

JOSÉ MARIANO VALLEJO Y ORTEGA,
UN MATEMÁTICO DE ALBUÑUELAS
QUE ESTUDIÓ LA FIGURA DE LA
TIERRA

José Mariano Vallejo y Ortega (1779-1846), un matemático de Albuñuelas que estudió la figura de la Tierra

Mario Ruiz Morales

Real Sociedad Geográfica

José Mariano Vallejo y Ortega nació en Albuñuelas, al Oeste del Valle de Lecrín, cursando allí sus primeros estudios. En el año 1794 se matriculó en la Universidad de Granada para graduarse en Filosofía, trasladándose a Madrid una vez conseguido el grado. Pronto se acrecienta su interés por las matemáticas, primero como alumno de la Real Academia de San Fernando y luego como catedrático de matemáticas del Seminario de Nobles de Madrid (1802), una prolongación del Colegio Imperial de los Jesuitas. Allí iría recopilando información suficiente para redactar sus dos obras matemáticas fundamentales: *Tratado elemental de Matemáticas* (Mallorca 1812) y *Compendio de matemáticas puras y mistas*, una excelente publicación, en dos tomos, varias veces reeditada, que apareció por vez primera en Valencia (1819) y que fue influenciada por la de Benito Bails. Su prestigio se consolidó definitivamente como miembro de la Academia de Ciencias de Barcelona (1813), de la Academia de Ciencias Naturales de Madrid (1834) y como profesor de geodesia en la Real Academia de San Fernando.

La importancia de su obra matemática se evidencia por las variadas monografías que han dedicado los especialistas en la materia a algunas de sus aportaciones más singulares. En cambio es menos conocida su contribución geodésica, asimismo recogida en su *Compendio*, debiendo destacar el capítulo que dedica a la geometría práctica en el tomo primero; evidenciando así unos conocimientos topográficos sólidos, plasmados en los diferentes planos que confeccionó y en otros trabajos, como la nivelación de los alrededores de Madrid, la medida del perímetro de la corte y la altura de los puentes de Segovia y Toledo. En el segundo tomo hay un capítulo dedicado a la astronomía realmente extenso,

describiendo con rigor el estado del conocimiento en su tiempo, al que nos volveremos a referir un poco más adelante.

Vallejo era el prototipo del científico ilustrado que no vivía al margen de la sociedad de su tiempo, así ha de entenderse su participación como representante de Granada en las Cortes Constituyentes de Cádiz (1813. Miembro de la Comisión de Agricultura). Dirigió también el Gabinete Geográfico que había creado Tomás López (1795), por encargo de Godoy. Con la caída del régimen constitucional este científico granadino tuvo que exiliarse en 1823, primero al Norte de España y después a varios países europeos, aprovechando la circunstancia para contactar con los más eminentes matemáticos de su época: Cauchy, Fourier, Laplace y Legendre, entre otros; los cuales reconocieron el valor de sus investigaciones científicas. De hecho, Valson (biógrafo de Cauchy), cita a Vallejo como uno de los que asistían a las conferencias de ese ingeniero francés, situándolo a igual altura que autores tan renombrados como Dirichlet y Ostogradsky. A su regreso del exilio, en 1829, se preocupó Vallejo de la reconstrucción física y moral del país, prestando especial atención a la educación general y al fomento de la lectura, para intentar luchar contra un analfabetismo que era la principal barrera contra la difusión de la cultura. En el año 1843 fue nombrado Senador vitalicio.

En la obra matemática de este granadino ilustre destaca, por su eminente carácter didáctico, el ya citado Compendio de Matemáticas. Dentro de él incluyó el capítulo astronómico, antes referido, que ocupaba las páginas comprendidas entre las 348 y 417, ambas inclusive, de la cuarta edición (Madrid.1840). Uno de sus apartados, el titulado *De la Tierra considerada astronómicamente*, es de claro contenido geodésico, fijándose en él las dimensiones del planeta en estos términos: « ...el esferoide que más concuerda con todas las medidas, es aquel en que el eje mayor de la Tierra, o sea el diámetro del ecuador, es de 15254598 varas¹, y el eje menor, esto es, la distancia que hay de polo a polo, es de 15209063 varas...Como la diferencia entre los ejes del elipsoide terrestre es solo 45535 varas...si dividimos estas 45535 varas por el diámetro del ecuador,

¹ Usando la equivalencia métrica de la vara castellana (0^m.835) resultarían los valores siguientes para los dos ejes del elipsoide de revolución: eje mayor ≈12737.58933 km, eje menor ≈ 12699.56761 km.

que es 15254598 varas, tendremos que 45535/152598 es lo que se llama el aplanamiento del elipsoide terrestre. Simplificando esta expresión dividiendo ambos términos por el numerador resulta 1/335, que es una expresión más sencilla del expresado aplanamiento». Aunque el interés de Vallejo por la geodesia fuese incuestionable, parece ser que la cuestión de la forma de la Tierra era objeto principal de sus estudios. Así se evidencia, al menos, en una extensa nota a pié de página que incluyó en el capítulo anterior, con un claro objetivo didáctico: «...Como de cada una de las medidas de la Tierra que se han ejecutado, resulta un aplanamiento diferente, no estará demás el que presentemos aquí un resumen de cuanto se ha trabajado sobre tan importante materia, y de los diferentes aplanamientos que se han obtenido».

A modo de presentación, realizó Vallejo unos comentarios cargados de sentido y brillantemente resumidos: *«La Teoría de la Tierra se ha considerado en todo tiempo como uno de los más importantes ramos de las ciencias, o al menos como el que tiene más íntima conexión con la existencia material del hombre...Por esta causa, parece que la primera necesidad intelectual de la especie humana era el reconocer la figura de la Tierra, determinar sus límites, y estudiar sus circunstancias. Así es, que desde la más remota antigüedad se hicieron tentativas para medir sus dimensiones; y si los resultados de las primeras mediciones no pueden considerarse en el día como una aproximación poco exacta,..., no podemos dejar de admirar el genio de los que han bosquejado un problema, respecto del cual, todas las fuerzas reunidas de las ciencias modernas no son aún capaces de dar una solución completa y rigurosa. En efecto, para la determinación de la figura y magnitud de la Tierra, se han empleado todos los recursos que ofrecen la Geometría más profunda, y todos los esfuerzos reunidos de la Física más escrupulosa y de la Astronomía más sublime y delicada, pudiendo reducirse a tres los métodos... que se han empleado hasta el día para la solución aproximada de esta importantísima cuestión, y son los siguientes: 1) medidas directas, que son procedimientos puramente geométricos y geográficos, y consisten en medir arcos de meridianos y paralelos sobre diversos puntos de la superficie terrestre; 2) observaciones acerca de las longitudes de los péndulos que oscilan segundos en diferentes parajes; y 3) observaciones astronómicas, no solo*

las que son necesarias en los dos métodos anteriores,...sino las operaciones astronómicas que directamente conducen a inferir el aplanamiento terrestre, por el examen de la influencia que ejerce la Tierra en los movimientos lunares».

Aunque la declaración de intenciones de Vallejo sea más que suficiente para reconocer su importancia, no debe olvidarse que la formulaba en una época en la que, geodésicamente hablando, solo se vivía del recuerdo de las observaciones y cálculos que habían realizado Jorge Juan y Antonio de Ulloa, cien años atrás. El pronunciamiento del matemático parece que también fue muy oportuno, pues se trataba de un tiempo en que había que reivindicar el papel transcendental de la geodesia para conseguir una representación cartográfica del territorio con fiabilidad geométrica. Buen botón de muestra fue la declaración efectuada por el Ministro de Gobernación (Manuel Cortina²), a propósito del Mapa de España: “...no parece que sea hoy la época de emprender el levantamiento científico de un mapa con aquellas seguridades, exactitud y prolijidad que nos ofrecen los progresos y las aplicaciones de la astronomía, de la física y de la geodesia”.

