

Primeras mediciones precisas de la gravedad hechas en México

M. A. Moreno Corral

*Instituto de Astronomía Universidad Nacional Autónoma de México,
Campus Ensenada. Km 103 Carretera Tijuana-Ensenada, 22860 Ensenada, Baja California, México,
e-mail: mam@astrose.unam.mx*

Received 29 January 2014; accepted 2 May 2014

The determination of the local gravity acceleration (g_l) is important in problems such as measuring the flattening of the terrestrial spheroid. Hence serious efforts have been made in the past to measure it with high precision at different points on the planet. This paper shows that in the last third of the nineteenth century, Mexican engineers were interested in measuring accurately that value in our country, particularly in the central region of the nation. The results obtained are discussed.

Descriptores: Historia de la física; gravimetría.

La determinación del valor de la aceleración de la gravedad local (g_l), resulta de importancia en problemas como el de la medición del aplanamiento del esferoide terrestre, de ahí que a lo largo del tiempo se hayan hecho esfuerzos serios por determinarlo con precisión en muy diferentes puntos del planeta. En este trabajo se muestra que en el último tercio del siglo XIX, ingenieros mexicanos se interesaron en medir lo más exactamente posible ese valor en nuestro país, particularmente en el centro de la nación. Se discuten los resultados que obtuvieron.

Keywords: History of physics; gravimetry.

PACS: 01.65.+g; 95.90.+v

1. Introducción

Los primeros estudios modernos del movimiento pendular los realizó Galileo Galilei, quien en 1581 observó que sin importar las condiciones en que un péndulo oscilara, siempre lo hacía con el mismo ritmo. La generalización de esta observación llevó a la ley de isocronía, que establece que *el periodo de oscilación del péndulo es independiente de la masa suspendida y de la amplitud*. Hacia el final de su vida, Galileo vio que esta propiedad podría aplicarse a la medición del tiempo, pues existe un dibujo fechado hacia 1637 y atribuido a su hijo Vincenzo Gamba Galilei, que ilustra la concepción de un mecanismo de escape regulado por un péndulo. Después de Galileo destacan los trabajos de Huygens, quien realizó estudios más completos sobre el movimiento pendular y sus aplicaciones: en 1657 construyó el primer reloj de péndulo operable y en 1673 publicó un importante texto titulado *Horologium Oscillatorium* [1], donde resumió sus investigaciones sobre la materia, entre las que destacan su determinación de la aceleración de la gravedad mediante el uso de un péndulo y su propuesta de utilizar como unidad de longitud, uno que oscilara con un periodo de un segundo [2]. Cuando Newton estableció el concepto de fuerza y lo plasmó en los *Philosophia naturalis principia mathematica*, pudo aplicarlo al estudio del movimiento pendular. En efecto, en la sección VI del Libro II, se ocupó *Del movimiento y resistencia de los cuerpos pendulares*, y en el Libro III, proposiciones XIX y XX, problemas III y IV, lo aplicó al estudio de la forma que debería tener la Tierra, mostrando que un cuerpo en equilibrio sujeto a la gravitación y girando sobre su propio eje, adquiriría estructura de esferoide aplastado por sus polos. Ahí también presentó una tabla de la longitud que un péndulo tendría en diferentes latitudes para oscilar con igual amplitud. Los

principales apoyos a esos cálculos realizados por Newton, fueron las observaciones del astrónomo francés Jean Richer, quien en 1671 observó en la población de Cayena, situada a una latitud de $4^\circ 56'$ al norte del ecuador terrestre, que la oscilación de los péndulos era más lenta que en París, por lo que dedujo que Cayena estaba más alejada del centro terrestre. El físico inglés también citó otras observaciones que mostraban que los relojes de péndulo se movían más lentamente, como por ejemplo las realizadas en la isla de Santa Elena por Edmund Halley en 1677, o las de Varin y Des Hayes y otras más [3].

Como es bien sabido, la visión newtoniana no fue aceptada inmediatamente, sobre todo en los países continentales de Europa, que bajo la influencia francesa siguieron las ideas de Descartes [4]. En particular tocante a la gravedad, consideraban que se generaba por la presión ejercida por los vórtices o torbellinos castersianos, que en la teoría de ese pensador [5], eran los responsables del movimiento de los cuerpos celestes. De acuerdo a esas ideas, Doménico Cassini, pero sobre todo su hijo Jacques, sostenían que el planeta era alargado hacia los polos, pues en base a sus mediciones de los arcos de meridiano entre la capital francesa, Perpignan y Dunkerque, creyeron encontrar pruebas de ello, que el segundo publicó en París 1700 en el *Traité de la grandeur et de la figure de la Terre* [6], situación que condujo a una sonada controversia sobre la verdadera forma de la Tierra. Esta situación en la que se introdujo una fuerte componente nacionalista, hizo que la Academia de Ciencias de Francia organizara dos expediciones para que de manera independiente, midieran con precisión la longitud de los arcos de grado de dos meridianos terrestres. Los sitios seleccionados para hacerlo fueron el norte europeo (Laponia) y América del Sur. Al frente de la primera pusieron a Pierre Louis Maupertuis, asistido por

