

El pez eléctrico

y el descubrimiento de LA ELECTRICIDAD ANIMAL

Chau H. **Wu**

El poder maravilloso del pez eléctrico se conocía desde siglos antes del descubrimiento de la electricidad. El choque producido por el pez fue tópicamente de especulación y curiosidad considerable, que devino posteriormente en investigaciones científicas del fenómeno eléctrico en todos los seres vivos. Pero mucho antes de que la electricidad fuese conocida científicamente, una gran cantidad de conocimientos prácticos fueron obtenidos por experiencias con peces eléctricos. Por cierto, estos conocimientos llegaron a ser tan sofisticados como para que se usaran los choques en electroterapia.

Scribonius Largus, en su carácter de médico oficial del emperador romano Claudio, en el siglo I, gozó de una posición única que le permitió tener acceso directo a los archivos médicos dispersos en todo el imperio romano. Dejando fuera los remedios supersticiosos prevalecientes en su época, e incorporando solamente aquellos remedios que consideró de eficacia probada, compiló un formulario de prescripciones que fue considerado como un hito en medicina desde la época de Hipócrates hasta la de Galeno. En los primeros registros del uso terapéutico de la electricidad, dos de las prescripciones en este libro recomiendan el uso de descargas eléctricas del torpedo, raya eléctrica de la familia *Torpedinidae* que puede producir choques eléctricos de aproximadamente cuarenta y cinco voltios.¹



FIGURA 1. El pez eléctrico era bien conocido en el imperio romano clásico, tal como se percibe en este mosaico del primer siglo después de Cristo, encontrado entre las ruinas de Pompeya. El torpedero (*Torpedo torpedo*), una raya eléctrica, es mostrado entre otros peces hallados comúnmente en el Mediterráneo, los cuales son representados observando la lucha entre un pulpo y una langosta; el torpedero aparece en la parte superior, directamente sobre los tentáculos retorcidos del pulpo.⁵³

Los torpedos comprenden una diversidad de géneros, de los cuales cinco especies pueden encontrarse en el Mediterráneo; la especie más común, ilustrada en la Figura 1, es el *Torpedo torpedo*.²

Uno de los remedios fue descrito así por Scribonius:

El dolor de cabeza, incluso si es crónico e insoportable, puede ser eliminado y remediado para siempre colocando un torpedero negro vivo sobre el punto donde está el dolor, hasta que el dolor cese.

Hay una prescripción similar para la gota:

Para cualquier tipo de gota, un torpedero negro vivo deberá, cuando el dolor comienza, colocarse bajo los pies. El paciente deberá pararse en una playa húmeda bañada por el mar y permanecer de este modo hasta que todo el pie y la pierna hasta la rodilla estén adormecidos. (Scribonius, *Compositiones Medicae*.³)

Éstos y otros remedios similares fueron copiados y recopiados por autoridades médicas de Occidente durante muchos siglos.

El uso terapéutico del pez eléctrico también fue desarrollado de manera independiente en otras partes del mundo. Los primeros exploradores y colonos de América del Sur reportaron que los indios nativos trataban la gota con la poderosa anguila eléctrica (*Electrophorus electricus*, anteriormente *Gymnotus electricus*), un pez de agua dulce, aborigen de los ríos Amazonas y Orinoco, que es capaz de producir choques eléctricos de hasta seiscientos voltios.⁴ En China, un pez gato eléctrico (*Parasilurus asota*) era recomendado para el tratamiento de la ptosis (caída del párpado) y de la parálisis facial, como en esta prescripción de una farmacoepia clásica:⁵

Cortar la cola de un pez gato vivo y colocarla directamente sobre la zona paralizada todas las mañanas. El párpado caído se corrige inmediatamente.

A diferencia de las prescripciones occidentales, que hacían uso de la propiedad adormecedora de las descargas eléctricas para mitigar el dolor, este modo de tratamiento utilizaba las descargas para estimular directamente a los músculos esqueléticos.

Los registros más antiguos que tenemos de peces eléctricos son las representaciones del pez gato del Nilo (*Malopterurus electricus*) en los murales de antiguas tumbas egipcias; algunos murales, como el que se muestra en la Figura 2, datan del año 2750 a.C.⁶ Este pez está dotado de un órgano eléctrico por debajo de la piel capaz de producir hasta trescientos cincuenta voltios de electricidad.¹

Hasta donde podemos determinar, la más temprana referencia escrita al pez eléctrico se encuentra en un antiguo tratado griego de Hipócrates (*Régimen*)⁷ en el cual el valor dietético del torpedero del Mediterráneo es comparado con otros alimentos animales y vegetales. En el texto hipocrático el pez es llamado por su arcaico nombre griego *narkē*, el cual se refiere tanto al pez como al efecto que produce (adormecimiento) y forma la raíz del término moderno *narcosis*. El poder adormecedor del torpedero era bien conocido por los antiguos griegos, como lo indica un pasaje del *Menón*, de Platón,⁸ en el cual la bien conocida capacidad de Sócrates de “electrificar” a su audiencia es comparada con el

[...] torpedo marino que causa adormecimiento a todos los que se le aproximan y le tocan. Pienso que has producido el mismo efecto sobre mí, porque verdaderamente siento adormecidos mi espíritu y mi cuerpo, y no sé qué responderte [...].

Muchos filósofos antiguos griegos y romanos hicieron una seria investigación acerca de la naturaleza del poder de choque de los peces y estaban al tanto de sus propiedades, como la notable habilidad del torpedo para transmitir su poder a través de un medio conductor. Teofrasto, discípulo y sucesor de Aristóteles, notó que el torpedo podía enviar sus choques a través de bastones y arpones, entumeciendo a quienes los sostenían en sus manos,⁹ y el filósofo romano Plotino (*Enéadas*¹⁰) observó que los pescadores podían sentir el choque adormecedor por contacto con el pez eléctrico a través de la red. Que el agua es un buen medio para la transmisión de choques también era bien conocido. Plutarco (*Moralia*¹¹) escribió que

[...] aquellos que derraman agua sobre el pez muy pronto percibirán un adormecimiento sobre sus manos y el entorpecimiento de sus sensaciones, por medio del agua afectada por la cualidad del pez [...].

Podemos asegurar que los naturalistas antiguos estaban enterados de que las descargas eléctricas surgen de ciertas partes especializadas del torpedo, aho-

ra conocidas como los órganos eléctricos. El poeta romano del siglo IV Claudiano (*Eydillium*¹²), por ejemplo, se refirió a la localización de los órganos eléctricos diciendo:

[...] la naturaleza ha armado con ponzoña sus lados, / y les ha adicionado frío que en su médula se desliza, / ante el cual las sensaciones de todos los animales se adormecen / y a través de cada vena, el frío del invierno se desliza [...].

