

ACTO ACADÉMICO DE APERTURA
DEL CURSO 2005-06

**Física y vida:
más allá de la materia inerte.**

JOSÉ HORNO MONTIJANO

UNIVERSIDAD DE JAÉN

2005

FÍSICA Y VIDA:
MÁS ALLÁ DE LA MATERIA INERTE.

*Lección inaugural pronunciada por el
Dr. D. José Horno Montijano,
catedrático de Física Aplicada,
en el acto académico celebrado
el día 24 de septiembre de 2005
en el Aula Magna de la Universidad,
con ocasión de la solemne apertura del curso,
presidida por el Rector Magnífico, el Excmo. Sr.
D. Luis Parras Guijosa*

JOSÉ HORNO MONTIJANO

**Física y vida:
más allá de la materia inerte.**



UNIVERSIDAD DE JAÉN

2005

© Universidad de Jaén
© José Horno Montijano

Publicaciones de la Universidad
Secretaría General
Universidad de Jaén

Depósito Legal
J-397-2005

Impreso por
Gráficas La Paz de Torredonjimeno, S. L.

Impreso en España

Printed in Spain

A Egi, Jose y Nono

*Excelentísimo Señor Rector Magnífico,
Excelentísimos e Ilustrísimos Señores,
Ilustrísimo Claustro de Doctores,
Señoras y Señores,*

Dice Aristóteles en el comienzo de su *Metafísica*: «*Todos los seres humanos desean por naturaleza el saber*». Se trata, pues, de esa antigua y primordial aspiración humana a la verdad, de esa tendencia inevitable a comprender lo que se esconde tras los hechos, a encontrar razones a todo lo que pasa. Y siendo ésta la meta última de todo saber, la ciencia que tengo el orgullo de ejercer intentará, a lo largo de la historia, saciar nuestra inagotable curiosidad buscando explicaciones racionales que respondan, desde Galileo, no ya al *qué* ni al *por qué*, sino al *cómo* suceden las cosas. En este sentido, la Física es una invención humana diseñada a tal efecto. Efectivamente, sus conceptos fundamentales no son entes que esperaban ser descubiertos y recogidos como si de la fruta del mítico árbol de la ciencia se tratara, sino esquemas de pensamiento creados por algunas de las mentes más despiertas de la civilización humana.

La Física ha sido el resultado de la imaginación y creatividad de muchas personas que aportaron nuevos conceptos, técnicas

y, en definitiva, teorías cada vez más desarrolladas y complejas para tratar de comprender las reglas básicas, las leyes que gobiernan el mundo natural en que vivimos: Aristóteles nos enseñó a observar y contemplar la Naturaleza. Galileo y Faraday marcaron nuestros rumbos en la aproximación experimental, mientras que Newton y Maxwell establecieron el método físico-matemático. Cuando la ciencia clásica estaba próxima a alcanzar su pináculo, emergió la teoría cuántica de Planck y la relatividad de Einstein, que revolucionaron el saber físico de tal modo que la imagen del mundo que vamos obteniendo nos permite empezar a establecer relaciones entre el microcosmos y el macrocosmos, entre la materia inanimada y la vida.

Con tal referente, y en este año 2005, proclamado por la UNESCO Año Mundial de la Física, que marca el centenario del *año milagroso* de Albert Einstein (1879-1955) en el que publicó una asombrosa serie de artículos científicos que fulminaron nuestros más arraigados conceptos sobre la naturaleza de la luz, el espacio, el tiempo, la materia y la energía, no quiero desaprovechar la oportunidad que se me brinda al impartir esta lección de hablarles de ciertos notables aspectos de los fenómenos electromagnéticos en los seres vivos, que ilustran lúcidamente el camino lógico seguido por la Física en su deseo de comprender racionalmente la Naturaleza. Y ello intentando no darles suficientes motivos como para llegar a perder su atención.

Electricidad y vida.

Las primeras manifestaciones de electricidad en los organismos vivos conocidas por el hombre fueron las descargas de los peces eléctricos, especies que tienen la capacidad de generar electricidad por medio de unos órganos eléctricos especializados. A lo largo de la historia estos peces despertaron un gran interés y admiración, y así hemos visto reflejada su

existencia a través de manifestaciones artísticas, médicas y esotéricas.

Las representaciones más antiguas que se conservan de peces eléctricos se encuentran en escenas de pesca en las tumbas del Antiguo Egipto, en las que aparece el pez gato, que se consideraba protector de los peces: si un pescador lo capturaba y sufría su descarga, debía dejar la pesca y soltar los peces; incluso llegaron a ser venerados debido a la leyenda de que uno de ellos se había comido los órganos genitales de Osiris, después de haber sido asesinado y arrojado al Nilo por su hermano Set.

Durante el periodo grecorromano (500 a.C.-500 d.C.), los peces eléctricos atrajeron la atención de filósofos, naturalistas, físicos y curanderos. En tratados, poemas y rituales mágicos aparecen reflejados aspectos que van desde cualidades nutritivas, hasta los efectos de su poder adormecedor sobre otros peces e incluso animales del tamaño del hombre. El médico griego Hipócrates (460-377 a.C.), considerado como el Padre de la Medicina, utiliza el término «narke», que significa «letargo», para hacer referencia al pez torpedo y a los efectos que produce, lo que dio origen al término moderno de narcosis.

Una receta interesante de tratamiento del pez torpedo la prescribió el físico del emperador romano Claudio en el siglo I. Esta receta decía textualmente: *«El dolor de cabeza, incluso si es crónico e insoportable, desaparece si el pez torpedo negro vivo se coloca sobre el punto doloroso, manteniéndolo en este punto hasta que el dolor cese»*. Existía también una receta análoga para el tratamiento de la gota: *«Para cualquier tipo de la gota, cuando comienzan los dolores, conviene colocar bajo los pies el pez torpedo negro vivo, con la particularidad de que en este caso el paciente debe estar de pie sobre arena húmeda bañada por el agua del mar, permaneciendo en este estado hasta que toda su pierna por debajo de la rodilla se entumezca»* [Bogdánov, 1989].

