



LA FORMA DE LA TIERRA: EXPEDICIÓN PARA MEDIR UN GRADO DEL ARCO DE MERIDIANO EN EL VIRREINATO DEL PERÚ (1735-1744)

Carlos de San Antonio Gómez

Si consideramos la forma de la Tierra desde un punto de vista matemático, entonces no debemos tener en cuenta la forma de su relieve continental ni las alteraciones en el nivel de los mares. Únicamente deberíamos estudiar el contorno medio del globo, determinado por la superficie libre de los océanos –supuestas las aguas en perfecto reposo relativo– prolongada idealmente bajo los continentes. Dicha superficie se llama geoide.

Pero el mar nunca está en reposo. Aún suponiendo esta hipótesis, continuarían actuando en cada punto de la superficie libre oceánica dos fuerzas: la atracción newtoniana de todas las masas terrestres y marinas y la fuerza centrífuga del movimiento de rotación, cuya resultante es la gravedad, que actúa en la dirección de la vertical del punto.

El geoide será entonces la figura teórica resultante del equilibrio de las masas oceánicas sometidas únicamente a la acción de la gravedad por lo que habrá que definirlo en términos de la dinámica. Pero si el geoide coincidiera con alguna superficie algebraica sencilla como la esfera o un elipsoide de revolución, también podría definirse geométricamente, lo cual no sería posible sino como primera aproximación.

Si la superficie matemática de la Tierra fuese una esfera, bastaría medir la longitud L_{AB} de un arco del meridiano

y amplitud β° en grados del mismo (diferencia entre las latitudes astronómicas de sus extremos A y B) para calcular el radio R o la circunferencia C del globo.

Por este método calculó la circunferencia terrestre Eratóstenes de Alejandría (240 a. C.), que midió la circunferencia de la Tierra con una precisión extraordinaria al determinar, a través de la astronomía, la diferencia de latitud entre las ciudades de Siena (actual Asuán) y Alejandría, en Egipto. Observó que a mediodía, en el solsticio de verano, los rayos del sol incidían perpendicularmente sobre la tierra y, por tanto, no proyectaban ninguna sombra (Siena estaba situada muy cerca del trópico de Cáncer). En Alejandría se percató de que en la misma fecha y hora las sombras tenían un ángulo de aproximadamente 7° con respecto a la vertical. Al conocer la distancia entre Siena y Alejandría, pudo hallar a través de cálculos trigonométricos la distancia al Sol y la circunferencia de la Tierra.

En el siglo XVII, tomó cuerpo la idea de que la tierra no era esférica sino que tenía forma elipsoidal: la tierra sería, en ese supuesto, un elipsoide de revolución. Las incógnitas que entonces habría que determinar fueron los dos parámetros de la elipse meridiana, pero el método anterior pudo conservarse, pues toda medida de un arco de meri-



diano permite plantear una ecuación entre los datos (longitud y amplitud del arco) y dichos parámetros. Según esto, bastaría con dos mediciones de arcos para resolver el problema. La exactitud de esas mediciones serían tanto más fiables cuanto más separados estuvieran ambos arcos, por lo que una habría de tomarse cerca del polo y otra cerca del ecuador.

Esto dio lugar, como a continuación veremos, a las expediciones científicas, organizadas por la Academie Royale des Sciencies de Francia, a Laponia (1736-1737) y al Virreinato del Perú (1735-1744), para medir el arco de meridiano en esos lugares extremos, que demostraron la hipótesis de que la superficie geométrica de la Tierra podía asimilarse a un elipsoide de revolución achatado por los polos.

Consideraciones previas

Al siglo XVII se le puede considerar como un periodo de transición, en el que se perfeccionan los logros de la nueva cartografía, apareciendo al final del mismo las primeras innovaciones de la cartografía científica contemporánea, que se afirman a lo largo del siglo XVIII y se desarrollan en el siglo XIX.

A principios del siglo XVII el conocimiento científico progresa rápidamente. La tierra es explorada, liberada de las tradiciones ptolemaicas por Mercator y Ortelius, y el cielo recorrido. Copérnico (1472-1543) ha abierto el camino con sus predicciones sobre el sistema del mundo, perfeccionado posteriormente por Kepler (1571-1630) y Galileo (1564-1642).

En enero del año 1610, Galileo dirigía por primera vez su lente hacia las

estrellas. No se trataba en aquella época de un telescopio, sino de un simple “juguete”, como él decía, un instrumento que perfeccionó a partir de la invención de un óptico holandés de Middelburg, Hans Lippershey. Aunque el aumento es sólo de 30, Galileo queda conquistado por el increíble hormigueo de las estrellas, cuyo número es diez veces más elevado, al menos, que el de las estrellas ya conocidas. Galileo es autor de dos obras que aparecen bajo una manta en Leyde y que servirán a Newton (1643-1727) para enunciar científicamente su ley de gravitación universal: “. una manzana madura cae de su rama...”. De la atracción terrestre a la gravitación universal, el paso siguiente es inminente.

Se conocen la mayor parte de las proyecciones y se saben construir geoméricamente. Pero en lo concerniente a la determinación de posiciones se padece, aún, la imperfección de los métodos de medida, sobre todo en la determinación de longitudes. Los cartógrafos se dan por satisfechos, en general, con reproducir los contornos heredados de los antiguos y situar sobre ellos los nuevos datos, sin controlarlos demasiado ni introducir innovaciones reales, salvo quizás en aquellos aspectos relativos a la ejecución gráfica.

Al cumplirse el primer tercio del siglo XVII se intenta aplicar el anteojito a los instrumentos graduados existentes, con el fin de dotar de gran precisión a las determinaciones astronómicas, pero fue a mediados de este siglo cuando comenzaron a utilizarse los aparatos físicos destinados al análisis de la atmósfera, con la finalidad de corre-

gir o aproximar más la medición obtenida por la observación astronómica. El termómetro, usado ya en Italia en el año 1641, el barómetro, descubierto por Torricelli en 1644, y el higrómetro, configuraron elementos de apoyo imprescindibles en el arte de la buena observación.

También destacan los descubrimientos en el campo de la medición del tiempo. La relojería debe su progreso a la aplicación, que realizó Huyghens (1629-1695), del péndulo a los relojes en el año 1656. Con la entrada en escena de todos estos aparatos se multiplican las observaciones astronómicas de longitudes y latitudes, poniéndose en evidencia los groseros errores que se transmitían de un mapa a otro.

A partir de entonces, la principal preocupación de los cartógrafos será eliminar estos errores y llegar a obtener documentos de una exactitud incontestable. Esta idea inspira, en Francia, obras como las de Guillaume Delisle (1675-1726) y Jean Baptiste Bourignon d'Anville (1697-1782), autores de mapamundis que incluían los descubrimientos más recientes y de colecciones de mapas de detalle que constituían verdaderos atlas universales.

Es en este contexto científico cuando se produce un hecho trascendental, que da origen a una nueva revolución de la cartografía. En el año 1666, el ministro Colbert ve realizado su sueño de crear la Academie Royale des Sciencies de París, auténtico foco de saber astronómico y geodésico que hace tomar hegemonía a Francia en estas técnicas en apogeo. Esta Institución aportó un notable impulso a los estudios relacionados con las denominadas Ciencias de la Tierra, para lo cual



reunió en París científicos procedentes de toda Europa, como los matemáticos Leibnitz, Huyghens y Picard, los astrónomos Cassini y Lleyelius, el naturalista Hartsoeker, el botánico Marchand, el físico Marian de la Chambre, los químicos Duclos y Pecket, y el óptico von Ischimhausen. Sus tareas prioritarias fueron la medición del arco de meridiano, la determinación de longitudes y el estudio de la gravedad y el magnetismo. Objetivos de gran importancia científica y de aplicación directa a la cartografía.