Los primeros escritos reconocieron el valor biológico de los choques de los peces. La habilidad del torpedo para usar su poder paralizante con el objeto de espantar a sus depredadores fue citada por Cicerón (*De Natura Deorum*¹³) como un ejemplo de cómo la naturaleza dotó a ciertos animales con armas de defensa. Y Aristóteles (*Historia Animalium*¹⁴) observó cómo

[...] el torpedo narcotiza a las criaturas que desea atrapar, abrumándolas con la fuerza del choque resistente en su cuerpo, y se alimenta de ellas; también se esconde en la arena y el fango, y atrapa a todas las criaturas que nadan en su cercanía y que caen bajo su influencia narcotizante [...].

Como prueba, Aristóteles cita el hecho de que el lento pez eléctrico “es a menudo hallado con salmone-tes, los más rápidos de los peces, en su interior”.



FIGURA 2. Los antiguos egipcios conocían los efectos de la electricidad por el bagre del Nilo (*Malopterurus electricus*), el cual es representado entre otras especies de peces comunes en este detalle de un bajorrelieve, circa 2750 a.C., de la tumba de Ti perteneciente a la Quinta Dinastía en Saqqarah. Un bagre del Nilo puede observarse directamente bajo la parte trasera de la barcaza.⁶

Plutarco¹¹ hace una observación similar, que es especialmente notable al ofrecer la primera especulación sobre la naturaleza del choque:

[...] Nadando circularmente sobre su presa, dispara una emanación, parecida a múltiples dardos, que en principio infecta el agua, y luego al pez a través del agua el cual ya no será capaz de defenderse ni escapar, pareciendo como si estuviese encadenado y congelado [...].

Por supuesto, antes del desarrollo de una teoría de la electricidad, los naturalistas antiguos fueron fuertemente presionados para describir el choque doloroso o explicar su causa. Algunos escritores antiguos describieron la descarga como “veneno” a falta de un mejor término; al menos un escritor del Renacimiento sugirió que el choque del torpedo estaba literalmente relacionado con alguna especie de veneno.¹⁵

Galeno caracterizó el letargo producido por el choque como una dificultad de movimiento debida a enfriamiento y compresión del tejido nervioso, lo que él atribuyó a una cierta cualidad enfriadora inherente al pez.¹⁶ De acuerdo con su teoría de las funciones corporales, entendidas como un equilibrio fisiológico de los cuatro humores, razonaba que los efectos producidos en el cuerpo eran parecidos a los ocasionados por la acción del frío extremo, y que la descarga podía ser transmitida a cierta distancia en modo parecido a la cualidad del frío. La teoría de Galeno dominó por más de mil años, y puede ser fácilmente identificada en literatura tan tardía como la del siglo XVI. Por ejemplo, Montaigne¹⁷ escribió en uno de sus ensayos que para cazar a su presa, el pez se entierra en el lodo de modo que cuando otro pez nada sobre él lo ataca y lo aturde con su frialdad, y de esa forma se apodera de él.

Para el final del siglo XVI, los italianos, que habían estado a la vanguardia de los esfuerzos del Renacimiento tardío por traducir y dominar la escuela de fisiólogos de Alejandría, habían aprendido del pasado todo lo que pudieron y comenzaban a emprender su propio camino. Francesco Redi¹⁸ y luego su discípulo Stefano Lorenzini¹⁹ fueron los primeros en diseccionar el torpe-

do; ellos concluyeron –correctamente, según se ha comprobado después– que el órgano eléctrico especializado era esencialmente tejido muscular ordinario modificado. Lorenzini consideró que el choque era causado por la expulsión súbita y rápida, desde el órgano especializado, de un efluvio microscópico o de corpúsculos que son

[...] lanzados como dardos por la contracción de aquellas fibras de las cuales estos dos cuerpos de músculos se componen [...].

La última y más influyente hipótesis planteada para explicar la naturaleza del choque, antes del advenimiento de la teoría eléctrica, fue la de Giovanni Borelli,²⁰ quien amplió la creencia de Lorenzini de que el órgano eléctrico era un tipo especial de músculo, argumentando que cuando el torpedo era tocado, el órgano eléctrico del animal se contraía a altas frecuencias, provocando sensaciones de entumecimiento muy parecidas a las provocadas por un golpe en el codo. Sorprendentemente, la teoría de Borelli permaneció sin cambios durante casi cien años. Esto fue así, por supuesto, debido a la ignorancia de la electricidad, pero también gracias a que la teoría era defendida por René

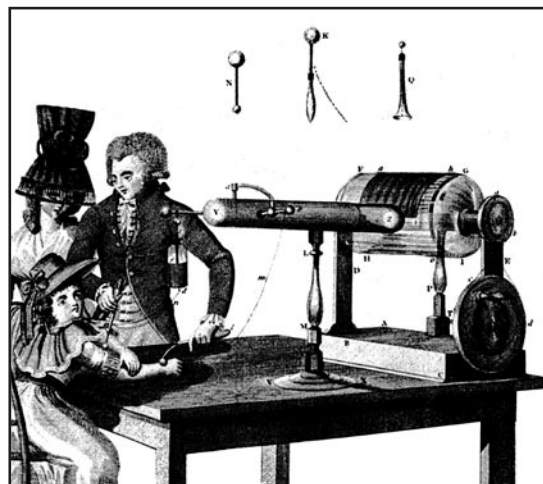


FIGURA 3. La pequeña botella de Leyden (próxima al brazo del hombre) está siendo usada aquí para almacenar la electricidad generada por la máquina electrostática de la derecha. La botella de Leyden es un simple capacitor elaborado con una botella de vidrio cubierta tanto en su interior como en su exterior con papel metálico; su invención a mediados del siglo XVIII hizo posible el empleo de cantidades significativas de electricidad para experimentos científicos y, tal como se muestra en la figura, para propósitos supuestamente terapéuticos.⁵²

Antoine Ferchault de Réaumur,²¹ quien escribió de forma similar que los efectos entumecedores eran ocasionados por una contracción de los músculos del torpedo, misma que provocaría una dura descarga que podía ser transmitida a través de cuerpos sólidos, pero que no lo haría —contrariamente al conocimiento adquirido por los antiguos— a través de líquidos. La quinta edición de la *Cyclopaedia* de Chambers²² declaró terminantemente que Réaumur había “aclarado el punto” de la descarga del torpedo.

EL DESCUBRIMIENTO DE LA ELECTRICIDAD ANIMAL

La invención de la botella de Leyden en 1745 jugó el papel más decisivo en el establecimiento de la naturaleza eléctrica de la descarga del pez eléctrico. Usada junto con el generador electrostático, inventado cien años antes, la gran capacidad de almacenamiento de la botella de Leyden incrementó grandemente la cantidad de electricidad que podía ser empleada para experimentos (Figura 3). Aquellos que experimentaron choques tanto del pez eléctrico como de la botella de Leyden, quedaron grandemente impresionados por su gran similitud.

