

CURIOSIDADES COSMOGRÁFICAS

Mario Ruiz Morales



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

INSTITUTO
GEOGRÁFICO
NACIONAL



Título:

CURIOSIDADES COSMOGRÁFICAS

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado:

<https://cpage.mpr.gob.es>

1ª edición: octubre de 2021.

Publica:

© De esta Edición O. A. Centro Nacional de Información Geográfica, 2021.

Autor:

© Mario Ruiz Morales, 2021.

Los contenidos recogidos en esta obra son responsabilidad exclusiva de sus autores y no reflejan necesariamente el punto de vista oficial del Instituto Geográfico Nacional ni del Centro Nacional de Información Geográfica.

Diseño y maquetación:

Servicio de Edición y Trazado

(Subdirección General de Cartografía y Observación del Territorio - Instituto Geográfico Nacional).

Ilustración portada:

Grabado del Invierno de Adrien Collaert.

Biblioteca Nacional de España.

NIPO PAPEL: 798-21-026-4

NIPO DIGITAL: 798-21-027-X

ISBN: 978-84-416-6540-8

DEPOSITO LEGAL: M-22525-2021

DOI: <https://doi.org/10.7419/162.06.2021>

Los derechos de la edición son del O. A. Centro Nacional de Información Geográfica como editorial. Este Organismo agradece que la difusión electrónica masiva de la edición digital se realice a través de un enlace al apartado correspondiente de la página web oficial.

En esta publicación se ha utilizado papel certificado de acuerdo con los criterios medioambientales de la contratación pública vigente.

Impreso en los talleres del Instituto Geográfico Nacional



CNIG: Calle General Ibañez de Ibero, 3

28003 - Madrid (España)

www.ign.es / www.cnig.es

consulta@cnig.es

CURIOSIDADES COSMOGRÁFICAS

 | Mario Ruiz
Morales

In Memoriam
A mi querido primo
Miguel Ángel Morales Duarte

Es natural que las manifestaciones astronómicas más remotas coincidieran con las observaciones realizadas por las primeras generaciones de homo sapiens, justo cuando comenzasen a ser conscientes de la secuencia regular de los días y de las noches, de los ortos y ocasos del Sol y de la luna, o cuando se quedasen extasiados contemplando la belleza del cielo negro pero poblado de estrellas. Mucho tiempo después se descubrirían los Planetas y notarían que durante periodos prolongados había épocas con climatología muy diferentes. El concepto de la orientación tardaría en aparecer, aunque lo asociarían de inmediato al Sol y al instante en que alcanzaba su máxima altura; y luego al punto contrario señalado por su sombra mínima, que se correspondía con otro del cielo en el que parecía como si las estrellas de su entorno no se movieran en el transcurso de la noche, con la particularidad añadida de que nunca se ocultaban. El interés que sentían por la astronomía aquellos pobladores de la Tierra quedó registrado en los numerosos petroglifos que se conservan repartidos por el mundo.

Algunas de esas observaciones astronómicas condujeron mucho más adelante a la identificación del primer modelo matemático de la Tierra. No se puede asegurar cuando se optó por la esfera, aunque algunos cronistas sitúen el acontecimiento en épocas muy pretéritas, no en vano aseguraron que la apotema de la gran pirámide de Giza coincidía con la décima parte del desarrollo de un minuto del meridiano terrestre, un hecho verdaderamente sorprendente que solo fue comprobado fehacientemente por los sabios franceses que acompañaron al ejército de Napoleón cuando invadió Egipto. Una vez que los filósofos de la antigüedad fueron conscientes de la esfericidad, surgiría la necesidad de calcular el valor de su radio. No sería extraño que las primeras medidas al respecto se efectuasen en ese país, instaurándose una tradición que sería continuada siglos más tarde por Dicearco de Mesina y por Eratóstenes de Cirene, por citar a dos de los más señalados.

Por aquel entonces ya se contaba en la Biblioteca de Alejandría con representaciones globulares del cielo y de la Tierra, en las que probablemente acabaría apoyándose Claudio Tolomeo para definir los sistemas cartográficos que incluyó en su celebrada Geografía; además de un listado con las ciudades más señaladas del mundo habitado, identificándolas con el par de coordenadas geográficas: latitud y longitud. En ese tiempo ya se podía determinar con cierta fiabilidad la latitud, en tanto que coincidía con la altura del polo sobre el horizonte. Los polos terrestres no eran más que la intersección del eje del mundo con la bóveda celeste. En el hemisferio boreal

resultaba más fácil de identificar, ya que en sus proximidades se hallaba siempre la llamada estrella del norte. No ocurría lo mismo con la longitud geográfica, cuya determinación fue muy poco fiable hasta mediados del siglo XIX, la razón no era otra que estar indefectiblemente ligada a la medida del tiempo.

El saber clásico permaneció aparcado durante siglos en Bizancio, hasta que fue recuperado por el califato de Bagdad para incorporarlo a su Casa de la Sabiduría, un centro creado gracias a la iniciativa genial de al Ma'mun. De allí fue en cierto modo transferido a al-Andalus y transmitido luego al occidente cristiano, a través de sus brillantes escuelas de traductores. De ese periodo histórico datan tanto la brújula como los portulanos, complemento indispensable de instrumentos matemáticos como el astrolabio y el cuadrante, que resultaron decisivos para el desarrollo y perfeccionamiento de la navegación. No es casual que la última de las curiosidades cosmográficas se refiera al astrolabio, ya que fue el instrumento astronómico más relevante hasta la frontera entre los siglos XVI y XVII, en que aparecieron los primeros telescopios. Asociados a él hubo una pléyade de astrónomos dignos de ser recordados, aunque solo se mencione ahora al toledano Azarquiel, puesto que gracias a su brillante innovación el astrolabio se convirtió en un aparato universal y en el primer nomograma portátil, al que llamó azafea. Sus manuales de construcción y uso fueron traducidos al castellano dos siglos después por iniciativa de Alfonso X, e incluidos en los celebrados Libros del Saber de Astronomía, acuñándose por ello el sobrenombre de rey sabio.

La llegada del Renacimiento unida a la aparición de la imprenta están detrás de acontecimientos tan sobresalientes como el descubrimiento del nuevo mundo y de lugares como el estrecho de Magallanes, como paso previo a la culminación de la primera circunnavegación de la Tierra, comprobando así la esfericidad de la misma. El éxito de tantas expediciones no hubiese sido posible sin el soporte económico y cosmográfico que recibieron tan intrépidos navegantes por las monarquías portuguesa y española; propiciando la formación de pilotos y cosmógrafos en dos instituciones sin parangón en su tiempo: la Junta dos Matemáticos y la Casa de la Contratación de Indias. En ese periodo histórico cobra de nuevo actualidad la cuestión del tamaño de la Tierra, prácticamente olvidada desde que intentasen cuantificarlo Eratóstenes y Posidonio; con la honrosa excepción protagonizada en el califato de Bagdad por los hermanos Musa y al-. Aunque resultasen baldíos y hasta contradictorios en sus resultados, han de citarse las supuestas operaciones de Nebrija y las de tantos otros que culminaron con las llevadas a cabo por el abate Picard en el siglo XVII, el cual logró determinar el primer valor aceptable del radio de la Tierra; hasta el extremo de que le pudo valer a Newton para comprobar la bondad de su ley de gravitación universal y, en consecuencia, se decidiera a publicar sus Principia en el año 1687. El éxito de esa medición se debió fundamentalmente al nuevo método trigonométrico utilizado para evaluar el desarrollo del grado de meridiano terrestre. La contrapartida del sabio inglés no fue baladí, ya que defendió que si la Tierra giraba en torno a su eje forzosamente tendría que ser elipsoidal y aplastada por los polos; como ya había probado sin proponérselo Jean Richer al descubrir que el valor de la intensidad de la gravedad era menor en la isla de Cayena, en las proximidades del ecuador terrestre, que en París, cuya latitud es próxima a los 48° 48'.

Dado que al hallar el desarrollo del grado en la prolongación del arco usado por Picard, hacia el Norte y hacia el Sur, dedujo Jacques Cassini que la Tierra debía de estar aplastada por el ecuador, se abrió un dilatado periodo de debates permanentes sobre la figura de la Tierra. La solución a tan virulenta controversia científica la auspició la Academia de Ciencias de París, favoreciendo la realización de dos expediciones geodésicas con el objetivo de medir grados de meridiano en el

virreinato de Perú y de Laponia, dos lugares con latitudes muy dispares y con desigual desarrollo del grado en uno y otro; los responsables respectivos fueron Louis Godin para la primera y Pierre Louis de Maupertuis para la segunda. Esta última fue la primera en presentar su resultado, señalando que el desarrollo del grado aumentaba con la latitud, de manera que sería máximo en los polos y mínimo en el ecuador. Aunque en esa misma misión se dedujera también que la intensidad de la gravedad crecía igualmente con la latitud, la cuestión de la figura de la Tierra siguió latente hasta que volvieron de América los expedicionarios franceses, quienes contaron con la valiosa e imprescindible colaboración de los marinos españoles Jorge Juan y Antonio de Ulloa.

Con el mejor conocimiento de la forma y de las dimensiones de la Tierra mejoró sensiblemente la fiabilidad en los cálculos de las distancias entre lugares muy alejados, aunque todavía faltase más de un siglo para que el valor obtenido tuviera la exactitud debida. El motivo ya es sabido, la diferencia de longitudes geográficas entre dos lugares dados es idéntica a la diferencia entre las horas locales correspondientes, de ahí que la solución satisfactoria hubiera de esperar a la época en que se pudieron transmitir las señales horarias; gracias al extraordinario invento de Samuel Morse. Ese es a grandes rasgos el itinerario que se anuncia en el índice de los doce capítulos de que consta el presente trabajo, en los cuales se ofrece información especialmente interesante para todos aquellos lectores que sean amantes de disciplinas propias de la antigua Cosmografía.

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	7
PROLOGUE (ENGLISH)	9
PRÓLOGO (ESPAÑOL)	11
CAPÍTULO I. La esfera del firmamento	13
CAPÍTULO II. El Sol. astro rey y Dios Supremo.	27
CAPÍTULO III. Las estaciones del año y los signos del zodiaco	41
CAPÍTULO IV. El movimiento diario de las estrellas	57
CAPÍTULO V. La estrella polar y su altura sobre el horizonte	71
CAPÍTULO VI. El nocturlabio, reloj de la estrella polar	85
CAPÍTULO VII. Los sistemas cartográficos de Claudio Tolomeo	99
CAPÍTULO VIII. Aproximación cronológica al problema de la longitud.	121
CAPÍTULO IX. De como Maupertuis acható la Tierra	145
CAPÍTULO X. Astronomía nautica. De la estrella del norte a las distancias lunares	185
CAPÍTULO XI. Geografía astronómica en los albores de la Ilustración	231
CAPÍTULO XII. El astrolabio estereográfico. De Tolomeo al rey Alfonso x el sabio	251
INDICE ONOMÁSTICO.	293
AGRADECIMIENTOS.	307

PRESENTACIÓN

Indudablemente la Astronomía es, con diferencia, una de las ciencias más atractivas para la sociedad en general. Entre otras muchas cosas, porque tiene un doble e intenso poder: el de la fascinación, junto con el de provocar las preguntas más difíciles que se puede formular la Humanidad.

La Astronomía es, además, una de las disciplinas científicas que más ha avanzado en los últimos tiempos, tanto en «increíbles» descubrimientos, como en su colosal desarrollo tecnológico, consiguiendo hitos inimaginables tan solo unas pocas décadas atrás: el big bang, la materia y energía oscuras, las ondas gravitacionales y los magnetares son solo unos pocos ejemplos.

Si además la astronomía se cuenta de forma accesible a los ciudadanos no especializados, relatando *curiosidades cosmográficas* tanto históricas como técnicas en un formato divulgativo asequible, está garantizado el éxito de la obra, lo que no puede sino ser una gran satisfacción para la institución que actualmente tengo el honor de dirigir, por acoger en su seno desde hace más de un siglo al Observatorio Astronómico Nacional.

Por otra parte, no puedo dejar de destacar el magnífico prólogo que nuestro insigne doctor geodesta Tomás Soler ha dedicado a la obra. Sus trascendentes contribuciones desarrolladas en el Servicio Geodésico Nacional de los Estados Unidos (National Geodetic Survey, NGS), recientemente le han valido el reconocimiento y galardón de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (American Society of Civil Engineers, ASCE).

No cabe duda, que el autor de esta obra lo valora con todo orgullo, el mismo con el que hoy suscribo la presentación de esta nueva obra con la que el profesor Mario Ruiz Morales, y querido colega ingeniero geógrafo, nos va a volver a deleitar.

LORENZO GARCÍA ASENSIO
Director General del Instituto Geográfico Nacional
Presidente del Centro Nacional de Información Geográfica

PROLOGUE

In the current era of significant technological advancements, such as interplanetary robotic probes or the quest for a laboratory-controlled utilization of nuclear fusion, it is refreshing to encounter a compilation of attention-grabbing cosmographic curiosities cleverly organized into a fascinating book.

This volume outlines an intriguing journey that started in ancient times and which progressively improved our understanding of the overlapping fields of cartography, navigation, astronomy and geodesy; all noteworthy branches of cosmography. This comprehensive summary explores with meticulous care numerous important developments that, undoubtedly, not only materialized in the astonishing discovery of a brand new continent, but also culminated in the pronouncement of a controversial yet revolutionary heliocentric planetary system. The intelligent and innovative «Copernican solution.» Necessarily, it also discusses another breakthrough in the annals of physical sciences: the impassioned confrontation between illustrious theoreticians and practitioners on their path to discern the mathematical model of the real shape of the Earth. In summary, the memorable triumph of Newtonian thought over the Cartesian thinking followers.

The word «curiosidades» (curiosities) spearheading the main work's title really encapsulates the flair with which the narrative is structured. The author departs from the traditional description of the historical events and concentrates mostly on emphasizing lesser-known aspects of the episodes themselves, blending together and comparing the similarities and differences with the procedures and ideas prevalent amongst various educated societies around the globe in the heyday of civilization. This space-time contrasting style makes the reading interesting and engaging because it shows that the progress of mankind is indifferent to individual culture or geographic location and is entirely capable of reaching the same exact scientific result, albeit using totally independent autochthonous avenues.

Consequently, the text contains many captivating stories, but most importantly, it admirably captures the trove of changes that permeated the history of mapping and the sister fields of astronomy and geodesy. It should be pointed out that this volume also revives the work of a few Spanish protagonists that are seldom mentioned in descriptive books of this nature, but that deserve notoriety for producing multi-language translations and receiving effusive praises from their most renowned contemporaries. That's the case, for example, of Pedro de Medina

(1493-1567), author of the two voluminous bestsellers: *El Arte de Navegar* (The Art of Navigation) and *Regimiento de Navegación* (The Control of Navigation) that sparked an interest in perfecting a more accurate celestial navigation methodology.

The book is also well illustrated with an abundance of engravings and images (288 to be exact) that, in the majority of cases, were extracted directly from the original versions of the writings and are shown herein for the first time. There are plenty of revealing tidbits and drawings distributed throughout the chapters providing simple factual information that clarifies some necessary spherical astronomy concepts. Oh! Last but not least, for the enjoyment of mainstream readers there are very few mathematical equations.