El uso terapéutico de los peces eléctricos también se desarrolló en otras partes del mundo. Los indios del Amazonas

y del Orinoco trataban la gota con anguilas eléctricas, que también se utilizaban en partos. En el siglo XVI, en China se recomendaba el pez gato para el tratamiento de la parálisis facial: «*colocando cada mañana la cola cortada del pez vivo en la parte paralizada*», mientras que en Etiopía, algunos misioneros utilizaban las descargas del pez gato «*para sacar el demonio del cuerpo*» [Miguélez et al., 2001].

Con el avance del conocimiento, se intenta dar una explicación o descripción física del fenómeno y así, por ejemplo, se pensaba que el efecto adormecedor del pez torpedo era producido por un veneno especial; pero sin embargo no explicaba por qué era un preciado alimento ya que cocido no tenía ningún efecto nocivo.

Antes de aparecer la teoría eléctrica, gozó de gran éxito la teoría que explicaba el fenómeno como acción mecánica, en la que se suponía que la fuente de los poderes del pez torpedo no era sino un músculo capaz de contraerse repetidamente a gran frecuencia, produciendo al ser rozado un entumecimiento temporal de la extremidad, similar a lo que sucede, por ejemplo, después de un golpe brusco en el codo.

A finales del siglo XVIII, aunque los orígenes de los efectos eléctricos permanecían todavía oscuros, científicos como Benjamín Franklin (1706-90) y Charles de Conlomb (1736-1806) habían establecido, en torno a los fenómenos sencillos entonces conocidos, una teoría detallada e inventado máquinas capaces de producir grandes cantidades de electricidad, los generadores electrostáticos, y también se habían inventado formas de almacenarla. Fue, en 1786, mientras producían chispas con una de estas máquinas cuando los ayudantes del profesor de anatomía de la Universidad de Bolonia Luigi Galvani (1737-98) observaron, por primera vez, que las ancas de ranas muertas podían contraerse si eran estimuladas eléctricamente. Esta fue la primera prueba indiscutible de que la electricidad, como ya se había sospechado desde hacía largo tiempo, desempeñaba un papel preciso en los procesos vitales.

Galvani dedicó el resto de su vida a la investigación de ese curioso fenómeno, usando para ello cientos de preparaciones fisiológicas, principalmente de ranas. Empezó estudiando las contracciones de las ancas de la rana que ocurrían cuando éstas no estaban en contacto directo con la fuente de electricidad. También examinó el efecto de la electricidad atmosférica sobre las preparaciones animales, apreciando que con cada relámpago se producían fuertes sacudidas musculares.

La observación de que las ancas de rana se contraían cuando tocaban metales diferentes estimuló una nueva serie de experimentos. Por ejemplo, Galvani ensartó una ristra de ancas de rana con ganchos de latón colgados a lo largo de una verja de hierro de su jardín, y quedó sorprendido al verlas retorcerse sin ningún estímulo externo. (Arraigó la historia de que el experimento fue una consecuencia del intento de Galvani de preparar una nutritiva sopa de ancas de rana para su mujer inválida). En un principio Galvani atribuyó estos resultados a cambios en la electricidad atmosférica, aun cuando podían ocurrir con un cielo despejado, sin embargo, pronto descubrió que podía repetirlos en el interior de la casa, siempre que los músculos de la pata y los nervios lumbares estuviesen en contacto con dos metales diferentes.

Galvani encontró que la fuerza de las contracciones dependía de los metales que hacían contacto con el músculo por un lado y el nervio por el otro y, finalmente, encontró que podía obtener contracciones débiles cuando un puente hecho con un solo metal se ponía en contacto con el nervio y el músculo.

Con los resultados de estos experimentos Galvani podía haber concluido que la electricidad tenía un efecto estimulante sobre los músculos y sentirse satisfecho, sin embargo, le atraía la idea de que las relaciones entre la electricidad y el músculo eran de una naturaleza más fundamental. De hecho, pensaba que la electricidad tenía un efecto importante sobre el músculo porque los músculos mismos contenían electricidad, y propuso

formalmente la existencia de una *electricidad animal*. La teoría que Galvani desarrolló para explicar sus observaciones era complicada e iba mucho más allá de los hechos experimentales. Suponía que los tejidos animales tenían dos tipos de electricidad mantenidos separadamente, de modo que un tipo quedaba en los nervios y el otro en los músculos. Comparó los músculos con las botellas de Leyden, la capacidad eléctrica principal de aquella época, y los nervios con las varillas que comunicaban con el interior. Por lo tanto, cuando los nervios y los músculos se unían por un conductor bimetálico la electricidad se descargaba y los músculos se contraían.

En un intento de refutar la tesis de Galvani sobre la existencia de «electricidad animal» su compatriota y físico Alessandro Volta (1745-1827), sugirió que las contracciones de las ancas de rana eran originadas por las corrientes eléctricas generadas en el contacto entre dos metales diferentes sumergidos en una solución salina; el anca era sólo un detector muy sensible. En 1793 Volta publicó su trabajo dando la descripción de un aparato que el mundo conocería como la «célula voltaica» o batería, que consistía en una columna en la que se interponían láminas de dos metales diferentes (cobre y zinc) en un baño de solución salina y que ha sido, sin duda, uno de los avances tecnológicos más importantes en la historia de la humanidad.

La demostración terminante de Volta de que Galvani no había descubierto la «electricidad animal» fue un duro golpe para el segundo y poco más se supo directamente de Galvani. Sin embargo, antes de su muerte apareció una publicación anónima (los historiadores han especulado que esta publicación fue hecha por, o con la colaboración, de Galvani) en la que se describía cómo un músculo de rana podía ser estimulado sin instrumentos metálicos. La contracción se obtenía con sólo tocar la médula espinal seccionada de una rana y demostraba que los músculos generan corrientes eléctricas cuando se contraen. Con

esto quedó claro que tanto Volta como Galvani estaban en lo cierto; ya que después de todo, existía una *electricidad animal*, una manifestación del potencial de membrana que luego fuera objeto de profundos estudios con técnicas altamente elaboradas y que continúa siendo tema de investigación. De este modo, la discusión entre dos compatriotas con diferentes puntos de vista científicos dio un impulso al desarrollo de la Física y la Biología modernas.