Coincidentemente, la invención ocurrió en el mismo año en que reportes de la existencia de la poderosa anguila eléctrica sudamericana cautivaron la atención de la nascente comunidad científica (Figura 4). Informes de los resultados de experimentos realizados con la anguila comenzaron a llegar a Europa, y la mayoría de ellos hacía notar la semejanza entre este choque y el producido por la botella de Leyden. Por ejemplo, Frans van der Lott²³ escribió desde la Guayana Holandesa dando una detallada descripción de sus experimentos con la anguila eléctrica; reportó que los efectos del pez semejan a los de la electricidad, con la cual ya había experimentado con anterioridad en los Países Bajos. También notó, al igual que otros, que el pez no puede producir chispas. Probó varias especies de conductores y encontró que cuando sostenía una varilla de hierro en un paño seco no se presentaba el choque, pero que éste ocurría en cuanto el paño se humedecía. Pieter Van Musschenbroek,²⁴ el inventor de la botella de Leyden, infirió de esos experimentos que los efectos de la anguila y de la botella eran similares, y sugirió que el torpedo europeo era también eléctrico.



FIGURA 4. El poder prodigioso de la anguila eléctrica *Electrophorus electricus* (en la parte inferior izquierda) es ilustrado en este grabado en el que se representa la historia espectacular difundida en Europa según la cual los indígenas sudamericanos capturaban anguilas utilizando caballos para dejarlas exhaustas. Los primeros informes relacionados con la existencia de la anguila eléctrica atrajeron enormemente el interés científico en el siglo XVIII y dieron pie eventualmente al descubrimiento de la electricidad animal. Este grabado está basado en un dibujo de Emil Du Bois-Reymond, uno de los pioneros de la electrofisiología moderna.⁵¹

De los artículos subsecuentes, el que tuvo mayor importancia en cambiar definitivamente la marea de opinión hacia la teoría eléctrica fue un ensayo escrito por un médico norteamericano residente en Guayana, Edward Bancroft,²⁵ quien desafió específicamente la validez de la teoría de Réaumur de un choque puramente mecánico. Para cuestionar el argumento de Réaumur de que el choque no podía ser transmitido a través de líquidos, Bancroft realizó un experimento en el cual

[...] una persona que ponía un dedo en el agua a una distancia de unos ocho a diez pies del pez, recibía una violenta descarga en el instante en que el pez era tocado por otra persona [...].

En otro experimento del mismo día:

[...] la misma anguila, tocada con una varilla de hierro sostenida en la mano de una persona cuya otra mano toma a la de otro, etc., comunica un violento choque a diez o doce personas tomadas así de la mano, de manera exactamente parecida a la de una máquina eléctrica [...].

Más tarde, Bancroft se estableció en Inglaterra, donde se unió al círculo que incluía a Benjamin Franklin

y Joseph Priestley, y donde conoció a John Walsh, quien era miembro del Parlamento y socio de la Royal Society. A sugerencia de Bancroft, Walsh pasó varias semanas efectuando experimentos con el torpedo europeo, el cual era capturado comúnmente por los pescadores comerciales. Estos experimentos eran similares a los realizados por Bancroft con la anguila eléctrica. Walsh confirmó que los descubrimientos de Bancroft eran también verdaderos para el torpedo, y concluyó que todos los experimentos “determinan que la elección de conductores es la misma en el torpedo y en la botella de Leyden”.²⁶

De los experimentos sugeridos por Franklin, Walsh encontró que los dos lados del órgano eléctrico del torpedo estaban en estados eléctricos opuestos. Estos y otros experimentos le hicieron ganar a Walsh la codiciada medalla Copley de la Royal Society en 1774.

A solicitud de Walsh, el más detallado estudio anatómico del torpedo, desde Lorenzini, fue emprendido por el gran anatomista y cirujano del siglo XVIII, John Hunter.²⁷ Como se ilustra en la Figura 5, Hunter encontró que cada órgano consiste de entre 470 y 1200 columnas perpendiculares, dependiendo del tamaño del animal, y que una columna de una pulgada de longitud contiene alrededor de 150 particiones. Hunter prestó particular atención a los inusualmente grandes troncos nerviosos que inervan a los órganos eléctricos, y especuló —proféticamente, según se comprobó después— que estos nervios juegan un papel en la descarga eléctrica:

[...] Si fuera probable que estos nervios no sean necesarios para propósitos de sensación o acción, no podríamos concluir que sean útiles para la formación, colección o manejo del fluido eléctrico; especialmente porque, como se aprecia en los experimentos del señor Walsh, es la voluntad del animal la que controla absolutamente los poderes eléctricos de su cuerpo, control que debe depender de la energía de los nervios. Cuán lejos puede ser esto llevado al poder de los nervios en general, y cuán lejos puede llevar a una explicación de sus operaciones, sólo el tiempo y los descubrimientos futuros podrán determinarlo [...].

A pesar del triunfo de Walsh, su teoría de que el choque del torpedo era de naturaleza eléctrica se encontró con un gran escepticismo. Por ejemplo, Jan Ingenhousz, luego de escuchar acerca de las investigaciones de Walsh, realizó varios experimentos con el torpedo, pero llegó a la conclusión contraria de que la única manera en que el pez podía imitar a la botella de Leyden era en la sensación que producía. El pez fallaba en atraer cuerpos luminosos o en electrificar una botella con recubrimiento, o incluso al experimentador, y cuando el pez daba un choque en la obscuridad, no se escuchaba ningún ruido y ninguna chispa era percibida.²⁸

La última prueba, la producción de una chispa, resultó ser el *sine qua non* para la aceptación total de la naturaleza eléctrica de la descarga. Un contemporáneo, Thomas Ronayne, dijo acerca de la hipótesis de Walsh: “si eso pudiese ser probado, él no ve por qué no podríamos tener tormentas de truenos y relámpagos en las profundidades del océano”.²⁹ John Hunter, quien había emprendido nuevamente las disecciones de la anguila eléctrica a petición de Walsh, publicó una anatomía detallada del pez, pero evitó la palabra “eléctrico”, sin pensar que estaba suficientemente justificada por cualquiera de los experimentos que habían hecho uso de ella.³⁰

LA ACEPTACIÓN DE LA ELECTRICIDAD ANIMAL

Eventualmente Walsh encontró una respuesta a sus críticos en una serie de eventos que comenzaron con un artículo de Hugh Williamson,³¹ de Filadelfia, publicado en el mismo volumen de *Philosophical Transactions* que incluía los artículos de Ingenhousz y de Hunter. Williamson, quien sirvió en el Congreso Continental, en la Convención Federal y en el Congreso de los Estados Unidos, efectuó una serie de experimentos con una gran anguila que había traído a Filadelfia desde Guayana. Además de los experimentos similares a los realizados por Walsh con el torpedo, Williamson y su ayudante tuvieron éxito en hacer pasar un choque a través del espacio entre dos piezas de metal, aunque en realidad no vieron la chispa.