Seis años más tarde se funda el Observatorio de París, y tres después el inglés de Greenwich. Este último, aunque en un principio estuvo más dedicado a la navegación que a la Astronomía, cooperó en gran medida a los avances que se produjeron en el campo de la cartografía. Se instituyó el cargo de Astrónomo Real para la dirección, siendo la primera persona que lo ostentó John Flamsteed (1646-1719), autor de la proyección sinusoidal; le sucedió Edmund Halley (1656-1742), descubridor del cometa de su nombre y autor de mapas temáticos sobre fenómenos astronómicos y geofísicos. El siguiente fue Isaac Newton, descubridor de las leyes de la gravitación universal y promotor de la polémica planteada sobre la figura de la tierra.

Primeras mediciones de un arco de meridiano

Tras la denominación de Academie Royale des Sciencies, se escondía un proyecto ambicioso: el establecimiento de mapas precisos del reino con el fin de definir los proyectos y trabajos de construcción de infraestructuras considera-

dos indispensables para el desarrollo del país. La tarea era compleja, puesto que en primer lugar había que fijar con precisión los límites del territorio, y en segundo lugar habría que medir un arco de meridiano por medio del método de la triangulación. Era el primer paso para lo que entonces se llamó “cartografía geométrica” y hoy se denomina “cartografía topográfica”.

Las dificultades para medir un arco de meridiano habían quedado resueltas en 1615, cuando Willebrord van Roijen Snell (1580-1626) perfeccionó el método de la triangulación aplicándolo a tal fin. En efecto, si se tiende una cadena de triángulos a lo largo de un meridiano y se miden los ángulos y el desarrollo de uno de los lados, se podrá calcular el desarrollo de todos los demás. Si también se determina astronómicamente el acimut de un lado, se podrán calcular las proyecciones de todos los lados sobre el meridiano, la suma de los cuales será el desarrollo del arco, cuya amplitud angular se conocerá por la diferencia entre las latitudes de los extremos de la cadena.

Snell en su obra *Eratosthenes Batavus, sive de terræ ambitus vera quantitate*, publicado en 1617, describe el método empleado y el resultado obtenido de 107,395 Km. para la longitud de un arco de meridiano correspondiente a un grado de latitud. Esta medición se aproxima a los 111,2 Km. que corresponden al valor actual de un grado, supuesta la Tierra esférica.

Los progresos científicos y el perfeccionamiento de los instrumentos de medida hicieron posible la obtención de resultados más exactos en el proyecto auspiciado por la Academie Royale des Sciencies. Se confió la misión

a uno de sus miembros, el abate Jean Picard (1620-1683), quien se rodeó de colaboradores tan cualificados como el geógrafo Philippe de La Hire (1640-1718), de París, y el astrónomo italiano Jean Dominique Cassini (1625-1712), de Bolonia, nombrado por Colbert primer director del Observatorio de París y precursor de una verdadera dinastía que reinará durante cerca de doscientos años en la cartografía francesa.

Picard realizó la triangulación de un arco de meridiano comprendido entre París y Amiens (1669-1670), utilizando un telescopio con hilos reticulares. Logró mejorar sustancialmente los 107,395 Km. de Snell para la longitud del arco de meridiano correspondiente a un grado de latitud, pues sus 111,2 Km. obtenidos, están notablemente cerca de los 111,111 Km. que corresponden al valor que hoy se considera exacto, supuesta la Tierra esférica. Obtuvo un valor del radio de la esfera terrestre con un error de 0,0 1%. Estas mediciones fueron muy importantes para resolver la forma de la Tierra. Años después se prolongó la medición para extenderlo desde el canal de La Mancha hasta el Mediterráneo.

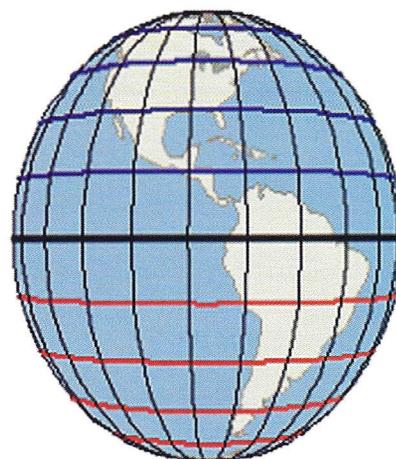
Estos resultados permitieron a Newton verificar la ley de gravitación universal que había formulado con anterioridad. También por esa época Richer observó en una expedición realizada a Cayena, que debían acortar la longitud del péndulo, previamente ajustado en París, para que batiese segundos, obteniendo la conclusión de la existencia de un incremento del valor de la gravedad en los polos respecto al ecuador. Por este método midió un arco del meridiano de París el aba-



1 / FERRER TORIO, RAFAEL, "La forma de la Tierra (1630-1750)", en *La imagen del mundo. 500 años de cartografía*, Instituto Geográfico Nacional, MOPT, Madrid, 1992, p. 124.



La Tierra de Newton (izq.), La Tierra de Cassini (dcha.)



te Picard en 1670, obteniendo el valor de 57.060 toesas, o sea 112.210 metros.

A pesar de las observaciones efectuadas, seguía en pleno apogeo la polémica suscitada desde mediados de siglo sobre la forma y dimensiones de la Tierra. Un simple razonamiento teórico de Newton trajo como consecuencia el establecimiento del equilibrio relativo de una masa homogénea en rotación uniforme. A partir de ahí surgió la discusión de que para determinar la forma de la Tierra habría que optar entre dos diferentes tipologías de tratamiento: el fundamento físico o el geométrico 1.

Newton, en el año 1687, a partir de su ley de gravitación universal, obtuvo un elipsoide de revolución como la figura de equilibrio para una tierra homogénea, fluida y sometida a la rotación. A partir de esta afirmación aparecen dos escuelas que sostienen que la forma de la tierra es un elipsoide de revolución, pero difieren en su eje de deformación. La escuela inglesa encabezada por Newton, que defiende el elipsoide de revolución achatado por los polos, y la francesa, cuya cabeza visible es Jacques Cassini (1677-1756), que propugna un elipsoide de revolución alargado por los polos. A esta conclusión había llegado al prolongar el arco de meridiano medido por Picard.

Desde ese momento se aceptó que la Tierra no es esférica, aunque hubiera diferencias sustanciales en cuanto a la interpretación de su configuración. La defensa de uno u otro modelo originó una verdadera pugna entre los científicos de la época de ambas escuelas. Como consecuencia de ello, los astrónomos concedieron prioridad a la verificación de estas hipótesis sobre otros

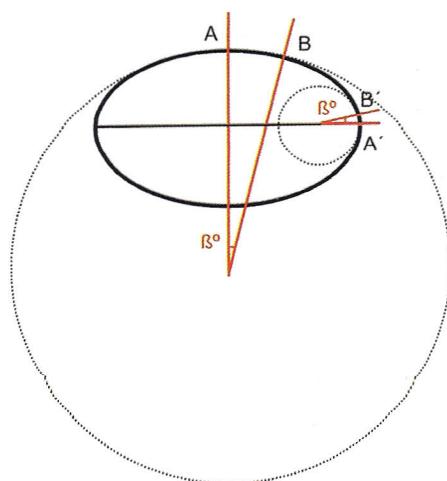
problemas propiamente cartográficos. La prolongación del arco de meridiano medido por Picard, hacia el Sur hasta Perpignan, realizada por Jean Dominique Cassini y su hijo Jacques Cassini entre los años 1683 y 1702, y hacia el Norte hasta Dunkerque, efectuada por La Hire y, posteriormente, por su hijo y el de Cassini, entre 1683 y 1718, confirmaron, en apariencia, la tesis francesa de que la tierra estaba alargada en el sentido del eje polar.