Vallejo comenzó su discurso geodésico, propiamente dicho, recordando que la esfericidad de la Tierra ya había sido demostrada por Aristóteles, cuando aseguró que su forma se reflejaba en la Luna durante los eclipses, y que, sabida esta, fueron varias las ocasiones en que se trató de hallar el valor de su perímetro. A los 400000 estadios citados por el propio Aristóteles (*De Coelo*), y que según este habrían sido obtenidos por los antiguos matemáticos, añadió los 250000 en que al parecer había fijado Eratóstenes la misma circunferencia de la Tierra. Como era previsible, no dejó de comentar la inconsistencia metrológica de ambas determinaciones, ya que al no concretarse el tipo de estadio empleado como unidad “queda desconocida la magnitud de la Tierra”. Inmediatamente después comentaba Vallejo que “la primera tentativa, hecha por procedimientos científicos³, fue la medida de un grado del

² Decreto del 23 de noviembre de 1840, con el que se acometió definitivamente el proyecto de Mapa de España.

³ El procedimiento empleado por los árabes se basó en los mismos principios que los griegos, aunque sea cierto que quizás aquí se determinase con mayor rigor el desarrollo del arco. Vallejo indicaba que

meridiano terrestre, ejecutado por los astrónomos árabes en el reinado del califa Mamun”. En su transcurso se midieron directamente las distancias con un codo, aunque tampoco se puedan extraer en ese caso una conclusión cierta sobre las dimensiones de la Tierra, ya que los autores no son unánimes al concretar el tipo de codo empleado. No sería extraño que se usase el llamado codo negro de 27 dedos, puesto que fue ideado por ese mismo califa; en cuyo caso, el desarrollo del grado sería del orden de 63750 toesas (≈ 124.25 km), según el geógrafo Albufeda, es decir alrededor de un 12.5% mayor de lo debido.

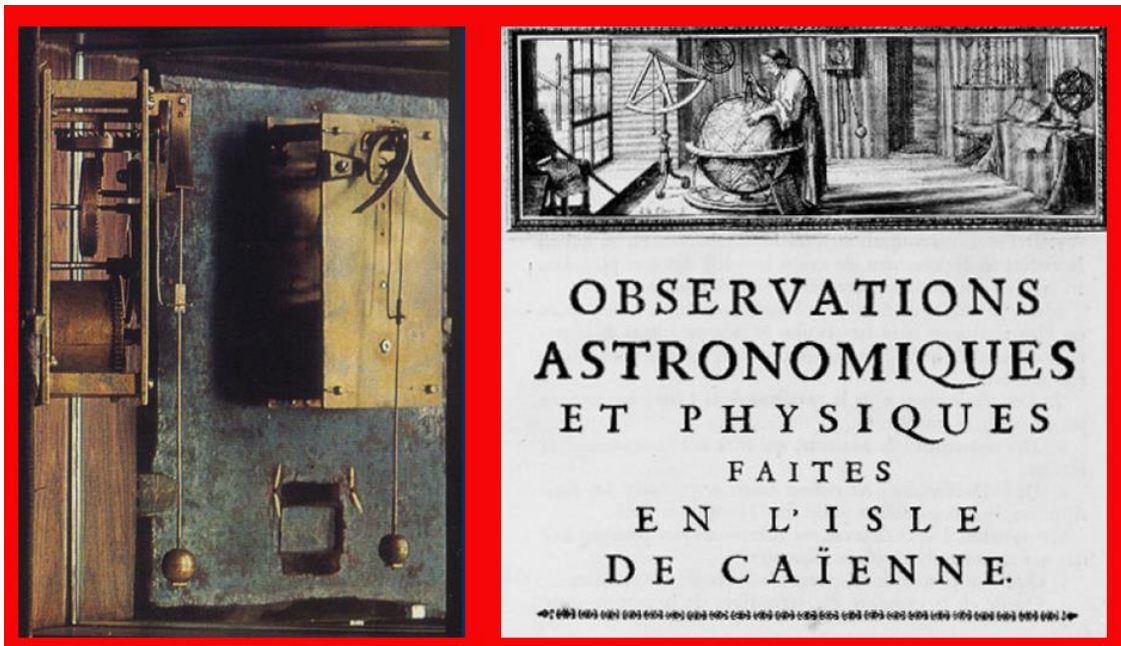
La primera medida de los tiempos modernos citada por Vallejo fue la que efectuó, sobre el luego llamado meridiano de Francia (Amiens-París), el médico Fernel, el cual midió el desarrollo del arco mediante el número de vueltas que habían dado las ruedas de su carruaje, un procedimiento poco aproximado pero con el que obtuvo un resultado nada disparatado, del orden de 57070 toesas por grado (≈ 111.23 km). Tal medida fue el detonante de otras muchas, entre las que sobresalió la realizada por Snellius en Holanda, pues fue entonces cuando se empleó por primera vez la triangulación para calcular el desarrollo del arco correspondiente. Sin embargo, las serias discordancias entre los valores proporcionados por todas ellas hicieron que la Academia de Ciencias de París encargase a Picard una nueva medida del arco de Fernel, operación que realizó entre 1669 y 1670, tal como recoge Vallejo. Para ello diseñó una cadena de triángulos entre las dos ciudades francesas y obtuvo finalmente el valor de 57060 toesas para el grado⁴. Aunque la comunidad científica aceptase como buena y definitiva la determinación del abate francés, solo pasaron dos años para que se pusiera en duda el modelo esférico de la Tierra.

Efectivamente, en el año 1672 y en el transcurso de las observaciones astronómicas que se estaban efectuando en la isla de Cayena (Guayana francesa), comprobó Jean Richer que “su reloj retardaba todos los días cerca de dos minutos y medio sobre el tiempo medio, aunque hubiese

“allí se dividieron en dos compañías, de las cuales una se fue hacia el Norte y la otra hacia el medio día, midiendo cada una, con el codo en la mano, una línea meridiana geoméricamente alineada”.

⁴ El perímetro de la Tierra hallado por Picard fue de unos 40036 km, es decir que el valor del radio terrestre resultaba próximo a los 6372 km. Aunque Vallejo no lo mencionase en su exposición, conviene traer a colación que los cálculos de Picard fueron usados por Newton para comprobar su ley de gravitación universal, antes de publicar sus famosos *Principia*.

dado al péndulo la misma longitud que en Francia; y para arreglarlo, se vio precisado a acortar este péndulo una línea y cuarto”. Inmediatamente después, añadía Vallejo: “El anuncio de este fenómeno excitó la admiración de Sabios, pues como las longitudes de los péndulos son como las gravedades, se deducía que la gravedad era menor en la Cayena, que está muy cerca del Ecuador⁵”.