Alexis Claude Clairaut, quienes contaron con la colaboración del sueco Anders Celsius, mientras que de la segunda se encargaron Pierre Bouguer, Charles Marie de la Condamine y Louis Godin, con los que colaboraron los españoles Antonio de Ulloa y Jorge Juan y Santacilia. Los trabajos en Laponia se desarrollaron alrededor del círculo polar ártico, mientras que los que se hicieron en Quito se realizaron cerca del ecuador. Para lograr buenos resultados, ambos grupos usaron las mismas técnicas, entre las que se encontraba la determinación experimental de la aceleración de la gravedad mediante péndulos. Las mediciones fueron hechas entre 1736 y 1744 y los resultados los publicó Maupertuis en 1738 en *La figure de la Terre*, mientras que La Condamine hizo lo mismo en 1749 en otra publicación con el mismo título. El resultado final mostró que el $R_{\text{ecuatorial}}$ resultó igual a 6397300 metros, mientras que el R_{polar} tuvo un valor de 6363806 metros, que significa que hay un abultamiento de la Tierra en el ecuador, o lo que es lo mismo, que nuestro planeta está achatado en las regiones polares, lo que mostró que la predicción de Newton era la correcta.

En el prólogo de su libro *Observaciones astronómicas y físicas de las cuales se deduce la figura y magnitud de la Tierra*, los expedicionarios españoles puntualizaron la importancia que tuvieron aquellos trabajos, escribiendo que “El principal fin del viaje, fue averiguar el verdadero valor de un grado terrestre sobre el ecuador, para que cotejado éste con el que resultase tener el grado que habían que medir los astrónomos enviados para ello al norte, se infiriese sin duda de uno y otro, la figura de la Tierra, y además de su utilidad, se decidiese de una vez, con tan ilustres experiencias, esta ruidosa cuestión que ha agitado a todos los matemáticos y aun a las naciones enteras por casi un siglo” [7].

2. La gravedad en el México Ilustrado

Ciertamente las ideas sobre la aceleración de la gravedad se conocieron en la Nueva España durante la segunda mitad del siglo XVIII. Además de indicios diversos dispersos en la literatura, existen al menos tres documentos mexicanos de esa época, que se ocuparon con amplitud del tema; los *Elementa recentioris philosophia* de Benito Díaz de Gamarra [8], la *Exposición de los elementos de Newton* de Pedro Moncada de Aragón [9], y el *De Mathematicis Elementis ac Naturali Philosophia Propositiones* de Emmanuel de Araujo [10]. De ellos, el primero fue escrito como texto para estudiantes de nivel bachillerato y universitario y se sabe que se utilizó por los alumnos del Colegio Oratoriano de San Miguel Allende y posiblemente por algunos de los cursantes de la Real y Pontificia Universidad de México [11], así que tuvo cierta difusión. El segundo quedó manuscrito hasta fecha muy reciente y fue concebido como un documento personal [12], mientras que el último, que se presentó como tesis en aquella universidad, fue escrito en latín y la única hoja que de él se conoce, muestra que sirvió para hacer una amplia discusión sobre la Ley de Gravitación Universal y sus consecuencias.

Cuando eso ocurría, el texto citado de Jorge Juan y Antonio de Ulloa era una obra bien conocida en la Nueva España, pues se sabe con certeza que formó parte de varias bibliotecas, entre las que se encontraban las de algunos novohispanos que al finalizar el siglo XVIII, destacaron en el estudio y aplicación de las ciencias exactas como Antonio León y Gama [13] e Ignacio Bartolache [14]. El ejemplar que perteneció a otro de aquellos personajes; Joaquín Velázquez de León, quien citó esa obra explícitamente en su trabajo sobre la *Elevación extraordinaria del suelo de este Valle de México* [15], ha llegado hasta el presente y se encuentra en la antigua biblioteca del Palacio de Minería de la Ciudad de México. Para el tema aquí tratado, de la obra de aquellos científicos peninsulares debe destacarse el Libro VIII, que trata *De las experiencias del Péndulo simple y conclusión de la figura de la Tierra*, donde mostraron con detalle cómo aplicar el movimiento pendular para estudios geodésicos, dando la formulación matemática correspondiente, además de presentar dibujos detallados de un péndulo de precisión utilizado para ese tipo de mediciones. Sin duda personajes como Velázquez de León conocieron no solamente ese trabajo, sino también los otros escritos publicados por los franceses sobre la forma de la Tierra, ya que también los mencionó cuando investigó la geografía de aquel valle, pues utilizó las técnicas de la geodesia y los aparatos que esa ciencia estaba desarrollando.