Isaac Newton había determinado de manera teórica que el radio ecuatorial de la Tierra era 1/230 más largo que el radio polar. Un método consistía en medir la longitud de arco de 1° de latitud cerca del ecuador y cerca del polo. De otra parte, Jean-Dominique Cassini y su hijo Jacques Cassini, en la medición antes citada, habían concluido que el diámetro que unía los dos polos era 1/95 más largo que el diámetro ecuatorial, lo que contradecía el resultado teórico de Newton.

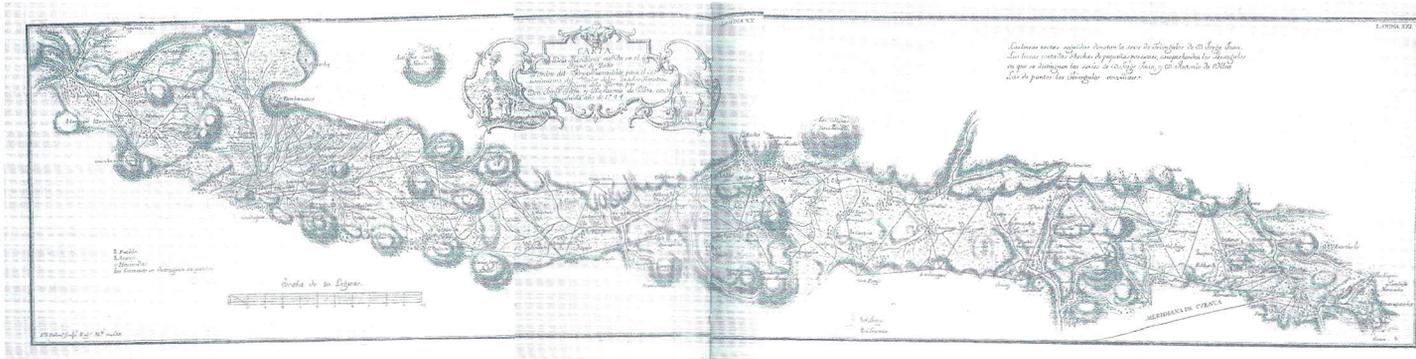
Se consideró que en la medición de los científicos franceses se había hecho sobre una distancia pequeña y arcos reducidos, por lo que los resultados podían estar enmascarados por los errores de observación. Para resolver esta duda, la Academie Royale des Sciences decidió emprender dos medidas de arcos de meridiano en posiciones extremas, con el fin de disipar cualquier equívoco. Se tomarían datos precisos sobre

la correspondencia de los valores angular y lineal de dos posiciones de meridiano en dos lugares de la Tierra: Laponia, en las inmediaciones del Polo Norte, y en el virreinato del Perú, en el Ecuador. Si en las dos mediciones se obtenían resultados iguales, la Tierra tendría forma esférica; si la del polo era más grande, el achatamiento se produciría en los polos y Newton tendría razón; en el caso contrario, serían los académicos franceses quienes habían defendido la teoría correcta.

Gráficamente podría explicarse del siguiente modo: Dados dos parejas de puntos (A, B) y (A', B') que definen arcos de un mismo meridiano. Para igual valor angular b° entre sus cenits, si la tierra fuera esférica, sus longitudes serían



Relación entre los valores angular y lineal de dos puntos.



Pierre Louis Moreau de Maupertuis.



Alexis Claude Clairaut.

an iguales: $LAB = LA'B'$. Supuesta la tierra elipsoidal achatada por los polos, como proponía Newton, si el valor angular b° sigue siendo el mismo, como el radio de curvatura de la circunferencia osculatriz en A será mayor que en A', la longitud del arco en el polo LAB será mayor que en el Ecuador LA'B'. Esta es la comprobación que debería hacerse.

Las mediciones efectuadas en las dos expediciones confirmaron que la Tierra estaba achatada en los polos. De esta forma la teoría de Newton triunfó y el debate entre newtonianos y casinianos quedó zanjado. Sin embargo, no sería hasta el siglo XX cuando se conocería la respuesta definitiva a la forma de la Tierra.

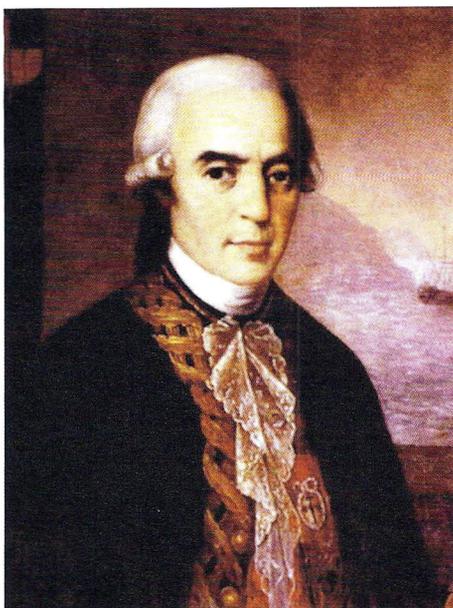
Expedición a Laponia (1736-1737)

El 2 de mayo de 1736, partió de Dunkerke la expedición hacia la Laponia dirigida por Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759), al que acompañaron otros científicos como el gran matemático y astrónomo Alexis Claude Clairaut (1713-1765), Camus, Le Monnier, el abate Outhier y Anders Celsius (1701-1744), de la Universi-

dad de Upsala, que se incorporó allí. Instalaron la base en la ciudad finlandesa de Tornio. Desarrollaron los trabajos con rapidez –duraron un año– y, a pesar ataque de los insectos en verano y los rigores del crudo invierno del Círculo Polar Ártico, los finalizaron en agosto de 1737. Aunque en su viaje de vuelta naufragaron en el Báltico, pudieron mantener los expedientes de sus observaciones indemnes.

Midieron con exactitud una línea de base de 14.3 Km. en el Río Tornio que estaba cubierto de hielo, y con la ayuda de esa se calculó por triangulación, la longitud del grado de meridiano. El punto más al sur de la línea era el campanario de la iglesia de Tornio y el punto más al norte era la colina de Kittisvaara que estaba 4 km al norte de la aldea de Pello.

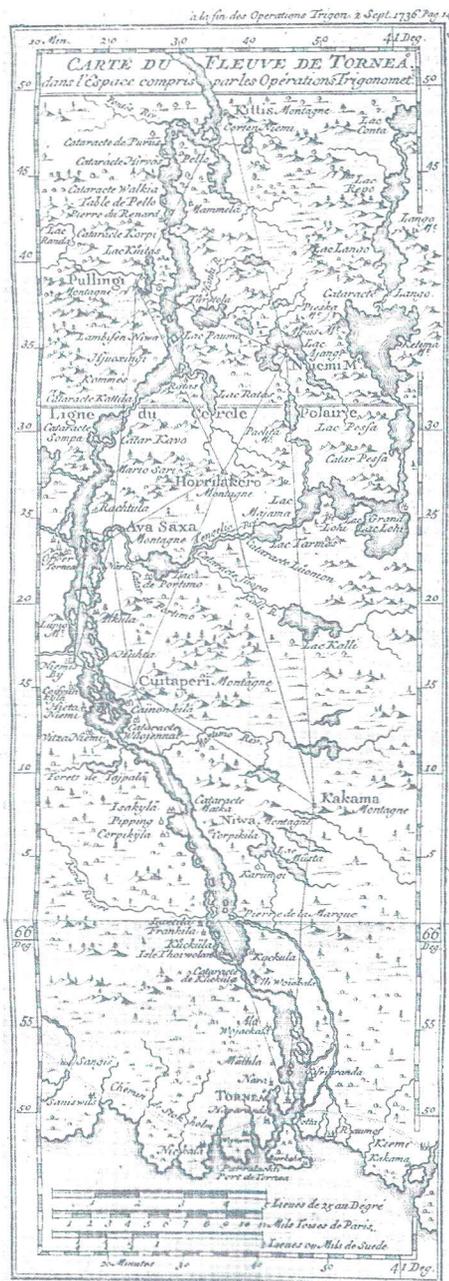
Cuando Maupertuis volvió a Francia, informó que en Laponia un grado de meridiano media 57.437,9 toesas. Este resultado, comparado con el valor de las 57.060 toesas obtenido cerca del París, comprobó el achatamiento de la tierra cerca de los polos, exactamente como predecía la teoría de Newton. Más tarde se encontraron graves errores en sus mediciones, sin embargo las inferencias



Antonio de Ulloa.