The presentation is fluid and well organized and it is interspersed with a profusion of characters and events that were important in the historic achievements of cosmography. At first glance, perhaps some acute readers may object to the absence of a long list of references at the end of the book. However, so much has been written about this multifaceted subject matter that properly mentioning all pertinent sources will fill up as many pages as the length of the book itself. On the other hand, the author conveniently cites in the text and in complementary footnotes the most influential references so that eager readers may further focus on specific areas of their particular interest. With this condensed information in hand a simple Google Scholar search can expand the research to some of the most intricate arguments already addressed in this volume. There are many citations referenced throughout that can assist enthusiastic readers with continuing their analysis on esoteric areas of specialization such as: marine cartography (portolans), celestial charts (Dendera planisphere), geodesy (arc connection between Europe and Africa) and mechanical inventions (astrolabes) to name just a few.

The author of the book is an avid popularizer of scientific themes and through all of his numerous publications in journals and books has concentrated on the divulgation of the history of geodesy and cartography while teaching the topic for many years to college students. Accordingly, this effort is another significant addition to his prolific bibliographic career.

I am convinced that the readers will appreciate the amount of information contained in these pages as much as I did and will find the curiosities described amid the narration of these endeavors absorbing and motivating enough to further explore this vibrant realm of science known as cosmography.

TOMÁS SOLER, PH.D.
National Geodetic Survey, NOAA (Retired)
Silver Spring, MD, U.S.A.

PRÓLOGO

En la era actual de importantes avances tecnológicos, como las sondas robóticas interplanetarias o la búsqueda de una utilización controlada de la fusión nuclear en los laboratorios, es reconfortante encontrar una compilación de curiosidades cosmográficas que solicitan atención, organizadas de forma inteligente en un libro que después de ojearlo invita a la lectura.

Este volumen describe el intrigante periplo que germinó en la antigüedad y que progresivamente mejoró nuestra comprensión de ciencias similares y hermanas como son la cartografía, la navegación, la astronomía y la geodesia; todas ellas ingredientes esenciales de la cosmografía. Este comprensivo resumen explora con meticulosidad numerosos adelantos importantes que, sin duda, no solo se materializaron en el sorprendente descubrimiento de un continente hasta entonces desconocido, sino que también culminaron en el pronunciamiento de un revolucionario, aunque controvertido, sistema planetario heliocéntrico. Nos referimos a la inteligente e innovadora solución copernicana. Necesariamente, también se entretiene exponiendo otro gran avance en los anales de las ciencias físico-matemáticas: el apasionante enfrentamiento entre ilustres expertos en la teoría y en la práctica, preocupados en lograr discernir el modelo geométrico ideal de la forma y dimensiones de la Tierra. En resumidas cuentas, el memorable triunfo final del pensamiento Newtoniano sobre los obstinados seguidores del razonamiento Cartesiano.

La palabra «curiosidades» que encabeza el título de la obra, realmente resume el estilo con el que se estructura la narrativa. El autor se aparta de la descripción tradicional de los hechos históricos para concentrarse, primordialmente, en enfatizar aspectos menos conocidos de los episodios en sí, diseccionando y comparando las similitudes y diferencias que regía el procesamiento de ideas en varias sociedades pseudo-educadas dispersas por el mundo antiguo durante el devenir de la civilización. Este estilo de resaltar el contraste espacio-tiempo favorece que la lectura sea entretenida y atractiva ya que muestra que el progreso de la humanidad es indiferente a la cultura local o su ubicación geográfica y es completamente capaz de lograr el mismo resultado científico, aunque utilizando procedimientos autóctonos totalmente independientes.

En consecuencia, el texto contiene muchos relatos que cautivan, pero lo más significativo es que reflejan admirablemente el conjunto de cambios que solidificaron la historia de la cartografía y sus ciencias anexas como la astronomía y la geodesia. Cabe destacar que este volumen reaviva la labor de unos cuantos protagonistas españoles que rara vez se mencionan en libros descriptivos

de esta índole, pero que consiguieron notoriedad por darse a conocer universalmente a través de traducciones multilingües y recibir efusivos elogios de sus contemporáneos más distinguidos. Es el caso concreto de Pedro de Medina (1493-1567), que escribió dos voluminosos bestsellers: *El Arte de Navegar* y *Regimiento de Navegación* que despertaron el interés en perfeccionar una metodología de navegación celeste más exacta.

El libro está muy bien ilustrado con un abundante número de grabados e imágenes (288 para ser exacto) que, en la mayoría de los casos, fueron extraídos directamente de las versiones originales de los documentos consultados y que se reproducen aquí por primera vez. Hay muchas curiosidades y dibujos explicativos diseminados a lo largo de los capítulos que brindan información didáctica simple y aclaran algunos conceptos fundamentales de la astronomía esférica. ¡Ah! También debe mencionarse, para tranquilizar a la mayoría de los lectores habituales, con antecedentes humanistas, que existen muy pocas ecuaciones matemáticas.

La descripción de los acontecimientos es fluida y bien organizada y esta intercalada con una profusión de personajes y eventos que marcaron un hito en el desarrollo histórico de la cosmografía. A primera vista, quizá ciertos lectores perspicaces objeten la ausencia de una larga lista de referencias al final del libro. Sin embargo, se ha escrito tanto sobre este tema multifacético que mencionar correctamente todas las fuentes pertinentes llenaría casi tantas páginas como la extensión del libro en sí. Por otro lado, el autor cita convenientemente en el texto, y en notas complementarias a pie de página, las referencias más influyentes para que los lectores ansiosos de avanzar sus conocimientos puedan centrarse en áreas específicas de su interés particular. Con esta información sinóptica a la vista, una simple búsqueda en *Google Scholar* podría dilatarse a la investigación de los argumentos más intrincados que se han abordado en este trabajo. Hay muchas citas referenciadas que pueden ayudar a los lectores curiosos a continuar sus conocimientos en áreas esotéricas de especialización, tales como: cartografía marina (portolanos), cartas celestes (planisferio de Dendera), geodesia (conexión del arco geodésico entre Europa y África) e invenciones mecánicas (astrolabios), por citar solo unos ejemplos.

El autor de esta obra es un ávido divulgador de temas científicos y, a través de todas sus numerosas publicaciones en libros y revistas especializadas, se ha concentrado en la propagación de la historia de la geodesia y la cartografía mientras, durante muchos años, enseñó sobre estos temas a estudiantes universitarios. En consecuencia, este esfuerzo es otra adición significativa a su prolífica carrera bibliográfica.

Estoy convencido de que los lectores apreciarán tanto como el prologuista la cantidad de información contenida en estas páginas y que encontrarán las curiosidades descritas en la narración lo suficientemente absorbentes y motivadoras como para explorar más a fondo este vibrante apartado de la ciencia conocido como cosmografía.

TOMÁS SOLER, PH.D.
National Geodetic Survey, NOAA (Jubilado)
Silver Spring, MD, EE.UU.

CAPÍTULO I | La esfera del firmamento



CAPÍTULO I | La esfera del firmamento

El firmamento, una de las palabras más llamativas de nuestro vocabulario, hace mención al cielo estrellado que nos envuelve. Su aspecto es el de una bóveda continua salpicada de estrellas, tanto para el observador del hemisferio septentrional como del austral. Pero etimológicamente se refiere igualmente al carácter estable de todas las luminarias (*stellae fixae*), de ahí que para referirse a él se emplease después la expresión esfera de las fijas. El hombre curioso se ha sentido siempre extasiado, y hasta empequeñecido, cuando contemplaba durante la noche tan grandioso espectáculo, el propio Claudio Tolomeo afirmaba que cuando lo hacía se sentía saciado de ambrosia, el alimento de los dioses; no sorprende por tanto que se hayan inspirado en él poetas y pintores. Un ejemplo de los primeros es Miguel de Unamuno, con su poema *La Luna y la rosa*:

*En el silencio estrellado
la Luna daba a la rosa
y el arma de la noche
le henchía —sedienta boca—
el paladar del espíritu,
que adurmiendo su congoja
se abría al cielo nocturno
de Dios y su Madre toda...*

*Toda cabellos tranquilos,
la Luna tranquila y sola,
acariciaba a la Tierra
con sus cabellos de rosa
silvestre, blanca, escondida...*

*La Tierra desde sus rocas,
exhalaba sus entrañas
fundidas de amor, su aroma...*

*Entre las zarzas, su nido,
era otra Luna la rosa,
toda cabellos cuajados
en la cuna, su corola;
las cabelleras mejidas
de la Luna y de la rosa
y en el crisol de la noche
fundidas en una sola...*

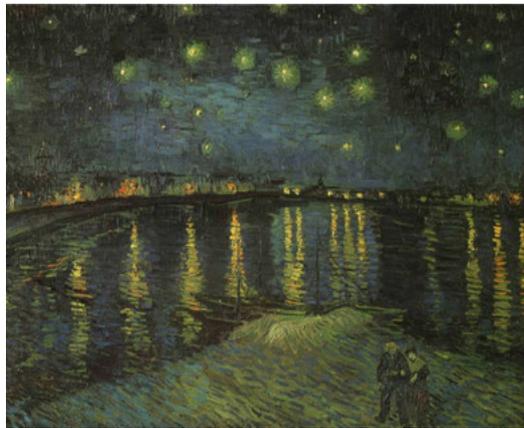
*En el silencio estrellado
la Luna daba a la rosa
mientras la rosa se daba
a la Luna, quieta y sola.*

De entre los segundos parece obligado centrarse en tres de las obras de Vincent Van Gogh: La noche estrellada, Noche estrellada sobre el Ródano y La terraza de café por la noche. En la primera se muestran dos especies de nebulosas que interactúan, dando la sensación de movimiento, junto a once estrellas y la Luna menguante. La segunda es más apacible, con las estrellas rodeadas por su halo y una pareja paseando al lado del río Ródano. Finalmente en el tercero se representa el cielo nocturno, si bien las estrellas parecen jugar un papel más secundario.



La noche estrellada.

Aunque aparentemente todas las estrellas estén a igual distancia de la Tierra, por estar situadas en esa hipotética esfera, realmente no es así: la visión que tenemos de todas ellas es la de su proyección sobre la superficie cóncava de la misma. Puede resultar un tanto sorprendente que se use el tiempo como escala para medir las distancias estelares, pero son estas de tal magnitud que resulta sumamente eficaz. La velocidad de la luz es del orden de los 300.000 km/s, de manera que podríamos decir que la Luna se encuentra a un segundo de la Tierra, puesto que la distancia media entre ambas es de unos 384.000 km. En cambio deberíamos decir que el Sol está a unos ocho minutos de la Tierra, ya que su distancia media es de



Noche estrellada sobre el Ródano.

150 millones de kilómetros¹, y al dividir esa cantidad por 300.000 resultaría 500, una cifra que casi coincide con los segundos a que equivalen los ocho minutos. La estrella más cercana al Sol es la *Próxima Centauri*, que se encuentra a poco más de cuatro años luz. La estrella polar en cambio está mucho más lejos, aproximadamente a 434 años luz; es decir que la estamos viendo en el estado que tenía unos diez años antes de que concluyera el reinado de Felipe II.

El modelo de la esfera de las fijas ha estado vigente durante milenios, puesto que reflejaba perfectamente lo que apreciaba el observador sin oponerse a ningún resultado que probase lo contrario. Es más, cuando esto sucedió continuó siendo útil como instrumento didáctico para explicar los fundamentos de la astronomía de posición o geodésica. Como por otra parte permitía explicar otros fenómenos, se entiende que fuese adoptado por los filósofos más prestigiosos. Aristóteles la hizo suya para evitar tener que suponer que su velocidad de rotación tuviera que

¹ Esa cifra es muy relevante en la astronomía, de hecho es conocida como Unidad Astronómica. Es muy útil para medir distancias dentro del sistema solar.



Platón y Aristóteles en la Academia, obsérvese la esfera colocada en un soporte de madera. Mosaico de Pompeya. Se expone en el Museo Arqueológico Nacional de Nápoles.

ser infinita. La ausencia de paralaje² para las estrellas, la invariabilidad de las constelaciones, el periodo de rotación idéntico, eran argumentos que avalaban la idoneidad del modelo, en tanto que todas las estrellas se encontraban a la misma distancia. Por otro lado esa esfera debería estar mucho más alejada que las planetarias, habida cuenta de que las estrellas centellean y los Planetas no, una conclusión a la que llegó Aristóteles en su obra sobre el cielo (*De caelo*).

Lo cierto es que en los orígenes del pensamiento científico el modelo esférico acaba por imponerse como forma del universo y de la propia Tierra. Los protagonistas fueron los filósofos griegos posteriores al siglo VI a.C., aunque actuasen influenciados por el saber astronómico de Egipto y de Mesopotamia, es decir Tales de Mileto, Anaximandro, Pitágoras, Platón, Aristóteles, etc. Todos ellos admitían que la Tierra era asimismo el centro del cosmos, moviéndose alrededor de la misma una serie de esferas concéntricas relativas a los siete Planetas: Luna, Mercurio, Venus, Sol, Marte, Júpiter y Saturno; la concepción no era nada casual, ya que respondía bien a la observación de sus movimientos y a consideraciones filosóficas.

En esa misma época floreció en las ciudades jónicas y en los círculos pitagóricos, una nueva concepción del mundo despojada en gran medida de las limitaciones impuestas por los relatos mitológicos. Concepción que solo fue posible tras haber constatado la existencia de movimientos cíclicos del cielo: trayectorias aparentes del Sol y de la Luna, orto y ocaso de las estrellas, eclipses solares o lunares; junto a una envidiable intuición matemática. Fue entonces cuando surgió la esfera como el sólido de la perfecta simetría, potencialmente animada de un movimiento circular inmutable. Los artífices fueron Pitágoras, Platón, Aristóteles y sus discípulos del siglo IV, los cuales hicieron de ella la forma ideal para un cosmos, que imaginaron creado, en su verdadera proporción y armonía, por un geómetra o gran arquitecto, esto es por el Demiurgo.

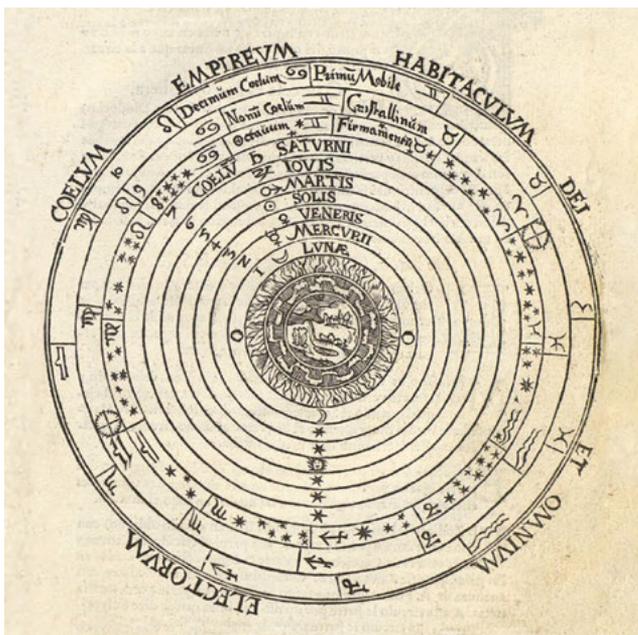
² Se define la paralaje de una estrella como el ángulo bajo el que se vería desde ella el radio de la Tierra. En todos los supuestos sería nula. A esa paralaje, llamada diurna, se une otra denominada anual que también es despreciable para la mayoría de las estrellas (se define como el ángulo bajo el que se vería el radio vector Tierra Sol desde la estrella en cuestión).