3. Un primer experimento

Aunque los cursos de física newtoniana comenzaron a impartirse en México en forma regular en 1792 en el Real Seminario de Minería [16], y de que continuaron durante el siglo XIX en diversas instituciones como el Colegio Militar, la Escuela de Ingenieros, la Nacional Preparatoria y algunos Institutos Científicos y Literarios fundados en la provincia [17], no hay constancia de que el movimiento pendular haya sido aplicado. Ello a pesar de que existen textos escritos en el país durante ese periodo, como el de *Introducción a la Física* de Ladislao de la Pascua [18], que trataban el tema. Fue hasta 1880, cuando dos ingenieros mexicanos publicaron en la capital del país su *Determinación de la longitud del péndulo de segundos y de la gravedad en México* [19], donde en forma experimental determinaron su valor. Al comenzar dicha obra, Francisco Jiménez que fue el autor principal, expresó su extrañeza de que no se hubiera determinado esa cantidad con anterioridad en nuestra nación. Sobre el particular escribió: “No obstante la importancia de la determinación de la longitud del péndulo de segundos, ninguna observación se conoce hecha en nuestro país con ese objeto, al menos que yo tenga noticia, pues aunque en 1865 se hicieron las primeras en la Escuela de Minas, para lo que se invitó un escogido concurso, ninguno de los que tuvimos la honra de asistir hemos visto publicado el resultado, que sería de tanto más interés cuanto que el péndulo de experimentación que se adoptó tenía una longitud de más de 12 metros, poco común en los péndulos destinados a esa clase de experiencias”.

En efecto, fue el profesor Próspero Goyzueta, catedrático de la Escuela Imperial de Minas (antiguo Colegio de Minería de la Ciudad de México), quien en octubre de 1865 utilizó un péndulo simple de grandes dimensiones, para determinar el valor de la aceleración de la gravedad [20]. Para medirla, suspendió de lo alto de la bóveda del laboratorio, un alambre de acero con longitud de 12.0 metros, que en su extremo inferior sostenía una granada rellena de munición de plomo que pesaba 15 kilogramos. El péndulo en reposo tocaba ligeramente la superficie de mercurio contenido en una vasija, localizada exactamente en la vertical y abajo del cuerpo oscilante, lo que permitía cerrar un circuito eléctrico cada oscilación, lo que a su vez activaba un sonador Morse. El número de oscilaciones que ocurrían a lo largo de 15 minutos, se determinaba con otro péndulo menor que se hallaba conectado a un registrador telegráfico Morse. Después de varias series de mediciones, Goyzueta estableció que el valor de la aceleración de la gravedad g , era de $9.8037069 \text{ m/seg}^2$

4. Los personajes

Por su actividad científica y técnica realizada durante varias décadas del siglo XIX, el ingeniero Francisco Jiménez (1824-1881) fue un personaje notable de nuestro país [21]. Ingresó muy joven al Colegio Militar y a los 19 años formó parte del Cuerpo de Ingenieros. En 1846 con el grado de capitán de ingenieros, participó en la batalla del Castillo de Chapultepec, donde fue hecho prisionero. Firmado el armisticio, se hizo necesario marcar *in situ* la nueva frontera entre México y los Estados Unidos. Para ese fin, el Senado de la República formó la Comisión de Límites Mexicana, encargando a sus miembros fijar con precisión la posición de las mojonearas que marcarían la línea divisoria plasmada en el Tratado de Guadalupe Hidalgo. Para realizar aquella labor, tuvieron que hacer cientos de observaciones astronómicas del Sol, la Luna y de estrellas brillantes [22], pues en ese entonces era la única forma confiable de establecer la latitud y longitud de cualquier punto de la superficie terrestre. Gran parte de ese trabajo recayó sobre Jiménez, quien fue nombrado Ingeniero de Primera Clase de esa comisión [23].

Tras enfrentar grandes penurias e invertir varios años en esos trabajos, Jiménez cumplió aquellas funciones y regresó a la capital del país, donde se hizo cargo de la cátedra de Mecánica Racional y Aplicada del Colegio Militar. Puesto que en aquellas fechas comenzó a surgir entre algunas autoridades del país interés por los estudios geodésicos, se le pidió a Jiménez participar en los trabajos de elaboración de la Carta General de la República, pero también desarrolló diversos proyectos del Ministerio de Fomento, como la determinación de las posiciones geográficas exactas de varias poblaciones y el trazo de caminos. En 1872 se le nombró profesor de la cátedra de Geodesia y Astronomía de aquel instituto castrense.