Jorge Juan.



Carta de la medición en Perú.

que sacaba de éstas eran correctas.

Los resultados de las mediciones los publicó Maupertuis en París (Imprimerie Royale), en 1738, con el título de *La figure de la terre*. En su *Relation du voyage*, exponía que la tierra era una esfera achatada por los polos; algo que, implícitamente ya había reconocido seis años atrás. El relato de la expedición también apareció en la obra del historiador de la expedición, el abad Réginald Outhier, titulada *Journal d'un Voyage au Nord en 1736 et 1737*, que imprimió en Ámsterdam, en el año 1749, con una relación de grabados del viaje.

Así mismo, Alexis Claude Clairaut, algún tiempo después del viaje, publicó la obra *Theorie de la figure de la terre* (París, Durand, 1743), donde zanjaba el debate sobre la forma de la tierra confirmando, sin dejar lugar a dudas, el achatamiento polar. Definió el valor del achatamiento a partir de mediciones de la gravedad, en lugares de diferente latitud geográfica, introduciendo el método gravimétrico o geodesia física. La aplicación práctica de su teoría no pudo llevarse a cabo con cierta calidad hasta tiempos actuales, debido a la carencia de instrumental adecuado para hacer medidas precisas del valor de la gravedad.

Expedición al Virreinato de Perú (1735-1744)

Para poder llevar a cabo la expedición al Virreinato del Perú y, en concreto a las ciudades de Quito y de Cuenca –hoy pertenecientes a la República del Ecuador–, situadas en los meridianos 78° 30' y 79° respectivamente, el Rey Luis XV de Francia tuvo que pedir permiso a su primo Felipe V de España, ya que esos

territorios pertenecían a su corona.

España recibió la petición en marzo de 1734. Con el informe positivo del Consejo de Indias, Felipe V, concedió la venia pero con la condición de que dos científicos españoles, expertos en la Ciencia Matemática, participaran en todas las operaciones, “no sólo para que así pudiese hacerse con mayor facilidad y brevedad, sino también para que pudiesen suplir la falta de cualquier académico, o de todos, temi-

ble en tantas navegaciones y diferencias de climas y para continuar y aún hacer enteramente ellos solos, en caso necesario, la medida proyectada, para dar después cuenta de ella a la Academia Real” 2.

Fueron designados para este cometido los guardias marinas Jorge Juan y Santacilia y Antonio de Ulloa y de la Torre-Giral. Tenían veintiún y diecinueve años respectivamente y hubo de ascenderles cuatro grados, a tenien-



3 / Para una biografía de Jorge Juan, véase: ALBEROLA, Elia, *Biografía de D. Jorge Juan y Santacilia*, en la web: <http://www.jorge-juan.net/>.

4 / CATALÁN PÉREZ-URQUIOLA, MANUEL, "Astronomía, Geodesia y Navegación en la Armada Española de la Ilustración en el Real Observatorio de la Marina de Cádiz". *Astronomía y Cartografía de los siglos XVIII y XIX*. Madrid, 1987, p. 19.

5 / CANO TRIGO, JOSÉ MARÍA, *Aportaciones de la Armada Española a la Geografía de la América del Sur en el siglo XVIII*. I Congreso Nacional de Geografía sobre Latinoamérica. Huelva, 1992, p. 20.

tes de navío, según Real Cédula de 3 de Enero de 1735, para que su categoría militar pudiera ampararles hasta que su talento y carácter les encumbraran a la altura que posteriormente alcanzaron. Desde el primer momento surgió una amistad entre ambos que se prolongó toda la vida. Según las instrucciones recibidas, Jorge Juan sería el matemático y Antonio de Ulloa el naturalista 3.

Las tareas encomendadas eran muy diversas: llevar diario completo del viaje y de todas las medidas físicas y astronómicas, cálculos de longitud y latitud, levantar planos y cartas, descripción de puertos y fortificaciones, análisis de costumbres, estudios de botánica y mineralogía, y elaboración de un informe secreto sobre la situación política y social de los virreinos, además de un control policiaco sobre los académicos franceses, dado que su paso por las colonias suponía obtener datos que caerían en manos de los ministros de Luis XV.

Con todas estas instrucciones partieron de Cádiz el 26 de mayo de 1735 en compañía del Marqués de Villagarcía, que acababa de ser nombrado virrey del Perú, a bordo del navío *El Conquistador*, Jorge Juan, y en la fragata *Incendio* Antonio de Ulloa. Llegaron el 7 de julio a Cartagena de Indias, pero hasta el 15 de noviembre no lo hicieron los académicos franceses, y juntos emprendieron la ruta por Guayaquil para arribar a Quito en junio del año siguiente.

Las razones por las que se eligió esta zona americana del Ecuador y no otra, fue, según Jorge Juan, porque no hay "otro país más adecuado que el de la provincia de Quito, en la América



La Condamine.



Pierre Bouguer.

meridional, porque en otros que la equinoccial contaba en África y Asia, o se hallaban habitados por pueblos bárbaros, o no tenían la extensión necesaria para el intento..." 4.

La comisión francesa estaba integrada por tres jóvenes académicos "bastante mal avenidos" 5: Louis Godin, Pierre Bouguer y Charles Marie de La Condamine. Louis Godin, astrónomo y matemático de prestigio, era el más joven de los tres aunque el más antiguo de los académicos. Godin fue el que mejor se relacionó con los españoles. Al concluir su misión se quedó de catedrático de Matemáticas y Cosmografía en la Universidad de San

6 / CATALÁN PÉREZ-URQUIOLA, MANUEL, "El Instituto y Observatorio de Marina, consecuencia científica de la medida del grado de meridiano en la América Hispánica", *La Forma de la Tierra. Medición del Meridiano. 250 aniversario*, Museo Naval, Madrid, 1986, pp. 35-36.

7 / *Compendio de mathematicas para el uso de los Cavalleros Guardias Marinas por el Coronel Don...* Imprenta de la Academia, Real Isla de Leon, 1758. 14 H. + 151 Pp. + 42 Lam./ Texto, Historia-E, Matematicas / BCUS-A 013/026.

8 / Manuscrito autografo sin fecha (entre 1753 y 1760) dado a conocer por el Prof. J.M. Gentil Baldrich. Procede de la biblioteca del Duque de Osuna (Manuscrito, Historica-e, Matematicas / bn-mss-11259/32).

Marcos, en Lima.

Louis Godin, a propuesta de Jorge Juan, fue nombrado profesor y director de la Academia de Guardias Marinas de Cádiz (1753-1760) 6, donde publicó un valioso *Compendio de mathematicas* (1758) 7 y dejó un manuscrito sin publicar titulado *Prologo e introduccion a un tratado para la popularizacion de las teorías filosóficas de Newton* 8.

Pierre Bouguer, de treinta y nueve años, era el más viejo de los tres, de carácter irascible, discutía continuamente con sus compañeros y no soportaba a los dos jóvenes oficiales españoles. Era un excelente geómetra y había sido profesor de Hidrografía en la Escuela Naval de El Havre.

