



ARTÍCULO DE REVISIÓN

En torno a los primeros estudios de electrofisiología

Alfredo de Micheli

Investigador del Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez.

Recibido el 3 de diciembre de 2010; aceptado el 17 de marzo de 2011.

PALABRAS CLAVE

Electricidad;
Electrofisiología en
músculo periférico;
Electrofisiología en
músculo cardíaco; México.

Resumen

Se presenta un breve bosquejo histórico de la evolución de la electrología a partir del siglo XVIII. Se discute el tema de la llamada electricidad animal, desde las observaciones sobre las descargas del pez Torpedo hasta las investigaciones del catedrático boloñés Luigi Galvani y de sus discípulos. Sus opositores, encabezados por el físico Alessandro Volta, catedrático en la Universidad de Pavia, opinaban que la electricidad detectada por los galvanistas no era inherente al propio animal, sino debida a la acción de los conductores metálicos empleados para formar el circuito: electricidad de contacto. Sólo a mediados del siglo XIX, el físico Carlo Matteucci logró demostrar la existencia de una verdadera electricidad animal en la forma de corriente de lesión. Se logró cuantificarla gracias a la obtención de un electrómetro satisfactorio construido en 1872 por el físico francés Gabriel Lippmann. Este instrumento fue empleado por el fisiólogo inglés Waller para registrar en humanos los ancestros de los trazos electrocardiográficos (1887). A principios del siglo XX, el holandés Willem Einthoven presentó su galvanómetro de cuerda, que abrió el paso a la electrocardiografía actual. Se logró así registrar los potenciales eléctricos de células miocárdicas primero *in vitro*, más tarde en corazón canino aislado y perfundido, poco después en corazón *in situ* y, en fin, en corazón humano. Esto permitió efectuar los actuales mapeos endocárdicos y epicárdicos, indispensables para el diagnóstico y el tratamiento de las arritmias cardíacas.

KEYWORDS

Electricity;
Electrophysiology in
peripheral muscle;
Electrophysiology in heart
muscle; Mexico.

On the first studies of electrophysiology

Abstract

A historical outline of the evolution of electrophysiology from the eighteenth century is shortly presented. Topics concerning the so called animal electricity starting from the observations on discharges of Torpedo fish until Bolognese Galvani's researches on the frogs are exposed. The points of view of their oppositionists also are examined. These ones, leaded by the physicist Alessandro Volta, professor in the University of Pavia, believed that electricity detected by galvanists was not inherent to animal but was due to the action of

Correspondencia: Alfredo de Micheli. Juan Badiano N°1. Col. Sección XVI, Tlalpan. 14080. Teléfono: 52 (55) 55 73 29 11. Extensión: 1310. Correo electrónico: alessandro.micheli@cardiol.org.mx

the metallic conductors present in the circuit: contact electricity. Only towards the middle of the nineteenth century the physicist Carlo Matteucci attained to demonstrate the existence of the real animal electricity in form of injury current. It was possible to determine that quantitatively thanks to the capillary electrometer built in 1872 by the French physicist Gabriel Lippmann. This instrument was used by the English physiologist Waller in order to obtain the primitive electrocardiographic tracings in humans (1887). At beginnings of the twentieth century, the Dutch professor Willem Einthoven, of the University of Leiden, introduced his string galvanometer which permitted to allow the modern electrocardiography. So it was possible to record the electrical potentials of myocardial cells, first in vitro, later in isolated and perfused heart, son after in dog's heart in situ and finally in human heart. Therefore now it is possible to effectuate endocardial and epicardial mappings, indispensable in order to diagnose and treat the cardiac arrhythmias.