Con motivo del tránsito de Venus por el disco del Sol, que ocurriría el 9 de diciembre de 1874, fenómeno astronómico que sería visible en una extensa zona de Asia y del Océano Pacífico, Jiménez formó parte de la Comisión Astronómica Mexicana que viajó a Japón a observar ese suceso [24]. Se encargó de instalar y usar uno de los dos observatorios que los mexicanos tuvieron en aquel país. Las observaciones que realizaron fueron exitosas. A su regreso, tras más de un año de ausencia, las autoridades del Colegio Militar le encomendaron en 1877 que impartiera la cátedra de Náutica a los alumnos de esa institución que formarían la oficialidad de la Marina de Guerra Mexicana. Además, el Ministerio de Fomento lo nombró Inspector de Caminos y poco después, el general Vicente Riva Palacio, encargado de esa Secretaría, lo designó director del Observatorio Astronómico Central, que por pocos años estuvo instalado en lo alto del Palacio Nacional [25]. Al frente de esta institución realizó una importante labor de observación, encaminada sobre todo a establecer patrones de referencia temporales y de posición, que apoyaran la labor geodésica y cartográfica que entonces se realizaba a lo largo y ancho del país.

Su obra escrita fue abundante, pues comprende reportes, memorias, observaciones astronómicas, notas de clase, mapas, planos y traducciones del inglés, que vieron la luz en diversas publicaciones mexicanas. Todas ellas se refieren a aspectos relativos al campo de las ciencias exactas. Uno de esos trabajos es el que aquí se comenta [19]. En él, Jiménez, que fue el autor principal, midió, asistido por Leandro Fernández, el valor de la aceleración de la gravedad con gran exactitud. Lo hizo como parte del proceso de obtención de diversos patrones de referencia, necesarios en las distintas labores de exploración del territorio nacional, convencido de que debían determinarse experimentalmente, tal y como expresó años antes al ministro de Fomento, a quien le escribió que “al presentar a usted la Memoria relativa al establecimiento del Observatorio creado por su iniciativa y aprobado por el primer Magistrado de la República, le manifesté mi intención de ocuparme en hacer las observaciones necesarias para determinar la longitud del péndulo de segundos y el valor de la gravedad, elementos de que se hace un uso frecuente en las aplicaciones de las ciencias y que solo conocíamos por deducciones de fórmulas teórica”. Los experimentos para tal fin, los realizaron Jiménez y Fernández en el centro político del país; en el Palacio Nacional, que en ese tiempo tenía en su azotea el Observatorio Astronómico Central.

Por su parte, el ingeniero Leandro Fernández (1851-1921) destacó desde su época de estudiante. En la Escuela Nacional de Ingenieros se graduó como Ingeniero Civil, Ingeniero Topógrafo e Ingeniero Geógrafo. Fue alumno y asistente de Jiménez. Gran parte de los cálculos necesarios para la elaboración del texto que aquí nos ocupa, los realizó Fernández bajo la supervisión de su maestro, a quien sucedió como director del Observatorio de Palacio a la muerte de aquel. Posteriormente ocupó la dirección de la Escuela de Ingenieros durante varias ocasiones. A él se debió en uno de esos periodos la creación de la carrera de Ingeniero Electricista.

5. Los péndulos utilizados

En 1817 el inglés Henry Kater inventó el péndulo recíproco, con el objeto específico de medir el valor de la aceleración de la gravedad localmente, lo que hizo de ese instrumento un aparato de gran aplicación en trabajos geodésicos. En esencia es un péndulo reversible, formado por una barra metálica rígida con dos soportes en forma de cuchilla, que funcionan como ejes de suspensión y permiten que el péndulo pueda oscilar sobre cualquiera de ellas. Tiene la propiedad de que

esos soportes o centros de suspensión y de oscilación son recíprocos, por lo que si se suspende de cualquiera de ellos, sus oscilaciones son isócronas. Una ventaja de este dispositivo sobre los péndulos tradicionales, es que no se necesita determinar previamente su centro de masa.