Inmediatamente Walsh se propuso repetir el experimento de Williamson con la esperanza de obtener una chispa luminosa que, en un artículo magistral de Henry Cavendish, se publicó que apoyaba la teoría eléctrica

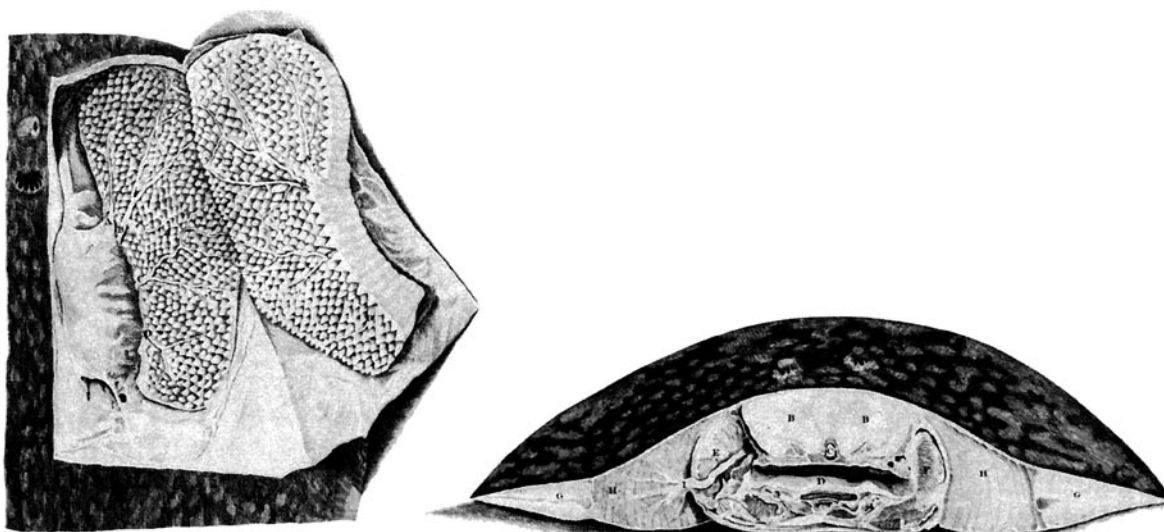


FIGURA 5. Los órganos eléctricos del torpeda, tal como se ilustran en la disección lateral (izquierda) y en la disección vertical (derecha) de John Hunter; consisten en cientos de columnas verticales dispuestas en un paquete compacto, cada una de las cuales está subdividida a su vez en bloques apilados (véase la Figura 7). El lado izquierdo de la sección vertical muestra una de las grandes ramas troncales del nervio a través de órgano eléctrico; esto llevó a Hunter a sugerir que la electricidad podía estar asociada cercanamente con la acción de los nervios en general.²⁷

de Walsh, y en el que se aclaraba el problema de producir una chispa luminosa. James Clerk Maxwell escribió:

[...] Sólo sé de dos ocasiones en las que Cavendish, luego de haber resuelto su opinión sobre cualquier tema, pensó que valía su tiempo corregir a otros que disientían de él [...].²⁹

Una de estas ocasiones fue cuando Cavendish, un acaudalado y retraído erudito, invitó a un grupo de sus amigos a presenciar su investigación sobre el torpeda. Entre ellos estaban Walsh, Hunter, Priestley y el dubitativo Thomas Ronayne, los únicos visitantes, según muestran los papeles de Cavendish, jamás admitidos en su laboratorio.

Cavendish se enfocó en las tres principales dificultades que impedían la total aceptación de la teoría eléctrica de Walsh. Las dificultades surgían principalmente del hecho de que la comprensión de la electricidad en esa época era confusa, especialmente en lo que respecta a la distinción entre el grado de electrificación (es decir, la diferencia de potencial) y la cantidad de electricidad.

La primera dificultad con la teoría de Walsh era que los choques del pez podían ser sentidos en un medio acuoso altamente conductor. Si el torpeda es eléctrico, como la botella de Leyden, el agua de mar debería producir un cortocircuito. Cavendish demostró que una

descarga eléctrica podía ser sentida bajo el agua construyendo un modelo físico del torpeda y conectándolo a una botella de Leyden. Él sumergió el aparato y sintió choques al colocar una mano en el agua cuando el circuito era cerrado. En un experimento que recuerda al tratamiento para la gota recomendado por Scribonius Largus 1700 años atrás, enterró el modelo en arena mojada y caminó sobre ella con sus pies descalzos notando con satisfacción que, en lo que tocaba a transmisión a través del agua, el efecto de este torpeda artificial concordaba con el del original.

Cavendish razonó que los choques eran esencialmente el resultado del paso de electricidad a través de circuitos paralelos en los que

[...] una mayor cantidad debería pasar mejor a través de aquellos en los que se encuentra con una menor resistencia, que a través de los que tienen una mayor [...].³²

Para mostrar que la electricidad no pasa solamente a lo largo del circuito más corto, ilustró el flujo del fluido eléctrico con un diagrama que se anticipó por más de medio siglo a las líneas de fuerza eléctrica y magnética de Michael Faraday.

La segunda dificultad concernía a la ausencia de chispas durante la descarga. Cavendish confirmó lo que



© **Maria Luz Bravo**, de la serie *Entretelón*, 2004/2005.

Walsh había observado antes –que una gran batería de botellas de Leyden cargada débilmente no podía descargar a través de un espacio de aire, aunque era capaz de dar choques severos. Basado en las mediciones anatómicas de Hunter del área de las membranas en el órgano eléctrico del torpedo, Cavendish estimó que un órgano eléctrico sería equivalente a una batería conteniendo tanta electricidad como cuarenta y nueve botellas de Leyden cargadas al mismo nivel. Así que no obstante que el torpedo puede tener una gran cantidad de electricidad, su grado de electrificación puede no ser suficiente como para hacer que una descarga pase a través de un mínimo espacio de aire entre dos hilos de metal.

Cavendish explicó la tercera dificultad, la ausencia de atracción o repulsión asociada comúnmente con la electricidad estática, por el carácter transitorio de las descargas. En cuanto el pez perturba el equilibrio, la electricidad se disipa. Ningún electrómetro disponible en ese entonces era lo suficientemente sensible como para detectar tan breve descarga.

Después de un minucioso y penetrante análisis que hizo mucho para establecer el carácter eléctrico de la descarga del pez, todo lo que quedaba por hacer era producir una chispa del pez eléctrico, ni más ni menos. Como Cavendish señaló, el torpedo, a pesar de poseer una gran cantidad de electricidad para producir descargas, no tiene un grado suficientemente alto de electrificación para producir chispas. Por lo tanto, Walsh dirigió su búsqueda de una chispa visible a la anguila eléctrica, cuyo grado mayor de electrificación permitiría producir una chispa.

Finalmente, una noche de 1776, ante un grupo de amigos filósofos reunidos en su casa, Walsh tuvo éxito en demostrar la chispa luminosa. La noticia del descubrimiento se esparció rápidamente. Walsh lo comunica en una carta a un amigo de la Real Academia de Ciencias de Francia, Jean-Baptiste Le Roy,³³ quien también recibió reportes confirmatorios de otras fuentes diversas, y se ha dicho que Walsh repitió el experimento de diez a doce veces ante miembros de la Royal Society de Londres. Sin embargo, Walsh nunca publicó los resultados de sus experimentos y, en cambio, estamos en deuda con Tiberius Cavallo, testigo que dejó este relato:

[...] El choque más fuerte del gymnotus pasará una muy corta interrupción en el circuito. [...] Cuando la interrupción es producida por la incisión por un cuchillo sobre una hoja de papel de estaño pegada sobre vidrio y ese papelito es colocado en el circuito, la descarga que pasa a través de la interrupción producirá una pequeña, pero vívida chispa, claramente distinguible en un cuarto oscuro [...].³⁴

Cavallo también describe otro descubrimiento de Walsh

[...] mostró en su casa a varias personas ingeniosas; fue una clase nueva de sentido en el animal por el cual él sabía cuando los cuerpos que se acercaban a él eran susceptibles de recibir la descarga (es decir, conductores), y cuando eran de naturaleza contraria [...].