A pesar de los modelos alternativos, sobre todo los heliocéntricos: primero de Heráclides Póntico (Siglo IV a.C.) y después de Aristarco de Samos (Siglo III a.C.), los fundamentos del modelo esférico planteados por los anteriores filósofos tomaron carta de naturaleza: la Tierra redonda e inmóvil localizada en el centro del universo, formado por esferas concéntricas sobre las que se localizaban las estrellas y los Planetas, las cuales estaban animadas de un movimiento circular y uniforme. Es sorprendente la pervivencia del modelo griego, pues fue del todo incuestionable hasta que Copérnico formuló su hipótesis revolucionaria en el siglo XVI.

A raíz de ello proliferaron globos celestes y terrestres, esferas armilares o planetarias, y diversos instrumentos cosmográficos, que permitieron dar cuerpo a las diferentes teorías científicas que fueron surgiendo desde el siglo III a.C., empleándose tanto como instrumentos de observación, como de cálculo y demostración. Lamentablemente son muy pocos los que aún subsisten. Antes de que el repetido modelo esférico fuese universalmente aceptado, continuó siendo el soporte de especulaciones filosóficas y metafísicas: la Tierra, como el universo, solo podían ser redondos por ser la esfera una forma perfecta; todo punto de su superficie dista lo mismo de su centro.

Al igual que Platón y Aristóteles definieron los grandes postulados del modelo esférico: una Tierra redonda e inmóvil en el centro y el movimiento circular y uniforme de los astros, Eudoxo de Cnido fue el primero en concebir un modelo matemático, apoyado en 27 esferas, que explicaba en su conjunto el movimiento de los cuerpos celestes; sus trabajos nos fueron transmitidos por poetas como Aratos de Soles y sabios posteriores, como Estrabón, Tolomeo o Macrobio. Realmente no se conserva ninguno de los textos griegos originales y solo se ha podido acceder a algunas de las copias de los mismos hechas en la Edad Media.

Esa concepción del mundo cerrado y compuesto de esferas concéntricas, sobre las que se situaban las estrellas fijas y los siete Planetas, girando alrededor de la Tierra igualmente esférica e inmóvil, que ocupaba el centro de todas ellas, fue perfeccionado en el siglo II de nuestra era por Claudio



La división de las esferas en la Cosmografía de Pedro Apiano (1574). En cada una de las siete planetarias figura el nombre y símbolo del planeta respectivo. Envolviendo a la de Saturno aparece la de las estrellas fijas con el rótulo *Octavum Firmamentum*, estando la corona circular correspondiente dividida de acuerdo con los doce signos zodiacales.



Dos monedas del Emperador Augusto. En los dos casos figura el globo en el reverso, aunque en una de ellas aparece coronado por el ángel de la victoria.

Tolomeo, el último sabio de la antigüedad. Suyas fueron las tres obras maestras en las que se sintetizaron los conocimientos cosmográficos del periodo grecorromano: *el Almagesto, la Geografía y el Tetrabiblos*. El Almagesto expuso la mecánica celeste y dio un catálogo de 1022 estrellas, agrupadas en 48 constelaciones, explicando además como se podía construir un globo celeste. La Geografía describió el ecúmene, esto es la parte habitada de la Tierra, dio las normas para confeccionar tanto globos terrestres como mapas, de acuerdo con varios sistemas cartográficos: representando parcialmente la esfera sobre un plano³. El Tetrabiblos no fue más que un tratado de astrología en el que se analizaban las supuestas influencias astrales sobre el destino del hombre. Desde Bizancio fue transmitido su saber a los árabes y al occidente a través de las diversas versiones latinas realizadas en las escuelas de traductores, principalmente en la de Toledo; se obtuvo así una referencia que mediatizó el conocimiento cosmográfico de Europa durante quince siglos.

La esfera no tardó en proyectarse a la sociedad, fuera del reducido círculo de los filósofos, así como el interés por las cuestiones astronómicas. Buen testigo de ello es su presencia en la serie de estatuas, frescos, mosaicos, monedas y hasta en obras literarias como el Sueño de Escipión, escrita por Cicerón en el año 54 a.C. En efecto, desde el año 75 a.C. comienzan a acuñarse monedas con la imagen del globo, el cual llegó a ser un atributo esencial del emperador Augusto, que denotaba su poder imperial y su ambición universal o cósmica. Dos son las representaciones más llamativas, por un lado la del Emperador que sostiene un globo en su mano, como soberano del mundo, y por otro la del Emperador acostumbrado a la Victoria, cuya imagen se sitúa sobre el globo para legitimar su poder. A partir de esa época, la esfera podía ir acompañada de otros elementos que matizaban su cometido: una lanza, como símbolo del poderío militar, o del fénix, el ave solar que renace de sus cenizas, una clara alegoría de la eternidad. Asimismo se contemplaron motivos parecidos en camafeos, como el del Triunfo de Licinio: mostrando al emperador, con globo y lanza, en una cuadriga tirada por cuatro caballos, mientras que dos victorias le hacen entrega de dos globos celestes; su victoria sobre los enemigos, aplastados por los caballos, fue asociada al dios

³ En el capítulo XI se ofrecen más detalles sobre ese particular.



El Triunfo de Licinio
(8.1 cm x 8.3 cm). Siglo IV.
Biblioteca Nacional de Francia
(*Médailles et Antiques*).

Sol y a la luna, pareja de astros visibles día tras día que vienen a sugerir la eternidad de Roma y la aspiración de los emperadores a la divinidad.

Con el triunfo del cristianismo, el signo de la victoria es sustituido paulatinamente por la cruz, simbolizando la base divina del poder terrenal. En la iconografía religiosa no dejó de estar presente el globo, cruciforme o no, llegando después a incorporarle los tres continentes conocidos para formar el globo tripartito. El globo aparece junto a Jesucristo, como salvador del mundo, o junto a Dios padre, como creador del mismo; igualmente figura en numerosas esculturas con la Santísima Trinidad. En este último caso, fueron la transposición espacial del mapa de T en O con que iluminó San Isidoro sus *Etimologías*. Tales modelos grecorromanos del mundo se fueron extendiendo por toda la ribera del Mediterráneo, mediante globos y esferas que servían de soporte material a los conocimientos que se habían venido acumulando, aunque las especulaciones filosóficas o metafísicas también se apoyasen en ellos.

Ese saber antiguo fue heredado y reinterpretado durante el Medievo en dos civilizaciones bien diferenciadas, pero obligadas a convivir: el mundo árabe musulmán y el Occidente cristiano, no en vano compartían ambas una misma realidad, la primacía de la astronomía sobre la geografía. La primera de las dos disciplinas fue muy cultivada en los países del Islam, como evidencia la cantidad de globos celestes que se construyeron a partir del siglo IX; fuertemente influenciados por las prácticas persas, indias y helenísticas sobre todo. Es sabido que tras la caída del Imperio de occidente (en el año 476), la ciencia grecorromana quedó enclaustrada en el Imperio de oriente y más concretamente en Bizancio. No obstante, parece incuestionable que su renacer solo fue posible gracias al interés por la ciencia que tuvieron los califas abasidas, ayudados en todo momento por los traductores siríacos. Fue así como se transmitió el saber de la antigüedad a la Casa de Sabiduría de Bagdad, asimilándose de inmediato y renovándolo con las aportaciones de los sabios que acudieron a la llamada del califa. Como era de esperar, el árabe se convirtió en el idioma con que se transmitiría el conocimiento.

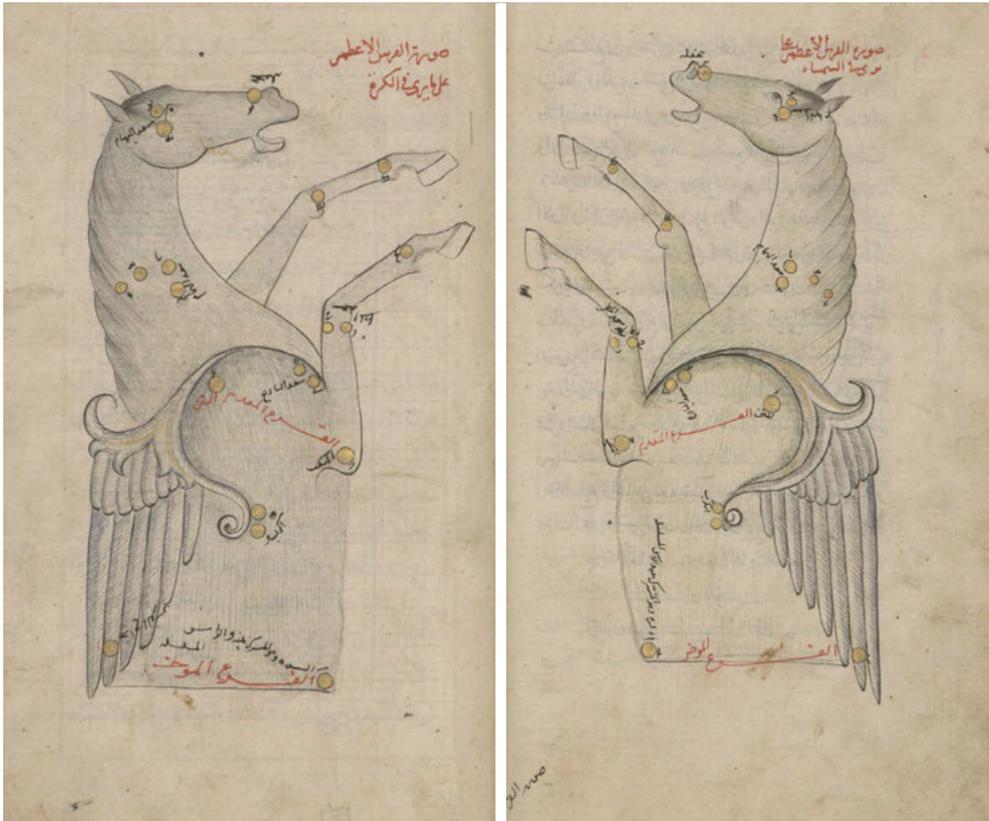


Globo celeste de Ibn said, año 1080. Astrolabio con alidada, Toledo siglo xi.

Tanto el globo celeste como el astrolabio, una representación bidimensional del firmamento, fueron los instrumentos científicos por excelencia de esa civilización, cuyo manejo se extendió a todas sus áreas de influencia, desde al Andalus a la India Mogol. Como era de esperar, los globos y los astrolabios, sobre todo, se convirtieron pronto en muestra de poder, siendo apreciados por príncipes y reyes más por sus deseos de ostentación que por su evidente valor artístico y simbólico. Ha de tenerse bien presente que su importancia para la ciencia islámica resultaba del todo obvia: el cumplir con los preceptos del Corán y la adivinación de las supuestas influencias estelares. Resulta pues que sin conocimientos astronómicos no se podían cumplir las obligaciones religiosas, de modo que era obligado estar al tanto del calendario lunar y saber cómo determinar las cinco horas de la oración, amén de la qibla u orientación de la Meca.

Para efectuar las observaciones astronómicas y realizar los cálculos pertinentes, los operadores de turno tenían que consultar permanentemente un listado con las estrellas localizadas en la esfera de las fijas. El libro de consulta más frecuentemente utilizado entre el colectivo musulmán fue el denominado Libro de las estrellas fijas⁴, que publicó el astrónomo persa Abd Al-Rahman Al Sufi, hacia el año 964. Tuvo esta obra una interesante particularidad, la de presentar las estrellas de dos formas diferentes: como se verían sobre la concavidad del firmamento y tal como aparecerían sobre un globo celeste. Para cada una de las 48 constelaciones proporcionó una carta celeste que contenía a todas las estrellas que formaban parte de la misma. En cada carta se identificaban las estrellas por su nombre y número, proporcionándose además su magnitud, y las coordenadas, latitud y longitud, con relación al sistema en el que su plano fundamental es el de la eclíptica.

⁴ *Kitab al-Kawatib al-Thabit al-Musawwar*



La constelación de Pegaso en el Libro de Las Fijas. Pegaso era el caballo alado de Zeus, Dios del cielo y de la Tierra. Su estrella 51 Pegasi es orbitada por el primer planeta extra solar que fue descubierto (Dimidio); el anuncio se hizo en el año 1995.

Aunque la influencia del *Almagesto* fuese evidente, el libro de al Sufi fue una de las obras más sobresalientes de la astronomía árabe, que fue profusamente consultada también en occidente a partir del siglo XI; como ocurrió con otros libros de ciencia que asimismo fueron traducidos al latín.

Con la caída del imperio romano de occidente se produjo en Europa un prolongado vacío cultural entre los siglos V y X, hasta que se crearon en Córdoba y Toledo las prestigiosas escuelas de traductores. Gracias a ellas llegaron a Occidente, a partir del siglo XI, numerosos textos antiguos de autores tan celebrados como Aristóteles, Euclides o Tolomeo, aparte de los de otros pensadores del Islam. Se produjo así un verdadero renacimiento científico que siempre conviene recordar, en tanto que surgieron de ese modo nuevas síntesis conceptuales que fueron adoptando los conocimientos antiguos a los dogmas cristianos. En lo que se refiere a la astronomía, es destacable el hecho de que las traducciones latinas del poema *Los fenómenos y los pronósticos* de Aratos de Solos, uno de los más leídos en la antigüedad después de la *Ilíada* y la *Odisea*, fueron la fuente primigenia en que se basaron las primeras cartas celestes dibujadas en nuestro continente, como sucedería también con los globos concebidos por Gerberto de Aurillac, el futuro papa Silvestre II, alrededor del año mil. Las traducciones al latín del *Almagesto* de Tolomeo y del *Libro de las fijas* de al Sufi, renovaron incuestionablemente la visión occidental del mundo. Todo parece señalar a



El modelo geocéntrico de Tolomeo en las Obras de Sacrobosco (i) y de Gautier de Metz (d). Obsérvese que en ambos figura la octava esfera, salpicada de estrellas. La segunda imagen aparece coronada por una figura de Jesucristo sosteniendo un globo tripartito y cruciforme.

que la asociación de las tradiciones grecorromanas y de las versiones árabes del *Almagesto*, dadas a conocer por los citados traductores, sentó las bases necesarias para que en el siglo xv surgieran en occidente unas imágenes cartográficas del firmamento ciertamente originales.

Ello no es óbice para que algunos autores cristianos de la alta Edad Media dudasen de la redondez de la Tierra y de que esta estuviese situada en el centro de las esferas que conformaban el universo, si bien es cierto que dicho modelo no tardaría en ser adoptado por la mayoría de los clérigos. Con el renacimiento científico del siglo xii, las nuevas obras que fueron apareciendo sirvieron para afianzar ese principio. De entre ellas, merecen ser recordadas el *Liber floridus* de Lambert de Saint-Omer o el *Dragmaticon Philosophiae* de Guillaume de Conches. En el siglo siguiente se publican ya algunos tratados de carácter didáctico, tales como *De sphaera mundi*, escrita por el monje agustino John de Hollywood⁵, o bien la escrita en lengua vulgar del clérigo francés Goussin de Metz: *L'Image du monde*, muy influenciada por la *Imago mundi* que había escrito el sacerdote y cosmógrafo alemán Honorio de Autun. Tuvieron que transcurrir dos siglos más para que apareciese la primera traducción latina de la Geografía de Tolomeo⁶, finalizada en Roma por Jacobus Angelus en el año 1406. A partir de entonces comenzó a vislumbrarse la existencia de un nuevo mundo, gracias a los primeros viajes exploratorios de españoles y portugueses, a la vez que se daban nuevas razones a los defensores de la esfericidad terrestre, que acabarían desembocando en la construcción de los primeros globos terrestres.