Antecedentes

Los estudios relacionados con la electricidad florecieron en la segunda mitad del siglo XVIII. William Watson (1707 - 1787) afirmó explícitamente que, en condiciones iguales, la carga eléctrica es proporcional a la superficie de las armaduras de los condensadores, como la llamada botella de Leiden y sus derivados, por ejemplo los condensadores planos. Se percibe en Watson una concepción, todavía vaga, del potencial eléctrico, la que poco después aparecerá en Benjamín Franklin (1706 - 1790), Figura 1. La obra teórica y experimental de éste se expone esencialmente en el libro "*Experiments and observations on electricity*".¹ Dicho libro comprende una serie de cartas dirigidas por el autor a su amigo londinense Peter Collinson (1694 - 1768) y su última edición, revisada por el propio autor con amplias modificaciones y varios agregados, es de 1774. Los términos positivo y negativo, por él introducidos, permanecen hoy en día, aun cuando su enfoque original fuera sustituido por la hipótesis de Robert Symmer (1759) en la que -contrariamente a la teoría eléctrica unitaria- se admitía la existencia de dos fluidos eléctricos. Tal doctrina fue vigente durante todo el siglo XIX. Parece justo mencionar que el ilustrado novohispano Juan Benito Díaz de Gamarra bien conocía el libro de Franklin, a quien consagró dos apartados en sus escritos.² El impreso del autor norteamericano se menciona también en el inventario de la biblioteca de la antigua Universidad de México, formado en octubre de 1833.³

A su vez, el clérigo inglés Joseph Priestley (1733 - 1804), antes de ocuparse del estudio de los "aires" (gases), había elaborado un tratado de física por consejo del propio Franklin. Esta obra,⁴ basada en trabajos originales, constituye una de las más valiosas y extensas exposiciones del desarrollo de la electrología, examinada con fino espíritu crítico.

Por su lado, un físico italiano, de quien no se conoce el nombre, presentó en 1746 un electrómetro de bolitas para detectar la presencia de electricidad.⁵ Tal instrumento fue perfeccionado en 1753 por John Cantón (1718 - 1772), en 1773 por Tiberio Cavallo (1749 - 1809) y en 1781 por Alessandro Volta (1745 - 1827). De todos modos, el adelanto más significativo se obtuvo en 1787 gracias a las innovaciones que aportaron, de manera independiente, Abraham Bennet (1750 - 1799) y Anton Maria Vassalli Eandi (1761 - 1825).

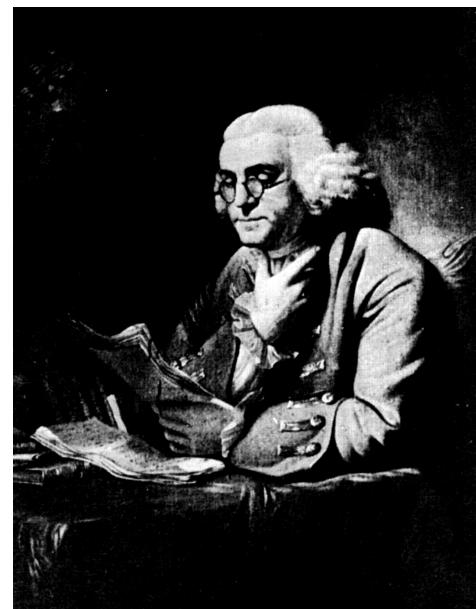


Figura 1. Benjamín Franklin (1706 - 1790).

Electrofisiología del músculo periférico

Por otra parte, junto con la teoría fibrilar, los estudios acerca de la "irritabilidad" de los tejidos animales constituyeron un aspecto característico de la corriente científica denominada iatrofísica. Fue el iniciador de estudios sobre dicha "irritabilidad" el inglés Francis Glisson (1597 - 1677). Siguió estas sendas Albrecht von Haller (1708 - 1777), discípulo de Hermann Boerhaave y padre de la fisiología experimental moderna con su tratado *Elementa physiologiae corporis humani*.⁶ Su obra fue continuada por el naturalista italiano Felice Fontana (1720 - 1805), quien estableciera el fundamento serio de las investigaciones sobre las propiedades bioeléctricas de dichos tejidos en varias publicaciones^{7,8} y particularmente en una de 1767.⁹ Entretanto John Walsn¹⁰ demostró en 1773 la identidad de las descargas eléctricas emanadas por el pez torpedo con las producidas en una botella de Leiden, i. e. en un condensador diseñado por el físico holandés Pieter van Musschenbroek, catedrático universitario en aquella ciudad.