Charles Marie de La Condamine, de treinta y cuatro años, hombre travieso, ingenioso e inquieto, de alta y perturbada mentalidad, también miraba con desdén a los españoles. Había pertenecido a la Caballería francesa, después se dedicó a escribir y a las ciencias químicas.

Como se ha dicho, el objetivo de la expedición era obtener la longitud de un grado del arco de meridiano midiendo, por triangulaciones, la distancia norte-sur en una dirección próxima al meridiano de Cuenca, instalando posteriormente en sus extremos dos observatorios para comparar esta medida con la diferencia en latitud determinada, para estos vértices, por procedimientos astronómicos. Como base métrica de las triangulaciones se eligió el llano de Yaruqui, desde la hacienda de Oyambaro hasta el extremo de la de Caramburu, decidiendo separarse en dos grupos que medirían la base en sentidos opuestos con el fin de



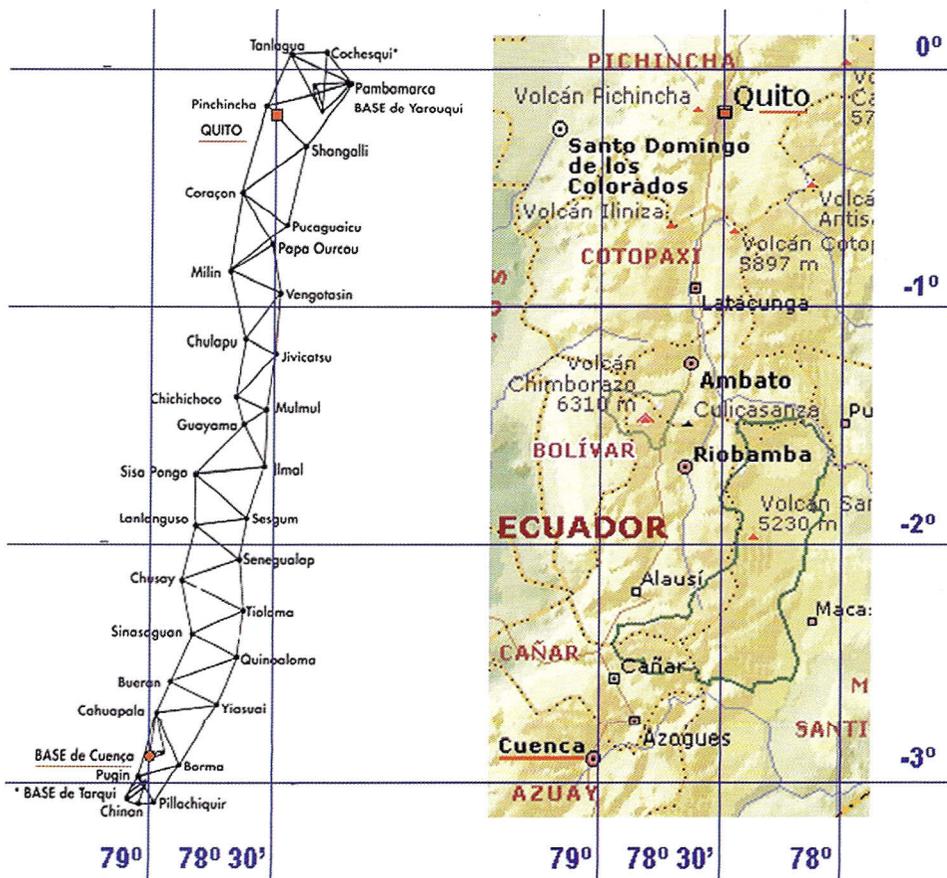
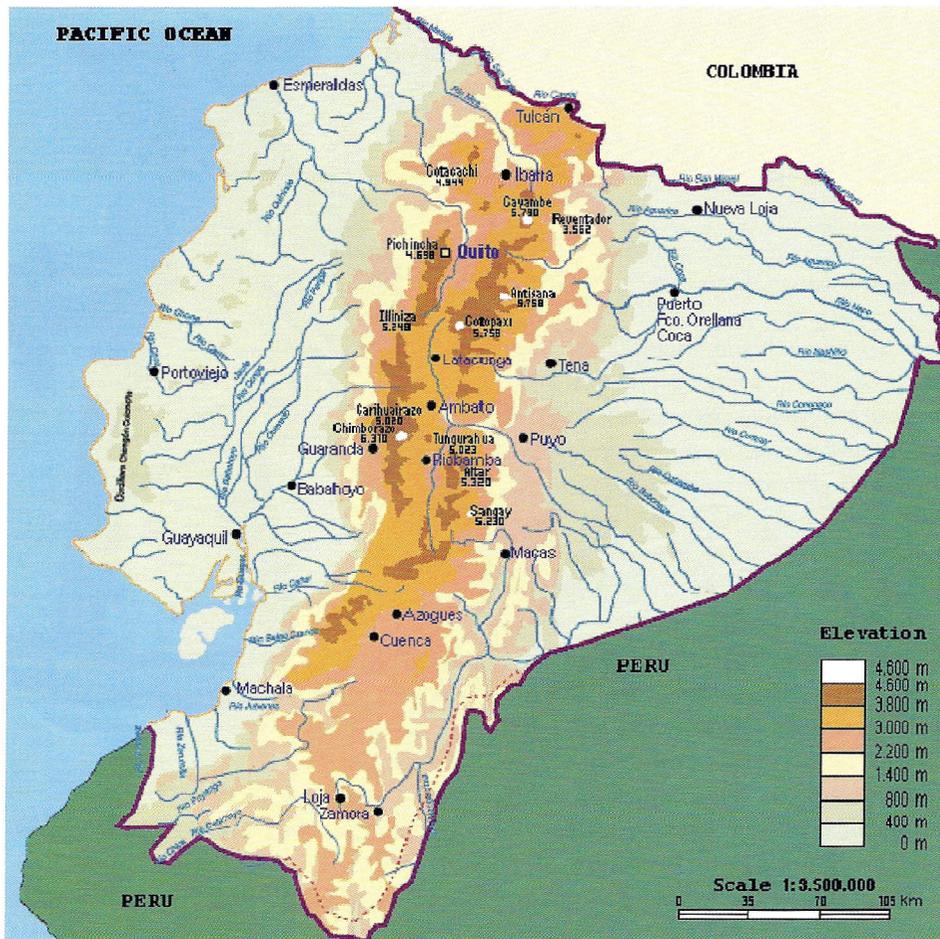
Arriba: Condiciones geográficas del valle andino que ocupa la parte central de la hoy República del Ecuador entre las ciudades de Quito y Cuenca.

Abajo: Cadena de triángulos establecida a lo largo de tres grados de latitud entre los meridianos de Quito y Cuenca, con una longitud de unos 434 Km.

comprobar su exactitud. La medida empleada sería la *toesa* equivalente a 1,98 metros. Uno grupo lo formó Godin y Jorge Juan, y el otro, La Condamine, Bouguer y Ulloa.

Los trabajos geodésicos comenzaron con la medición de la base indicada en Yaruqui, el día 10 de octubre de 1736, y a partir de ella con una cadena de triángulos que comprendían todo el enorme valle interandino que se extiende entre las ciudades de Quito y Cuenca. La triangulación abarcó una extensión de 78 leguas (medida itineraria que en España equivale a 5572,7 m., es decir unos 434 Km.), comprendidas entre el pueblo de Mira, a unas 16 leguas al noroeste de Quito, y el de Pillat-Chiquir, a unas 6 leguas al sureste de la ciudad de Cuenca. Fueron largos y penosos, hasta el punto que sólo en el reconocimiento del terreno y la elección de los vértices de la triangulación tardaron un año, teniendo en cuenta que algunos se situaron en cumbres por encima de los 4000 metros de altura y temperaturas bajo cero o en depresiones con más de 40° a la sombra.