Sin embargo, se fueron modificando paulatinamente las primitivas hipótesis de los filósofos griegos al ser reinterpretadas de acuerdo con las principios innegables de la fe cristiana. Así el Demiurgo pasó a ser el Dios creador de todas las cosas que gobierna el conjunto de la «máquina del mundo», concebido, siguiendo el ejemplo de Aristóteles o de Tolomeo, como un conjunto de esferas concéntricas en cuyo centro se situaba la Tierra esférica e inmóvil. La diferencia principal

⁵ Más conocido por su nombre latino: Johannes Sacrobosco.

⁶ Uno de los acontecimientos más importantes para el comienzo de la geografía y de la cartografía moderna en Europa, poniendo a disposición de los estudiosos europeos el primer tratado de cartografía con una base matemática y astronómica, en palabras de Carmen Lliter Mayayo (Bibliotecaria emérita de la Biblioteca Nacional de España y el alma mater de su excelente cartoteca).

con el sistema griego radicaba en la modificación de los extremos. Por una parte desaparecerían los cuatro elementos (tierra, agua, aire y fuego), incorporando un supuesto infierno colocado en el centro de la Tierra; y en el que frecuentemente se situaba un monstruo que devoraba a los condenados. Asimismo sería eliminada la esfera de las fijas, o la del «*primum mobile*» de Aristóteles, colocando en su lugar el empíreo; la morada de Dios, de los ángeles y de los bienaventurados. Una concepción cristiana del mundo que fue representada en la extensa iconografía medieval.

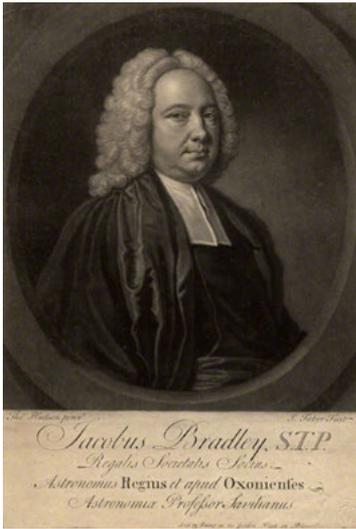
Aunque el sacerdote polaco de Tórum, Nicolás Copérnico, revolucionara la Astronomía con su modelo heliocéntrico del universo, aún limitaba la ampliación de este por la esfera de las fijas. Así lo hizo en su *De revolutionibus* (1543), numerando la última esfera de su esquema con el número I y rotulando sobre ella el texto siguiente: *Stellarum Locatum Sphaera Immobiles*. Cuando en 1661 se publicó el *Atlas Coelestis seu Harmonia Macrocosmica* de Andreas Cellarius con el grabado del sistema copernicano, sustituyó la esfera anterior por una corona circular subdividida por los doce signos del zodiaco. Unos años antes ya había publicado su sistema astronómico Tycho Brahe, una mezcla del sistema heliocéntrico de Copérnico y del geocéntrico de Tolomeo: la Tierra continuaba siendo el centro del universo, girando en torno a la misma el Sol y la luna, mientras que el resto de los Planetas si giraban alrededor del Sol; pero el límite del cosmos continuaba siendo la esfera de las fijas. No obstante le cupo el honor de haber cuestionado la inmutabilidad aristotélica con la existencia de la supernova SN 1572 en la constelación de Casiopea. Fue Johannes Kepler quien con sus leyes rompió definitivamente con el geocentrismo, firme defensor de las tesis de Copérnico siguió manteniendo la esfera de las fijas como el límite del universo, llegando a incluir un cuidadoso dibujo de la misma en su obra *Mysterium Cosmographicum* (1596).



Ángel con la esfera de las fijas. Placa 48: De los Planetas y esferas. Series Tarocchi. 1465



El sistema heliocéntrico de Copérnico, según Kepler, con su SPHAERA STELLAR FIXAR.



James Bradley y Friedrich Wilhelm Bessel, los dos astrónomos que abrieron las puertas del universo al superar la esfera de las fijas.

Hubo que esperar al siglo XVIII para que cambiase radicalmente el panorama, gracias a los trabajos del James Bradley, astrónomo real de Inglaterra entre 1742 y 1762. En efecto, tratando de hallar las paralajes de las estrellas llegó a la conclusión de que todas estaban tan alejadas que sus valores forzosamente tendrían que ser pequeños. Gracias a sus estudios probó por primera vez la traslación de la Tierra alrededor del Sol y la existencia de la aberración de la luz, evidenciada por la finitud de la relación existente entre su velocidad y la de la traslación, y que se traducía en un pequeño cambio aparente en la posición de las estrellas por la repetida traslación terrestre. Ese descubrimiento genial lo comunicó a Edmund Halley, otro astrónomo igualmente brillante, en el documento siguiente: *A Letter from the reverend Mr. James Bradley, sivilian Professor of Astronomy at Oxford. Reg. &c. giving an Account of a new discovered Motion of the Fix'd Stars* (1727-1728). Aunque ahí estuviese implícita la superación de la barrera que suponía la esfera de las fijas, aún quedaba pendiente la prueba definitiva. El encargado de ello fue el matemático Friedrich W. Bessel, el cual halló finalmente, en 1838, la paralaje de la estrella *61 Cygni*, usando para ello el heliómetro diseñado por Joseph von Fraunhofer. Las medidas se realizaron en el Observatorio de Königsberg (actual Kaliningrado), probando definitivamente que las estrellas no están igualmente alejadas de nuestro sistema solar.

CAPÍTULO II | El Sol: astro rey y Dios supremo



CAPÍTULO II | El Sol: astro rey y Dios supremo

La astronomía es la primera rama del saber en la que debieron pensar los pobladores primitivos de la Tierra. Es difícil imaginar la sorpresa que sentirían al comprobar como salía el Sol cada día y el temor que les embargaría al verlo desaparecer bajo el horizonte, tras haber recorrido el cielo. Sentimientos análogos tendrían cuando vieran aparecer la luna, aunque el temor se convirtiera en este caso en alivio, por el hecho de disipar un tanto las tinieblas de la noche. Tampoco debió ser menor su sensación al ver como cada noche aparecían las estrellas, a modo de iluminarias lejanas incrustadas en la bóveda celeste por la que parecían estar envueltos. Aunque en un principio pensarán que el Sol salía y se ocultaba por los mismos puntos del horizonte¹, con el tiempo se darían cuenta que no era así; comprobando que tales puntos se desplazaban por el mismo. Al ser conscientes del movimiento aparente del Sol y de la producción de sombras, constatarían que en un momento dado éstas eran mínimas y que apuntaban hacia la zona del horizonte por la que nunca estaba aquel. Pasaría un prolongado espacio de tiempo para que los primeros observadores de tales fenómenos astronómicos comprobasen que la duración del periodo comprendido entre la salida y la puesta del Sol era variable, una evidente manifestación de la traslación de la Tierra alrededor del mismo. Tampoco es irrelevante otro hecho singular, la imposibilidad de mirar al Sol sin sentir molestias, que podrían llegar a causar un daño irreparable². La fascinación que sentirían por el Sol, la Luna y las estrellas, aquellos hombres primitivos ha quedado indirectamente reflejada en la existencia de los numerosos petroglifos que hay repartidos por diferentes lugares de la Tierra; con la importancia añadida de que, en algunos casos, contienen evidencias irrefutables de sus conocimientos astronómicos. Mención aparte merecen los numerosos monumentos que parecen representar observatorios astronómicos, en los que se destacan las posiciones singulares del Sol en los cuatro puntos más señalados del año: los dos solsticios (invierno y verano) y los dos equinoccios (primavera y verano).

Es indudable que muchos de aquellos observadores tan remotos debieron quedarse extasiados contemplando la belleza e inmensidad del cielo nocturno repleto de luminarias. Probablemente no tardarían demasiado en constatar que la mayoría de ellas se moverían de forma análoga a como hacían el Sol y la luna, en tanto que aparecían y se ocultaban por los mismos lados del horizonte

¹ Esa creencia todavía está presente en un amplio sector de la población, sobre todo del ámbito urbano.

² Tal como le acabaría sucediendo a Galileo Galilei, por observarlo sin la debida protección al buscar las manchas solares.



Petroglifo escandinavo con el Sol, rodeado de adoradores. Dos de las figuras femeninas tocan el disco.

Museo Undersls & Universidad de Gothenburg.

que esos dos cuerpos. Al mismo tiempo comprobarían que cuando unas desaparecían surgían otras por el lado opuesto del horizonte, interrumpiéndose la secuencia con la llegada del amanecer. Ese aspecto mutable del firmamento les debió resultar incomprensible, máxime cuando, para un lugar y hora dados, no se veían las mismas estrellas si el intervalo de tiempo transcurrido entre dos observaciones consecutivas era considerable. Tampoco alcanzarían a comprender en un principio como el Sol era diferente al resto de las estrellas, en tanto que presentaba una particularidad muy llamativa: el hecho de que su máxima altura sobre el horizonte variase de un día a otro, aunque todos los valores de la misma estuviesen comprendidos entre las cifras extremas que alcanzaba en los dos solsticios y su valor medio se produjera en los equinoccios. En otras palabras colegirían que en el periodo analizado había una clara separación: durante la mitad del mismo la duración de los días era mayor que la de las noches, justo lo contrario de lo que ocurría en la otra mitad; en la frontera de las dos mitades la duración del día coincidía con la de la noche. Mucho más adelante se admitiría que tales hechos eran una prueba evidente de que el Sol estaba animado



Alegoría del Sol naciente.

Se representa como un hombre desnudo que conduce cuatro caballos, símbolo de sus desplazamientos por la bóveda celeste, y es acompañado por el padre tiempo. El astro aparece rodeado por una corona circular que representa a la banda zodiacal. El autor del grabado fue el italiano Giulio Bonasone, en torno al año 1530.

British Museum.

por otro movimiento complementario del diurno, desplazándose sobre un plano oblicuo con relación al ecuador y que forma con él un ángulo próximo a los $23^{\circ} 26'$, un valor conocido como oblicuidad de la eclíptica³.

Otra de las cuestiones que llamaría poderosamente la atención de aquellos astrónomos sería el diferente brillo de las estrellas, y más especialmente la mayor luminosidad de algunas, cuya trayectoria resultaba un tanto errática al compararla con la del resto. Tales astros fueron identificados de inmediato en tiempos tan pretéritos que no pueden ser datados a ciencia cierta, de ahí que hayan de considerarse prehistóricos. Fue en la Grecia clásica en donde se les llamó Planetas (*πλανητης* que se puede traducir por errante), una denominación que ha llegado hasta nuestros días; debe de recordarse que su número no varió hasta que fue descubierto Urano el 13 de marzo de 1781, por el astrónomo inglés William Herschell. Tanto la luna, como el Sol y los demás Planetas fueron elevados a la categoría de dioses en distintas civilizaciones, convencidos como estaban de que se trataba de algo sobrenatural e inalcanzable. No viene mal señalar que su incidencia en nuestra vida cotidiana sigue siendo notoria, habida cuenta de los nombres que llevan los días de la semana⁴. El Sol estuvo llamado desde los principios de los tiempos a ocupar el lugar más destacado en la historia del hombre, de hecho se le viene rindiendo culto desde tiempo inmemorial⁵, llegando a ser considerado como el dios supremo o dios de dioses.

Las primeras referencias más concretas sobre el cultivo de la astronomía, se



El Sol como rey. En el brazo derecho lleva el cetro con su figura y en el izquierdo el orbe. El león acrecienta la supremacía sobre los demás Planetas. Grabado de 1548, por Hans von Ladenspelder. Serie de los Planetas. *British Museum*.

³ En otro momento volveremos a este movimiento aparente del Sol sobre la esfera celeste, en el que va recorriendo los doce signos del zodiaco; a razón de 30° cada uno.

⁴ Ha de traerse a colación que la Luna y el Sol eran considerados Planetas, en los modelos teóricos de la filosofía griega, como Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno.

⁵ Aún hoy se reza, en la cristiandad, una oración de este tenor: bendita la luz del día, el señor que nos la envía, bendito su gran poder que nos ha dejado amanecer. Otra es más conocida, pues incluso va acompañada del repicar de campanas: me refiero al *Ángelus* de las 12 horas, coincidente como es sabido con la culminación superior del Sol (cuando alcanza su máxima altura sobre el horizonte). Se da la curiosa circunstancia de que los sacerdotes egipcios entonaban cantos en el mismo instante.

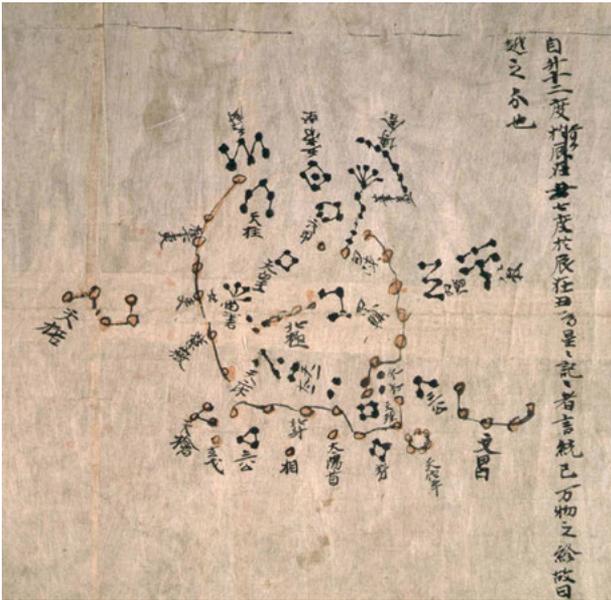
remontan según Jean Sylvain Bailly⁶ al año 3890 a.C. fecha hipotética en que el personaje mitológico Atlas inventó la esfera. Lamentablemente no se conserva documento alguno que avale tal supuesto, solo la tradición. Lo mismo sucede con las innegables observaciones practicadas en Egipto, de las que solo se da fe en el Calendario de Tolomeo; refiriendo los días en que tuvo lugar el orto heliaco de Sirio, después del solsticio de verano. Es sabida la importancia que tuvo ese fenómeno en la historia de aquel país, ya que era el anuncio del desbordamiento del Nilo. De entre ellos, resulta que el más remoto es el que tuvo lugar el cuarto día tras el solsticio, alrededor del año 2550 a.C. Otra prueba indirecta apunta hacia esa misma fecha, ya que unos veinte años atrás se habría construido la gran pirámide de Giza. Las observaciones astronómicas correspondientes fueron incuestionables, en otro caso carecería de sentido la perfecta orientación de sus cuatro caras hacia las direcciones cardinales. Sin embargo, no resulta aventurado suponer que la astronomía se venía estudiando en Egipto desde el milenio anterior. Las observaciones de los caldeos que figuran en el *Almagesto* de Tolomeo datan solo del año 721 a.C., aunque es sabido que ellos habían enviado a Aristóteles registros astronómicos de observaciones hechas en Babilonia 1903 años antes de que Alejandro Magno llegase allí; de manera que se remontarían al año 2234 a.C. Todo apunta por tanto a que los astrónomos caldeos eran contemporáneos de los sacerdotes egipcios. Se sabe también que en los límites de su reino con el de Frigia existía un templo dedicado a Hércules⁷, levantado hacia el año 2700 a.C. Bailly concluyó esta breve reseña afirmando que en aquella parte de Asia se venía practicando la astronomía desde el año 3000 a.C.