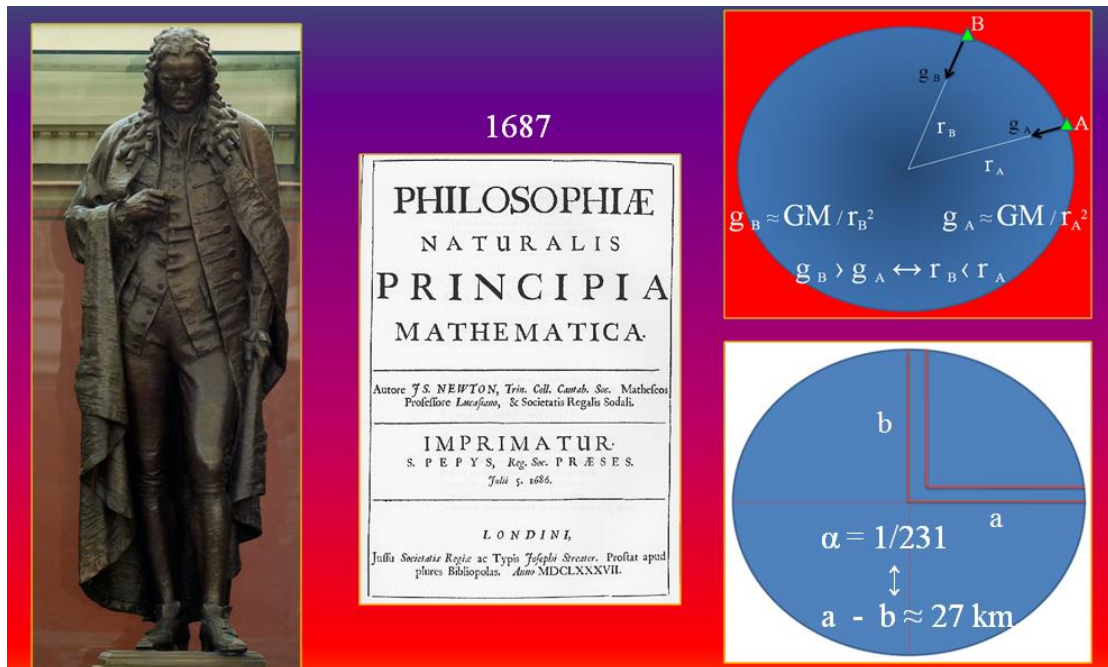


Los péndulos usados por Richer: uno batía segundos y otro medios segundos, junto a la portada de la memoria que daba cuenta de sus observaciones.

El razonamiento posterior y la conclusión consiguiente merecen ser reproducidos, aunque sean un tanto redundantes por el afán didáctico de Vallejo: “El ser menor su gravedad cerca del ecuador era señal de que la fuerza centrífuga, que siempre es opuesta a la gravedad, era allí mayor; y como... las fuerzas centrífugas son como los radios de los círculos en que giran los cuerpos, se llegó a deducir, que *las porciones de la masa terrestre cerca del ecuador tenían menos pesadez, o eran menos pesadas que las más próximas a los polos*; y que, para que se conserve el equilibrio, *era preciso que hubiese más porción de masa hacia el ecuador*, para que la pesantez correspondiente a la mayor cantidad, contrabalancease el peso mayor, que en menor cantidad tengan las porciones hacia los polos; por lo que, según esto, *la Tierra debe hallarse más elevada respecto de su centro, hacia el ecuador que hacia los polos*; y que por lo mismo *su figura debe*

⁵ Vallejo fijaba la latitud de Cayena en 4° 46'17''.30 Norte.

ser, no una esfera o bola perfectamente redonda, sino un esferoide aplanado, o una bola chata hacia los polos; y su figura ser parecida a la de una naranja. El descubrimiento de Richer fue aprovechado por Huygens y Newton para deducir las consecuencias referidas por Vallejo, apoyándose el primero en su obra *Horologium oscillatorium* y el segundo en su trascendental descubrimiento de la gravitación universal. Si a todo ello se unía la reciente constatación del aplastamiento polar de Júpiter, se comprende que ambos personajes se convenciesen aún más del carácter elipsoidal de la Tierra y que no tardasen en cuantificar el aplastamiento del mismo. Los valores obtenidos también los citaba Vallejo⁶: 1/578 (Huygens) y 1/231 (Newton).



Los estudios teóricos de Newton sobre el elipsoide terrestre.

Acto seguido hacía nuestro protagonista una interesante digresión sobre las reticencias de la Academia de Ciencias francesa, ante semejante novedad y como se convencieron de su existencia “después de saber que *Halley* en 1677 observó en Santa Elena un fenómeno semejante, y también por las observaciones de los Sres. *Varin, Deshayes* y *Glos* en la *Goréa, Guadalupe* y la *Martinica* en 1682; y las de *Couplet* en *Lisboa* y *Pará* en 1697, así como las del padre *Feuillet* en *Portobelo*, y la *Martinica*, y

⁶ Vallejo hizo un sentido elogio de ambos personajes, que merece ser transcrito: ¡Loor eterno a los genios privilegiados que saben conocer los principios sólidos científicos y no se dejan arrastrar por las apariencias!

otras de otros que por ningún título podían atribuirse a las situaciones puramente locales o accidentales, a la variedad de los climas, ni a las anomalías o errores de las observaciones. En virtud de lo cual, para todos los que estaban convencidos de las teorías de *Huygens* y *Newton*, no cabía duda en que la Tierra era aplanada por los polos”.

Vallejo explicó a continuación cómo se gestó una de las mayores controversias científicas de la historia, aquella que enfrentó radicalmente a los newtonianos (partidarios del elipsoide oblato, modelo naranja) con los cartesianos (defensores del elipsoide prolato, modelo del limón) y que fue una de las características de la Ilustración. En primer lugar, comentaba que los franceses fueron los más reacios a la hora de aceptar las tesis de Huygens y de Newton, aunque poco a poco fueron convenciéndose por las evidencias tan concluyentes que proporcionaba la variabilidad de la longitud del péndulo. Fue así como se vieron abocados a la evaluación de la curvatura variable del meridiano, apoyándose en el que ya había sido medido en varias ocasiones, es decir en el llamado meridiano de Francia. Para ello se prolongó el arco Amiens-París en los dos sentidos: hacia el Norte (hasta Dunkerque) y hacia el Sur (hasta Colliure⁷). Cassini I se encargó de observar la triangulación del sector septentrional y La Hire del meridional, comenzando los trabajos de campo en el año 1683 y ultimándose en el 1718, aunque no se publicasen los resultados de los mismos hasta dos años después, en una de sus obras más conocidas: *De la Grandeur et de la Figure de la Terre*.

Los resultados expuestos por Cassini fueron concluyentes, ya que el grado terrestre en el segmento París-Colliure era de 57097 toesas, es decir 37 toesas más que el que había sido medido por Picard. Mientras tanto su hijo Cassini II⁸, había obtenido para el desarrollo del grado, al Norte de Amiens, un valor de 56960 toesas, esto es 137 toesas menos que la magnitud hallada por su padre en el otro sector del meridiano. Como los instrumentos empleados en las observaciones les merecieron toda clase de garantías su conclusión resultaba obvia: *los grados terrestres eran mayores hacia el ecuador*. Vallejo añadía que “atendiendo a que el valor

⁷ En castellano se traduce por Colibre, siendo ese el nombre usado por Vallejo.

⁸ Su verdadero nombre era Jacques Cassini.

del grado terrestre es la parte del meridiano de la Tierra comprendida por dos líneas perpendiculares al expresado meridiano, y que en su punto de concurso forman un ángulo de un grado, se llega a concluir que en este caso la Tierra debe ser prolongada por los polos y aplanada por el ecuador: consecuencia enteramente contraria a la deducida de las observaciones del péndulo; y que ambas se oponen a que la Tierra sea esférica”.

Un resultado tan contrario a la propuesta de Newton envalentonó a los cartesianos, aunque el sabio inglés no desistiera en ningún momento, como tampoco hicieron sus partidarios. Al contrario, no tardó en proporcionar la explicación del mismo, tal como se recoge en esta contribución geodésica del matemático granadino: “... aunque la medida comprendiese todo el meridiano que atraviesa la Francia, estando unidos los grados de los dos arcos en que se partió la medida, la diferencia del valor y longitud de unos grados a otros era muy corta, y por consiguiente poco sensible y expuesta a confundirse entre los errores a que toda observación está expuesta por más delicada que sea. Y que estos errores podían ser tales que en ellos se envolvese no solo la diferencia de las 37 toesas, en que la medida del Sr. *Cassini* hacia *Colibre* excedía a la del Sr. *Picard*; y la de 137 toesas en que excedía a la de su hijo hacia *Dunquerque*, sino también la diferencia que debían tener los grados, si la Tierra en efecto fuese aplanada por los polos, según ellos afirmaban”.