Más tarde, en 1748, Ulloa describió en su *Relación Histórica del Viaje a la América meridional* muchas de las dificultades y sufrimientos que tuvieron que soportar: "Nuestra común residencia era dentro de la choza, así porque el exceso del frío y la violencia de los vientos, no permitían otra cosa, cuando porque de continuo estábamos envueltos en una nube tan espesa que no dejaba libertad a la vista....cuando se elevaban las nubes, todo era respirar su mayor densidad, experimentar una continua lluvia de gruesos copos de nieve o



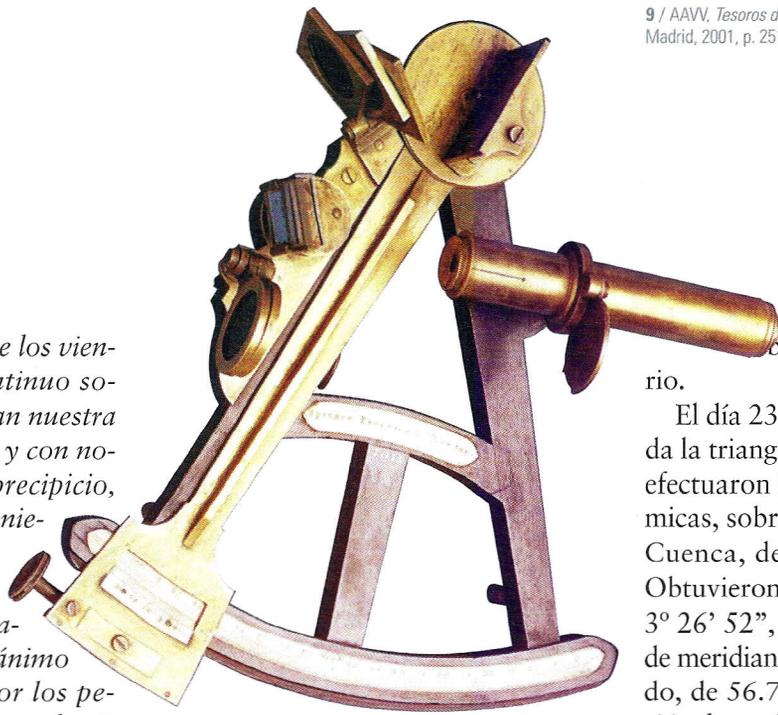


granizo, sufrir la violencia de los vientos y con ésta, vivir en continuo sobresalto, o de que arrancaran nuestra habitación y dieran con ella y con nosotros en el tan inmediato precipicio, o de que la carga de hielo y nieve, que se amontonaba en corto rato sobre ella, la venciese y nos dejase sepultados”....y se aterrorizaba el ánimo con el estrépito causado por los peñascos, que se desquiciaban, y hacían con su precipitación, y caída no sólo estremecer todo aquél picacho, si también llevar consigo cuantos tocaba en el discurso de la carrera...”(4)

Jorge Juan y Ulloa, tuvieron que interrumpir su trabajo en tres ocasiones y andar el largo camino desde Quito a Guayaquil, por orden del Virrey del Perú José Antonio de Mendoza, que les pidió colaboración para reclutar y organizar tropas, fortificar plazas fuertes, y armar y mandar dos fragatas –*Belén* y *Rosa del Comercio*– para neutralizar los ataques del almirante inglés Anson.

Terminada la medición geométrica del trozo de arco de meridiano por medio de la triangulación, el siguiente paso era medir la amplitud del ángulo del arco triangulado para saber el valor del grado en las proximidades del Ecuador, para lo cual era necesario medir la latitud en cada extremo de la triangulación. A tal efecto, Godin y Jorge Juan instalaron su observatorio en Cuenca, mientras que el otro grupo se estableció al sur en las proximidades de la hacienda de Mama-Tarqui.

Las observaciones se dieron por concluidas el 31 de enero de 1743. El valor del arco de meridiano correspondiente a un grado de latitud tuvo



ya instalado su observatorio.

El día 23 de mayo de 1744, concluida la triangulación, Jorge Juan y Ulloa efectuaron las observaciones astronómicas, sobre los mismos astros que en Cuenca, de la latitud de ese vértice. Obtuvieron la medición de un arco de 3° 26' 52", con una longitud del arco de meridiano correspondiente a un grado, de 56.767,788 *toesas*. Esta medición fue más exacta que las que hicieron los científicos franceses. Estos resultados se validaron ciento sesenta y seis años más tarde, cuando una Comisión del Instituto Geográfico del Ejército francés, revisó esas observaciones y medidas y las consideró mucho más precisas.

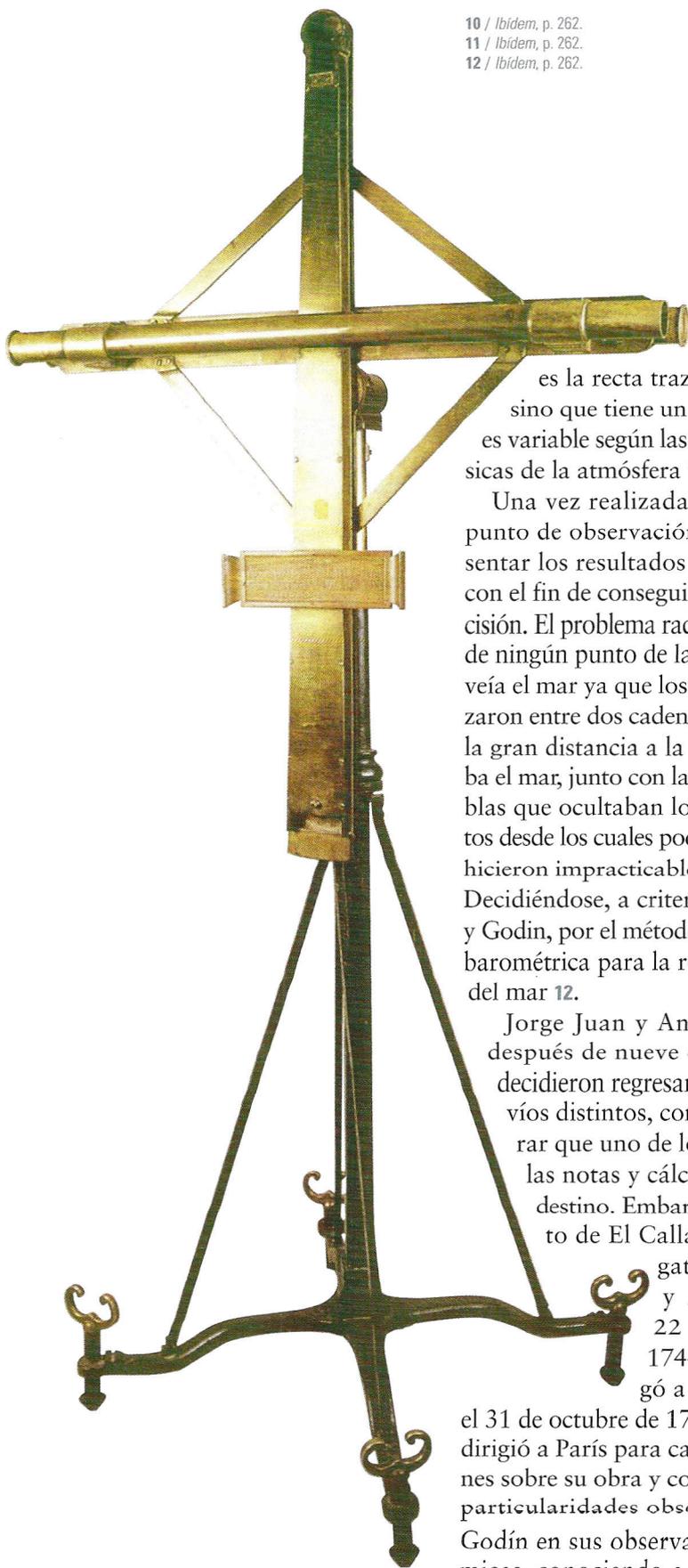
Tuvieron que enfrentarse a dificultades inéditas para la ciencia del momento como la refracción atmosférica y astronómica, la variación local de la gravedad y, por tanto, de la verticalidad de la plomada junto a las grandes masas montañosas, la dilatación de los materiales, los desniveles entre las señales, las oscilaciones térmicas, los desajustes en los aparatos de precisión provocados por el traslado habitual a través de cimas montañosas y caminos difíciles y el no haber hecho nunca observaciones astronómicas por encima de los 3.000 metros 9.