A continuación refiere como los antiguos persas, ancestros de los caldeos, hablaban en su libros de cuatro estrellas que indicaban los cuatros puntos cardinales. Comprobándose que 3000 años a.C. las estrellas conocidas como ojo del Toro y el corazón del escorpión, marcaban precisamente los equinoccios; mientras que la del corazón del León y la del Pez austral estaban muy cerca de los solsticios. En la India tenía la astronomía una antigüedad parecida. Se pensaba que el mundo había tenido cuatro edades, la primera duró 1.728.000 años, la segunda 1.296.000, la tercera 864.000 y la cuarta 4.863 años. La duración tan pequeña de esta última edad, en relación con la de las tres primeras, evidencia que esas eran imaginarias o de una clase diferente de nuestros años. Dado que los años de la última son solares, parece que la historia de sus observaciones astronómicas se remonta también a los albores del tercer milenio antes de nuestra era. Por otra parte parece adecuada esa conclusión, ya que fue por entonces cuando calcularon los movimientos en longitud del Sol, de la Luna y de las estrellas. Añadió Bailly, como prueba, que Tolomeo les había atribuido la observación de las pléyades, asegurándose en el libro de Job que esa constelación era muy conocida en Asia y que el orto heliaco de las mismas regulaba el comienzo del año.

El resumen de los albores de la astronomía china es especialmente interesante por su escasa divulgación. Se destaca en primer lugar su registro de un eclipse de Sol ocurrido en el año 2155 a.C., durante el reinado del emperador Tchong-Kang, tal como probó el jesuita francés A. Gaubil durante su misión en aquel país. En sus anales figuran recogidos otros fenómenos singulares como la conjunción planetaria en un día de Luna llena, la cual tuvo lugar en el año 2500 a.C. aunque Cassini I dudase de su verosimilitud, el también Jesuita A. Kircher demostró que realmente acaeció en el año 2449. Citaba también Bailly que bajo el reino de Hoang-ti, en el 2697 a.C., uno de sus ministros, llamado Yu-chi, descubrió la estrella polar y construyó un

⁶ *Histoire de l'astronomie ancienne, depuis son origine jusqu'à l'établissement de l'École d'Alexandrie. Paris, 1775*

⁷ Considerado en la antigüedad como el emblema del Sol, de hecho los viajes y hechos fabulosos que se le atribuyen pueden ser considerados como una especie de alegoría del movimiento del Sol.



Fragmento de la carta celeste de Dunhuang, datada en la dinastía Tang (618-907), en la que se muestra con toda claridad la constelación de la Osa Mayor. Aparecen representadas las estrellas usando colores diferentes, atendiendo a la escuela que las identificó: las negras son de Gan De y las naranjas de Shi Shen. El mapa contiene la imagen de 1300 estrellas y se conserva en la *British Library*.

globo celeste. Se cree igualmente que Fohi fue el primer emperador que estuvo verdaderamente interesado en la astronomía, allá por el año 2952 a.C., llegando a estudiar el movimiento de las estrellas y a reflejarlo en unas tablas astronómicas construidas a tal efecto. Bailly aseguraba en este resumen que la esfera celeste fue inventada por los astrónomos chinos.

A modo de conclusión mostraba este erudito francés su extrañeza de que siendo tan remotos los orígenes de la astronomía en dichas civilizaciones no se hubiesen conseguido después logros que viniesen a justificar sus ancestrales conocimientos, llegando a afirmar que habían mostrado para los descubrimientos la misma indolencia que para las conquistas y que en absoluto habían inventado la ciencia. Pero aún fue más lejos cuando defendía la posibilidad de que su astronomía fuese solo la herencia que habían sabido captar de una civilización superior, luego desaparecida tras algún proceso revolucionario. Esta fueron sus palabras: *Elle est l'ouvrage d'un peuple antérieur, qui avoit fait sans doute en ce genre des progrès, dont nous ignorons la plus grande partie. Ce peuple a été détruit par une grande révolution. Quelques –unes de ses découvertes, de ses méthodes, des périodes qu'il avoit inventées, se sont conservées dans la mémoire des individus dispersés. Mais eelles se sont conservées par des notions vagues & confuses, par une connoissance des usages, plutôt que ddes principes.*

Hasta el segundo tercio del pasado siglo solo se tenían noticias confusas acerca del desarrollo astronómico de los pueblos de mesoamérica y particularmente de los mayas. La explicación es el hallazgo en 1922 de una ciudad perdida en el norte de Guatemala (Tykal), en la que se encontraron diversas estelas de claro contenido astronómico. La vida de este pueblo se centró en el cosmos y el movimiento de los astros, que estudiaban con la ayuda de gnomons y desde verdaderos observatorios construidos al efecto. Gracias a las mismas diseñaron originales calendarios extremadamente precisos; baste decir que los cálculos de la concordancia entre los ciclos mayas de 260 días y el de 365 días, dan en los trópicos resultados casi idénticos a los del año actual, con un margen de error de tan solo 19 minutos. Apoyándose en ellos pudieron



El Observatorio del Caracol, en Chichén Itzá, al parecer fue ultimado en el año 906. Fue llamado así por los conquistadores españoles, en atención a la escalera del interior de la torre cilíndrica rematada por una cúpula sensiblemente esférica.

determinar las fases de la luna, la posición del Sol en el momento de los eclipses⁸, de los solsticios y de los equinoccios, así como los ciclos de la naturaleza. Otras de sus observaciones se centraron principalmente en Venus⁹, en las Pléyades (de donde se suponían originarios), y en los Planetas Marte, Júpiter y Saturno. La vía láctea también fue objeto de su estudio, siendo concebida como la trayectoria mítica que deberían seguir las almas cuando viajaran desde las profundidades subterráneas a los cielos del más allá.

Las alineaciones con el Sol jugaron un papel muy destacado en las ciudades mayas, de modo que los edificios ceremoniales se diseñaron de acuerdo con las direcciones cardinales. Los observatorios astronómicos presentaban la particularidad de que durante los equinoccios de primavera y de otoño los rayos solares penetraban por las troneras de los observatorios e iluminaban los muros de su interior. Uno de los ejemplos más conocidos de estos alineamientos tiene lugar en la celebrada ciudad de Chichén Itzá, en la península de Yucatán. Durante los equinoccios el Sol ilumina una de las escaleras de la pirámide dedicada al dios Quetzalcóatl y más concretamente la cabeza de una serpiente en la base de la misma. Los mayas creían también que los movimientos del Sol y de la Luna eran guiados por los dioses, y que necesitaban la ayuda de los humanos para poder salir del mundo subterráneo que recorrían durante la noche, de ahí que efectuasen con tanta frecuencia toda clase de ritos, incluidos los sacrificios de inocentes (aunque fuesen premiados

⁸ Incluso se cree que registraron el de Luna ocurrido el día 15 de febrero del año 3379 a.C.

⁹ Los mayas suponían que la Tierra ocupaba una posición central en el universo y no eran conscientes de las revoluciones planetarias alrededor del Sol. Usaron mucho los ortos y ocasos de Venus, fijando en 584 días la duración de un ciclo. También sabían que cinco de ellos equivalían a ocho años solares. Por lo que las apariciones del planeta en los extremos noreste y sureste tenían lugar cada ocho años.



Pictograma con la Luna creciente y la supuesta supernova SN 1054, la cual se mantuvo visible durante 22 meses. Cañón del Chaco en Nuevo Méjico.

con la inmortalidad). Concluimos esta breve aproximación con su modelo cosmológico de los tres mundos, a saber: el cielo, la Tierra y un océano subterráneo; en ocasiones la Tierra aparece como un gran cocodrilo flotando sobre ese agua subterránea. En esas tres regiones efectúa el Sol su doble movimiento, diario y anual.

La última referencia sobre las manifestaciones astronómicas primitivas se va a centrar en el suroeste de los Estados Unidos de América, donde cobraron especial protagonismo las tribus de los Asanazi, Mogollon y otra más genérica conocida como Pueblo, desde la llegada de los primeros conquistadores españoles. La cuestión relativa a los conocimientos astronómicos de algunos de sus componentes resulta todavía controvertida, aunque los ocho capítulos del libro *Prehistoric Astronomy in the Southwest*¹⁰ debieran ayudar a disipar cualquier duda al respecto. En ella se comenta por ejemplo que, aunque no conocieran la estrella polar, podían materializar la dirección norte sur siguiendo procedimientos gnomónicos. Otra buena muestra de sus conocimientos astronómicos era el hecho de saber la época del año en que se encontraban, a través de la posición del orto solar sobre su horizonte sensible. Se le atribuyen también los clásicos calendarios en espiral, sobre la que llegaba a proyectarse la luz solar, a través de ranuras abiertas en la roca circundante, en las épocas más señaladas del año. Son numerosos los pictogramas que se conservan y que están repartidos por sus zonas de influencia, llegando a representarse en uno de ellos (Cañón del Chaco) la supernova del cangrejo, visible el 4 de julio del año 1054, aunque en otras ocasiones se asegure que se trata del planeta Venus. Mención especial merece la llamada Casa Rinconada, una construcción circular en lo alto de una colina, que parece representar el modelo cosmológico de los Anasazi o bien un observatorio solar, en base a los nichos que contiene y a la orientación de una alineación, sensiblemente coincidente con la meridiana.

A pesar de haberle prestado tanta atención al Sol desde tiempos prehistóricos, solo se logró tener una idea cabal de sus movimientos relativos, asociados a la rotación diaria de la Tierra y a su traslación anual. En cambio, de su naturaleza apenas se supo nada hasta nuestros días, gracias al imparable desarrollo de la era espacial y al creciente lanzamiento de sondas que han ido explorando su sistema y a él mismo. Se comprende así que hayan proliferado toda clase de mitos y leyendas, algunas de las cuales han perdurado durante milenios y aún se mantienen en el acervo popular. Lo más sobresaliente, en ese aspecto, ha sido el haber llegado a considerarlo Dios en la mayoría

¹⁰ John Mckim Malville y su alumna Claudia Putnam. *Big Earth Publishing*, 1993. Mckim es Profesor emérito del *Department of Astrophysical and Planetary Sciences* en la Universidad de Colorado Boulder.



Nicho con el Dios Ra en el templo de Abu Simbel, al Sur de Egipto. En la estela de la derecha aparece el Dios Shmash sentado, bajo la Luna y las estrellas, delante de él sobresale la imagen de un disco solar apoyado en un altar y suspendido por otra deidad.

de las civilizaciones¹¹. De los muchos ejemplos que podrían traerse a colación, nos ha parecido representativa la selección que se expone a continuación.

La adoración de Ra, el antiguo dios solar de Egipto, no se limitó a Heliópolis sino que alcanzó a los propios faraones que se autoproclamaron hijos del mismo. Tal fue el papel asignado a Ra, que llegó a ser considerado el creador del mundo. La alegoría de los movimientos fue en este caso el empleo de un barco en lugar de la carroza, de manera que no solo se podría desplazar por los cielos sino también en el inframundo. Se daba por supuesto que renacía cada día, con la llegada del orto. En la antigua Mesopotamia surgió la figura de Shamash como Dios de la justicia, el cual le entregó a Hammurabi su celebrado código. Una de sus representaciones fue la de un disco solar, aunque llegase a ser considerado el Dios del cielo y de la Tierra. Existía la creencia de que recorría los cielos en una carroza, viendo así todo lo que ocurría durante el día. También viajaba por el inframundo hasta la llegada del día. Él fue el dios supremo para toda Babilonia.

En la tradición griega, el dios Apolo, hijo de Zeus (El Dios de dioses), se desplazaba por el cielo en una carroza tirada por caballos y con su luz iluminaba el mundo. La iconografía de Apolo fue muy variada, llegando a ser representado como el Sol radiante, que protegía con su luz disciplinas tan variadas como la música, la lógica y la razón. Con la llegada del cristianismo se le asoció al demonio, como relejo de la intolerancia hacia todo lo pagano. El mito de Apolo ha estado presente en el mundo de la filosofía, asociándolo en multitud de ocasiones a aspectos de la vida cotidiana, de la sociedad y hasta de la naturaleza. No obstante es obligado recordar que él no presidía el panteón, sino que lo hacía Zeus¹² (el Júpiter romano). La idea de que la Tierra es el centro del universo ha perdurado en el tiempo, desde que sus primitivos pobladores observaban que el Sol, la Luna y las estrellas parecían girar en torno a ella. Así quedó plasmado en el sistema geocéntrico de Tolomeo (siglo II d.C.), que mantuvo su vigencia mucho tiempo después de que

¹¹ Es esta una circunstancia que puede hacer sonreír a algún insensato, a pesar de que el mismo Sócrates le dirigía sus plegarias. Muchos de nuestros sesudos razonamientos es probable que hagan sonreír también en los siglos venideros, una vez que hayan sido superados nuestros conocimientos.

¹² En la mitología griega Zeus tuvo con Leto dos hijos gemelos: Apolo y Artemisa.



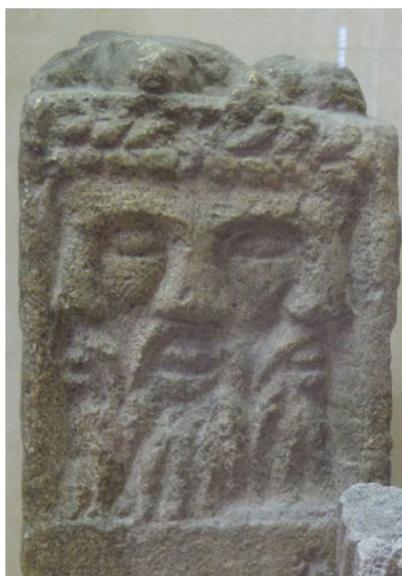
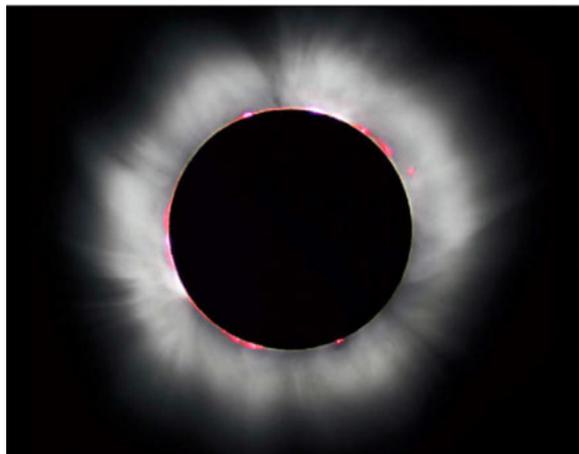
Bella alegoría del orto solar, con la carroza de Apolo apareciendo sobre el horizonte (*British Museum*). Junto a ella se presenta un cuadro de Tolomeo con la esfera armilar, pintado por Justus van Gent en 1476. *Musée du Louvre*.

Copérnico (en los albores del siglo XVI) defendiera que realmente era el Sol el que ocupaba dicho centro. El sistema del astrónomo egipcio, con la Tierra estacionaria, fue abrazado por la Iglesia; defendiéndose en su seno que el Sol ocupaba la cuarta esfera, entre las de Venus y Marte.