Lejos de convencerse los cartesianos, comandados por el académico Jean-Jacques d'Ortous de Mairan⁹, persistían en la defensa de su modelo prolato. Llegando este a tratar de conciliar las observaciones gravimétricas con el modelo matemático que propugnaba, tal como figura en la memoria que presentó a la Academia de Ciencias, en el año 1720. Su trabajo no tardó en ser rebatido por John Theophilus Desaguliers en los anales de la Royal Society, como bien reseñó Vallejo. Suya fue también la información que da cuenta del estudio de Clairaut¹⁰ para demostrar que,

⁹ Este intentó basar su modelo de elipsoide aplastado por el ecuador en el principio de los torbellinos defendidos por Descartes.

¹⁰ El estudio de Clairaut lo incluyó en su obra: *Theorie de la figure de la terre, tirée des principes de l'hydrostatique* (1743). En este punto tuvo Vallejo un pequeño lapsus, ya que en su contribución da a entender que esta obra fue anterior a las expediciones científicas del virreinato de Perú y de Laponia; cuando es sabido que la segunda finalizó en el año 1737.

en el supuesto del elipsoide con aplastamiento ecuatorial, las disminuciones en la longitud de los péndulos, próximos al ecuador, serían mucho mayores (en torno a 8 o 9 líneas) de las observadas; de manera que *la figura prolongada de la Tierra hacia los polos, es de todo punto incompatible con las observaciones del péndulo.*

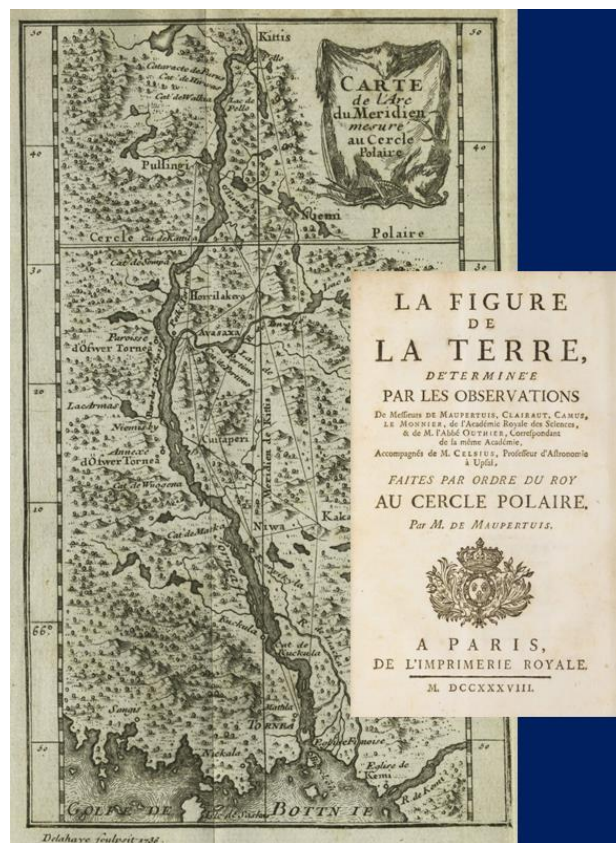
Vallejo resumió muy bien el estado de ánimo en la comunidad científica de Francia, a esas alturas del siglo XVIII: “...los *Franceses*, cuyo amor propio estaba como comprometido, porque después de cuarenta años de operaciones costosas y de trabajosos afanes, sus resultados estaban en contradicción con los principios científicos, para decidir la cuestión, adoptaron el medio indicado por *Newton*, de medir dos grados del meridiano terrestre los más distantes posible. Y con el objeto de evitar la especie de escándalo científico que resultaba de tales controversias, el Gobierno Francés resolvió que se hiciesen nuevas mediciones, y para que fuesen decisivas, determinó que se midiese un grado cerca del ecuador, y otro cerca del círculo polar”.

El desenlace final lo resume también Vallejo, recordando el envío de las dos comisiones: una al Perú y otra a Laponia. La primera, propuesta por el matemático L. Godin, inició su viaje a la América ecuatorial en 1735 y volvió siete años después; la segunda, propuesta por el matemático P. Maupertuis, inició su andadura en el año 1736, regresando a Francia dieciséis meses después. Tanto en una como en otra colaboraron representantes de los dos gobiernos respectivos: Jorge Juan y Antonio de Ulloa en el primer caso y Celsius en el segundo. La controversia quedó así superada gracias a las dos expediciones científicas, las dos más divulgadas de la Ilustración, y definitivamente zanjada “*la cuestión a favor del aplanamiento de la Tierra hacia los polos*”, tal como dejó escrito el granadino.

A pesar de que Maupertuis¹¹ dejara claro, desde su vuelta a París, que el modelo elipsoidal verdadero era el newtoniano, la Academia quiso

¹¹ Vallejo reproduce en su contribución geodésica una velada crítica de Maupertuis a los Cassini y a la indecisión del gobierno francés, la cual la incluyó en su libro *Eléments de la Géographie: Méthode et résultats démontrant la sphéricité et aplatissement du globe aux pôles, rejoignant les théories de Newton*, publicado en París (1742). La traducción de Vallejo fue la siguiente: «Estas medidas fueron repetidas por M.M. Cassini, en diferentes tiempos, en diferentes lugares, con diferentes instrumentos, y

refrendarlo mediante una nueva medida del meridiano de Francia, “con instrumentos más exactos, y con mayor delicadeza de la que se había ejecutado precedentemente”. Estas fueron las palabras siguientes de Vallejo: “Se encargó esta operación a Mr. *Cassini de Thury*, nieto del que la emprendió por primera vez, y al abate *de la Caille*; y habiendo estos ejecutado su medida con cuanta precisión y exactitud es imaginable, hallaron que esta se conformaba con las medidas hechas en el círculo polar, y después se vio que iban también conformes con las hechas en Perú, como todo puede verse en las Memorias de la *Academia de Ciencias de París*, y en la obra que con el título de *La Meridienne de Paris vérifiée*¹², publicó Mr. *Cassini de Thury*”.



La triangulación de Laponia y portada de la memoria de Maupertuis, en la que demostraba la validez del modelo elipsoidal defendido por Newton y Huygens.

por diferentes métodos ; el Gobierno hizo pródigamente todos los gastos, y dispensó toda la protección imaginable por espacio de 36 años ; y el resultado de seis operaciones, hechas en 1701, 1713, 1718, 1733, 1734 y 1735, fue siempre que la Tierra era alargada y no achatada por los polos». Años antes ya había afirmado Voltaire que Maupertuis no solo había aplastado a la Tierra, sino que también lo había hecho con los Cassini.

¹² El título completo de la obra de Cassini III fue: *La Méridienne de l'observatoire royal de Paris vérifiée dans toute l'étendue du royaume par de nouvelles observations*. El libro se editó en París en el año 1744.

Elegido ya el elipsoide de revolución, como el verdadero modelo matemático de la Tierra, aún quedaba pendiente la tarea de hallar el valor de su aplastamiento; tarea que no era nada evidente, ya que se necesitaba el concurso de dos arcos de esa superficie. Vallejo sintetizó las determinaciones más señaladas, comenzando con el valor de 1/266 asignado por Jorge Juan, siendo 16895708.5 varas el diámetro ecuatorial de su elipsoide. De nuevo recurrió Vallejo a la obra de Clairaut, ya referida, para recordar que sus estudios sobre el modelo homogéneo de la Tierra le permitieron fijar el aplastamiento elipsoidal en 1/231, un valor prácticamente igual que el obtenido por Stirling¹³, 1/230. Vallejo iluminó esta parte de su exposición con una tabla, en la que incluyó los resultados obtenidos en las mediciones de arco más notables del siglo XVIII, tabla que se reproduce junto a estas líneas.