Interesados en obtener gran precisión en sus determinaciones del valor de g , Jiménez y Fernández utilizaron dos péndulos recíprocos de Kater; uno de la compañía de Jules Salleron y el otro de la de Noel-Jean Lerebours, ambas fabricas parisinas de instrumentos científicos de reconocido pres-

<i>RESULTADOS de las observaciones hechas con el péndulo de Kater (construcción de Salleron) para obtener la longitud del péndulo de segundos sexagesimales de tiempo medio, en el Observatorio Astro-nómico Central, á 2283^m sobre el nivel del mar.</i>				
PRIMER GRUPO.				
FECHAS	Número de órden de las series	Número de los pares de cada serie	Valor de una oscilación en tiempo medio t	Longitud del péndulo de segundos x
<i>1878.</i>				
Noviembre 12...	1 ^a serie.	1 ^{er} par.	1 ^s 00492	0 ^m 99184
„ 25...	2 ^a serie.	2 ^o par.	1.00521	0.99127
„ 27...	2 ^a serie.	3 ^{er} par.	1.00504	0.99160
„ 29...	2 ^a serie.	4 ^o par.	1.00576	0.99018
„ 30...	1 ^a serie.	5 ^o par.	1.00536	0.99097
Diciembre 4...	1 ^a serie.	6 ^o par.	1.00574	0.99022
„ 7...	2 ^a serie.	7 ^o par.	1.00551	0.99068
„ 17...	2 ^a serie.	8 ^o par.	1.00567	0.99036
„ 19...	1 ^a serie.	9 ^o par.	1.00518	0.99132
„ 20...	2 ^a serie.	10 ^o par.	1.00517	0.99135
„ 23...	2 ^a serie.	11 ^o par.	1.00541	0.99087
„ 24...	1 ^a serie.	12 ^o par.	1.00551	0.99068
<i>1879.</i>				
Enero 10.....	3 ^a serie.	13 ^o par.	1.00515	0.99138
„ 13.....	4 ^a serie.	14 ^o par.	1.00488	0.99191
„ 15.....	3 ^a serie.	15 ^o par.	1.00528	0.99113
„ 17.....	4 ^a serie.	16 ^o par.	1.00561	0.99048
Promedio discutido.....			1.00529	0.99111

FIGURA 1. Ejemplo de los datos obtenidos por Jiménez y Fernández.

tigio durante el siglo XIX. A diferencia del gran péndulo que construyó y usó Goyzueta, éstos eran pequeños, pues el largo total de la barra metálica fue de 237 cm, mientras que el contrapeso de los péndulos estaba formado por un cilindro aplanado con radio de 5.25 cm, que podía desmontarse fácilmente para colocarlo en la posición adecuada al invertir el dispositivo. Esas características hacía que además de ser portátiles, sencillos de justar y manejar, permitieran realizar gran número de mediciones en tiempos razonables.

6. El experimento

Todos los ajustes y mediciones utilizadas por Jiménez y Fernández para determinar el valor de la gravedad, las hicieron entre 1878 y 1879, en uno de los salones del Observatorio Astronómico Central, que ocupaba varias habitaciones en la azotea del Palacio Nacional.

A partir de la ecuación clásica para el periodo de oscilación de un péndulo simple, dada por $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$, dedujeron las fórmulas aplicables al caso de un péndulo físico como el de Kater. En la sección *Métodos y fórmulas de reducción de las experiencias* del texto que aquí nos ocupa, sus autores desarrollaron el formulismo matemático necesario para tratar con un péndulo real y no con la idealización que considera masas puntuales, cuerdas inextensibles y sin fricción en el sistema, pues ahí escribieron que en “la naturaleza no puede haber sino péndulos compuestos, es decir, un peso o sistema de pesos unidos a una varilla inflexible, que oscila bajo un eje de suspensión”. Como la intención de este artículo es dar

a conocer los resultados obtenidos por Jiménez y Fernández para el valor de g, no entraremos en los detalles matemáticos de su experimento, refiriendo al lector interesado en ellos a la publicación original citada en [19].

Para aumentar la precisión en la medida de las amplitudes, consideraron no una sólo oscilación, sino un número N de ellas. Con todo listo, y cuidando realizar las medidas cuando en el Observatorio no había nadie más que los que las hacían, comenzaron la primera serie de determinaciones de la amplitud el 12 de noviembre de 1878, y utilizaron solamente el péndulo construido por Salleron. Para evitar variaciones debidas a cambios atmosféricos, los experimentos se realizaron por las mañadas de días claros y serenos. Cada par de medidas fueron hechas una a continuación de la otra. Al péndulo se le hacía oscilar un día con la cara hacia el observador y al siguiente volteado 180°. En cada una de esa ocasiones con el contrapeso alternativamente arriba y abajo. Los días en que se midió la primera serie fueron el 12, 25, 27, 29 y 30 de noviembre y 4, 7, 17, 19, 20, 23, 24 de diciembre, además, también midieron el 10, 15, y 17 de enero de 1879.