Una de las tradiciones solares más trágicas son las de la civilización azteca, concretamente las asociadas a Huitzilopochtli, Dios del Sol y de la guerra. Su iconografía era variada, aunque solía ser representado con plumas de color azul y verde, simulando las del colibrí. Pero a pesar de ello requería la ayuda de los humanos para vencer las trabas que le ponían las deidades de la oscuridad y poder volver a dar la luz del día. La ayuda era realmente cruenta, en tanto que requerían la sangre del corazón del sacrificado. Otra de las tradiciones más llamativas es la de la civilización china, pues una vez hubo 10 soles en el cielo. Todos ellos viajaban individualmente con su esposa Xihe, hasta que un día decidieron aparecer en el cielo al mismo tiempo. Sin embargo fue tanto el calor ocasionado que Dijun, el padre de todos ellos, les ordenó que se comportasen. Al no



Huitzilopochtli, en el Códice Telleriano-Remensis (Méjico. Siglo XVI). El arquero en la obra *Petición de los Cielos* (1645).



Eclipse total de Sol ocurrido el 20 de marzo de 2015, siendo visible desde las regiones polares del hemisferio norte; obsérvese la corona solar iluminada por la luna. La imagen de la derecha es la advocación tricéfala del Dios Lug, fue descubierta en Reims.

ser atendida su petición, ordenó al arquero Hou Yi que les disparase, siendo así como murieron nueve de ellos y quedó solo uno.

La tribu de los Inuit viven tanto en Alaska, como en Groenlandia y otras regiones del Ártico. Entre sus tradiciones se encuentra la leyenda que explica la existencia del Sol y de la luna, asociando ambos cuerpos al dios lunar Annigan y a su hermana, la diosa solar Malina. Al parecer durante un periodo en que vivieron juntos, un día se pelearon entre sí. Malina se alejó enfadada y Annigan la siguió continuamente sin conseguir reconducir la situación. Hasta tal extremo llegó la situación, que Annigan dejó de comer y se hizo cada vez más delgado, de ahí las fases lunares. Cuando la Luna desaparece, los Inuit pensaban que Annigan se había ido a comer. Al finalizar la persecución logra alcanzar a Malina y tiene lugar el eclipse solar. Al igual que sucedió con otras divinidades previas al cristianismo, en la mitología celta aparece la figura del Dios Lug (Lugh o Lugus), una especie de rey guerrero reluciente que ayudó a una tribu irlandesa a ganar su guerra con una raza de gigantes. Estos eran dirigidos por Balor, una especie de diablo del submundo que llegó a ser el abuelo de Lug. Este consiguió derrotar a su abuelo, a pesar de la ayuda que le prestó un cíclope mágico. La historia de este dios luminoso es análoga a las que se contemplan en la tradición indoeuropea, recordando en muchos supuestos al dios Apolo. El nombre de este dios celta explica el origen de topónimos como Lyon (*Lugdunum*), Leyden (*Lugdunum Batavorum*) y Lugo.

En la mitología escandinava, Frey era el Dios de la paz, fertilidad, lluvia y del Sol naciente. La leyenda señalaba que montaba un jabalí de oro, llamado Gullinbursti, con el que viajaba por el cielo y el océano. De tal manera que si estaba contrariado, se podía fugar en su propio barco, el *Skíðblaðnir*, el cual era el mejor de toda Escandinavia. Cuando no usaba el barco, Freyr lo plegaba y lo guardaba en su bolsillo. En la antigua mitología hindú, Suria, como Dios solar, representaba la forma visible de lo divino, tal como podía verse con toda claridad cada día. Representado



Estatuilla de Rällinge (Södermanland, Suecia), se cree que representa a Frey y data de la época vikinga. Imagen de Suria montando la carroza tirada por siete caballos, solía llevar siempre una flor de loto.

como un hombre rojo con tres ojos y cuatro brazos, este Dios iba generalmente en una carroza, tirada por siete caballos o bien por un solo caballo con siete cabezas. Se supone que Suria sana a los enfermos y como tal es honrado en templos y festivales en toda la India. Se cree que este Dios Sol es también el garante de la buena fortuna, un atributo que explica el hecho de que muchos comerciantes coloquen un símbolo del Sol sobre las puertas de sus tiendas.

Los indígenas Fon de Benín y los Ewé, que habitan en Ghana, Benín y Togo, creen que Lisa (Dios del Sol) y Mawu (el Dios de la Luna) tienen espíritus gemelos. Para ellos, los dos juntos son los creadores del universo, representando Mawu la maternidad y la fertilidad mientras que Lisa es la encarnación de la energía, el trabajo y la fuerza. En la religión cristiana se observan prácticas parecidas a las que han sido mencionadas hasta aquí. En efecto, la fecha del propio nacimiento de Jesucristo parece que fue forzada para que no coincidiese exactamente con el solsticio de invierno.



Una representación moderna de las deidades Mawu y Lisa. A la derecha fresco de Jesús en el centro del zodiaco. Catedral Svetitskhoveli en Mtskheta (Georgia).

no. La proliferación de imágenes en los que se representa al creador o al salvador con corona es signo evidente de la influencia solar, más clara es todavía en las famosas custodias, saliendo de la sagrada forma haces de rayos como si fuese el mismo Sol. El paralelismo entre los doce apóstoles, los doce meses del año y los doce signos del zodiaco tampoco ofrece duda, de hecho son muchas las imágenes en las que aparece Jesucristo rodeado de los doce signos.

Culminamos esta aproximación a la figura del Sol, con una interesante reflexión de la NASA¹³ que refleja sintéticamente su importancia para nosotros:

Nothing is more important to us on Earth than the Sun. Without the Sun's heat and light, the Earth would be a lifeless ball of ice-coated rock. The Sun warms our seas, stirs our atmosphere, generates our weather patterns, and gives energy to the growing green plants that provide the food and oxygen for life on Earth.

¹³ National Aeronautics and Space Administration. *A meeting with the universe chapter 3-1: The Sun and Us*

CAPÍTULO III | Las estaciones del año y los signos del zodiaco



CAPÍTULO III | Las estaciones del año y los signos del zodiaco

Los son los movimientos principales asociados a la Tierra, el de rotación en torno a su eje y el de traslación alrededor del Sol, el primero tiene un periodo de un día (24h) y el segundo otro de 365,25 días aproximadamente. Al igual que el primero se ve reflejado en el movimiento diurno y aparente de las estrellas, incluido el Sol, la Luna y los Planetas, en el segundo se puede considerar otro relativo del Sol alrededor de la Tierra. El plano sobre el que se efectúa la traslación terrestre es el de la eclíptica, que se define como el plano que contiene al centro del Sol, al baricentro¹ del sistema Tierra-Luna y a su vector velocidad heliocéntrica. La línea normal a ese plano y que pasa por el centro de la esfera cortaría a esta en los polos eclípticos, mientras que los planos perpendiculares a ella intersectan la esfera según circunferencias máximas, los meridianos eclípticos. La intersección del ecuador y del plano de la eclíptica es la línea equinoccial, que corta a la esfera en los puntos equinociales, el punto Aries (comienzo de la primavera) y el punto Libra (comienzo del otoño). Se define la línea de los solsticios como una recta perpendicular a la anterior y contenida en el plano de la eclíptica, esta línea corta a la esfera celeste en los solsticios de verano e invierno, según se encuentre el Sol por encima o por debajo del ecuador. El plano de este y el de la eclíptica forman un ángulo llamado oblicuidad de la eclíptica, cuyo valor actual es próximo a los 23° 26'. Los círculos horarios que contienen a los solsticios o a los equinoccios se llaman coluros solsticiales o equinociales. El Sol efectúa su movimiento aparente recorriendo la eclíptica en sentido directo o contrario a las agujas del reloj, es decir desde el Punto Aries se desplazaría hasta el Solsticio de verano, desde este hasta el Punto Libra, desde él hasta el Solsticio de invierno (bajo el ecuador) y desde allí hasta el Punto Aries, en donde su declinación pasaría de negativa a positiva. Entre cada dos de esos puntos invertiría aproximadamente un trimestre. Es sabido por otra parte que los puntos en que se inician o finalizan las estaciones astronómicas coinciden con los equinoccios y con los solsticios: la primavera comienza en el Punto Aries y finaliza en el Solsticio de Verano, inicio de la estación que lleva igual nombre y que finaliza en el Punto Libra, o equinoccio de otoño. En este comienza precisamente esa estación, que termina en el Solsticio de invierno. Allí comienza la cuarta estación, que finaliza en el Punto Aries, con la llegada de la primavera.

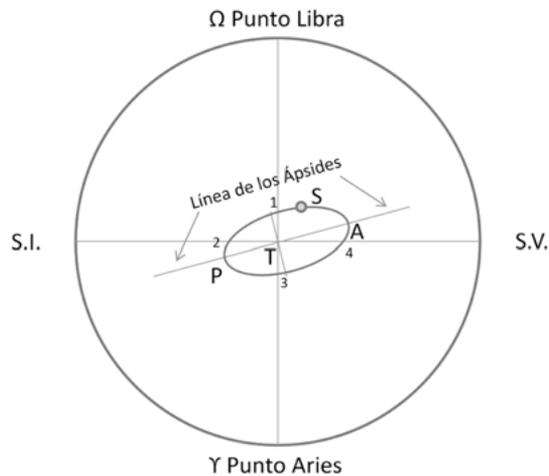
¹ Centro de masas situado en la recta imaginaria que une los centros de masas del planeta y de su satélite, a unos 4660 km del centro de la Tierra.

A la vista de la figura anterior podría pensarse que la duración de las cuatro estaciones del año sería idéntica, pero cuando se analiza la situación con más detalle se llega a una conclusión diferente. En efecto, la órbita de la Tierra alrededor del Sol puede considerarse elíptica, aunque su excentricidad sea unas cinco veces menor que la que presentan los meridianos terrestres², de modo que la distancia entre la estrella y el planeta es variable, desde un valor mínimo durante el perigeo (mayor acercamiento $\approx 147.10 \text{ E}6 \text{ km}$) a un valor máximo durante el apogeo (mayor alejamiento $\approx 152.10 \text{ E}6 \text{ km}$). Análogas consideraciones se podrían hacer para la elipse homotética que recorrería el Sol alrededor de la Tierra, cambiando apogeo por afelio y perigeo por perihelio. El segmento que une ambos puntos sería el eje mayor de la elipse orbital y la recta que lo contiene recibe el nombre de línea de los ápsides, la cual forma con la de los solsticios un ángulo que depende del tiempo³ y que es próximo a los 12° .

Aunque la figura anterior no esté sujeta a escala y se haya exagerado la excentricidad orbital, si es didácticamente útil; ya que teniendo en cuenta la segunda ley de Kepler⁴ se entiende que la velocidad del Sol ha de ser menor en el entorno del apogeo (A) que en del perigeo (P). En otras palabras, en la primera región tardará más tiempo en recorrer un determinado arco que en la segunda, la conclusión resulta por tanto evidente:



La esfera celeste, el plano de la eclíptica y del ecuador celeste. No se ha representado el Punto Libra, o equinoccio de otoño, diametralmente opuesto al Punto Aries.



Proyección ortográfica de la esfera celeste sobre el plano de la eclíptica. Se ha esquematizado la elipse orbital, marcando los extremos de las estaciones.

² Es ese un hecho que puede resultar sorprendente, pues a veces se piensa equivocadamente que la órbita de la Tierra alrededor del Sol es más elíptica que los meridianos terrestres, supuestos prácticamente circulares, cuando en realidad la excentricidad orbital es de 0.01671 y la de la elipse meridiana vale 0.08206. Un hecho que hace más encomiable la corrección de Kepler a Copérnico.

³ El perihelio avanza unos $12''$ cada año y el Punto Aries retrocede alrededor de $50''$ anuales por la precesión equinoccial, una consecuencia de la desigual atracción del Sol sobre la Tierra (por su abultamiento ecuatorial).

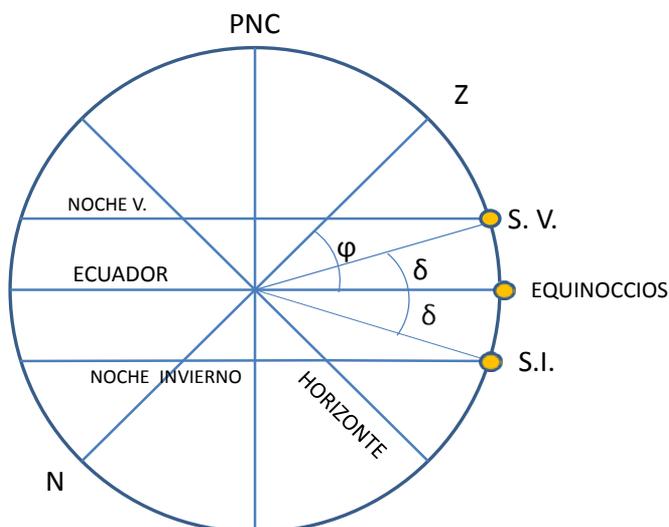
⁴ El radio vector Tierra Sol barre áreas iguales en tiempos iguales.

la primavera y el verano tendrán una duración mayor que las otras dos estaciones (otoño 1-2) e invierno (2-3); la misma ley permite concluir que la duración del invierno será menor que la del otoño, pues el Sol tardaría menos en recorrer el segmento curvilíneo que se considere, por ser su velocidad máxima.

Inicio	H. Norte	H. Sur	Duración (d)	Declinación S.
20-21 Marzo	Primavera	Otoño	92.9	0°
21-22 Junio	Verano	Invierno	93.7	23° 26´
22-24 Septiembre	Otoño	Primavera	89.6	0°
21-22 Diciembre	Invierno	Verano	89.0	-23° 26´

Antes de continuar con los comentarios sobre las estaciones del año, parece conveniente abrir un paréntesis para aclarar una posible duda que podría asaltarle a quien observe con detenimiento la figura previa: ¿Cómo es posible que estando el Solsticio de Invierno más cercano al Sol que el Solsticio de verano, haga más frío durante el primero y más calor durante el segundo? La explicación es inmediata ya que el calor depende de la inclinación de los rayos solares y no de la distancia al Sol, prácticamente igual en los dos casos.

En la imagen siguiente se observa ese fenómeno, para latitudes medias, deduciéndose que la distancia al cenit del Sol es mínima durante el solsticio de verano y máxima durante el invierno. Como la declinación del Sol, en valor absoluto, es de 23° 26´ en los dos casos, resultará que dicha distancia cenital valdría $\varphi - \delta$ en el solsticio de verano y $\varphi + \delta$ en el solsticio de invierno; coincidiendo con la latitud en los equinoccios. Concretando para el caso de Granada, con una latitud de 37°, resultaría que la distancia cenital del Sol sería de 13° 34´ en el primer caso y de 60° 26´ en el segundo. La duración de los días y de las noches en los solsticios y en los equinoccios es tam-



Sección meridional de la esfera celeste para mostrar la distancia cenital del Sol, durante los solsticios y en los equinoccios. DISTANCIAS AL CENIT: $\varphi - \delta$, en el Solsticio de verano, y $\varphi + \delta$, en el Solsticio de invierno. Se observa también como la duración del día es mayor que la noche en el solsticio de verano, lo contrario que sucede en el solsticio de invierno. Durante los equinoccios la duración de la noche es igual que la del día, 12h.

bién evidente a la vista del dibujo.