LATITUD del punto medio del grado	LONGITUD de los grados en toesas	OBSERVADORES Y LUGARES en que se hicieron las medidas meridianas
0° 0´	56753	Bouguer, Godin, La Condamine. Perú
	56767,8	Jorge Juan. Perú
33° 18´ Austral	57037	La Caille. Cabo de Buena Esperanza
39° 12´ Boreal	56888	Mason y Dixon. Estados Unidos.
43° 1´ id	56979	Boscovich y Maire. Estados Romanos.
44° 44´ id	57024	Beccaria. Piamonte.
45° 0´ id	57 028	Cassini de Thury, La Caille. Francia
45° 57´ id	56881	Lisganig. Hungría. (dudosa)
48° 43´ id	57086	Id.
49° 23´ id	57069	Picard (corregido). Francia.
66° 20´ id	57422	Maupertuis, Clairaut. Suecia.

¹³ El dato lo incluyó en su comunicación a la Royal Society (1733), titulada: *Twelve propositions concerning the figure of the of the Earth*, decantándose en ella por el modelo newtoniano.

La dificultad inherente al aplastamiento la explica Vallejo a la perfección: *“De todas estas medidas, resulta comprobado de un modo positivo el aplanamiento de la Tierra por los polos; puesto que la longitud de cada uno de los grados medidos es mayor que la del medido en el ecuador. Pero nada se puede concluir por ellas acerca de la naturaleza de la curva que forma el meridiano, ni sobre la cantidad efectiva del mismo aplastamiento; porque combinándose de dos en dos, se obtienen resultados que difieren mucho entre sí”*. Incluso da unos cuantos ejemplos: comparando el grado ecuatorial con el del círculo polar se obtiene un aplastamiento de 1/213, comparándolo con el de Picard, se hallaría 1/314 y si la comparación fuese con el grado austral se llegaría a 1/78. Vallejo dio cuenta también del estudio de Euler¹⁴ sobre este particular y de su cálculo de un aplastamiento igual a 1/230. La discusión sobre el aplastamiento hizo que abordase también otra cuestión no menos relevante, en la que estaba implícito el fenómeno de la desviación de la vertical, la posibilidad de que los meridianos de la Tierra no fueran elipses “ni aún curvas semejantes entre sí”.

Así se expresaba, a propósito de las medidas llevadas a cabo, sobre el meridiano de París, por Delambre y Mechain para el establecimiento del Sistema Métrico Decimal: “se nota en un cierto número de estos grados una marcha irregular, y saltos bruscos, que se separan de la figura elíptica”. Su análisis de tan interesante aspecto lo concluyó señalando la imposibilidad de entrar en los detalles de todas las operaciones geodésicas para medir los grados terrestres y la conveniencia de reunir en una tabla, aquellas cuyos resultados consideraba exactos. Los datos del cuadro le valieron a Vallejo para definir un modelo del elipsoide terrestre, mediante los parámetros siguientes: eje mayor, o ecuatorial, igual a 12754863 m, es decir 15258734 varas; eje menor, o polar, igual a 12712251 m, es decir 15207757 varas. Siendo su diferencia de 42612 m, resulta que la relación entre sus semiejes era sensiblemente igual a la

¹⁴ Aunque Vallejo no lo subrayase, Euler vio evidente la necesidad de seleccionar los datos disponibles, eligiendo solo los más fiables. Fue en ese estudio, presentado en la Academia de Berlín (1753), cuando cuantificó los errores cometidos en las diferentes misiones geodésicas: Laponia (27 toesas), Perú (15 toesas), África (43 toesas) y Francia (125 toesas).

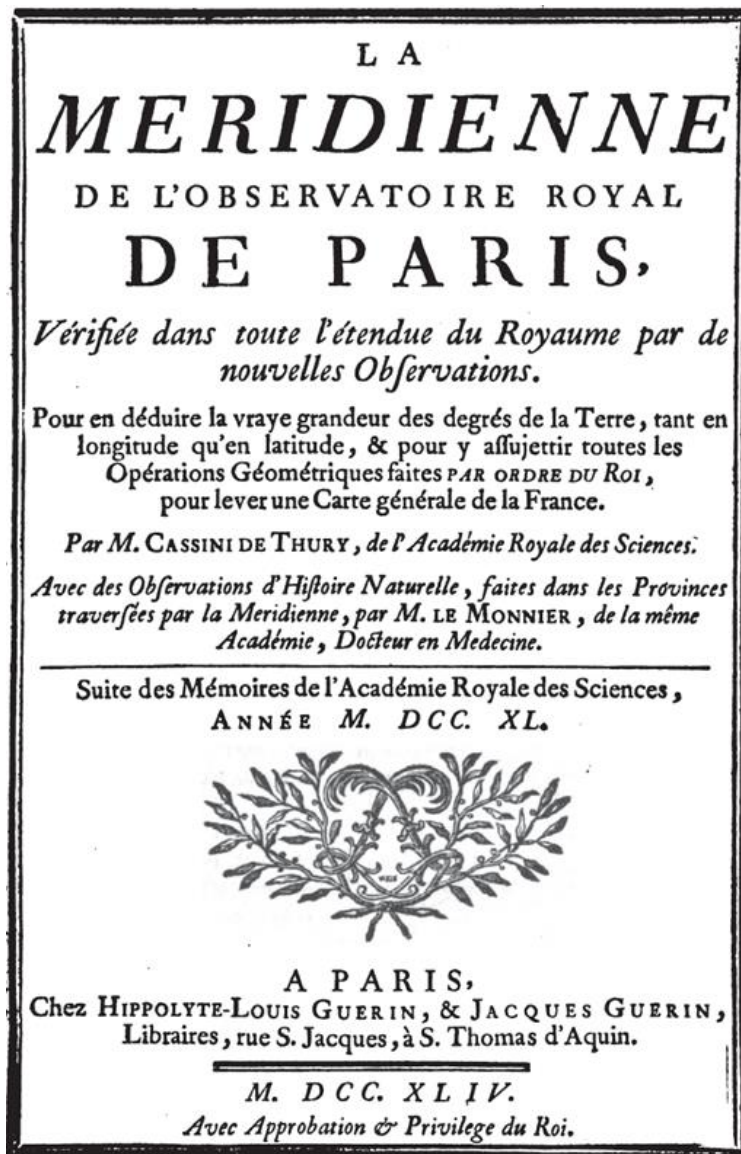
existente entre los números 298 y 299, de ahí que fijase el aplastamiento en $1/299$, “un poco más grande que $1/300$ ”, según sus propias palabras¹⁵.

PAISES	AMPLITUD del arco medido	LATITUD del punto medio del arco	DESARROLLO del grado en metros	NOMBRES de los observadores
Suecia	1° 37' 19''	66° 20' 40''	111488	Svanberg.
Rusia	3° 35' 05''	58° 17' 37''	111362	Struve.
Inglaterra	3° 57' 13''	52° 35' 45''	111241	Roy, Kater.
Francia	8° 20' 00''	46° 52' 02''	111211	La Caille, Cassini.
Francia	12° 22' 13''	44° 51' 02''	111108	Delambre, Mechain.
Roma	2° 9' 47''	42° 59' 00''	111025	Boscovich.
Estados Unidos	1° 28' 45''	39° 12' 00''	110880	Mason, Dixon.
Sudáfrica	1° 13' 17''.5	33° 18' 30''	111163	La Caille.
India	15° 57' 40''	16° 08' 22''	110653	Lambton, Everest.
India	1° 34' 56''	12° 32' 21''	110644	Lambton.
Perú	3° 7' 03''	1° 31' 00''	110582	Bouguer, La Condamine.
			110507	Jorge Juan.