Los resultados que obtuvieron en esa primera etapa, los consignaron en una tabla, de donde hemos sacado que la amplitud de oscilación se mantuvo siempre menor a los 2° 28' 49", ciertamente cumpliendo con el criterio para mantener el isocronismo establecido por la relación matemática $\text{sen } \theta \sim \theta$. El número de oscilaciones consideradas fue en promedio de 1790 y el tiempo en que ellas tenían lugar del orden de 30 minutos, por lo que el valor medio de una oscilación resultó ser de 1.00529 minutos.

Datos de las observaciones hechas con el péndulo de Kater, construcción de Lerebours, que constituyen el SEGUNDO GRUPO.

Fechas	Número de órden de las series.	Posición del nonius respecto del observador.	Número de los pares.	Posición del contrapeso.	Semiampplitud de la 1ª oscilación. θ_1	Semiampplitud de la última oscilación. θ_n	Número de oscilaciones. N'	Barómetro reducido a 0°. b	Termómetro centígrado al aire libre péndulo. τ	Termómetro centígrado del péndulo. μ	Tiempo medio en que se han contado las N' oscilaciones. T
1879.											
Marzo 25	1ª	Nonius hacia el observador	19	Contrapeso arriba	2°40'49"	0°59'50"	1792	0m5863	22°0	22°6	30m00s318
Id. 26	2ª	Nonius hacia el muro	29	abajo	2.53.35	1.40.25	1972	0.5862	22.5	23.6	33.01.682
Id. 29	1ª	Nonius hacia el observador	39	arriba	3.00.37	1.40.25	1870	0.5860	21.2	21.0	31.19.002
Id. 31	2ª	Nonius hacia el muro	49	abajo	2.36.07	0.46.18	1792	0.5857	21.2	21.6	29.59.778
Abril 1º	1ª	Nonius hacia el observador	59	arriba	2.35.36	0.58.48	1792	0.5878	20.8	20.9	30.00.027
Id. 2	2ª	Nonius hacia el muro	69	abajo	2.41.20	1.39.23	1792	0.5871	21.7	22.6	30.00.095
Id. 3	1ª	Nonius hacia el observador	79	arriba	2.36.39	1.47.42	1792	0.5856	21.6	21.6	30.00.824
Id. 4	2ª	Nonius hacia el muro	89	abajo	2.38.44	0.55.56	1794	0.5854	22.7	23.1	30.01.752
Id. 5	1ª	Nonius hacia el observador	99	arriba	2.35.05	1.00.52	1792	0.5847	21.8	22.4	30.00.355
Id. 14	2ª	Nonius hacia el muro	109	abajo	2.23.06	1.31.34	1792	0.5845	22.8	24.0	30.00.385
					2.35.36	1.32.06	1792	0.5863	21.1	20.8	30.00.330
					2.23.06	0.51.30	1792	0.5852	22.1	22.9	30.00.050
					2.30.24	0.56.42	1792	0.5855	22.7	23.3	29.59.746
					2.18.56	1.25.51	1792	0.5854	23.4	24.6	30.00.414
					2.23.22	1.24.48	1792	0.5861	22.3	23.4	30.00.515
					2.30.24	0.44.13	1792	0.5858	23.3	24.0	30.00.086
					2.35.36	0.50.28	1792	0.5867	20.6	20.6	30.00.109
					2.33.01	1.27.56	1852	0.5864	21.7	22.3	31.00.724
					2.42.54	1.41.43	1792	0.5849	21.2	21.8	30.00.814
					2.33.31	0.56.42	1792	0.5848	22.2	23.3	29.59.806

Longitud del péndulo, distancia entre los cuchillos a 0° L=1m000675.
Coeficiente de dilatación=0.0001879.
Densidad del péndulo=8.395.

FIGURA 2. Datos obtenidos por Jiménez y Fernández en 1879.

Entre marzo y abril de 1879 realizaron un segundo grupo de observaciones, pero en esa ocasión utilizaron el péndulo construido por Lerebours. Los datos que obtuvieron los consignaron en una nueva tabla, que aunque muestra variaciones en temperatura de entre cuatro y cinco grados centígrados por arriba de los valores medidos durante el invierno, no tiene diferencias significativas en lo tocante al tiempo y número de oscilaciones registradas. En ambas temporadas la longitud del péndulo correspondiente se mantuvo prácticamente igual, pues para el primer grupo fue de 1.001623 metros, mientras que para el segundo resultó ser 1.0000675.

La Tabla de la Fig. 1, que fue tomada del trabajo original, muestra los resultados de las mediciones hechas con el péndulo construido por Salleron para determinar la longitud de éste, mientras que la Fig. 2 da información de los parámetros que nuestros personajes obtuvieron en sus experimentos con el péndulo fabricado por Lerebours.