La invención de la pila voltaica fue un hecho decisivo en el rápido desarrollo de la ciencia del siglo XIX, posibilitando el inicio de un nuevo campo de investigación en torno a las propiedades electrolíticas, magnéticas y térmicas de la corriente eléctrica. De entre los nuevos fenómenos observados destaca el descubrimiento del físico danés Hans Christian Oersted (1777-1851) de la acción magnética de la corriente eléctrica. En 1820, observó inesperadamente que una corriente eléctrica perturbaba una aguja magnética del mismo tipo que las empleadas en las brújulas. Cuando la brújula se situaba cerca de la corriente eléctrica, la aguja se movía. El magnetismo, el fenómeno por el que trozos de algunos óxidos de hierro se atraen entre sí, se conocía desde los griegos sin que nadie diera una explicación del mismo, y mucho menos que este, aparentemente fortuito fenómeno, tuviese alguna relación con la electricidad. La relación se hizo más cuantitativa cuando, poco después, el físico francés Andre Marie Ampère (1775-1836) demostró que una corriente que circulaba por un bucle producía una fuerza magnética exactamente de las mismas características que la que produciría una cantidad equivalente de material magnético, por ejemplo, una barra magnética. Por consiguiente llegó a la conclusión, en aquel tiempo no muy aceptada por la mayoría, de que el origen del magnetismo en los materiales podría explicarse por medio de corrientes eléctricas que circulaban en su interior. (Ahora sabemos que esto es una parte muy sustancial

de lo que realmente ocurre, aunque hay otra fuente del magnetismo que se ha hecho evidente desde que surgió la teoría cuántica, la debida al momento angular intrínseco –el «spin»- de las cargas elementales.)

El siguiente paso lo dio el extraordinario físico inglés Michael Faraday (1791-1867), con el descubrimiento de la inducción electromagnética y del concepto de campo electromagnético. Ya hemos mencionado que a principios del siglo XIX ya se sabía que las corrientes eléctricas producían fuerzas magnéticas. Lo que Faraday demostró, a principios de 1831, fue que en determinadas circunstancias los imanes podían originar corrientes eléctricas. Básicamente los experimentos de Faraday consistieron en lo siguiente: tomó una barra de imán –llamada también imán permanente, puesto que puede mantener su imanación durante mucho tiempo con tal de que no se caliente la barra o se utilice para golpear algo de forma violenta- y la movió por el interior de una bobina de hilo conductor por el que puede circular una corriente. La bobina estaba conectada a un galvanómetro que medía el flujo de la corriente que circulaba por ella. Cuando se movió el imán, el galvanómetro registró de forma repentina el paso de una corriente, indicando que un imán móvil podía *inducir* una corriente eléctrica. Este descubrimiento inesperado completó la simetría entre la electricidad y el magnetismo –aunque de una forma muy sutil, puesto que, como diríamos ahora, sólo un campo magnético *variable* produce una corriente eléctrica.

También se debe a Faraday el concepto de «campo» electromagnético (él habló de «líneas de fuerza»). Este concepto tiene su origen en la observación de Faraday de que si se ponen pequeñas limaduras de hierro sobre, por ejemplo, una hoja de papel de forma que pueda moverse fácilmente, en las proximidades de una barra magnética y se agitan las limaduras, éstas se reorganizan de tal manera que forman una serie de líneas que van desde el polo norte al polo sur del imán. De esta

observación Faraday sacó la idea de que estas líneas, existían, aunque las limaduras de hierro no estuviesen presentes. En otras palabras, el imán produce un «campo» de influencia en todo el espacio que le rodea y que se puede medir en cualquier punto observando el comportamiento de una pequeña limadura de hierro, o de la pequeña aguja de una brújula situada en ese punto. Pronto extendió esta idea para describir la influencia de objetos cargados eléctricamente sobre otros.

Como resultado de sus investigaciones, Faraday contribuyó a nuestro conocimiento del mundo con aportaciones de la misma importancia que las que hicieron los más aventajados científicos del pasado, como Galileo y Newton. Sus numerosos descubrimientos merecieron la admiración de sus coetáneos, quienes no se percataron plenamente del impacto e importancia de su teoría de campos y demás hallazgos. En realidad, hubo solamente un hombre, el físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879), que supiera apreciar plenamente la importancia y las posibilidades de las ideas de Faraday. Lo que Maxwell se encontró delante fue una serie de hallazgos experimentales y unas cuantas ideas (en estado embrionario, pero fascinantes) sobre una teoría general del electromagnetismo y del mundo.

Maxwell se encargó de clarificar la teoría de Faraday y de descubrir las leyes del campo. Aunque es cierto que su imponente teoría matemática se basaba en las ideas de Faraday, alteró alguno de los rasgos fundamentales de su concepción. La desviación fundamental de Maxwell respecto a Faraday era su concepto de materia y campo como entes totalmente diferentes. Las ecuaciones de Maxwell constituyen uno de los éxitos más brillantes de la historia de la Física, culminados con el descubrimiento de las ondas electromagnéticas por el físico alemán Heinrich Hertz (1857-94), y son el punto de partida de todos los estudios modernos sobre electricidad y magnetismo [Bernstein, 1993].

Fenómenos bioeléctricos.

Durante el siglo XIX, la electricidad generada por los tres grupos de peces de descargas fuertes de hasta 500V (anguilas, peces gato y torpedos) no sólo fue utilizada como terapia en medicina para tratar la gota, reumatismos, parálisis y todo tipo de dolores artríticos, sino también por los físicos como fuentes de corriente eléctrica. La «electricidad animal» de Galvani se había transformado en algo mágico, especialmente entre la gente común, y la posibilidad de generar vida por medio de la electricidad era motivo de acaloradas discusiones. Precisamente, este fue el tema propuesto por Lord Byron a Mary Shelley para que escribiera una fantasía y así, en 1818, aparece la primera novela de ciencia ficción: «Frankenstein», que tuvo un éxito sensacional y nunca ha dejado de tenerlo.