Obtenido el aplastamiento polar del elipsoide por la vía de la geodesia geométrica, se centró Vallejo en las otras posibilidades que comentó al comienzo de su estudio: la gravimétrica y la astronómica, aunque de hecho prestase mucha más atención a los resultados logrados por el primer procedimiento; un análisis que iniciaba afirmando que “el aplanamiento terrestre, que resulta de las observaciones del péndulo, posteriores a las que ya hemos citado, no difiere mucho de esta última determinación”. Para añadir después que Mathieu había obtenido un aplastamiento de $1/298.2$, comparando las seis medidas absolutas de péndulo realizadas en estaciones localizadas sobre el meridiano que sirvió de base al Sistema

¹⁵ Vallejo incluyó una nota que revela el rigor con el que procedía: “Lo que difiere esta valuación de la del texto (se refería a un apartado del capítulo dedicado a la Astronomía, en el que hablaba del elipsoide terrestre) proviene de que la de este se sacó en virtud de las valuaciones hechas hasta la época en que se imprimió primitivamente, y para la que acabamos de poner se han tomado también en consideración otras valuaciones posteriores”.

Métrico Decimal. En cuanto al método astronómico, derivado de la influencia terrestre sobre los movimientos lunares, recordaba el valor de $1/304$, que había obtenido Laplace: considerando la atracción de la Tierra sobre los puntos exteriores y valiéndose de las observaciones de Bourg. Asimismo indicaba Vallejo que “los fenómenos de la *nutación* y de la *precesión de los equinoccios* no dan a conocer el valor absoluto de la fracción que expresa el aplanamiento, y solo determinan los límites entre los cuales esta fracción se halla comprendida, y son $1/304$ y $1/578$ ”.



Portada de la obra de Cassini III (Cassini de Thury), con la que se dio por concluida la controversia científica entre newtonianos y cartesianos.

De nuevo incide Vallejo en la forma real del meridiano terrestre¹⁶, recogiendo para ello la opinión formulada, al respecto, por Biot, en la Memoria¹⁷ que presentó ante la Academia de Ciencias en diciembre del año 1827. Según la traducción de Vallejo:

“...todos los métodos están conformes y dan a conocer indudablemente, que la Tierra tiene una forma aplanada por los polos y como hinchada o inflada hacia el ecuador, conforme a lo que la analogía indica para el equilibrio de una masa fluida que gira alrededor de un eje, y que en todas sus partes se atraen mutuamente. Pero, que, cuando se quiere ir más allá, y asimilar el esferoide a alguna forma simple, por ejemplo al elipsoide, se descubren irregularidades muy sensibles que no se pueden atribuir a los errores de las observaciones. Cuando se examina de este modo el arco del meridiano que se extiende desde Greenwich a Formentera¹⁸, las porciones sucesivas de este arco, consideradas yendo de Norte a Sur, dan decrementos de grados que no guardan absolutamente ninguna ley, ya hacia el grado 46 en particular ofrecen una enorme anomalía. Pero, si el meridiano terrestre fuera elíptico, la latitud media de este mismo arco es tal, que en toda su extensión el decremento sucesivo de los grados debería ser sensiblemente constante.

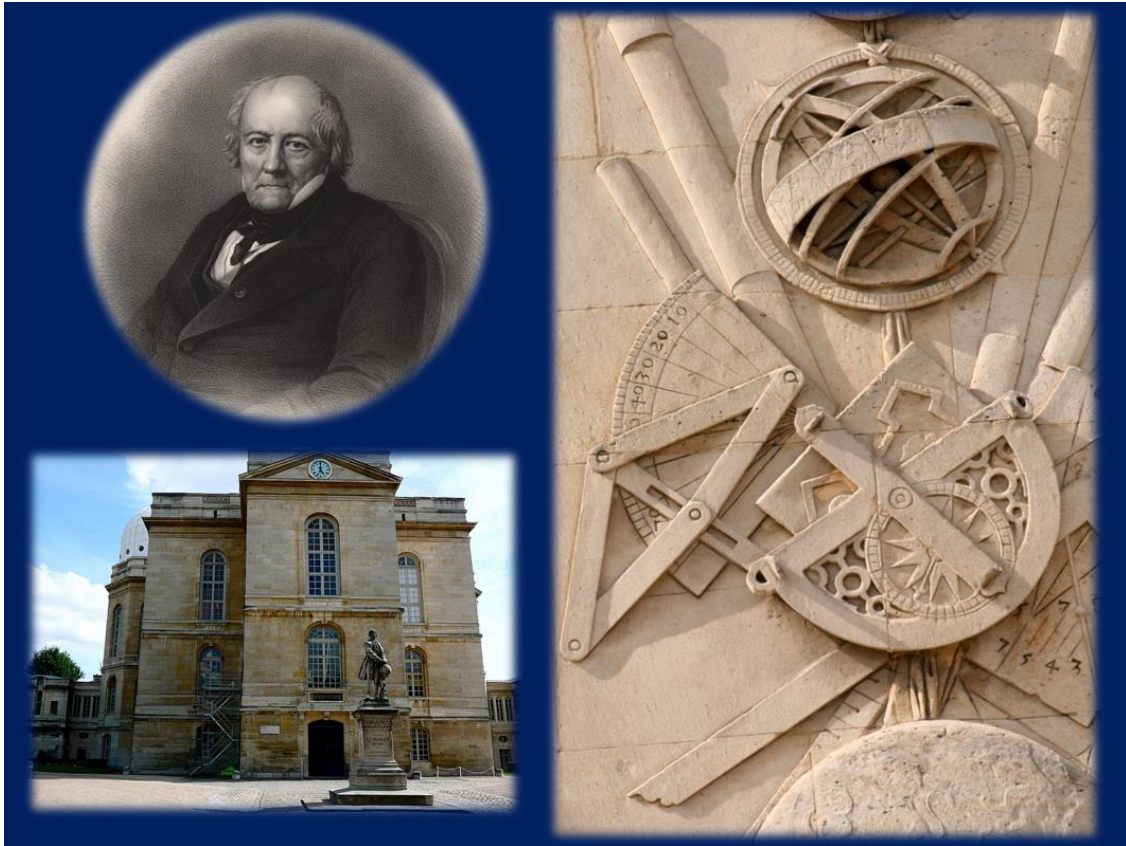
El arco de paralelo recientemente medido entre Burdeos y Padua presenta fenómenos análogos. Irregularidades semejantes tan grandes como ciertas, se manifiestan también en las diversas partes del arco del meridiano medido por los ingleses en la India, y los Sres. Plana y Carlini han encontrado aún irregularidades más considerables en el Piamonte. Estos ejemplos manifiestan que la figura de la Tierra es mucho más complicada de lo que se creyó en un principio. Por esta causa, es por lo que

¹⁶ En realidad se estaba refiriendo Vallejo al geoide, un vocablo que todavía no se había acuñado hasta el año 1873 (recuérdese que se le atribuye a Listing, un discípulo de Gauss).

¹⁷ *Mémoire sur la Figure de la Terre.*

¹⁸ Debe recordarse que Biot, en compañía de Arago, fue comisionado por el gobierno francés para que prolongasen el meridiano de Francia, con objeto de poder definir mejor el metro. En el transcurso de aquella operación efectuaron parte del enlace geodésico entre el litoral levantino y las Islas Baleares, aprovechando la ocasión para efectuar observaciones gravimétricas (medidas de la gravedad con el péndulo) en la Isla Formentera. Tales observaciones las continuaría años después dentro de un programa verdaderamente ambicioso. En efecto, siendo consciente de las irregularidades que presentaban los meridianos, decidió completar sus mediciones pendulares para aportar más elementos de juicio al problema de la figura de la Tierra. En su plan de trabajos contempló un nuevo traslado a España, efectuado en el año 1824, esta vez en compañía de su hijo Édouard.

se ha procurado debilitar la influencia de sus irregularidades, combinando los valores medios de los grados medidos a latitudes muy distantes, y sujetándolos solo a las relaciones elípticas se puede deducir el aplanamiento del esferoide, que se ha encontrado así poco diferente de 1/309.”