La simple, pero elegante demostración de Walsh fue realizada de la siguiente manera: dos alambres fueron colocados en el agua de una vasija en la cual se encontraba nadando una anguila eléctrica. Estos

alambres eran de la misma longitud y se extendían hasta terminar en un vaso lleno de agua. Mientras el aparato permanecía en este estado, con los dos vasos separados, el circuito estaba abierto y el animal nunca se aproximaba a los extremos de los alambres en la vasija. Pero en el momento en que el circuito era cerrado por otro alambre, una persona, o cualquier otro conductor que conectara los dos vasos, el animal se movía instantáneamente hacia los alambres, se acomodaba y proporcionaba un choque, aun cuando el cierre del circuito hubiese ocurrido fuera de su vista. La astuta habilidad del pez de sentir si un objeto en su medio es conductor no fue reinvestigada sino hasta la década de 1950.³⁵

La observación de Walsh de chispas provenientes de la descarga de la anguila eléctrica fue repetida y confirmada subsecuentemente por varios investigadores, estableciéndose firmemente el carácter eléctrico de las descargas. Puede decirse que la noche en que Walsh demostró por primera vez la chispa a sus amigos marca el nacimiento de la electrofisiología. Antes de esto, se pensaba que el agente de la actividad nerviosa y muscular era un misterioso espíritu animal, pero Walsh probó que al menos algunos animales producen su propia electricidad. Esto fue generalizado quince años más tarde en el principio fisiológico de que todos los animales producen su propia electricidad y de que la electricidad es el agente de la actividad nerviosa y muscular.

La literatura fue muy pronto avasallada por una avalancha de afirmaciones acerca del descubrimiento de nuevos peces eléctricos, una tendencia que culminó con un profesor de anatomía en Nápoles que afirmaba haber recibido una severa descarga de un ratón ordinario durante la disección.³⁶ Otra indicación del reconocimiento general del descubrimiento de Walsh fue la popularidad de la electricidad animal entre personas que sufrían de gota o artritis, las cuales acudían en manada para probar el poder curativo de la electricidad “natural” del pez eléctrico. Un anuncio publicado en Londres en 1777 proclamaba que por el precio de dos chelines y seis peniques uno podía disfrutar del beneficio curativo de una “anguila torporífica”.³⁷

Sin embargo, las fuentes animales para la electroterapia fueron poco fiables en términos de suministros y disposición de los animales. Las anguilas eléctricas y los peces gato del Nilo no estaban disponibles

en Europa, y las descargas del torpedo eran a menudo impredecibles y esporádicas, incluso bajo demanda repetitiva, y rápidamente cansaban al animal. Pero la electricidad podía ser generada por medios artificiales, y equipados con generadores electrostáticos y grandes botellas de Leyden, los practicantes pusieron manos a la obra de manera entusiasta (ver Figura 3). Se reportaron muchas afirmaciones sobre el tratamiento exitoso de varias enfermedades.

Entre los ardientes defensores de la “electricidad médica” estaba Benjamin Franklin³⁸ quien, a menudo, trató a paralíticos y a pacientes que padecían crisis convulsivas; de ahí que el término “franklinización” fue acuñado durante este periodo para denotar el uso terapéutico de la electricidad estática. Incluso John Wesley, el fundador del Metodismo, estaba tan convencido del valor terapéutico de la electricidad que hizo traer cuatro generadores estáticos a Londres para tratar enfermedades, y publicó un libro en el que exaltaba las virtudes de la electroterapia como “la medicina más noble jamás conocida en el mundo”.³⁹



© María Luz Bravo, de la serie *Entretelón*, 2004/2005.

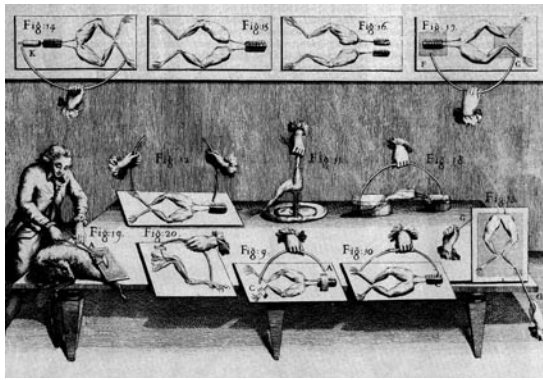


FIGURA 6. Estas figuras ilustran algunos de los muchos experimentos realizados por Luigi Galvani en los cuales demostró que podía inducirse la contracción de las piernas de una rana si los nervios de la extremidad eran conectados a la médula espinal por dos metales en serie, como los del arco metálico de la “Fig:10”.⁴²

Fue en este medio fomentado por los descubrimientos de Walsh, en el que los generadores estáticos y las botellas de Leyden tuvieron gran demanda entre fisiólogos y médicos, donde el interés curioso acerca de la electricidad animal se transformó en un esfuerzo científico conocido actualmente como electrofisiología. Con la aceptación del hecho de que la electricidad animal no era diferente de la electricidad común, y con la demostración de que podía ser producida voluntariamente por el animal, se necesitó sólo un pequeño paso para sugerir, como lo hizo Priestley, que la electricidad animal no estaba confinada a unos pocos peces altamente especializados sino que era inherente a todos los animales y que era usada por ellos para el propósito de la locomoción.⁴⁰ El mismo punto de vista fue expresado por Fellice Fontana,⁴¹ profesor de filosofía natural en Pisa y Roma, quien, para explicar el movimiento muscular escribió:

[...] aparentemente seremos llevados a recurrir a algún otro principio; ese principio, de no ser la electricidad común, puede ser sin embargo algo análogo a ella. El gymnotus eléctrico y el torpedo, si bien no hacen la teoría muy probable, al menos la hacen posible, y puede creerse que este principio sigue las leyes más comunes de la electricidad. Puede así mismo estar más modificado en los nervios que en el torpedo o el gymnotus. Los nervios deberían ser órganos des-

tinados a conducir el fluido y quizá también a excitarlo, pero en este campo todo queda por ser hecho [...].

En medio de tan creciente interés y gran especulación, Luigi Galvani, profesor de anatomía en la Universidad de Bologna, hizo el anuncio trascendental de sus observaciones acerca de que las piernas de rana se contraían bajo estimulación eléctrica.⁴² Galvani también describió, entre los resultados de muchos experimentos con piernas de rana, la todavía más sorprendente observación de que las piernas se contraían cuando un arco formado por dos metales en serie tocaba simultáneamente los nervios de las piernas y la médula espinal (Figura 6).