El anatomista bolones Leopoldo Caldani (1725 - 1819) y su colega Tommaso Laghi¹¹ fueron de los primeros en efectuar la estimulación eléctrica de nervios y músculos, cuando el padre escolapio G. B. Beccaria ya había publicado en 1753 sus resultados de la estimulación de los músculos expuestos de un gallo vivo.¹² Esta monografía, junto con el curso completo de física del abate Nollet, figuraban en la biblioteca de J. B. Díaz de Gamarra, divulgador de los adelantos científicos de su tiempo entre la juventud mexicana.¹³ La física de Nollet se hallaba aun en la llamada biblioteca turriana.¹⁴ Caldani, titular de la cátedra de anatomía de la universidad, tuvo que trasladarse de Bolonia a Padua por la oposición encontrada en su ambiente, al apoyar las teorías de von Haller acerca de la "irritabilidad" de los tejidos animales. Lo sucedió, en dicha cátedra, Luigi Galvani (1737 - 1798), Figura 2. Las contribuciones de este último se caracterizan por un enfoque esencialmente fisiológico o electrofisiológico.¹⁵ Debe tenerse presente que, si bien la fisiología no constituía entonces una disciplina institucionalizada, sí había excelentes investigadores en el campo fisiológico.

Electricidad animal

En su monografía *De viribus electricitatis in motu musculari*,¹⁶ describió Galvani los resultados de once años de estudio sobre los eventos fisiológicos de las ranas, relacionados con fenómenos eléctricos. De hecho, él había iniciado sus experimentos en 1780 y sus primeras observaciones acerca de la contracción muscular de dichos batracios se realizaron a comienzos de septiembre de 1786. Observó entonces el fenómeno de que, al tocar con la punta de un escalpelo los nervios currales internos de una rana decapitada y fijada en una mesa, si se hacía saltar al mismo tiempo la chispa en una máquina eléctrica cercana, se contraían todos los músculos de los miembros. Además, los músculos de ranas decapitadas, con la médula perforada, y colgadas en ganchos de hierro o cobre, entraban en convulsión cuando se establecía un circuito entre ellos y los nervios respectivos por medio de un arco bimetálico. Por lo tanto, nuestro fisiólogo supuso que los nervios y los músculos de dichos animales actuarian como las armaduras, interna y externa, de una botella de Leiden. Atribuyó, pues, el fenómeno a la existencia de electricidad inherente al animal mismo. Él creía, de hecho, que los músculos, por medio de los nervios, podían cargarse de electricidad negativa en su parte externa y de electricidad positiva en su parte interna. Así que el mecanismo de las contracciones musculares observadas dependería de la descarga ocasionada por vía de los nervios cuando la parte interna de los músculos se ponían en contacto con la externa.

La noción de electricidad animal ya existía en el ambiente científico dieciochesco.¹⁷ Por ejemplo, el naturalista Felice Fontana, ya citado, había sugerido en 1781 una probable analogía entre el sistema nervioso y una máquina eléctrica. A su vez, John Walsh¹⁸ había demostrado en 1773 la naturaleza eléctrica de las descargas emanadas por el pez Torpedo y Giuseppe Francesco Gardini¹⁹ había obtenido el salto de la chispa en este pez. Más aún, la expresión "fluidos eléctricos" ya había remplazado la de *spiritus animales* empleada todavía por von Haller. Pero

la doctrina galvanista tuvo una honda repercusión internacional no inferior, según Du Bois-Reymond,¹⁹ a la que causaban los acontecimientos contemporáneos de la Revolución francesa en los círculos políticos. La doctrina mencionada ejerció una influencia provechosa aun en sus opositores.