Como era de esperar, el estudio de las posibles relaciones entre la electricidad y la vida también interesó a Faraday y así, al estudiar la descarga del pez torpedo, demostró que, en esencia, la «electricidad animal» no se diferenciaba, en ningún aspecto, de otras «clases» de electricidad, y éstas, en aquella época, se consideraba que eran cinco: estática (obtenida por frotamiento), térmica, química, magnética y animal. Faraday consideraba que en el caso de llegar a comprender la naturaleza de la «electricidad animal» se podría *«transformar la fuerza eléctrica en nerviosa»* [Bogdánov, 1989]. Quizás sus palabras resuman de manera rotunda el papel que los fenómenos eléctricos tienen reservado en el estudio de los seres vivos: *«Si maravillosas son las leyes y fenómenos de la electricidad cuando se nos manifiestan en la materia inorgánica o inanimada, su interés difícilmente puede compararse con aquellos que aparecen para las mismas fuerzas cuando se asocian con el sistema nervioso y con la vida».*

Hubo de transcurrir, no obstante, medio siglo para dar respuesta a las incógnitas sobre los fenómenos eléctricos en los tejidos vivos y a principios del siglo XX existía consenso sobre el origen de los potenciales bioeléctricos (los potenciales de

acción en los tejidos excitables y sus respectivos potenciales de reposo) y se sabía que la electricidad era el agente de toda la actividad nerviosa y muscular en los organismos vivos.

Pero los fenómenos eléctricos no sólo se desarrollan en los animales, como podría desprenderse de lo anteriormente expuesto, sino que idénticos procesos eléctricos encontramos en las células vegetales.

Con frecuencia, las plantas se utilizan como patrón de inmovilidad al quedar arraigadas firmemente en la tierra con sus raíces. Se dice, por ejemplo: «inmóvil como un roble». Estas ideas no son del todo certeras, puesto que todas las plantas son susceptibles de lentas «flexiones de crecimiento» indispensables para adaptarse a la iluminación y a la dirección de la fuerza de la gravedad. Estos movimientos vienen condicionados por la desigual velocidad de crecimiento de los diferentes lados de un órgano cualquiera. Además, algunas plantas realizan movimientos periódicos correspondientes al día y a la noche, plegando y abriendo sus hojas y los pétalos de sus flores. Otras plantas revelan una actividad locomotora todavía más notable y con movimientos rápidos reaccionan a los diversos factores externos: la luz, las sustancias químicas, el toque, la vibración. Esta «sensibilidad» contribuyó a que el nombre de mimosa púdica se hiciera proverbial, pues con apenas rozarla, sus hojas diminutas se contraen y baja el pedúnculo principal. Son capaces también de reacciones rápidas diversas plantas insectívoras.

El papel decisivo de que se produzcan en las plantas esos movimientos tan rápidos, pertenece a los procesos eléctricos operados en las células. Resulta que el interior de una célula vegetal, al igual que en una célula nerviosa o muscular de los animales, se halla a un potencial eléctrico diferente del exterior, y que esta diferencia de potencial tiene repercusiones bioenergéticas notables. De hecho, aunque dicha diferencia de potencial sea apenas de una décima de voltio, el campo eléctrico en el interior de la membrana celular es intensísimo, debido al

pequeño grosor de ésta. Este intenso campo determina la estructura de muchos canales que atraviesan la membrana y juega un papel fundamental en el transporte de materia a través de la misma.

Cuando actúan los estímulos externos enumerados con anterioridad, la membrana de la célula vegetal se excita, aumentando bruscamente su permeabilidad para uno de los cationes (por regla general, para el calcio), aumento que viene acompañado de una variación igualmente brusca de la diferencia de potencial entre sus superficies interior y exterior.

El restablecimiento de la diferencia de potencial en la membrana a su valor inicial después de una excitación, se debe a que en la membrana se abren canales complementarios de potasio cerrados en estado de reposo. De este modo, cada excitación de la célula vegetal viene acompañada, para cierto tiempo, de disminución de la concentración de iones potasio en el interior de la célula y de su aumento en el exterior, lo cual, precisamente, es la causa de la reacción locomotora.

El proceso descrito de incremento brusco del potencial de membrana y de su subsiguiente disminución que se origina en todas las células nerviosas excitadas, incluidas las células sensoriales y musculares, se denomina potencial de acción o impulso nervioso y constituye la base material del proceso de excitación del sistema nervioso. Por la investigación de la naturaleza del impulso nervioso, se les concedió a los científicos ingleses Alan Hodgking y Andrew Huxley el premio Nobel en 1963.

Sensibilidad electromagnética de los animales.

No cabe duda que en el estudio de las relaciones entre los fenómenos electromagnéticos y la vida desempeñó un papel fundamental el desarrollo de instrumentos con suficiente velocidad de respuesta para el registro de los potenciales

bioeléctricos. Los avances tecnológicos del siglo XX proporcionaron numerosos medios que han facilitado la tarea y que son en parte responsables de los éxitos obtenidos: disponer de instrumentos precisos, que permitían determinar las características temporales del impulso nervioso, fue vital para que Hodking y Huxley explicaran la conducción nerviosa. Con su ayuda se logró no sólo demostrar que el desarrollo de muchos procesos en el organismo vivo, efectivamente, viene acompañado de variaciones del campo eléctrico, sino también poner de manifiesto la alta sensibilidad de los organismos vivos a las variaciones de los campos electromagnéticos, sin que los efectos observados de ningún modo puedan ser explicados por la acción térmica de estos campos.

Pues bien, los animales, incluidos los seres humanos, tienen necesidad de obtener información sobre el ambiente en que viven para moverse de manera adecuada y poder detectar alimentos y peligros. Para eso la Naturaleza ha desarrollado detectores sensibles a diversos tipos de energía que captan información del mundo externo —receptores o sensores, a los que llamamos «sentidos»— y un sistema de proceso que interpreta la información y responde con ajustes de la conducta: el sistema nervioso. Los mismos elementos se usan también para la comunicación entre individuos de la misma especie. Mientras que la detección de información del mundo externo sirve sobre todo para la supervivencia del individuo, la comunicación es primordial para la continuidad de la especie, pues establece vínculos que sirven a la organización social jerárquica, para el apareamiento, la reproducción, el cuidado de la cría, etc.