Jean Baptiste Biot y el Observatorio de París. Se presenta además un detalle de los instrumentos con que se adorna una de sus fachadas. La estatua representa a Urbain Le Verrier, descubridor del planeta Neptuno.

Vallejo reprodujo una de las tablas formadas por Biot, en la que se plasmaban los resultados de las observaciones pendulares realizadas en Italia y en España, en las que fue ayudado por su hijo, con el fin de completar las que se habían efectuado sobre el gran arco de paralelo que se extiende entre Burdeos y Fiume (actual Rijeka); incluyendo además los previamente obtenidos por análogo procedimiento en diversos puntos del meridiano de Francia.

ESTACION	L	λ (mm)	h (mm)	$2h\lambda/r$ (mm)	l (mm)	OPERADOR
UNST	60° 45' 25''	994.943083	8.50	0.002659	994.945742	Biot (padre).
Fuerte de LEITH	55 58 37	994.524453	21.00	0.006565	994.531018	idem.
DUNKERQUE	51 02 10	994.079137	4.00	0.001245	994.080382	Biot, Mathieu.
Observatorio de PARÍS (Sala meridiana)	48 50 14	993.844842	70.25	0.021938	993.866780	Idem y Bouvard.
Observatorio de PARÍS (Sala del mural)	idem	993.826473	63.00	0.013674	993.846147	Borda, Cassini.
CLERMONT-FERRAND	45 46 48	993.455560	406.00	0.126717	993.582277	Biot, Mathieu.
MILAN	45 28 01	993.500800	150.08	0.046842	993.547642	Biot (padre e hijo).
PADUA	45 24 03	993.597710	30.67	0.009584	993.607294	idem.
FIUME	45 19 00	993.563844	64.80	0.020227	993.584075	idem.
BURDEOS	44 50 26	993.447586	17.14	0.005349	993.452935	Biot, Mathieu
FIGEAC	44 36 45	993.388214	223.00	0.069591	993.457805	idem
BARCELONA	41 23 15	993.230852	4.10	0.001279	993.2321312	Biot (padre e hijo)
FORMENTERA	38 39 56	993.006385	202.90	0.063275	993.0696597	idem.
LIPARI	38 28 37	993.076357	9.00	0.002807	993.0791638	Idem.

L es la latitud, λ es la longitud del péndulo simple observada en la estación, h es la altitud sobre el nivel del mar, $2h\lambda/r$ es la corrección por la altitud y l es la longitud corregida del péndulo de segundos en el vacío y a nivel del mar.

Vallejo añadió otro cuadro con datos complementarios, referidos a la variación de la gravedad sobre el meridiano que se extiende desde Unst a Formentera, con las observaciones efectuadas en otros puntos del mismo por Kater, cuyos resultados los transformó en longitudes absolutas, según las medidas del péndulo absoluto obtenidas por idéntico observador. La tabla la incluyó Biot en la memoria ya citada, recogiendo también la longitud absoluta del péndulo en París, en la sala de la meridiana, añadiendo el geodesta granadino: “tal como se concluye del péndulo de Londres, según las oscilaciones de un péndulo de comparación observado por Sabine en estas dos estaciones: lo que acaba de unir los resultados de los dos métodos que se han empleado para la determinación de las longitudes absolutas. Dice también Mr. Biot, que ha aplicado igualmente a estos datos la corrección de altura calculada en virtud del cuadrado de la distancia, como lo hizo en la tabla precedente”.

ESTACION	L	λ (mm)	h (mm)	$2h\lambda/r$ (mm)	l (mm)	OPERADOR
UNST	60° 45' 25''	994.935840	8.50	0.002659	994.938499	Kater
PORTSOY	57 40 59	994.681591	28.67	0.008962	994.690553	idem.
Fuerte de LEITH	55 58 37	994.528685	21.00	0.006565	994.535250	idem.
CLIFTON	53 27 43	994.269356	103.33	0.032286	994.301642	idem.
ARBURY HILL	52 16 55	994.152520	239.87	0.074943	994.2277463	idem.
LONDRES	51 31 08	994.114673	28.20	0.008748	994.123421	Idem.
SHANKLIN FARM	50 37 24	994.024000	73.76	0.023040	994.047040	Idem.
Observatorio de PARÍS (Sala meridiana)	48 50 14	993.838644	70.25	0.021938	993.860582	Kater, Sabine

El significado de las variables es el mismo que el de la tabla anterior.

Continuaba Vallejo, afirmando que de la comparación de las dos tablas anteriores se podía deducir la perfecta concordancia entre las longitudes absolutas en las estaciones de Unst¹⁹, Leith y París: “sea que se las tome en las medidas directas obtenidas por el método de Borda ó que se las concluya del péndulo absoluto del capitán Kater en Londres...una conformidad tan precisa es una segura confirmación de los dos métodos”. La importancia histórica de las mediciones gravimétrica de Biot fue incuestionable, pues a raíz de entonces se contó con el valor absoluto de la gravedad en seis puntos de un mismo paralelo, distribuidos por un arco de 15 grados de extensión, y en otros nueve de un arco de meridiano, con una amplitud angular de 22 grados; a las que habría que sumar las medidas análogas, en siete puntos más, debidas a Kater. Vallejo terminó su reseña sobre la Memoria de Biot recordando que, a pesar de todo, los valores del aplastamiento deducidos a partir de las observaciones anteriores, “en la hipótesis elíptica, con el auxilio del Teorema de Clairaut”, serían muy diferentes entre sí y dependientes de las latitudes involucradas. Estos fueron los ejemplos que seleccionó para justificar su comentario: “combinando el valor del péndulo en el polo, que es de 996.188965 mm, con el que corresponde a la latitud de 45°, que es de 993.520351 mm, resulta un aplanamiento de 1/306.33”. Procediendo de forma parecida con las longitudes del péndulo en el paralelo anterior y en el ecuador ($l \approx 991.027015$) resultaría un valor de 1/276.38. De igual

¹⁹ Unst es una de las islas del Norte del archipiélago de las Shetland (al Norte de Escocia).

modo, si se comparasen las longitudes propias del polo y del ecuador, se llegaría a $1/290.59$. Esos tres valores merecieron un comentario añadido de Vallejo, ya que en el primer caso coincidía con el obtenido mediante las distancias lunares, el segundo era prácticamente igual al deducido por Freycinet, a partir de la serie de observaciones realizadas entre la latitud 45° y el ecuador; finalmente, el tercero, era muy próximo a $1/289$, el cual había sido deducido por Sabine, apoyándose en todos sus experimentos (desde el ecuador hasta Spitzberg²⁰) y en los que habían sido realizados tanto en Francia como en Inglaterra.

Antes de concluir Vallejo su interesante disertación, reivindicó la importancia de una última campaña geodésica que había sido protagonizada por el ingeniero geógrafo Jean Baptiste Mathurin Brousseau y que había sido resumida²¹ en una publicación de la Biblioteca Universal de Ginebra a finales de marzo de 1840; una circunstancia que dice mucho a favor de su interés por las aportaciones científicas más novedosas. Las observaciones de esa campaña geodésica se practicaron desde los alrededores de Burdeos hasta la zona fronteriza de Saboya, una porción significativa del arco comprendido entre Marennes, en el litoral atlántico, y la península de Istria (Croacia), con una extensión longitudinal de $15^\circ 30'$ aproximadamente. En la correspondiente memoria, obtuvo Brousseau un aplastamiento terrestre de $1/247$, “el aplanamiento más probable del elipsoide osculador de Francia”, una vez relacionados entre sí el valor del grado de paralelo, en el arco Marennes-Ginebra, y el grado del meridiano resultante de la medición del arco Dunkerque-Barcelona.