Galvani interpretó sus inesperadas observaciones como una evidencia de electricidad animal inherente, la cual, suponía, era sintetizada en el cerebro y almacenada en el músculo vía los nervios. Utilizando la descarga de la botella de Leyden como analogía, pensó que al tocar la preparación neuromuscular con el arco de metal causaba que el músculo descargara la electricidad almacenada, y de ese modo se contraía el músculo. Para apoyar su hipótesis, Galvani citó la electricidad del torpedo como ejemplo, forzando la semejanza entre la débil electricidad animal de las piernas de rana disecadas y las fuertes descargas “de la raya eléctrica y otros animales de su clase”. El informe de su trabajo fue extensamente publicado causando gran excitación en el mundo científico y sus experimentos fueron repetidos y confirmados en cualquier lugar en que hubiese ranas disponibles.

Galvani envió una copia de su artículo a Alessandro Volta, profesor de física en la Universidad de Pavía, quien inicialmente lo llenó de elogios. Pronto, sin embargo, comenzó a cuestionar la validez de las conclusiones de Galvani. Usando un sensible electroscopio que había inventado antes, Volta repitió cuidadosamente los experimentos de Galvani, poniendo atención particular en la observación de Galvani de que el vigor de las contracciones dependía de la clase de metal usado. Entonces, en una conferencia pública que luego publicó, Volta⁴³ argumentó que las contracciones musculares no eran resultado de una corriente que surgía del interior del organismo, sino que eran debidas a corrientes eléctricas gene-

radas en el contacto de distintos metales en el arco de metal que tocaba a la preparación.

El escenario estaba ahora preparado para uno de los grandes debates en la historia de la ciencia. La rivalidad entre los galvanistas que creían en la electricidad animal intrínseca, y Volta y sus seguidores que defendían la teoría del contacto metálico, se extendería a toda Europa. La controversia Galvani-Volta ha sido sujeto de extensa discusión en la literatura (por ejemplo, Dibner, 1952;⁴⁴ Mauro, 1969⁴⁵); nuestra atención se enfocará en el papel del pez eléctrico en la polémica.

En el único experimento lógico que pudo oponer al argumento de Volta, Galvani efectuó un experimento sin el arco metálico.⁴⁶ Efectivamente, encontró que cuando los músculos de una pierna tocaban los nervios expuestos de la médula espinal dañada, los músculos se contraían vigorosamente. Este exitoso experimento es la primera observación de la existencia de una corriente de lesión en los músculos, la cual es el producto del flujo de corriente resultante de la diferencia de potencial entre el tejido dañado y el intacto; extensos estudios de este fenómeno en el siglo XIX condujeron eventualmente al descubrimiento del potencial de acción, el cambio transitorio en el potencial eléctrico a través de la superficie de membrana de las células nerviosas y musculares cuando son estimuladas.

Sin embargo, a pesar del experimento de Galvani, Volta prevaleció claramente, y por razones ajenas al debate. Para 1794 Galvani, acosado por problemas personales y de salud, se había retirado virtualmente del campo de batalla. Sus infortunios fueron agravados por la invasión de Italia por Napoleón en 1796; debido a su negativa a jurar lealtad al régimen títere de Napoleón, la República Cisalpina, fue despedido de su cátedra en la Universidad de Bologna y forzado a renunciar a su residencia.⁴⁷

La posición de Volta fue pronto desafiada por el barón Alexander von Humboldt. Sin una predisposición hacia alguno de los protagonistas, Humboldt⁴⁸ realizó experimentos que demostraron contracciones en una preparación neuromuscular sin usar el arco metálico, y por tanto, confirmó independientemente los resultados previos de Galvani.

Sin embargo, el más grande desafío a la negativa de Volta a aceptar el concepto de electricidad animal in-

trínseca vino del ejemplo del pez eléctrico. No hay duda de que Volta era completamente consciente de la naturaleza eléctrica de este pez, y de que estaba al tanto de los trabajos publicados sobre este tema por Walsh, Hunter y Cavendish. Su conocimiento del órgano eléctrico del torpedo era profundo porque había hecho estudios anatómicos detallados de la estructura. El pez eléctrico debió ser un gran peso en la mente de Volta, a pesar del hecho de que durante los ocho años que siguieron a 1792, en los que publicó un total de 32 artículos, mantuvo un silencio estricto sobre el tema.

Volta rompió su silencio dramáticamente en una comunicación a la Royal Society, en la cual reveló un nuevo aparato que había inventado; lo llamó "órgano eléctrico artificial" porque imitaba "el órgano eléctrico natural del torpedo o anguila eléctrica".⁴⁹ Como se muestra en la Figura 7, fue construido intercalando capas de dos metales y cartones bien empapados en agua salada, y era capaz de producir corriente eléctrica de modo continuo. Así nació la primera batería eléctrica.

La esencia del comunicado culminante de Volta es su modelo para la descarga tomado del pez eléctrico.

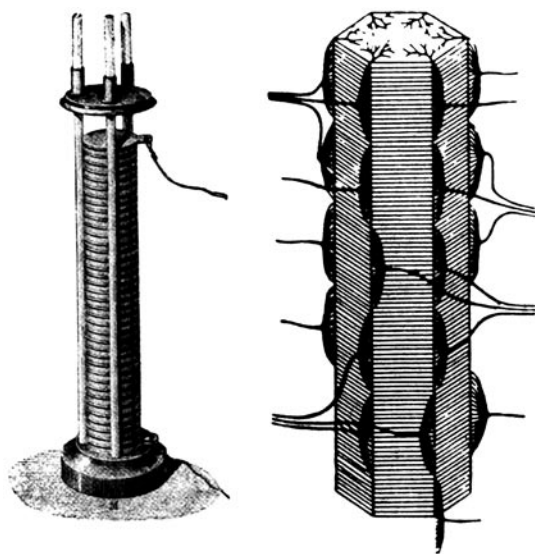


FIGURA 7. La "pila" de Alessandro Volta (izquierda),⁴⁴ la primera batería eléctrica, consistía en delgadas placas metálicas de dos metales apiladas entre capas de cartón empapadas en agua salada, con lo cual se producía una corriente eléctrica continua. Para construir su aparato, Volta describió su analogía con el órgano eléctrico natural, el cual según él era "fundamentalmente igual" a la pila eléctrica. El dibujo esquemático de la derecha⁵⁴ muestra las múltiples divisiones y los nervios conectados a ellas que componen cada una de las columnas verticales del órgano eléctrico natural del torpedo tal como Hunter las describió (ver Figura 5); la similitud entre el órgano eléctrico artificial y el natural es asombrosa.



© **María Luz Bravo**, de la serie *Entretelón*, 2004/2005.

Él argumentó que su “aparato columnar” era “fundamentalmente igual” al órgano eléctrico natural, y que el órgano, como su aparato, estaba compuesto enteramente por sustancias conductoras. Explicó que lo que el torpedo hace cuando desea transmitir una descarga a los brazos de un hombre o a un animal que lo esté tocando, es alinear de manera apropiada algunas partes de sus órganos eléctricos, para obtener el contacto requerido, y para provocar que algo de humedad fluya entre los diafragmas, los cuales normalmente están separados.