Al igual que muchos animales los seres humanos recibimos información sobre todo a través de la vista. Nuestra capacidad visual superior en colores y detalles nos permite ubicarnos en un lugar importante en la escala de la evolución, aunque no es, al menos no en un modo estricto y condicionante, el sentido

más importante en la Natulaleza. Muchos predadores utilizan el sentido del olfato con una precisión y capacidad de detección imposible de lograr con la vista y, además, el tacto se vuelve importante si las circunstancias lo obligan. Algunos peces que viven en la oscuridad (son nocturnos, o habitan en aguas fangosas o profundas) han desarrollado, además del tacto, un sentido que nos cuesta imaginar cómo funciona. Poseen unos órganos eléctricos con un sistema generador de pulsos de corriente eléctrica y unos receptores distribuidos en toda la piel capaces de detectar y procesar esas corrientes. Entre ambos pueden construir en su cerebro una «imagen» eléctrica similar a la visual que creamos los seres humanos. De la misma manera que nuestra conducta se basa principalmente en la comunicación visual y acústica, la mayor parte de la conducta de estos peces se expresa a través de su descarga eléctrica.

Los primeros indicios de que ciertos peces eléctricos utilizan la electrolocalización –la generación y detección de corrientes eléctricas- para explorar el medio ambiente surgieron, hace ya cincuenta años, al demostrarse que los peces eléctricos de descarga débil eran capaces de captar las deformaciones que se producen en el campo eléctrico cuando hay objetos cerca de ellos con propiedades eléctricas diferentes a las del agua y, así, distinguir entre dos objetos que diferían sólo en sus conductividades eléctricas [Lissmann, 1951].

Investigaciones posteriores determinaron que los peces teleósteos de agua dulce, que están activos durante la noche, usan el campo eléctrico que genera su cuerpo para detectar las características, distancias y forma, de los objetos en su vecindad. Para formar imágenes eléctricas claras, un pez eléctrico debe ser capaz de interpretar sus propias señales pero también separarlas de las señales de otras fuentes, como otros peces eléctricos. De esta manera pueden detectar las señales eléctricas emitidas por sus parejas y utilizan esta habilidad para comunicarse. Por ejemplo, se ha demostrado que los machos

ensanchan la onda de descarga cuando están aptos para la reproducción y aumentan bruscamente la frecuencia de sus pulsos durante un encuentro agresivo o ante la cercanía de una presa. También modifican su emisión cuando detectan elementos que contaminan el agua.

El pez eléctrico de señal débil posee los pulsos eléctricos más precisos que existen en la Naturaleza, de ahí que su estudio fisiológico se oriente a lograr mejores marcapasos para el tratamiento de los problemas de arritmia cardíaca en los seres humanos. Igualmente, la capacidad de cambio de ritmo de los pulsos eléctricos generados por estos peces que se producen con los cambios de la temperatura, el pH y ante la presencia de múltiples productos químicos, ha llevado al desarrollado de biosensores de detección rápida de contaminación del agua. Y, por supuesto, no podemos olvidar que durante siglos los peces eléctricos de descarga fuerte han sido utilizados para la electroterapia, ni la importancia del desarrollo tecnológico que implicaron los tratamientos alternativos.

Pero los peces que producen electricidad no son los únicos que pueden percibirla. Se sabe que los elasmobranquios (tiburones y rayas) y algunos silúridos poseen una sensibilidad muy alta respecto al campo eléctrico externo que les permite detectar campos eléctricos de sólo $50 \mu\text{V}/\text{m}$ –para hacernos una idea, esto corresponde a un gradiente de potencial de 1.5 V sobre 3000 km . De esta forma, orientándose solamente por la percepción de los potenciales bioeléctricos que se engendran durante los movimientos respiratorios de la presa, el tiburón es capaz de descubrir el lenguado que se esconde en la arena a varias decenas de centímetros de distancia [Kalminj, 1966 y 1982].

Investigadores japoneses han descubierto que el siluro, inmediatamente antes de un fuerte sismo, acusa una sensibilidad inusitada respecto a débiles perturbaciones mecánicas. Esto se explica por el hecho de que entre los puntos de la corteza terrestre, en el periodo precedente al terremoto, se engendran diferencias de

potencial que son percibidas por el siluro. La intensidad de los campos eléctricos, los cuales con frecuencia se engendran 8 horas antes de iniciarse el sismo, puede alcanzar un valor de 300 $\mu\text{V}/\text{m}$ que supera en más de 10 veces el umbral de sensibilidad de estos peces.

Es interesante señalar que cerca de dos mil años atrás en el Japón existía una leyenda de acuerdo con la cual el siluro podía penetrar debajo de la tierra y, desplazándose allí, provocar terremotos. Desde aquellos tiempos el siluro se asocia en el Japón con los fenómenos sísmicos. Sin embargo, hasta el siglo pasado la conducta de los animales antes de los terremotos no llamó la atención de los sismólogos japoneses. En la actualidad, los métodos biológicos de pronóstico de los sismos han cobrado gran desarrollo [Bogdánov, 1989].

En el último y más devastador desastre natural, el maremoto en Asia del pasado 26 de diciembre de 2004, se pudo observar que los animales supieron interpretar los signos de la hecatombe que se avecinaba y huyeron hacia el interior de las islas, lamentablemente una prueba más de la necesidad de profundizar en el estudio de la biología sensorial de los animales.

Orientación magnética de los animales.

A diferencia del campo eléctrico, el campo magnético no juega un papel tan directamente destacado en los sistemas biológicos. Sin embargo, no deja de tener importancia en algunos fenómenos concretos y muchos animales son capaces de reaccionar incluso a sus pequeñas variaciones. Las moscas de la carne (*Sarcophaga*) se posan nueve veces de cada diez según una orientación magnética N-S o E-O, lo que no puede ser efecto del azar, y mucho menos cuando el 10% restante se orientan estrechamente hacia el NO o el NE. Igualmente un caracol o un ratón de bosque orientan sus desplazamientos de modo distinto según la orientación y la intensidad del campo magnético experimental donde se les sitúa.