Vallejo terminó su nota geodésica, emitiendo sus propias opiniones y esbozando ambiciosos proyectos de difícil ejecución; no obstante, dos de ellos no tardaron demasiado en hacerse realidad. En efecto, en 1862, esto es 22 años después de su pronunciamiento, el alemán Baeyer logró que se constituyera en Berlín la *Asociación para la Medida De Arco en Europa Central*, transformada después en *Asociación para la Medición de Arcos de Meridiano y de Paralelo en Europa* (1867) y en *Asociación Geodésica*

²⁰ Ese vocablo alemán, procede del noruego *Spitsbergen*, y se refiere a la isla mayor del archipiélago Svalbard, al Norte de Noruega.

²¹ *Mesure d'un arc du parallèle moyen entre le pôle et l'équateur. Limoges, F. Chapoulaud, 1839.*

Internacional para la Medición de la Tierra (1887), el más directo antecedente de la actual Unión Geodésica y Geofísica Internacional, fundada en 1919. En cambio, su deseo de ver prolongado el arco de meridiano²², desde Laponia hasta África del Sur, tuvo que esperar poco más de un siglo, aunque en 1872 se lograra efectuar el enlace astronómico-geodésico entre los continentes europeo y africano, gracias a la dirección conjunta de Carlos Ibáñez de Ibero y François Perrier:

“En todo lo expuesto se ven los constantes esfuerzos del entendimiento humano para investigar la figura de la Tierra. Pero todavía falta mucho que hacer para conseguir la resolución de tan importante problema. En mi concepto, debería procurarse comparar la longitud de grados de un mismo meridiano, y no como se ha hecho hasta ahora comparando los grados de meridianos diferentes. Mr. Biot en la Memoria citada manifiesta que ya no son de gran utilidad los experimentos aislados, y lo muy importante que sería el que el arco de meridiano que pasa por Francia y España se prolongase hasta Escocia y que se completase este gran arco europeo haciendo observaciones en África en el establecimiento inglés de Cape Coast, situado muy cerca del ecuador y del meridiano de las islas de Shetland; pero la importancia de la resolución de este problema es de tal naturaleza, que yo juzgo que todos los Gobiernos de los países civilizados deberían reunirse, y escotar cada uno a proporción de su influjo, ó a proporción del número de sus habitantes para medir el mayor arco posible de meridiano y del ecuador; cual sería medir todo el meridiano que resulta de prolongar el arco medido en la Laponia hasta el Cabo de Buena Esperanza, lo que podría comprender un arco de meridiano hasta de más de cien grados. Debería También medirse la mayor porción del ecuador que cortase a este meridiano, que viene a ser de unos 35° desde Guinea a la tierra de Ajan; y también la parte de ecuador que atraviesa la América

²² Las medidas de arcos de meridiano se ultimaron con el magno proyecto que permitió unir el Océano Glacial Ártico con Sudáfrica. Para ello, hubo que enlazar previamente el Cairo con la Ciudad del Cabo, de manera que ese desarrollo de 30° unido a la parte más septentrional, que pasaba por Creta, permitió disponer de una cadena triangular extendida sobre 105° aproximadamente. Las operaciones se culminaron a comienzos de la segunda mitad del pasado siglo XX, gracias al permanente trabajo y esfuerzo de los miembros del *Coast and Geodetic Service* de los EE.UU.; aunque se aprovecharan en el proyecto gran parte de las observaciones y triangulaciones efectuadas con anterioridad, destacando sobre todas las demás el gran arco ruso-escandinavo medido entre los años 1816 y 1855 (El Ministerio de Fomento, a través del Instituto Geográfico Nacional acaba de publicar el resumen de tan interesante medida de la Tierra).

desde el mar pacífico hacia Quito hasta el océano atlántico hacia la desembocadura del río de las Amazonas. Convendría prolongar también el paralelo de 45° hasta el estrecho de la Peruse: con lo cual se tendría el mayor número de datos posible. El realizar este proyecto filantrópico presentaría dificultades; pero nunca serían tantas como otros proyectos más costosos, y cuyo objeto es más bien la destrucción del género humano, que procurar su bien estar y felicidad”.



Epílogo

Aunque Vallejo emplease la vara, como unidad de longitud, al fijar la escala del elipsoide terrestre, lo hizo más por la inercia (o comodidad), marcada en la primera edición de su Compendio de Matemáticas, que por un supuesto desconocimiento del todavía balbuceante Sistema Métrico

Decimal²³; de hecho simultaneó su uso con el de los metros y milímetros, como se ha podido comprobar. Si bien la mejor prueba de su interés metrológico sea el comentario sobre tan novedoso sistema, ligado en sus orígenes a la medida de la Tierra, que incluyó en una nueva edición de su Compendio, al tiempo que anunciaba la próxima aparición de un artículo sobre el mismo: *“Pero, además, hay otras razones de mucha consideración, que corroboran la absoluta, indispensable y urgentísima necesidad que hay de proporcionar este conocimiento en una obrita sencilla, clara, exacta y al alcance de todas las inteligencias y de todas las fortunas; y las principales son las siguientes:*



Prototipo del metro en la Plaza Vendôme de París.

²³ Durante 1812, la situación planteada en Francia era la de un dualismo real, reflejado en la doble calibración de medidas y escalas, siguiendo los patrones antiguos y los decimales. Ello se consagró con el decreto de Napoleón declarando válidos los dos sistemas. El problema se agravó aún más cuando Luis XVIII suprimió el Sistema Métrico para restaurar las viejas unidades de medidas, las cuales continuaron en vigor hasta el año 1837, en que fueron definitivamente abolidas al legalizar de nuevo el Sistema Decimal, dándose además facilidades para generalizar su empleo. En lo que respecta a España, fue la reina Isabel II quien promulgó la ley (19.VII.1849) en la que se definía la unidad fundamental de longitud como la diezmillonésima parte del meridiano terrestre que va desde el polo Norte al ecuador, con la denominación de metro. Posteriormente se reforma, al entrar en vigor la Ley de Pesas y Medidas de la reina regente (1892) que instauró el Sistema Métrico Decimal y el metro prototipo internacional de Sèvres como patrón básico de las medidas lineales.

*1) El sistema decimal ó métrico está fundado en la misma naturaleza; pues la medida primordial de todo él, es el METRO, que es la diez millonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre; 2) es el más filosófico de cuantos han existido; 3) los trabajos que se han hecho para establecerle son los más científicos de que se tiene noticia; 4) los resultados, que han producido, han tenido un considerabilísimo influjo en los adelantamientos científicos, artísticos e industriales: 5) su conocimiento interesa á todas las clases de la sociedad; pues aún las operaciones domésticas más triviales han recibido ventajas de los resultados que con este motivo se han obtenido. Por lo cual este conocimiento no solo es de la más absoluta necesidad para las relaciones comerciales de ambas Naciones (España y Francia), sino que su vulgarización es una necesidad científica, una necesidad artística, una necesidad industrial , en fin una necesidad social, y hasta un elemento de civilización". Más tarde (1840) llegó a publicar el folleto que anunció, con el título siguiente: *Explicación del sistema decimal ó métrico francés, que por ley de 4 de julio de 1837, se ha mandado establecer en Francia... correspondencia de las expresadas unidades francesas con las españolas, y de las españolas con las francesas y modo de hacer la reducción de unas á otras.**