El efecto en la comunidad científica de las noticias de la “pila” de Volta, como se le llamó, fue sensacional. A su llegada triunfal a París en 1801, Volta fue invitado a demostrar su celda eléctrica en la Academia Francesa de Ciencia. Realizó los experimentos en tres sesiones, a las cuales asistió Napoleón, quien —en contraste con el trato que recibió Galvani— le otorgó a Volta numerosos honores, incluyendo un premio de una medalla de oro y una atractiva pensión, además le confirió el título de conde y lo designó senador del Reino de Italia.

Los reconocimientos fueron bien merecidos. Efectivamente, el órgano eléctrico artificial tuvo mucho que ver con el rápido desarrollo de la ciencia en el siglo XIX. Con su suministro constante de energía eléctrica, la pila voltaica hizo posibles muchos de los descubrimientos decimonónicos, incluyendo las leyes fundamentales de electroquímica por Michael Faraday, los nueve elementos químicos en cinco años por Humphry Davy, los fenómenos del electromagnetismo por Hans

Christian Oersted, y, con la electrólisis del agua, factible por potentes baterías, la teoría atómica moderna por John Dalton. Las aplicaciones técnicas que la batería eléctrica han propiciado son de una magnitud incommensurable.

Ahora sabemos que tanto Galvani como Volta tenían razón: las células vivas producen electricidad, y fuerzas eléctricas surgen con el contacto de metales distintos en un electrolito. Sin embargo, Galvani se equivocó al suponer que la electricidad animal inherente es sintetizada en el cerebro y es enviada a través del nervio al músculo, el cual la almacena como una botella de Leyden, por ello pensó que cuando tocaba el nervio y el músculo con su arco bimetálico, simplemente descargaba la electricidad almacenada. Él se percató que sólo el arco bimetálico funcionaba, pero falló en determinar el por qué —un único metal habría trabajado si su teoría de la descarga hubiese sido correcta. Ahora comprendemos que, de hecho, él estimuló la preparación neuromuscular con el voltaje generado por las dos medias celdas de las uniones metal-electrolito disímiles.

Volta se dio cuenta de la necesidad de usar metales disímiles y así desarrolló su teoría del contacto. Él atribuyó la causa de las contracciones del músculo enteramente a la electricidad generada por el contacto de los distintos metales; falló en reconocer que los metales proveen sólo un estímulo eléctrico que excita al nervio. Los nervios y músculos de hecho generan su propia electricidad por la autopropagación de la excitación —el potencial de acción— que lleva a la contracción muscular.

Nuestro conocimiento actual del funcionamiento del nervio y el músculo tiene su origen científico en la demostración de Galvani de que las contracciones del músculo pueden ser inducidas sin el uso del arco metálico. Sin embargo, en parte debido a la suerte política de Galvani y de su rival, pasaron cerca de cincuenta años antes de que la fuente de la electricidad fuera reinvestigada. Fue Carlos Matteucci⁵⁰ quien demostró la existencia del potencial de lesión entre regiones dañadas y no lesionadas, y de la corriente durante la excitación, la corriente de acción. Emil Du Bois-Reymond⁵¹ confirmó su existencia y además comprobó que los nervios y los músculos son verdaderamente electrogénicos. El tema del mecanismo básico de la descarga del pez eléctrico fue finalmente resuelto cuando él demostró de manera concluyente que la descarga es fundamentalmente similar a la excitación del nervio y el músculo.

B I B L I O G R A F Í A

- ¹ Grundfest, H. 1957. The mechanisms of discharge of the electric organs in relation to general and comparative electrophysiology. *Progr. Biophys. Biophys. Chem.* 7:1-85.
- ² Bini, G. 1967. *Atlante dei Pesci delle Coste italiane*, vol. 1, pp. 127-34. Rome: Mondo Sommerso Editrice.
- ³ Scribonius Largus. *Compositioes Medicae*, xi, CLXII. Trans. in P.Kellaway 1946, The part played by electric fish in the early history of bioelectricity and electrotherapy. *Bull. Hist. Med.* 20:112-37.
- ⁴ Keynes, R.D. 1956. The generation of electricity by fishes. *Endeavour* 15:215-22.
- ⁵ Li, Shih-Chen. 1596. *Pen Tso Kang Mu (The Great Herbal)*. Taipei: Wun You Books Company, 1959, pp. 1379-80 (in Chinese).
- ⁶ Gaillard, M.C. 1923. *Faune Égyptienne Antique. Recherches sur les poisons représentés dans quelques tombeaux égyptiens de l'Ancien Empire*. Vol. 51 of *Memoires de l'Institut Français d'Archéologie Orientale*, pp. 75-78. Cairo: Imprimerie de l'Institut Français d'Archéologie Orientale.
- ⁷ Hipócrates. *On Regimen*, II, XLVIII. Trans. and ed. W.H.S. Jones, *Hippocrates*, vol. 4, p. 321. London: William Heinemann, 1931.
- ⁸ Platón. *Meno*, 80^a. Trans. B. Jowett, *The Dialogues of Plato Translated into English with Analysis and Introduction*, 2nd ed., vol. 1, pp. 280-81. Oxford: Clarendon Press, 1875.
- ⁹ Teofrasto. Fragment 178. *Theophrasti Eresii Opera Quae Supersunt Omnia*, ed. F. Wimmer, vol. 3, pp. 222-23. Leipzig: Sumptibus et Typis B.G. Teubneri, 1862.
- ¹⁰ Plotino. *Enneades* IV, 5:1. Trans. K.S. Guthrie, *Plotinos Complete Works*, vol. 2, pp. 515-16. London: George Bell and Sons, 1918.
- ¹¹ Plutarco. *Moralía*, 978B. Trans. and ed. H. Cherniss and W.C. Helmbold, *Plutarch's Moralia*, vol. 12, pp. 433-35. Harvard Univ. Press, 1957.
- ¹² Claudiano. *Eidyllium* III. Trans. A. Hawkins, *The Works of Claudian, Translated into English Verse*, vol. 2, pp. 296-97. London: J. Porter, 1817.
- ¹³ Cicerón. *De Natura Deorum*, II, 50. In *M. Tulli Ciceronis De Natura Deorum*, ed. A.S. Pease, vol. 2, pp. 872-78. Harvard Univ. Press, 1958.