La intuición nos sugiere que son las aves las que sacan mayor provecho de su sentido magnético. En efecto, durante sus largos vuelos migratorios las aves tienen que afrontar importantes problemas de navegación, ya que estos vuelos, como regla, se realizan por las noches a raíz del peligro que representan los ataques de las aves de rapiña. Además, el cielo encapotado nunca ha representado un problema para las aves de paso.

Las primeras experiencias para demostrar que las aves se valen de su sentido magnético para orientarse en sus vuelos prolongados fueron realizadas con palomas mensajeras las cuales, alejadas de su palomar a decenas y, a veces, a centenares de kilómetros, encuentran inequívocamente su camino a casa. Pues bien, después de colocar un pequeño imán en la cabeza de una paloma mensajera, ésta perdió su capacidad de encontrar el camino a casa. Cabe señalar que un objeto absolutamente idéntico por su masa y tamaño pero carente de propiedades ferromagnéticas no impedía al pájaro hallar su palomar.

Investigaciones posteriores evidenciaron que durante las tormentas magnéticas (variaciones bruscas e imprevistas del campo magnético de la Tierra relacionadas con el aumento de la actividad solar) las capacidades de navegación de las palomas mensajeras empeoran considerablemente. Dificultades análogas experimentan las aves si en su camino de regreso se encuentran con las llamadas «anomalías magnéticas», es decir, parajes con particularidades geológicas del subsuelo vecino al lugar en las cuales varía ostensiblemente el campo geomagnético a lo largo de varios kilómetros [Moore, 1980].

Una sensibilidad todavía mayor a la acción del campo magnético la poseen las abejas, las cuales presentan en su comportamiento diversas características correlacionadas con la dirección del campo magnético local. Así, los apicultores conocen que las abejas silvestres orientan los panales absolutamente de la misma manera (respecto a la dirección N-S) a como estaban orientados en la colmena materna. En

cambio, si la nueva colmena se emplaza en un campo magnético intenso la orientación de los panales se ve alterada. Por esta razón se considera que la aptitud de las abejas de sentir el campo magnético de la Tierra les ayuda a coordinar las «obras de construcción» en la nueva colmena.

¿De qué modo, entonces, las palomas y las abejas pueden detectar pequeños cambios en el campo magnético terrestre? Uno de los métodos usado en la práctica para medir el campo magnético consiste en determinar el momento mecánico con el cual el campo magnético tiende a girar un imán permanente paralelamente a sus líneas de inducción magnética. El uso de este mecanismo para explicar la base del sentido magnético del animal, requiere que su cuerpo disponga de imanes permanentes y, de hecho, en los últimos 30 años se viene descubriendo diminutas partículas de magnetita (Fe_3O_4) en una gran diversidad de animales (desde bacterias hasta el hombre) y parece ser que éstos utilizan las partículas magnéticas como estímulo de orientación durante sus migraciones o sus desplazamientos dentro de su hábitat. La evidencia de ello es bastante segura en el caso de las abejas, que poseen un momento magnético perpendicular al cuerpo. También, las partículas de magnetita encontradas en la parte superior del pico de las palomas mensajeras parecen ser las responsables de que las palomas, y las aves migratorias en general, puedan discriminar entre la presencia y la ausencia de una anomalía magnética, como recientemente ha quedado demostrado mediante experimentos de elección condicionada [Mora et al., 2004].

Los primeros animales en los que se detectaron partículas magnéticas fueron en los quitónidos, pequeños moluscos del mar que se procuran los alimentos raspando las algas desde las rocas. Resultó que la mayor parte de los dientes de estos moluscos consta de cristales de magnetita que es una de las sustancias más duras entre aquellas que se forman en los organismos vivos. A propósito, este molusco, al igual que las palomas, es capaz de hallar

certeramente el camino a casa. Se considera que logra hacerlo con la ayuda de sus dientes magnéticos.

Poco tiempo después de descubrirse los dientes magnéticos en los moluscos marinos, se vio que algunos tipos de bacterias se orientaban y nadaban preferentemente a lo largo de las líneas del campo magnético [Blakemore, 1975]. Las bacterias del fango normalmente nadan hacia abajo, buscando el fango blando que constituye su hábitat; cuando se utilizan imanes para anular e invertir el campo magnético terrestre, nadan hacia arriba. Asimismo, las bacterias del fango del hemisferio meridional – donde la componente vertical del campo magnético es opuesta a la del hemisferio septentrional- nadan hacia arriba cuando se las traslada al hemisferio norte, mientras las bacterias del fango del Brasil –donde el campo es horizontal- pueden nadar con la misma probabilidad en cualquier dirección relativa al campo magnético. Dentro de estas bacterias, cuyas dimensiones son de varios micrómetros, se encontró diminutas partículas de magnetita dispuestas en forma encadenada, formando una auténtica aguja de brújula que tiende a alinear la bacteria con el campo magnético de la Tierra. El diámetro de las partículas es de unos 50 nm, lo que hace que sean lo suficientemente grandes para que las fluctuaciones térmicas no destruyan la magnetización y lo suficientemente pequeñas para que no se formen dominios magnéticos que cancelen la imanación. Está claro que la orientación de semejantes organismos unicelulares rudimentarios en el campo magnético representa un proceso puramente pasivo y no depende del «deseo» de las bacterias.

Las bacterias magnetotácticas están ampliamente difundidas en la Natulaleza. En muchos depósitos éstas constituyen más de la mitad de todo el plancton bacteriano, y en los suelos, hasta el 20% de la microflora. Durante largo tiempo no estuvo claro el papel desempeñado por los iones de hierro en la vida de las bacterias, pero recientemente se ha comprobado que en el proceso de actividad vital en las bacterias se acumula peróxido

de hidrógeno. El peróxido es un intensísimo oxidante y actúa sobre las bacterias como veneno. En presencia del hierro la acción oxidante del peróxido se dirige al metal y no a la bacteria. De este modo, el papel del hierro se reduce a la neutralización del peróxido de hidrógeno tóxico para las bacterias.

Parece lógico que en aquellos casos en el que los animales mantienen un rumbo constante hacia un determinado destino, la orientación puede conseguirse con un sentido de brújula simple. Sin embargo, no basta esa brújula interna para guiar el regreso a casa desde un lugar desconocido. Esta capacidad de navegación requiere un sentido direccional («brújula») y un sentido de posición geográfica («mapa») elaborado a partir de la información espacial disponible en el lugar en que se encuentra el individuo. Y puede resultar difícil para un animal establecer con exactitud su posición geográfica, dado que las variaciones temporales de tipo natural en el campo magnético terrestre constituyen una fuente potencial de error.