Finalmente entre abril y mayo de aquel año, realizaron un tercer grupo de medidas, volviendo a utilizar el péndulo construido por Salleron. En aquella ocasión obtuvieron una longitud para ese péndulo de 0.99087 metros. Los resultados también los publicaron en una tabla, que muestra que en lo esencial los parámetros significativos no tuvieron cambios de importancia. Con toda la información generada durante las tres temporadas de experimentación, obtuvieron los promedios correspondientes y analizaron sus errores probables. Determinaron un valor para la longitud del péndulo $L = 0.99109 \pm 0.00007$ metros, con el que finalmente calcularon el valor de la aceleración de la gravedad, que resultó ser $g = 9.7816 \text{ m/seg}^2$. Jiménez y Fernández hicieron notar que este valor tenía precisión hasta la quinta cifra decimal. Para concluir su trabajo y hacerlo útil en las labores geodésicas que entonces comenzaban a realizarse en todo el mundo, indicaron la posición exacta del lugar del Observatorio donde hicieron sus medidas, que tuvo las siguientes coordenadas geográficas: latitud = $19^\circ 26' 0.73''$ N y longitud oeste de meridiano de Greenwich = $6^{\text{h}} 36^{\text{m}} 26^{\text{s}}.67$, con una altura sobre el nivel medio del mar de 2283 metros, que según esos autores, correspondía al segundo piso del Palacio Nacional.

7. Comentarios

Tanto Goyzueta como Jiménez expresaron su extrañeza porque en el tiempo en que realizaron sus experimentos, no existían en México determinaciones precisas del valor de la aceleración de la gravedad, ya que para aquellas fechas era común utilizarlo en los trabajos geodésicos. Sin duda, las mediciones hechas por nuestros connacionales se enmarcaron dentro del gran esfuerzo que entonces se hacía en muy di-

versas partes del mundo por obtener valores experimentales de g . Por ejemplo, en 1877 Joaquín María Barraquer, usando un péndulo de Bessel, determinó el valor de g para Madrid, España [26].

Otro hecho que hay que resaltar, es que los experimentos de Jiménez y Fernández, se enmarcaron dentro de un esfuerzo mayor que entonces se hacía en México para conocer y aprovechar las características y recursos del país, cuyas manifestaciones más visibles fueron la construcción de una cartografía confiable de la nación. También aquellas mediciones, allanaron el camino a trabajos de colaboración internacional en gravimetría, en los que con la certeza de los datos adquiridos, el país se comprometió poco después. En efecto, en 1898 México acordó bajo la dirección del ingeniero Ángel Anguiano, primer director del Observatorio Astronómico Nacional, medir el arco de meridiano de 98° al oeste de Greenwich, que cruza gran parte de nuestro país. Para cumplir ese compromiso nuestros ingenieros realizaron trabajos de triangulación, nivelación de precisión y medición de la intensidad de la gravedad en una extensión de aproximadamente 1200 km.

Ese y otros proyectos similares, habrían de converger en la creación de la Comisión Geodésica Mexicana en 1886 [27], que poco después se transformaría en el Instituto Geológico de México. Es importante hacer notar que uno de los puntos más importantes en la agenda de aquella comisión, fue la determinación de la aceleración de la gravedad a lo largo y ancho del territorio nacional, buscando contribuir al esfuerzo internacional por determinar de manera detallada la forma verdadera de la Tierra.

Concluiremos este trabajo haciendo mención de que en la actualidad, cualquier estudiante de los primeros cursos de física ha podido comprobar en el laboratorio la isocronía del péndulo y en particular que el rango de aplicabilidad de esa ley, está sujeto a que el ángulo de oscilación sea pequeño; esto es, que se cumpla que $\sin \theta \sim \theta$, sin embargo la mayoría de ellos no tienen conciencia de la importancia que los péndulos tuvieron para sanjar de manera definitiva la controversia sobre la forma que tiene la Tierra, que en el fondo se originó por las concepciones newtoniana y cartesiana sobre la gravedad, ni que la comprobación experimental fue la que mostró que la teoría de Newton era la correcta, abriendo de esa forma nuevos e importantes desarrollos de la física.

Agradecimientos

Agradezco la lectura que hizo el Dr. Carlos Chavarría-K del manuscrito, así como sus valiosos comentarios. Igualmente se agradecen los de un árbitro anónimo, que sin duda permitieron mejorar este trabajo.