El fisiólogo boloñés había estudiado asimismo, en 1795, los fenómenos eléctricos propios del pez torpedo.²⁰ Y en una carta de 1797, dirigida al biólogo Lazzaro Spallanzani, catedrático de Historia Natural en el Ateneo pavés, aceptaba la probable existencia de dos clases de electricidad: la animal y la común. De hecho, él pudo demostrar la existencia de corriente eléctrica en animales, sobre todo en los músculos, puesto que la sacudida muscular se obtenía aun cuando se sustituían los metales del circuito entre el nervio y el músculo por un asa de vidrio. En un opúsculo anónimo de 1794²¹ (Figura 3), debido tal vez a su sobrino Giovanni Aldini, se describía un experimento concerniente a las contracciones musculares de ranas sin ninguna intervención de metales. Y debe tenerse presente que sus observaciones experimentales y su doctrina estimularon las investigaciones del físico Volta, las que resultaron provechosas en todos los campos.²²

Electricidad de contacto

La oposición a la doctrina galvánica de la electricidad animal vino de parte del físico Alessandro Volta y, sobre todo, de parte de sus discípulos en la Universidad de Pavia. Volta, originario de Como, había sido invitado allí en noviembre de 1777 para hacerse cargo de una parte del curso de física: electricidad, calórico, propiedades físicas de los gases, etc. Inicialmente él se adhirió con entusiasmo a la doctrina de Galvani e hizo hincapié en el hecho de que la rana preparada por aquél (rana reoscópica) constituía un electrómetro más sensible que los existentes en su época (carta del 3 de abril de 1792 al doctor Baronio), aunque



Figura 2. Luigi Galvani (1737 - 1798).

en esta preparación la corriente eléctrica se valorara en sentido cualitativo más que cuantitativo.²³ Pero más tarde, en sus apuntes de laboratorio, escribió lo siguiente: "A veces me nace la duda de si será cierto que conductores metálicos diferentes o aplicados de manera distinta en dos puntos del animal, cuando se establece una comunicación entre ellos, no hagan otra cosa que ofrecer un camino al fluido eléctrico, que naturalmente tiende a desplazarse de un lugar a otro [...]. Si son solamente pasivos o más bien son agentes positivos, que mueven de su lugar el fluido eléctrico del animal [...]"²⁴ Poco después, el ilustre físico rechazaba definitivamente la doctrina galvanista afirmando que la supuesta electricidad animal detectada por Galvani se debía, en realidad, al simple contacto entre los dos metales del circuito: electricidad de contacto.²⁴ En su opinión, las contracciones musculares de las ranas de Galvani no eran la consecuencia de un desequilibrio ("imbalance") natural de cargas eléctricas entre nervios y músculos, sino que se debían a la fuerza electromotriz engendrada al poner en contacto dos conductores diferentes (nervio y músculo) en un circuito de tres conductores: nervio, músculo y líquido, todos ellos de segunda clase y distintos el uno del otro. Opinará más tarde Laín Entralgo²⁵ que la electricidad detectada por el maestro boloñés bien podría definirse electricidad metálica y no diferir de la ordinaria. Sin embargo, todo esto no permite rechazar la existencia de una verdadera electricidad animal. Atenido fielmente a la doctrina de la electricidad de contacto, Volta inventó la pila eléctrica, hecho que anunciara en una carta del 20 de marzo de 1800 a sir Joseph Banks, entonces presidente de la Royal Society de Londres. Tal carta se leyó en la sesión del 26 de junio de la mencionada sociedad científica.²⁶