De hecho, con bastante frecuencia aparecen en la prensa noticias acerca de la muerte en masa de ballenas o de delfines que se arrojan a las costas en tal o cual punto del mundo. Se conoce que los cetáceos, a semejanza de las aves, se orientan en las migraciones por la dirección de las líneas de campo magnético, valiéndose para ello de las partículas magnéticas dispuestas en la parte delantera de su cabeza. A partir del análisis del archivo del Museo Británico, donde se encuentran reunidas las descripciones de más de 3000 casos semejantes desde 1913, se ha logrado establecer que la muerte en masa de las ballenas corresponde a las ocasiones en que las variaciones irregulares del campo geomagnético (debidas a la actividad solar) se producen por la mañana, eclipsando para la ballena la señal matutina regular. Se considera que las ballenas se desplazan guiadas por su memoria a lo largo de las líneas de inducción magnética, pasando dentro de intervalos determinados de tiempo desde una línea hacia otra. Así pues, para las ballenas

que se fían plenamente de sus sistemas de navegación magnéticos parece como si la mañana no hubiera llegado, el periodo de 24 horas se alarga y se retarda el paso a la siguiente (de acuerdo con su «mapa») línea geomagnética. Como resultado, si este error se comete cerca de la costa, las ballenas, por inercia, «encallan» en ésta [Klinowska, 1988].

Es interesante señalar que incluso los seres humanos tienen cierta capacidad análoga de sentir el campo magnético [Thoss y Bartsch, 2003]. El hecho de que algunos individuos poseen una sensibilidad inusualmente alta frente a las variaciones del campo magnético terrestre sirve de base para explicar su capacidad de descubrir aguas freáticas y cuerpos minerales valiéndose de una «maravillosa varilla de mimbre». La mención sobre semejantes personas llega a nosotros a través de los siglos y como han demostrado los experimentos realizados ya en nuestra época, el rasgo distintivo de los «exploradores con varilla» es su alta sensibilidad a las variaciones del campo magnético. Análogamente a cómo el imán permanente impedía que la paloma mensajera se orientase, el acercamiento de un imán fuerte a la cabeza del «explorador con varilla» inhibía su capacidad de hallar cuerpos minerales. Sin embargo, hasta la fecha no se ha logrado aclarar definitivamente la naturaleza de las fuerzas que hacen que la varilla de mimbre gire en las manos del explorador.

Todas estas experiencias nos permiten asegurar que una gran diversidad de animales, incluyendo representantes de las cinco clases de vertebrados y algunos invertebrados, utilizan el campo magnético terrestre como ayuda a su orientación. De qué forma exacta se detecta y procesa esta información es una pregunta apasionante objeto de estudio en la actualidad.

Precisamente, en una publicación recientemente aparecida (marzo de 2005) en una revista de la *Royal Society* británica, se demuestra, el hecho largamente sospechado, de que los tiburones también pueden sentir el campo magnético terrestre

y utilizan esta capacidad para orientarse en su navegación [Meyer et al., 2005]. No obstante, parece poco probable que la hipótesis basada en el uso de los materiales ferromagnéticos como órgano sensorial primario, y que explica muchas de las propiedades de la orientación de las aves, sea la metodología utilizada en la orientación magnética de los tiburones, puesto que, como ya se ha mencionado, la gran sensibilidad de estos animales es respecto a los campos eléctricos.

En los últimos años, se viene discutiendo la hipótesis de la inducción electromagnética como el mecanismo que proporciona las bases físicas del sentido magnético de los peces elasmobranquios (tiburones y rayas). Estos peces tienen un sentido eléctrico lo suficientemente sensible como para detectar campos eléctricos tan débiles como los que se inducen por su propio nadar en el campo magnético terrestre. Dado que la intensidad y dirección de esos campos están relacionadas con la velocidad y dirección de los movimientos que los originan, los elasmobranquios podrían usar su sentido eléctrico en la navegación. Y hay evidencia de que ello es así [A.J. Kalmijn, 1966, 1982].

De conformidad con el modelo teórico actual, estos peces pueden determinar su dirección de movimiento en un sistema de referencia solidario con la Tierra mediante un cómputo que envuelve los voltajes recibidos por sus receptores eléctricos, la velocidad de natación y el vector local del campo geomagnético -según la ley de Faraday-. Sin embargo, el modelo podría llegar a ser inconsistente con la restricción física de que es el animal quien ha de orientarse, no el observador, y en consecuencia el animal es el propio sistema de referencia, en el cual los órganos sensoriales están en reposo. En otras palabras, ello supone que debería ser físicamente posible para estos peces, cuando nadan a velocidad constante, sentir eléctricamente su movimiento mediante los campos que ellos detectan en sus propios sistemas de referencia. Pero, como sugiere el profesor de la Universidad

de California Ad. Kalmijn (2002), tal idea podría violar el principio de la relatividad originalmente propuesto por Galileo y extendido por Einstein para incluir los fenómenos electromagnéticos.

Pero veamos el problema de la orientación magnética de los peces elasmobranquios mediante la situación simplificada de un conductor (tiburón) y un imán (la propia Tierra) en movimiento y tratemos de comprender qué es lo que sucede en los dos sistemas de referencia: uno fijo con respecto al conductor y otro fijo con respecto al imán. Si estamos en reposo perfecto respecto al imán, observamos una *fuerza magnética* sobre las cargas libres del conductor (que se mueve a través del campo magnético de un imán estacionario) que las desplaza a lo largo del conductor, lo que origina una corriente eléctrica que podemos registrar con un galvanómetro conectado en los extremos del conductor. Supongamos ahora que estamos en reposo perfecto respecto al conductor: una vez que el imán se ha puesto en movimiento observamos también un efecto sobre el galvanómetro. Tal como lo descubrió Faraday, mover el imán bajo el conductor –en un sentido- tiene el mismo efecto que mover el conductor sobre el imán –en el otro sentido-. Pero cuando se mueve el imán, ya no tenemos ninguna *fuerza magnética* sobre las cargas libres del conductor. La fuerza magnética no depende únicamente de la velocidad relativa, sino que resulta ser distinta para un sistema de referencia en movimiento. En particular, se anula en un sistema de referencia que se mueve solidariamente al conductor. Esta dependencia respecto al sistema de referencia contradice la suposición de la mecánica clásica de que las fuerzas son las mismas en todos los sistemas inerciales de referencia. Sin embargo, con una interpretación relativista en la que las fuerzas también se transforman cuando pasamos de un sistema a otro (transformación de Lorentz), encontramos que las dos formas de ver lo que sucede conducen en efecto al mismo resultado