El instrumental que utilizaron adolecía de graves defectos, por lo que tuvieron que repetir numerosas veces los cálculos, llegando a tener que construir Godín, Jorge Juan y el relojero Hugot, un instrumento de 20 pies de largo para facilitar las mediciones. Utilizaron para las mediciones de la fase astronómica: barómetros, plomadas, termómetro y un Octante fabricado en

diferentes resultados según la persona que hizo los cálculos: 56.747 *toesas* para Godin, 56.753 *toesas* para Bouguer, y 56.750 *toesas* para La Condamine. Finalizados estos trabajos la Comisión se disolvió para dar cuenta a la Academia de Ciencias de París, regresando a Francia Bouguer y La Condamine por separado, el primero por el río de la Magdalena hasta el Atlántico y el segundo por el río Amazonas, y quedando Godin enfermo en Lima.

Jorge Juan permaneció allí, porque sabía por Godin que había que prolongar la triangulación doce leguas más al norte, hasta Pueblo Viejo de Mira, y recuperar, además, el más pesado de los aparatos que habían dejado allí al iniciar los trabajos. Él sólo, en enero de 1744, emprende la ampliación de la red comenzando por el vértice Pambamarca y repitiendo la estación de Guapulo, ambas con altitud superior a los 4.000 metros. Ulloa se le unió el 14 de febrero, para ayudarle en este trabajo y observar los vértices de Guapulo, Campanario, Cosín y Pueblo Viejo de Mira, que era el punto más septentrional del meridiano medido, y donde Godin ha-

Nivel geodésico de Jorge Juan.



10 / *Ibidem*, p. 262.
 11 / *Ibidem*, p. 262.
 12 / *Ibidem*, p. 262.

Londres, en 1734, que perteneció a Antonio de Ulloa, con un gran sector astronómico de 18 pies que transportaron desde París.

En la fase geodésica, o geométrica como entonces se llamaba, utilizaron un Nivel geodésico fabricado en París en 1735, perteneciente a Jorge Juan. Este instrumento se usó, principalmente, para el reconocimiento geográfico y cartográfico del inmenso valle andino, comprendidos entre las dos cadenas montañosas donde se haría la triangulación. Se comenzó midiendo la «base fundamental» de unos doce Km. de longitud, a partir de la cual se procedió a la triangulación del arco del meridiano. Con este Nivel se procedió, de un lado, a comprobar la horizontalidad de las perchas sobre las que se colocaban las *toesas* utilizadas para medir el terreno y de otro, a la nivelación de los ángulos observados ya que tenían diversas alturas que debían ser reducidas al nivel de horizontalidad del punto de observación. Es decir, había que prescindir completamente de las desigualdades de la superficie pues darían lugar a grandes errores en la medición, y considerar la tierra como una esfera ideal en la que todos sus puntos están alineados con respecto al nivel del mar o, en su defecto, respecto a un plano de comparación **10**.

En la nivelación geodésica, los expedicionarios tuvieron que tener en cuenta el error producido por la refracción atmosférica en las observaciones de las distintas cotas de los ángulos de la triangulación. Pues, como bien sabían, la dirección según la cual se ve un punto B desde otro A es una línea tangente que describe el rayo luminoso al pasar del primer punto al segundo y que,

por causa de la refracción, no es la recta trazada entre ambos sino que tiene un valor mayor que es variable según las circunstancias físicas de la atmósfera **11**.

Una vez realizada la nivelación al punto de observación, se debían presentar los resultados al nivel del mar, con el fin de conseguir una mayor precisión. El problema radicaba en que desde ningún punto de la triangulación se veía el mar ya que los trabajos se realizaron entre dos cadenas montañosas, y la gran distancia a la que se encontraba el mar, junto con las persistentes nieblas que ocultaban los puntos más altos desde los cuales podía ser observado, hicieron impracticable el uso del nivel. Decidiéndose, a criterio de Jorge Juan y Godín, por el método de la nivelación barométrica para la reducción al nivel del mar **12**.

Jorge Juan y Antonio de Ulloa, después de nueve durísimos años, decidieron regresar a España en navíos distintos, con el fin de asegurar que uno de los duplicados de las notas y cálculos llegara a su destino. Embarcaron en el puerto de El Callao sobre las fragatas francesas *Liz* y *Deliberance*, el 22 de octubre de 1744. Jorge Juan llegó a Brest con la *Liz* el 31 de octubre de 1745. Desde allí se dirigió a París para cambiar impresiones sobre su obra y contrastar algunas particularidades observadas por él y Godín en sus observaciones astronómicas, conociendo a los astrónomos Marian, Clairaut y La Caille, autores de las fórmulas que tantas veces ha-

gatas francesas *Liz* y *Deliberance*, el 22 de octubre de 1744. Jorge Juan llegó a Brest con la *Liz* el 31 de octubre de 1745. Desde allí se dirigió a París para cambiar impresiones sobre su obra y contrastar algunas particularidades observadas por él y Godín en sus observaciones astronómicas, conociendo a los astrónomos Marian, Clairaut y La Caille, autores de las fórmulas que tantas veces ha-

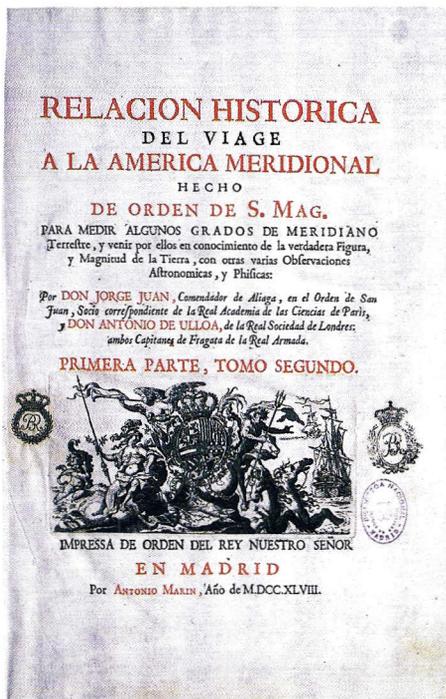


bían empleado. Conoció a Reaumur, inventor del termómetro, y a otros célebres académicos que, en compañía de La Condamine y Bourguer, reintegrados a sus actividades, le votaron como miembro correspondiente de la *Royal Academie des Sciences*.

Antonio de Ulloa tuvo más dificultades. Apresada su fragata por los ingleses que declararon la guerra a Francia durante la travesía, tuvo que arrojar al agua la documentación comprometida, no así lo referente a la medida del grado, observaciones físicas y astronómicas, y noticias históricas, que entregó no sin advertir del interés que todas las naciones de Europa habían mostrado en esta empresa.