Corriente de lesión

La línea que va de Galvani, creador del modelo de la rana reoscópica, a Leopoldo Nobili, perfeccionador en 1825 del galvanómetro inventado en 1811, y a Carlo Matteucci (1811 - 1868), catedrático de física en la Universidad de Pisa, llevó al conocimiento de la verdadera electricidad animal en la forma de corriente de lesión, i.e. la corriente que fluye entre las partes dañadas y las íntegras de un músculo. Matteucci fue el impulsor de los estudios de electrofisiología iniciados por Galvani. Estaba profundamente convencido de que se producían fenómenos eléctricos en los tejidos animales y descubrió, pues, las corrientes de demarcación y de acción.^{27,28} Tal fenómeno será interpretado correctamente por Emil Du Bois-Reymond como una oscilación negativa del potencial de demarcación. Su discípulo Julius Bernstein, inventor del reótomo diferencial,²⁹ pudo asentar en 1871 las bases de la teoría iónica del potencial celular. El concepto de la permeabilidad iónica selectiva de la membrana de la célula, por él formulado, ha sido una de las contribuciones más importantes al conocimiento de la electrofisiología.

Un instrumento satisfactorio para medir las corrientes bioeléctricas fue inventado en 1872 por el físico francés Gabriel Lippmann (1845-1921). Y el fisiólogo Etienne-Jules Marey ideó en 1876 un sistema para fotografiar las variaciones de corriente registradas con el electrómetro capilar. Se obtuvo así un instrumento sensible (Figura 4),

que podía proporcionar registros gráficos de los fenómenos bioeléctricos.³⁰ El fisiólogo inglés Augustus Desiré Waller (1856 - 1922) fue el primero en registrar los fenómenos electrofisiológicos cardíacos en el hombre (1887).³¹ En su primera publicación, llamó electrograma el registro obtenido (Figura 5). Más tarde el holandés Willem Einthoven (1860 - 1927), catedrático en la Universidad de Leiden, planeó y construyó su galvanómetro de cuerda.³²

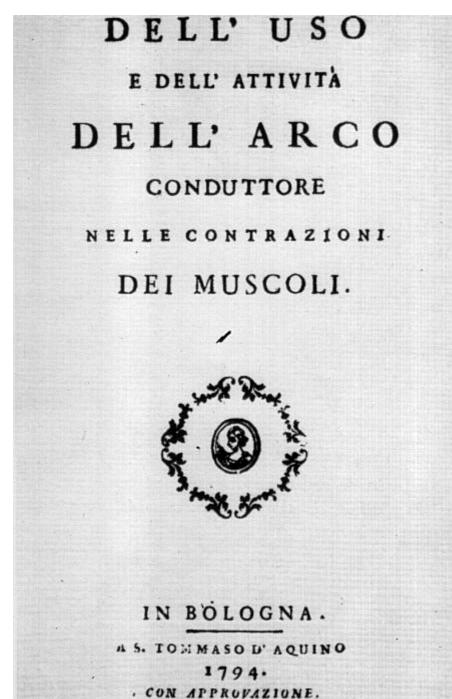


Figura 3. Opúsculo de autor anónimo acerca de la actividad del arco conductor en las contracciones musculares.

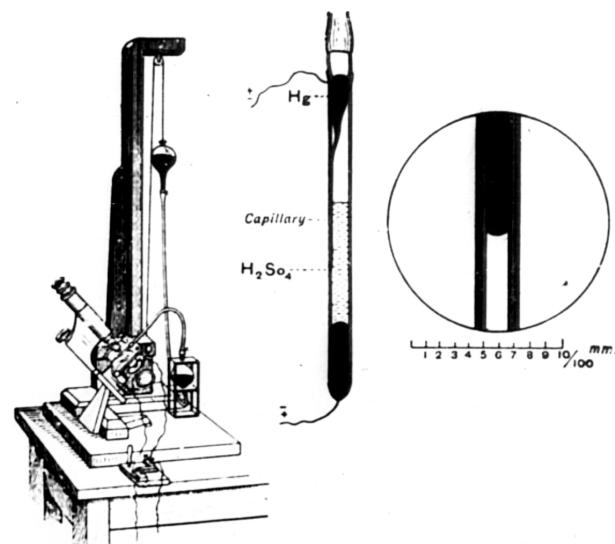


Figura 4. Electrómetro capilar de Gabriel Lippmann (1872).



Figura 5. Antecesores de los registros electrocardiográficos, obtenidos por A. D. Waller en humanos con el electrómetro capilar.