- ¹⁴ Aristóteles. *Historia Animalium*, IX, 620b. Trans. D.W. Thompson, in *The Works of Aristotle Translated into English*, ed. J.A. Smith and W.D. Ross, vol. 4. Oxford: Clarendon Press, 1910.
- ¹⁵ Mercurialis, H. 1571. *Praelectiones Patavinae. De Cognoscendis et Curandis humani corporis affectibus*. Venice: Junta, 1603, p. 99.
- ¹⁶ Kühn, C.G., ed. 1822-26. *Claudii Galeni Opera Omnia*, vol. 2, pp. 108-09; vol. 4, pp. 497-98; vol. 8, p. 72. Leipzig: C. Knoblochii.
- ¹⁷ Montaigne, M. de. 1580. Trans. G.B. Ives, *The Essays of Montaigne*, vol. 2, pp. 223-24. Harvard Univ. Press, 1925.
- ¹⁸ Redi, F. 1671. *Esperienze intorno a diverse cose naturali e particolarmente a quelle che ci sono portate dalle Indie*, pp. 47-51. Florence: 1671. Reprinted in *Le Più Belle Pagine di Francesco Redi*, ed. P. Giacosa, pp. 105-09. Milan: Fratelli Treves, Editori, 1925.
- ¹⁹ Lorenzini, S. 1678. *Osservazioni intorno alle Torpedini*. Florence: l'Onofri. Trans. J. Davis, *The curious and accurate observations of Mr. Stephen Lorenzini of Florence*, pp. 66-72. London: Jefferys, 1705.
- ²⁰ Borelli, G.A. 1680. *De Motu Animalium*. Leiden: P. Vander Aa, 1710, pp. 276-77.
- ²¹ Réaumur, R.A.F. de. 1714. Des effets que produit le poisson appelle en françois torpille, ou tremble, sur ceux qui le touchent; et de la cause dont ils dependent. *Memoires de l'Academie Royale des Sciences* 1714:447-68.
- ²² Chambers, E. 1743. *Cyclopaedia: or, an universal dictionary of arts and sciences*. London: J. and J. Knapton et al.
- ²³ Lott, F. van der. 1762. Kort bericht van den Conger-aal, ofte drilvisch. *Verhandelungen Uitgegeeven door de Hollandse Maatschappij der Wetenschappen, te Haarlem* 6:87-95.
- ²⁴ Musschenbroek, P. van. 1762. *Cours de physique expérimentale et mathématique*. Trans. S. de la Fond, vol. 1, pp. 392-93. Paris: Desventes de la Doué, 1770.
- ²⁵ Bancroft, E. 1769. *An Essay on the Natural History of Guiana, in South America*, pp. 190-201. London: T. Becket and P.A. de Hondt.
- ²⁶ Walsh, J. 1773. Of the electric property of the torpedo. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 63: 461-80.
- ²⁷ Hunter, J. 1773. Anatomical observations on the torpedo. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 63:481-89.
- ²⁸ Ingenhousz, J. 1775. Extract of a letter from Dr. John Ingenhousz, F.R.S. to Sir John Pringle, Bart. P.R.S., containing some experiments on the torpedo. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 65:1-4.
- ²⁹ Maxwell, J.C., ed. 1879. *The Electrical Researches of the Honourable Henry Cavendish*, F.R.S., p. xxxvii. Cambridge Univ. Press.



© María Luz Bravo, de la serie *Entretelón*, 2004/2005.



© **María Luz Bravo**, de la serie *Entretelón*, 2004/2005.

³⁰ Hunter, J. 1775. An account of the *Gymnotus electricus*. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 65:395-407.

³¹ Williamson, H. 1775. Experiments and observations on the *Gymnotus electricus*, or electric eel. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 65:94-101.

³² Cavendish, H. 1776. An account of some attempts to imitate the effects of the torpedo by electricity. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 66: 196-225.

³³ Le Roy, J.B. 1776. Lettre sur l'étincelle électrique que donne l'anguille de Surinam. *Journal de Physique* 8:331-35.

³⁴ Cavallo, T. 1786. *A Complete Treatise on Electricity, in Theory and Practice*, 3rd ed., vol. 2, pp. 309-11. London: C. Dilly.

³⁵ Lissmann, H.W. 1963. Electric location by fishes. *Sci. Am.* 208:50-59.

³⁶ Cavallo, T. 1795. *A Complete Treatise on Electricity, in Theory and Practice*, 4th ed., vol. 3, pp. 7-8. London: C. Dilly.

³⁷ Strong, A. [pseud.]. 1777. *The electric eel, or Gymnotus electricus by A. S. Naturalist*. London: J. Bew.

³⁸ Franklin, B. 1759. An account of the effects of electricity in paralytic cases. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 50:481-83.

³⁹ Wesley, J. 1760. *The Desideratum: or, electricity made plain and useful*, pp. 70-72. London: W. Flexney, E. Cae, et al.

⁴⁰ Priestley, J. 1775. *Experiments and Observations on Different Kinds of Air*, 2nd ed., vol. 1, pp. 274-79. London: J. Johnson.

⁴¹ Fontana, F. 1781. *Traité sur le venin de la vipère, sur les poisons américains, sur le laurier-cerise, et sur quelques autres poisons végétaux*, vol. 2, pp. 244-45. Florence.

⁴² Galvani, L. 1791. *De Viribus Electricitatis in Motu Musculari*. Bologna: Typographia Instituti Scientiarum. Trans. R.M. Green, *Commentary on the*

Effect of Electricity on Muscular Motion, pp. 66-67. Cambridge, Mass.: Elizabeth Licht, 1953.

⁴³ Volta, A. 1792. Memoria Prima sull'Elettricità Animale. In *Collezione dell'Opere*, tomo 2. Florence: G. Piatti, 1816.

⁴⁴ Dibner, B. 1952. *Galvani-Volta*. Norwalk, Conn.: Burndy Library.

⁴⁵ Mauro, A. 1969. The role of the voltaic pile in the Galvani-Volta controversy concerning animal vs. metallic electricity. *J. Hist. Med.* 24:140-50.

⁴⁶ Galvani, L. 1794. *Dell'Uso e dell'Attività dell'Arco Conduttore nelle Contrazione dei Muscoli, Supplemento al Trattato*. Bologna: A.S. Tommaso d'Aquino. Trans. in Dibner 1952, pp. 50-51.

⁴⁷ Dibner, B. 1971. *Luigi Galvani*. Norwalk, Conn.: Burndy Library.

⁴⁸ Humboldt, F.H.A. von. 1797. *Versuche über die gereizte Muskel- und Nervenfasern nebst Vermuthungen über chemischen Process des Lebens in der Thier und Pflanzwelt*, vol. 1, pp. 367-73. Poznan: Decker.

⁴⁹ Volta, A. 1800. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 90: 403-31 (in French). Trans. in *Phil. Mag.* 7:289-311.

⁵⁰ Matteucci, C. 1840. *Essai sur les Phénomènes Électriques des Animaux*. Paris: Carilian-Goeury and Dalmont.

⁵¹ Du Bois-Reymond, E. 1849. *Untersuchungen über thierische Electricität*. Berlin: Verlag von G. Reimer.

⁵² Adams, G. 1799. *An Essay on Electricity*, 5th ed. London: W. and S. Jones.

⁵³ Feder, T.H. 1978. *Great Treasures of Pompeii and Herculaneum*. Abbeville.

⁵⁴ Fritsch, G. 1890. *Die elektrischen Fische*. Leipzig: Verlag von Veit und Comp.

Texto reproducido con permiso de American Scientist, vol. 72, no. 6, pp. 598-607, 1984. Traducción de J. Emilio Salceda.