físico. En otras palabras, la electricidad y el magnetismo son esencialmente el *mismo fenómeno* –o son diferentes aspectos del mismo fenómeno– y el énfasis en uno u otro aspecto dependerá del sistema de referencia tomado para la descripción.

Esta unificación natural que la teoría de la relatividad especial da a los conceptos de electricidad y magnetismo, permite concluir que el movimiento en un campo magnético es equivalente a estar expuesto a un campo eléctrico y que los tiburones tienen en su sentido *eléctrico* el instrumento sensorial requerido para la orientación *magnética*. Y fue Einstein, con su revolucionario trabajo de 1905 «*Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*», en el que se formula la teoría de la relatividad especial, quien preparó el camino para dar respuesta al problema de la orientación magnética de estos peces [Kalmijn et al., 2002].

Por último, cabe señalar que la teoría de la relatividad especial no tiene sólo importancia en los fenómenos a velocidades elevadas. Esta equivocación se debe al hecho histórico de que los efectos relativistas de baja velocidad fuesen conocidos con anterioridad en las características de las ecuaciones de Maxwell-Lorentz, las cuales parecían no necesitar más explicación al estar apoyadas en hechos experimentales. Sin embargo, Einstein, al postular que las ondas electromagnéticas se propagan siempre por el espacio vacío con una velocidad bien definida, c , que es independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor, propugnó el desarrollo de una nueva aproximación a la teoría de campos con la que se llegó a comprender completamente la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, tiburones y rayas incluidos.

Con la mirada al pasado realizada a lo largo de esta exposición he pretendido, por un lado, demostrar la importancia de la colaboración entre la Física y la Biología, colaboración que ha sido clave en el descubrimiento de soluciones a viejos e importantes problemas biológicos y fisiológicos, y que está definiendo una nueva etapa en el estudio de la materia viva y de los procesos vitales tan espectacular en la historia de la ciencia

que muchos científicos han llegado a la conclusión de que no hay diferencias fundamentales entre la Biología y la Física. Y por otro, poner de manifiesto que la ciencia básica, es decir, la inquietud por descubrir los secretos fundamentales de la Naturaleza, está en muchas ocasiones unida a los avances tecnológicos de un modo realmente sorprendente, con descubrimientos que se escapan a las previsiones más osadas.

No debemos olvidar que los logros de la Física son impredecibles y así, por ejemplo, la teoría de la relatividad especial, surgida meramente para eliminar algunas incongruencias, aparentemente menores, muestra como subproducto la que, tal vez, sea la ecuación más famosa de la Física: $E = mc^2$, que reveló una nueva y, hasta entonces, insospechada fuente de energía, con aplicaciones tan importantes como en la *fusión nuclear*, que algún día puede convertirse en nuestra fuente de energía más barata y no contaminante. No basta, pues, con centrar todo el esfuerzo en la aplicabilidad, hay que generar nuevas ideas, hay, en definitiva, que crear ciencia y para ello es fundamental eliminar cualquier restricción. Como aconseja la conocida frase de Einstein: «*La lógica te llevará de A a B; la imaginación te llevará a cualquier parte*», debemos seguir moviéndonos por la curiosidad, haciéndonos las preguntas para las que no hay respuestas, para así lograr una ciencia de calidad.

Gracias.

Referencias bibliográficas:

- Assad C., Rasnow B., Stoddard P.K., Electric organ discharges and electric images during electrolocation, *J. Exp. Biology* 202 (1999) 1185-1193.
- Bernstein, J., Einstein. El hombre y su obra, McGraw-Hill/ Interamérica de España S.A., 1993.
- Blakemore R.P., Magnetotactic bacteria, *Science*, 190 (1975) 377-379.
- Blakemore R.P., Frankel R.B., Kalmijn A.J., South-seeking magnetotactic bacteria in the southern-hemisphere, *Nature* 286 (1980) 384-385.
- Bogdánov K., El físico visita al biólogo, Editorial Mir, Moscú, 1989.
- Kalmijn A.J., Electro-perception in sharks and rays, *Nature* 212 (1966) 1232.
- Kalmijn A.J., Electric and magnetic-field detection in elasmobranch fishes, *Science* 218 (1982) 916-918.
- Kalmijn A.J., Gonzalez I.F., McClune M.C., The physical nature of life, *J. Physiology-Paris* 96 (2002) 355-362.
- Klinowska M., Cetacean navigation and the geomagnetic-field, *J. Navigation* 41 (1988) 52-71.

- Lissmann H.W., Continuous electrical signals from the tail of a fish, *Gymnarchus-Niloticus* Cuv, *Nature* 167 (1951) 201-202.
- Miguélez F, Liaño R., López-Plaza R., Sobre peces eléctricos y algunos avances científicos, *Revista Española de Física* 15 (4) (2001) 53-57.
- Meyer C.G., Holland K.N., Papastamatiou Y.P., Sharks can detect changes in the geomagnetic field, *J. Royal Soc. Interface* 2 (2005) 129-130.
- Moore B.R., Is the homing pigeon's map geomagnetic?, *Nature* 285 (1980) 69-70.
- Mora CV, Davison M, Wild JM, Walker MM, Magnetoreception and its trigeminal mediation in the homing pigeon, *Nature* 432 (2004) 508-511.
- Thoss F, Bartsch B., The human visual threshold depends on direction and strength of a weak magnetic field, *J. Comparative Physiology A* 189 (2003) 777-779.



Servicio de Publicaciones