Por estas vías ha sido posible llegar, en el siglo XX, a registrar los potenciales eléctricos de las células constitutivas del sistema específico de excitación-conducción auriculoventricular *in vitro*,^{33,34} en corazón de perro aislado³⁵ e *in situ*³⁶⁻³⁹ y también en corazón humano.⁴⁰⁻⁴² Y pudo definirse el concepto histoelectrofisiológico^{43,44} del endocardio eléctrico. Pueden realizarse así los actuales mapeos endocárdicos y epicárdicos indispensables para el diagnóstico y el tratamiento de las arritmias cardíacas.

Conclusión

Se sabe ahora que existen ambas formas de electricidad: la verdadera electricidad animal y la electricidad común y que la fuerza electromotriz originada en la pila eléctrica se debe no tanto a la electricidad de contacto, sino a los procesos químicos que se desarrollan en ella. Además, como lo demostró Faraday en el siglo XIX, las electricidades de cualquier origen tienen los mismos efectos y, por tanto, deben considerarse idénticas.

Referencias

1. Franklin B. Experiments and observations on the electricity. (Citado en el inventario de la Biblioteca de la Nacional y Pontificia Universidad de México. BNM. Fondo de origen; 1833. MS 6431.
2. Díaz de Gamarra JB. Elementa recentioris philosophiae. México. Impr. Joseph A. de Jauregui, N 479-480; 1774. pp.151.
3. Inventario de la biblioteca de la Nacional y Pontificia Universidad de México. BNM. Fondo de origen, MS 6431; 1833.
4. Priestley J. The history and present state of electricity with original experiments. III Ed. Londres. C. Bathurst. 2 Vols; 1775.
5. Gliozzi M. L'elettrologia fino al Volta. 2 Vols. Nápoles; 1935.
6. Von Haller A. Elementa physiologiae corporis humani. Lausana. S. Allard; 1757 - 1759.
7. Fontana F. Expériences sur les parties irritable et sensibles. En Von Haller A: Mémoires sur les parties sensibles et irritable. Vol. III. Lausana. S. d'Arnat; 1760.
8. Fontana F. Ricerche filosofiche sopra la fisica animale. Florencia; 1775.
9. Fontana F. De irritabilitatis legibus nunc primum sancitis et de spirituum animalium in movendis musculis inefficacia. Lucca. I. Riccomini; 1767.
10. Walsh J. On the electric property of the Torpedo. (En carta dirigida a Benjamín Franklin). Phil Trans 1773;63:461-477.
11. Laghi T. De insensibilitate atque irritabilitate halleriana. De Bononiensi Scientiarum et Artium Instituto atque Academia. Cominentarii. Vol 4, 1757. pp.208-217.
12. Beccaria GB. Dell'elettricismo artificiale e naturale. Turín. Impr. Filippo Antonio Campana, 1755.
13. Herrejón Peredo C, Benito Díaz de Gamarra. A través de su biblioteca. Bol Inst Invest Bibl 1988;2:149-189.
14. Bibliotheca Turriana. BNM. Fondo de origen. MS 38.
15. De Micheli Serra A. Recordando a Luigi Galvani en el bicentenario de su muerte. Gac Med Mex 1999;135:323-328.
16. Galvani A. De viribus electricitatis in motu musculari. Commentarius. Bononiae. Ex Typographia Instituti Scientiarum, 1791.
17. Walker WC. Animal electricity before Galvani. Ann Sci 1937;2:84-113.
18. Mieli A. Volta y el desarrollo de la electricidad. Buenos Aires. Espasa Calpe Argentina; 1944. pp.103.
19. Du Bois Reymond E. Untersuchung über tierische Electricität. Berlin; 1848.
20. Taccuino delle esperienze del Galvani sulla torpedine, fatte a Senigaglia ed a Rimini l'anno 1795 (Gherardi, ed). Memorie dell'Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna. Serie 2. Vol. 9; 1869. pp.172-179.