Fue encarcelado cerca de Portsmouth, pero interesándose por sus papeles los comisarios y comunicándolo al Almirantazgo, el Duque de Bedford le concedió la libertad. Pasó a Londres, donde el Ministro de Estado Conde de Harrington, le presentó a Martin Folkes, presidente de la Royal Society, quien se había hecho cargo de los papeles desde el Almirantazgo, y habiéndolos estudiado y viendo su valor científico los conservó y se los devolvió, no sin antes haberle propuesto junto al Conde de Stanhop, ser Miembro de la *Royal Society*.

Al llegar a Madrid, el Marqués de la Ensenada, ministro del nuevo rey Fernando VI, se interesó por sus investigaciones y decidió publicar las *Observaciones astronómicas y Phisicas*, y los cuatro volúmenes de la *Relación Histórica del Viage a la América meridional*, comprendiendo que el trabajo de los dos jóvenes no estaría terminado hasta su pública presentación, que fue en 1748, en una tirada de 900



ejemplares, (la edición francesa de La Condamine no aparecerá hasta 1751). En 1749, publicaron la “*Disertación histórica y geográfica sobre el meridiano de Demarcación*”.

Las *Observaciones astronómicas y Phisicas* de Jorge Juan suscitaban ciertos reparos, al aceptar éste por evidente el sistema de Copérnico, que todavía en Roma provocaba un cierto rechazo. Pero el jesuita padre Burriel defendió sus escritos, y para evitar la censura se acordó figurase en la segunda edición de 1773, un preámbulo de Jorge Juan titulado *Estado de la Astronomía en Europa*.

La obra “*Relación Histórica del viage a la América meridional*”, supuso una amplia repercusión en el desarrollo científico de la época. En el prólogo del tomo primero, primera parte, Antonio de Ulloa escribe: “*El asunto de este tomo, y de los tres que le siguen, es la Relación Histórica del Viage a la América Meridional, cuyo honorífico destino merecimos Don Jorge Juan, y Yo, a la Real deliberación del Rey nuestro Señor, (que está en el Cielo) el Señor Don Phelipe V. mandándonos para aquellos Reynos a practicar varias Observaciones, y principalmente las que*

13 / PALAU BAQUERO, MERCEDES, “Expediciones científicas en América en el siglo XVIII”, en *Astronomía y Cartografía de los siglos XVIII y XIX*. Comisión 5º Centenario. Madrid. 1987, p.37.

14 / CANO TRIGO, JOSÉ MARÍA, op. cit., p.26.

15 / Biblioteca Nacional de Madrid. Colección Ayala. Vol. LXXI, fol. 1. Cat. De Dominguez Bordona, 347.

conducían al mas perfecto conocimiento de la verdadera Figura de la Tierra, y magnitud de sus Grados. Esta materia se trata con la extensión correspondiente en el Tomo, que Don Jorge Juan ha escrito; pues como se previene en su prólogo, pareció conveniente para la mayor perfección, y claridad de este, y de los demás encargos, que se fiaron a nuestro cuidado, que el suyo estuviese escrito sobre Observaciones Astronómicas y Phisicas hechas por uno y otro, tanto en común como en particular; y el mío todo lo perteneciente a la Historia y bocetos del Viage”.

En efecto, Ulloa se ocupó de la relación general del viaje, de la formación de los mapas y de la descripción de los países visitados, Chile, Perú y Ecuador, y Jorge Juan escribió sobre Física, Astronomía y otras observaciones de carácter reservado 13. Por el contenido de las memorias redactadas por Jorge Juan, se puede comprobar que la labor de los científicos españoles fue más rigurosa que la de los académicos franceses. Así se reconoció en Francia, llegándose incluso a decir allí que “esta obra daría algún tipo de vergüenza a los matemáticos franceses que hasta ahora, de un viaje tan ruidoso, no habían dado más que una imperfecta y corta relación o extracto” 14.

Por su parte, Antonio de Ulloa destacó como naturalista y geógrafo, descubriendo en la expedición un nuevo metal: el platino. Existe en la Biblioteca Nacional de Madrid un manuscrito titulado “*Juicio de Don Antonio de Ulloa sobre el metal platina y modo más económico de explotarlo en el Virreinato de Santa Fe*” 15.

En 1748 alcanzó tanta importancia la publicación de las obras de Jorge



Juan y Antonio de Ulloa, que tuvieron que ser reimpresas en 1773. Por entonces las academias científicas de Francia, Inglaterra, Holanda y Alemania ya habían traducido la primera edición. Al francés la tradujo M. De Mauvillon, editándose en 1752, 1850 y 1861 en París y Ámsterdam. En inglés se imprimió cinco veces: 1758, 1760, 1762, 1772 y 1802. Holanda la editó en una ocasión, 1772. Esta es, sin duda, la mejor prueba de las excelencias de la obra, considerada como una de las grandes obras científicas sobre la América del siglo XVIII, sólo comparable a la que medio siglo después realizaría Alejandro de Humboldt.

En la figura 8 se reproduce la carta, contenida en el libro de Jorge Juan y Antonio de Ulloa, con indicación de la red de triangulación utilizada. En cuanto a la representación de la orografía se puede apreciar la aparición de los primeros cambios, sustanciales por otra parte, con referencia a la simbología de periodos anteriores, lo cual no quiere decir que el relieve se encuentre determinado perfectamente, de forma geométrica. Las montañas aparecen definidas por su proyección ortogonal sobre un plano horizontal, introduciendo un rayado para dar sensación de altitud, a modo de líneas de máxima pendiente y sombreado. Siguen manteniendo en el plano las formas abatidas para significar la vegetación y las poblaciones. La red hidrográfica es amplia y ofrece la carta la impresión de encontrarse bien determinada.

Epílogo

La forma de la tierra quedó definitivamente establecida, según Newton había imaginado, como un elipsoide de revolución achatado por los polos (forma naranja, según el argot de entonces para diferenciarla de la forma limón auspiciada por Cassini, aunque en la actualidad se ha demostrado que su forma es más bien asimilable a una pera). Se llegó a esa conclusión y a saber sus verdaderas dimensiones, a partir de las expediciones que la Academie Royale des Sciences de París organizó a Laponia y al Virreinato del Perú para medir el valor de un grado del arco de meridiano en esos lugares extremos.

La expedición a Laponia se hizo en un tiempo razonablemente corto, un año, porque no presentó apenas dificultades. La expedición a Perú, plagada

de dificultades de todo tipo y que duró casi una década, terminaría convirtiéndose en una auténtica gesta científica y abrió muchos caminos de futuro para diversas ramas del saber: geodesia, astronomía, navegación, botánica, etc. Los resultados de la medición del Perú, fueron muy exactos, con un error en tomo al 0,04% (unas 22 toesas aproximadamente).

Realizadas las dos mediciones del arco de meridiano, los resultados mostraron, sin lugar a dudas, que el grado polar era mayor en longitud que el grado ecuatorial, confirmando así la teoría de Newton de que la Tierra no era una esfera, sino un elipsoide de revolución aplanado por los polos. Semejante conclusión dio pie a que Voltaire afirmase, mediante un juego de palabras, que Newton había aplastado a la Tierra y a Cassini, y para mayor burla publicó un enfático epigrama:

*“Héros de la Physique, argonautes nouveaux,
Qui franchissez les monts, qui traversez les eaux,
Ramenez des climats soumis aux trois couronnes,
Vos perches, vos secteurs et surtout deux Laponnes,
Vous avez confirmé dans ces lieux pleins d’ennui,
Çe que Newton connut sans sortir de chez lui.
Vous avez arpenté quelque faible partie
Des flancs toujours glacés de la Terre aplatie”.*