Cerramos el paréntesis, señalando que cada civilización estableció sus estaciones basándose en criterios distintos a los puramente astronómicos que se acaban de comentar, primando por ejemplo aspectos meteorológicos, agrícolas, etc. Sirva de ejemplo el caso de Islandia, donde se inicia el verano (fiesta nacional) el primer martes después del 18 de abril; o el de algunos países meridionales de Asia, en los que se divide su calendario en seis estaciones en lugar de las cuatro, con las que estamos tan familiarizados. Asimismo, en muchas regiones de los trópicos solo contemplan dos estaciones: la lluviosa y la seca; aunque en ocasiones recurran a una tercera, llamada fría, leve o *harmattan*⁵. No obstante las estaciones de mayor resonancia histórica son las tres empleadas en el antiguo Egipto: avenida, desbordamiento y cosecha, directamente relacionadas con las crecidas anuales del río Nilo; cada una de estas estaciones se dividían en cuatro meses de 30 días, subdivididos a su vez en tres semanas de 10 días cada uno, a las que se les daba el nombre de decanas⁶. Otra curiosa división del año tuvo lugar en el calendario tradicional de China, en donde las cuatro estaciones *chūn* (春), *xià* (夏), *qiū* (秋), y *dōng* (冬), parecen corresponderse con primavera, verano, otoño e invierno; aunque los equinoccios y los solsticios sean los puntos medios de los intervalos correspondientes, en lugar de los extremos de los mismos. En Australia, concretamente en sus regiones tropicales y septentrionales, solo se usan dos estaciones: seca (del 1 de noviembre al 30 de abril) y húmeda (del 1 de mayo al 31 de octubre). Los polos ártico y antártico son dos puntos singulares en los que carecen de sentido conceptos tales como el de estación, en tanto que el año puede dividirse en dos periodos: uno en el que el Sol está siempre por encima del horizonte (día polar de seis meses) y otro en que siempre estará oculto (la noche Polar de seis meses); recuérdese que el Sol está seis meses por encima del ecuador y seis meses debajo del mismo, además de que el plano del ecuador y del horizonte son idénticos en los dos puntos.

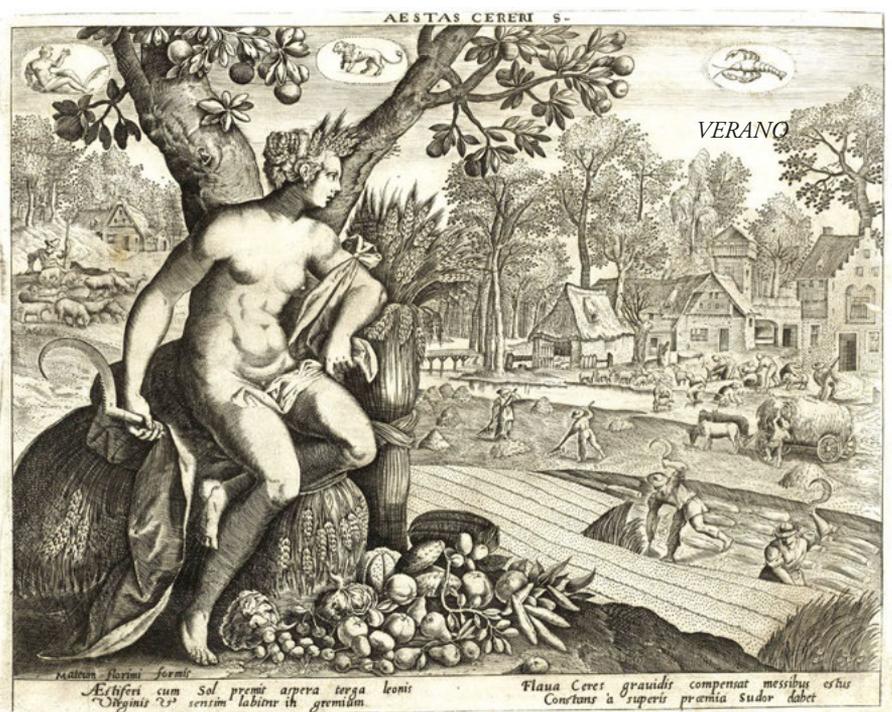
Aunque se identificasen los Planetas como astros errantes, no se suponía que se desplazarían sobre cualquier región de la esfera celeste. Desde los primeros estudios se comprobó que sus movimientos se realizaban dentro de una franja localizada en su zona central, tal como ocurre con el desplazamiento aparente y anual del Sol, muy próximo a los de los Planetas y al de la luna. Esa zona centrada en la eclíptica⁷ tiene una extensión longitudinal de 360° y una amplitud latitudinal variable entre 16° y 18°, de ahí que a veces sea referida como banda zodiacal. Etimológicamente la palabra zodiaco procede del griego antiguo y viene a significar círculo o rueda de los pequeños animales, en atención a las constelaciones presentes en esa zona del firmamento: Leo, Aries (carnero), Scorpio, Cáncer (cangrejo), Piscis, Capricornio y Taurus. Al parecer fueron los caldeos⁸ los que dividieron la zona anterior en doce sectores de 30° de extensión, llamados signos, que iría recorriendo el Sol en su trayecto anual alrededor de la Tierra. La denominación elegida para tales

⁵ Suele referirse al periodo comprendido entre finales de noviembre y mediados de marzo. Difiere del invierno, en tanto que es fría, seca y proclive a las tormentas de arena. La palabra suele emplearse en un dialecto usado en la parte central y meridional de Gana.

⁶ En alusión a las estrellas de igual nombre. Conjunto de estrellas, agrupadas en 36 asterismos, usadas como reloj nocturno desde el tercer milenio antes de Cristo.

⁷ La denominación de eclíptica obedece al hecho de que la Luna ha de estar prácticamente sobre ella para que ocurra el eclipse. En realidad el plano de la órbita lunar forma con el plano de la eclíptica un ángulo próximo a los 5°, de manera que la mitad del tiempo tiene latitud positiva y la otra negativa.

⁸ Sextus Empiricus atribuyó a los caldeos la división del zodiaco, aunque Macrobio pensara que fueron los egipcios. Jean Sylvain Bailly en su *Histoire de l'astronomie ancienne* (1775), deducía, por esa doble asignación, que debió ser un pueblo anterior.



Las cuatro estaciones del año, grabados del siglo XVI y XVII. Los cuatro llevan en la parte superior los signos de zodiaco con que se corresponden. Grabados de Adrien Collaert, en la frontera de los siglos XVI y XVII). Biblioteca Nacional de España.



Las cuatro estaciones del año, grabados del siglo XVI y XVII. Los cuatro llevan en la parte superior los signos de zodiaco con que se corresponden. Grabados de Adrien Collaert, en la frontera de los siglos XVI y XVII). Biblioteca Nacional de España.



Imagen de seis signos del zodiaco, preparadas en husos para formar un globo celeste. Aries, Tauro, Géminis, Cáncer, Leo y Virgo. Obsérvese que figura el Trópico de Cáncer y el Círculo Polar Ártico. B. Gaultier y otros. *Bibliothèque Nationale de France.*

signos fue la de la constelación más relevante de la zona correspondiente; el paralelismo con los doce meses del año es obvio, siendo esa la razón fundamental de tal división.

La colocación de los signos en la franja zodiacal sigue el orden de las cuatro estaciones, a saber: Aries, Tauro y Géminis (primavera), Cáncer, Leo y Virgo (verano), Libra, Escorpio y Sagitario (otoño), Capricornio, Acuario y Piscis (invierno). Asociados a Cáncer y a Capricornio están dos paralelos terrestres denominados trópicos: el primero es el lugar geométrico de los puntos cuya latitud es de $23^{\circ} 26'$ Norte, mientras que el segundo es el lugar geométrico de los puntos cuya latitud es de $23^{\circ} 26'$ Sur. Otros dos paralelos terrestres están igualmente relacionados con el valor de la oblicuidad de la eclíptica, se trata de los dos círculos polares, ártico y antártico, cuyas latitudes son las colatitudes de los trópicos respectivos, es decir $66^{\circ} 34'$ Norte y $66^{\circ} 34'$ Sur.

El carácter mitológico de los nombres adjudicados a los doce signos del zodiaco es tan evidente que no es preciso insistir más sobre el particular, no obstante se da seguidamente una apretada visión de algunos de los mitos que tratan de explicar el porqué de su denominación. Aries, es el primero de los doce signos, creyéndose que representa al carnero que fue sacrificado para honrar a Júpiter y fue transportado al cielo. Tauro es el animal en el que se transformó Júpiter para secuestrar a Europa, princesa fenicia. Géminis es el símbolo que representa indubitablemente a Castor y a Polux, dos hermanos gemelos hijos de Leda: el padre de Castor fue Tindareo, de ahí que este fuese mortal; en cambio el hermano era inmortal por ser hijo de Zeus.

Cáncer, fue el cangrejo que Juno envió contra Hércules, mientras que este luchaba contra la Hidra de Lerna; aunque le mordió en el pie, logró matarla y Juno la incluyó como una más de las constelaciones del zodiaco. Leo es el león que fue asfixiado por Hércules en uno de los bosques de Nemea. Virgo, según unos era Erigone hija de Icaro de Atenas y ejemplo de piedad filial; para otros se trataba de Astrea, hija de Temis y de Júpiter. Al parecer descendió del cielo, pero los crímenes de los hombres la forzaron a dejar las ciudades, y luego los campos, para volver al cielo.

Libra, simbolizada por la balanza, signo de la equidad y de la misma justicia. Escorpio es el octavo signo zodiacal y representa al escorpión que fue enviado por Diana para que picase en el talón a Orión, un gigantesco cazador.

Sagitario es la personificación del mito, mitad hombre mitad caballo, lanzando una flecha con su arco. Para unos es Centauro, pero para otros es Croco, hijo de Eufemia, nodriza de las musas; quien a su muerte fue llevado con las estrellas atendiendo a la petición de estas. Capricornio es la famosa cabra Amaltea, la que amamantó a Júpiter; que está convertida en estrella junto a sus cabritillos. Acuario, es la personificación del

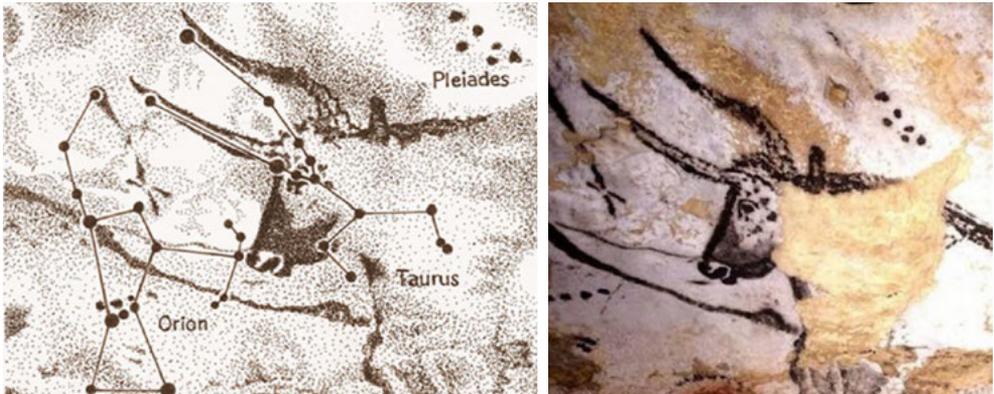
apuesto Ganímedes, secuestrado por Júpiter para convertirlo en su amante y camarero de los dioses. Para otros es Aristeo, hijo de Apolo y de la cazadora Cirene. Piscis, el duodécimo signo zodiacal, cuya imagen son los dos peces que transportaron a Venus y al Amor. Huyendo de la persecución de Tyfón, Venus y su hijo Cupido también fueron llevados por dos peces más allá del río Éufrates, y como premio fueron situados en el cielo. Otra versión indica que esta constelación representa a los delfines que le llevaron Anfrita a Neptuno, el cual agradecido logró que Júpiter



Zodiaco romano con los dioses protectores de los signos. A la izquierda Venus y el Amor. *Bibliothèque Nationale de France.*

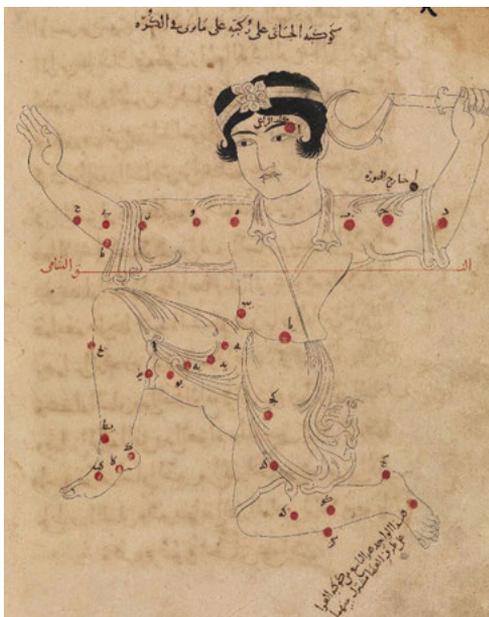


Los seis signos restantes: Libra, Escorpio, Sagitario, Capricornio, Acuario, y Piscis. Figura también la traza del Trópico de Capricornio. Como en el grupo anterior se trata de la preparación de un globo celeste, fabricado en el año 1626, tal como quedó reflejado en la cartela que aparece bajo la imagen de Pegaso. B. Gaultier y otros. *Bibliothèque Nationale de France.*



Evidencias astronómicas en el complejo de Lascaux: las Pléyades y la constelación de Orión.

les hiciese sitio en el zodiaco. Tanto las constelaciones zodiacales como las del resto del cielo ya eran conocidas desde tiempos prehistóricos, entre las muchas evidencias pueden citarse los dibujos que aparecen en las cuevas del complejo Lascaux (Dordogne. Francia), probablemente referidos a Taurus, Orión y a las pléyades, a veces conocidas también como las siete hermanas. La tradición recogida por los filósofos griegos y recopilada por Tolomeo, fijaba en 48 el número de constelaciones⁹ aunque ya estuviese presente también la referida a los doce signos del zodiaco, ligada como ya se ha dicho a constelaciones con nombres de animal. Las constelaciones zodiacales



Hércules en el *Kitāb suwar al-kawākib al-tābita* de Abd al-Rahman ibn «Umar al-Sūfi». Manuscrito de 1009-1010 (pág 81). Biblioteca Bodleiana de Oxford.

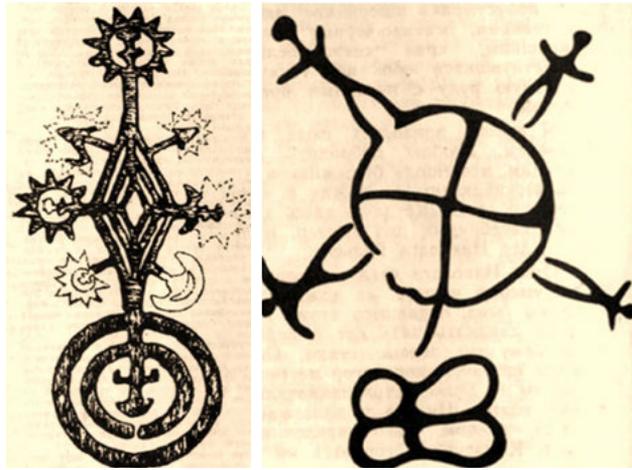
⁹ En el año 1922 la Unión Astronómica Internacional admitió la existencia de 88 constelaciones, incluidas las 48 de Tolomeo.

fueron conformadas como tales en Mesopotamia, durante un periodo tan prolongado como el que va del 3200 al 500 a.C., siendo a partir de ese último año cuando fueron adoptadas en Grecia; en cambio las de los otros grupos, asociadas a las tareas agrícolas, fueron olvidadas.