1. C. Huygens, *Horologium oscillatorium sive de motu pendulorum ad horologia aptato demonstrationes geometricae*. (París, 1673).
2. E. Mach, *Desarrollo histórico crítico de la Mecánica* (Espasa-Calpe Argentina. Buenos Aires, 1949).
3. I. Newton, *Principios matemáticos de filosofía natural* (2), página 655. (Alianza Editorial. Madrid, 1987).
4. S. Hacyan, *Bol. Soc. Mex. Fis* **6-2** (1992) 64-66.
5. R. Descartes, *Principios de la filosofía*. (Biblioteca de los grandes pensadores. Barcelona, 2002).
6. M. Terrall, *The Man Who Flattened the Earth*. (The University of Chicago Press. Chicago, 2002).
7. Juan y Santacilia, A. J. y Ulloa de, *Observaciones Astronómicas y Phisicas hechas de orden de A. Mag. en los Reynos del Perú*. (Madrid, 1748).
8. Díaz de Gamarra y J. B. Dábalos, *Elementa recentioris philosophiae*. México, 1774. Hay traducciones modernas al español de esta obra, hechas por Bernabé Navarro (UNAM. México, 1984) y por Carmen Robira y Carolina Ponce (UNAM. México, 1998).
9. P. Moncada de Aragón Branciforte, *Exposición de los elementos de Newton*. México, 1791. Existe versión moderna publicada por la Universidad Iberoamericana, con estudio preliminar de María Eugenia Ponce Alcocer. (México, 2006).
10. E. Araujo, *De mathematicis Elementis ac Naturali Philosophia propotiones*. (México, 1791).
11. M. A. Moreno Corral, *Rev. Mex. Fis. E* **52** (2006) 104-110.
12. M. A. Moreno Corral, *Bol. Soc. Mex. Fis.* **25-3** (2011) 202.
13. R. Moreno, “La biblioteca de Antonio de León y Gama”. En: *Ensayos de bibliografía mexicana*. (UNAM. México, 1989).
14. R. Sánchez Flores, “José Ignacio Bartolache. El sabio humanista a través de sus bienes, sus libros e instrumentos de trabajo”. (Bol. Archivo General de la Nación, T. XIII, 187-216, 1972-1976. México).
15. J. Velázquez de León, “Elevación extraordinaria del suelo de este Valle de México sobre el nivel del mar”. En: Moreno, R. *Joaquín Velázquez de León y sus trabajos científicos sobre el Valle de México*. (UNAM. México, 1977).
16. C. Díaz y de Ovando, *Los veneros de la ciencia mexicana*. (T. I. Facultad de Ingeniería. UNAM. México, 1998).
17. M. de la P. Ramos Lara, *Historia de la Física en México en el siglo XIX: los casos del Colegio de Minería y la Escuela Nacional de Ingenieros*. (Tesis doctoral, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México, 1996).
18. L. Pascua de la, *Introducción al estudio de la Física*. (Imprenta de M. Munguía y Comp. México, 1853).
19. F. Jiménez, y L. Fernández, *Determinación de la longitud del péndulo de segundos y de la gravedad en México, a 2283^m sobre el nivel del mar*. (Imprenta de Francisco Díaz de León. México, 1880).
20. M. Medina, “La gravimetría en México”. *Revista de la Sociedad de Estudios Astronómicos y Geofísicos*. Segunda época, tomo IV, Núm. 1, 15-23, Octubre 1937.
21. L. M. O. Tamayo Pérez, “José Salazar Iarregui, personaje central de la Comisión de Límites Mexicana, 1849-1857, y dos de sus colaboradores: Francisco Jiménez y Agustín Díaz”. En: *Del estamento ocupacional a la comunidad científica*. (María Luisa Rodríguez-Sala coordinadora. UNAM. México, 2004).
22. M. E. Lara Andrade, “Astronomía en Baja California en el siglo XIX”. En: *La Astronomía en México en el siglo XIX*. (María de la Paz Ramos y Marco Arturo Moreno Corral coordinadores. UNAM. México, 2010).
23. J. Salazar Ylarregui, *Datos de los trabajos astronómicos y topográficos, dispuestos en forma de diario*. (Imprenta de Juan R. Navarro. México, 1850).
24. M. A. Moreno Corral, *Odisea 1874 o primer viaje internacional de científicos mexicanos*. (La ciencia para todos/15. Fondo de Cultura Económica. México, 2001).
25. M. A. Moreno Corral, “El Observatorio Astronómico Central: datos para su historia”. En: *La Astronomía en México en el siglo XIX*. María de la Paz Ramos y Marco Arturo Moreno Corral coordinadores. (UNAM. México, 2010).
26. E. Rodríguez Pujol, “Medidas gravimétricas en Madrid y en España”. (Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid. 2005).
27. Z. Cserna de, “La evolución de la geología en México (1500-1929)” (Univ. Nal. Autón. México, Inst. de Geología, Revista), **9** (1990) 1-20.