21. Anónimo. Dell' uso e dell' attività dell arco conduttore nelle contrazioni dei muscoli. Bologna. Tipografía San Tommaso d'Aquino. 1794.
22. Dibner B, Galvani-Volta, A controversy that led to the discovery of useful electricity. Norwalk, Conn. Burndy Library; 1952.
23. Volta A, An account of some discoveries made by M. Galvani with experiments and observations on them. Phil Trans R Soc Lond 1793;83:10-44.
24. Volta A, Opere. Milán. Edizione Nazionale. Ulrico Hoepli, ed 1918-1930. pp.39.
25. Lain Entralgo P. Historia de la Medicina. Barcelona. Salvat Ed; 1978. pp.309.
26. Volta A. op. cit. pp.563.
27. Matteucci C. Sur le courant électrique de la grenouille: second mémoire sur l'électricité animale faisant suite à celui sur la torpille. Ann Chim Phys 1842;6:301.
28. Matteucci C. Sur un phénomène physiologique produit par les muscles en contraction. Ann Chim Phys 1842;6:339.
29. De Micheli A. Breve panorámica de la evolución de la electrovectorcardiografía. Arch Inst Cardiol Mex 1976;46:98-103.
30. De Micheli A. Del de viribus electricitatis... de Galvani a la moderna electrovectorcardiografía. Arch Inst Cardiol Mex 1991;61:7-13.
31. Waller AD. A demonstration on man of electromotive changes accompanying the heart's beat. J Physiol (London) 1887;8:229-234.
32. Einthoven W. Un nouveau galvanomètre. Arch N Sc Ex Nat 1901;6:625.
33. Corabœuf E, Weidmann S. Les potentiels d'action du muscle cardiaque, obtenus à l'aide de microélectrodes intracellulaires. Présence d'une inversion de potentiel. C R Soc Biol (Paris) 1949;143:1360-1361.
34. Méndez R, Pastelín G. Modificaciones farmacológicas de los fenómenos bioeléctricos de los tejidos y células del corazón. Gac Med Mex 1970;100:27-40.
35. Alanís J, González H, López E. The electrical activity of the bundle of His. J Physiol (London) 1958;142: 127-140.
36. Sodi Pallares D, Medrano G A, Bisteni A, et al. The electrograms of the conductive tissue in the normal dog's heart. Am J Cardiol 1959;4:459-463.
37. Medrano G A, Sodi Pallares D, de Micheli A, et al. A study of the potentials of the Purkinje tissue. Am Heart J 1960;60:562-589.
38. Medrano G A, de Micheli A, Sodi Pallares D. Les potentiels des structures spécifiques du cœur et leurs relations chronologiques avec l'électrocardiogramme périphérique chez le chien. Acta Cardiol 1962;17:731-760.
39. Medrano G A, de Micheli A, Sodi Pallares D. Les potentiels des structures spécifiques du cœur et leurs relations chronologiques avec l'électrocardiogramme périphérique chez le chien. Acta Cardiol 1962;17:731-776.

40. Giraud G, Puech P, Latour H, et al. Variations de potentiel liées à l'activité du système de conduction auriculoventriculaire chez l'homme (enregistrement électrocardiographique endocavitaire). *Arch Mal Coeur* 1960;53:757-776.
41. Sherlag BJ, Lau SH, Helfant RH, et al. Catheter technique for recording the bundle activity in man. *Circulation* 1969;39:13-18.
42. Martínez Ríos MA, Paredes A, Cisneros F, et al. Registros aurículo-ventrículos (electrograma de His) en la comunicación interauricular. *Arch Inst Cardiol Mex* 1974;44:592-597.
43. Sodi Pallares D, Medrano GA, de Micheli A, et al. Unipolar QS morphology and Purkinje potential of the free left ventricular wall. The concept of electrical endocardium. *Circulation* 1961;23:836-846.
44. Medrano GA, de Micheli A. Electrocardiographic features in experimental subendocardial infarctions in canine hearts. *J Electrocardiol* 1994;27:263-273.