Sin embargo existía también otro grupo de constelaciones procedentes del litoral mediterráneo, vigentes desde el 2800 a.C., de gran utilidad para la navegación. A él pertenecían algunas con forma de osos y serpientes, usadas para marcar la posición del polo celeste y la del ecuador; además de otras asociadas a personajes mitológicos como Hércules, Serpentario, Cazador y Auriga, o las del hemisferio sur. Hay otras constelaciones como la de Perseo y las de otros animales que son de origen desconocido. Se ha especulado mucho acerca del origen de las constelaciones, aunque se haya venido defendiendo la idea de que obedecían principalmente a mitos o fantasías populares, hoy día comienza a extenderse la idea de que se trataba de una especie de sistemas coordinados rudimentarios que permitían localizar las estrellas, sin necesidad de instrumentos. No obstante hay evidencias de que probablemente datan del año 2700 a.C., las cuales se basan en la existencia de una zona del cielo en la que no figura ninguna de las 48 constelaciones de Tolomeo; un hecho sorprendente que podría ser explicado teniendo en cuenta la precesión de los equinoccios, ya que en la época de la observación no sería visible.

Si bien se reconoce la antigüedad las aportaciones babilónicas, el descubrimiento de un observatorio en Metsamor (Armenia) ha cambiado sustancialmente el panorama, pues de algunos de sus registros se desprende que ya habían dividido el año en doce secciones, unos 2000 años antes de que lo hiciesen en Mesopotamia. También se supone que confeccionaron un calendario y eran conscientes de la esféricidad de la Tierra, como prueba un petroglifo en el que incluso se esbozó la existencia de antípodas.

La representación zodiacal más antigua que se conserva, procede de Egipto, y forma parte del planisferio que se encontró en el complejo de Dendera, durante la invasión francesa, y más concretamente en el templo de Hathor, la diosa del amor y de la fertilidad. Los autores del hallazgo¹⁰, fueron los Ingenieros *de Pont et Chaussées* Prosper Jollois y Édouard de Villiers du Terrage, más conocido como Devilliers, miembros de la Comisión de sabios y del Instituto del Cairo. El planisferio celeste fue trasladado a París en el año 1821, contando para ello con la autorización de Mohamed Ali Pasha, que gobernaba Egipto bajo la supervisión del sultán otomano. El zodiaco, como también se le conoce, se encuentra expuesto en una de las salas del Museo del Louvre.



Un posible modelo cosmológico. En la parte inferior la Tierra rodeada por las esferas del agua y del aire. En la parte superior se situaría el Sol, con el árbol de la vida en su interior. Entre los dos cuerpos están la Luna y los cinco Planetas visibles a simple vista: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno.

¹⁰ El monumento astronómico más sobresaliente que se descubrió en las postrimerías del siglo XVIII.

Se trata realmente de un bajorrelieve que representa el cielo nocturno y se encontró en el techo de una de las capillas del referido templo, en el cual se celebraban los misterios de la resurrección del dios Osiris¹¹. La bóveda celestrial se representa mediante un disco soportado por cuatro mujeres, asistidas por espíritus con cabeza de Halcón. Las treinta y seis decanas alrededor de la circunferencia simbolizan los 360 días del año egipcio¹². Las constelaciones que aparecen dentro del círculo incluyen los signos del zodiaco, mediante imágenes similares a las actuales. Aries, Tauro, Escorpio y Capricornio, por ejemplo, son fácilmente reconocibles; otras en cambio tienen el aspecto propio de la iconografía egipcia: Acuario se representa como Happi, el padre de los dioses y dios de las crecidas del Nilo, vertiendo agua de dos vasos. Entre las constelaciones



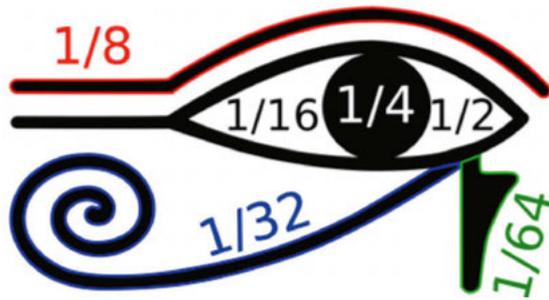
Grabado del Templo de Hathor, diosa del amor y de la fertilidad (Dendera), pintado por David Roberts (1838). Obsérvese que la fachada del templo estaba parcialmente oculta cuando fue dibujada en aquel año.



Planisferio celeste de Dendera. A la izquierda aparece el bajo relieve original, conservado en el Museo del Louvre, junto al dibujo que hizo in situ Dominique - Vivant Denon, miembro de la Comisión de Sabios y del Instituto de Egipto. *Musée du Louvre.*

¹¹ Esposo de Isis y padre de Horus. El mito de su resurrección reconfortaba a todos los que pensaban en la posibilidad del más allá.

¹² Al último mes de cada año le añadía cinco días para completar el año solar, los llamados días epagómenos. Herodoto dejó dicho que los egipcios fueron los primeros hombres del mundo que descubrieron el ciclo del año, dividiendo su duración, para conformarlo, en doce partes. Afirman haberlo descubierto gracias a su observación de los astros.



El Ojo de Horus, o también el ojo de Ra, junto a las fracciones unitarias; obsérvese que cada una es la mitad de la anterior.

circumpolares, colocadas en el centro del cuadro, figura la Osa Mayor como la pata de un buey. La diosa hipopótamo, opuesta a las dos Osas, es la imagen de la constelación del dragón.

Aunque los primeros intentos de datar el planisferio no dieron un buen resultado, los estudios más recientes si lo han logrado. Los hechos en que se han basado han sido los siguientes: Los cinco Planetas conocidos en aquella época estaban asociados a ciertos signos del zodiaco: Venus (el dios matutino) está detrás de Acuario, Júpiter (Horus que revela el misterio) está cerca de Cáncer, Marte (Horus el rojo) está justo encima de Capricornio. Mercurio era llamado el inerte y Saturno Horus el Toro. Esa configuración tan particular, de los Planetas sobre las constelaciones zodiacales es sabido que solo tiene lugar una vez cada mil años; de ahí que esta representación del firmamento egipcio haya sido datada entre el 15 de junio y el 15 de agosto del año 50 a.C. Por otro lado figuran en ella dos eclipses bien documentados. El solar del 7 de marzo del año 51, cuya alegoría es la diosa Isis cogiendo un babuino (el dios Thot) por su cola, tratando de impedir que la Luna llegue a oscurecer el Sol y otro lunar acaecido el 25 de septiembre del mismo año, cuya imagen es el ojo de Horus (*udjat-eye* o el todo), ya que el eclipse lunar solo tiene lugar si la Luna está llena.

Se ha escrito mucho sobre la relevancia de este planisferio, destacando sobre todo la influencia sobre el mismo de las ideas babilónicas, dejando de lado la egipcia; como si la astronomía del



Techo de la tumba de Seti I, descubierta por el italiano Giovanni Battista Belzoni en 1817. Destaca delante del hipopótamo la constelación de la Osa Mayor, simbolizada por la pata del buey en que se apoya. Esta constelación era el signo del dios Seth, como Orión era la estrella de Osiris y Sirio la estrella de Isis.



Dos imágenes de la Osa Mayor
en el antiguo Egipto.

antiguo Egipto dejase mucho que desear, por el simple hecho de no haber encontrado un zodiaco similar al de Dendera. A cualquier observador perspicaz no se le escapa que la importancia de los conocimientos astronómicos de aquel país salta a la vista, por hechos tan trascendentes como la orientación de la gran pirámide de Giza o la proliferación de motivos astronómicos en numerosas tumbas, de entre los que cabe destacar el de la tumba del faraón Seti I, en el Valle de los Reyes, el cual gobernó en el siglo XIII a.C. La existencia de constelaciones previas a las listadas por Tolomeo, es también buena prueba de ellos, prestando especial atención a las circumpolares; una de las cuales figura precisamente en el planisferio de Dendera, simbolizada por la pata de buey (imagen ajustada de la Osa Mayor).

Sin pretender hacer una enmienda a la totalidad ha de recordarse que el estudio de los zodiacos es propio de la astronomía judiciaria, una disciplina sin base científica, de la que hicieron uso personajes tan brillantes como Johannes Kepler o Isaac Newton. En todo caso, la importancia del cultivo de la astronomía en Egipto viene avalada sobre todo por la invención de su calendario de 365 días, organizado en doce meses de 30 días cada uno, que convivía con uno lunar previo (\approx 5000 a.C.), del que tomaron su nombre. No son muy conocidos los astrónomos egipcios, aunque todos los sacerdotes poseían conocimientos al respecto; quizás Sosígenes de Alejandría fuese el último de ellos, honrándolo el hecho de haber asesorado a Julio Cesar en la reforma y posterior implantación de un novedoso calendario.

CAPÍTULO IV | El movimiento diario de las estrellas



CAPÍTULO IV | El movimiento diario de las estrellas

Al contemplar el cielo nocturno con detenimiento se aprecia que muchas estrellas se mueven lentamente sobre la esfera, análogamente a como lo hacen el Sol y la Luna, saliendo por el lado del Este y poniéndose por el lado del Oeste. No todas las estrellas repiten esa secuencia, en tanto que siempre están por encima del horizonte girando en torno a un punto fijo del cielo, denominado Polo celeste. Los polos son los puntos de intersección del eje del mundo con la esfera celeste: uno se encuentra en el hemisferio norte, junto a la estrella polar, y otro en el hemisferio austral, en las proximidades de la Cruz del Sur (una de las constelaciones más señaladas de aquella parte del firmamento). Ese movimiento circular y relativo tiene un periodo de 24 horas, efectuándolo todas las estrellas en sentido directo, es decir contrario a las agujas del reloj. Dicho movimiento diario y aparente es tan solo una prueba más de la rotación de la Tierra. Todas las trayectorias estelares son círculos menores de la esfera celeste, pues son intersecciones de la misma con planos perpendiculares al eje del mundo. En realidad el movimiento no es regular, pues el orto de las estrellas se adelanta cada día unos cuatro minutos, a causa de la traslación imaginaria del Sol alrededor de la Tierra, cantidad que es conocida con el nombre de aceleración de las fijas¹.

Atendiendo a su visibilidad se puede establecer una cierta clasificación: en el primer grupo estarían aquellas cuyas órbitas son tan próximas a los polos que siempre estarían por encima del horizonte, de ahí que reciban el nombre de circumpolares; mientras que al segundo grupo pertenecerían aquellas que tienen orto y ocaso. El aspecto del firmamento dependerá siempre del lugar que ocupe el observador sobre la superficie terrestre. En efecto, si se situase sobre los polos solo podría ver las estrellas que se localizan a un lado o al otro del ecuador celeste: en el polo norte todas las de declinación positiva y en el polo sur todas las de declinación negativa, sin que ninguna se pudiera ocultar bajo el horizonte (su plano coincidiría con el del ecuador). Si el observador

¹ La posición del Sol sobre la esfera celeste se puede definir en función de sus dos coordenadas ecuatoriales: declinación y ascensión recta. La primera es el ángulo que forma el radio vector del Sol con el plano del ecuador celeste (diametral y perpendicular al eje del mundo). Al contrario de lo que sucede con las otras estrellas, su valor es variable y actualmente está comprendido en el siguiente intervalo: $-23^{\circ} 26' \leq \delta \leq 23^{\circ} 26'$. El ángulo $23^{\circ} 26'$ es el formado por el plano del ecuador y el de la eclíptica (por el que realiza el Sol su desplazamiento aparente). La segunda coordenada solar sería la llamada ascensión recta, o distancia del equinoccio de primavera al Sol medida sobre el ecuador y en sentido directo, sus valores están comprendidos en el intervalo siguiente: $0^{\text{h}} \leq \alpha \leq 24^{\text{h}}$. Pues bien, la aceleración de las fijas es la variación diaria de la ascensión recta, de manera que, como el periodo de traslación es próximo a los 365 días, resulta una variación diaria cercana a los 4 minutos de tiempo.



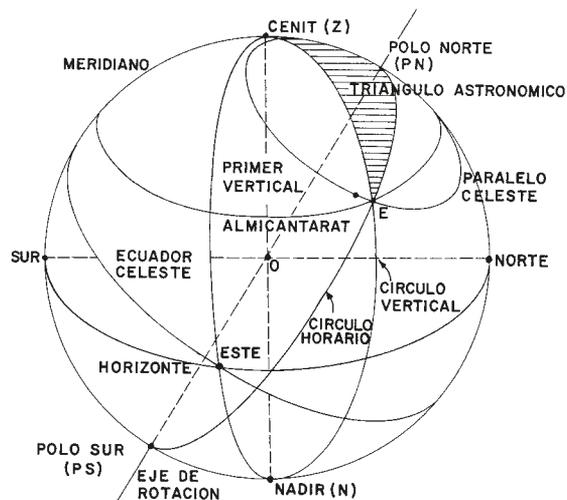
Imagen del movimiento diurno sobre el Pico del Teide. Fotografía de Daniel López.

se trasladase a un punto del ecuador podría ver todas las estrellas del firmamento, estando por encima del horizonte el mismo tiempo que debajo del mismo. En latitudes intermedias se verían estrellas con declinación positiva y negativa, variando el intervalo de tiempo que están a uno u otro lado del horizonte.

Aparentemente todas las estrellas mantienen sus posiciones relativas, noche tras noche, aunque cada una tiene en realidad su movimiento propio. Desde las primeras observaciones se fueron agrupando algunas para identificarlas con mayor facilidad, originándose así las constelaciones, cuya denominación dependía del país en que fueron observadas. En Occidente se eligieron las denominaciones grecorromanas, como por ejemplo Orión el cazador, acompañado incluso por dos de sus perros. Los animales ocuparon también un lugar destacado: *Scorpio*, de escorpión; *Leo*, de león; *Cygnus*, de cisne; *Ursa Major* y *Ursa Minor*, de osa; etc. Esas dos últimas constelaciones son, junto a la de Casiopea, fundamentales para orientarse durante la noche, ya que permiten localizar con suma facilidad la posición del Polo norte celeste y replantear, en su caso, la meridiana del lugar.

Para entender con más claridad el movimiento diurno de las estrellas, ha de tenerse una idea aproximada de los elementos geométricos de la esfera celeste, plasmados en la figura adjunta.

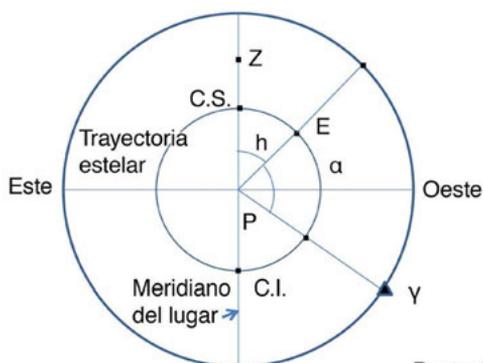
La mayoría de los problemas que se plantean en la astronomía de posición se resuelven aplicando las fórmulas de la trigonometría esférica al triángulo que aparece rayado en la figura, siendo sus vértices el Cenit, el Polo y la propia estrella. El papel jugado por la meridiana del lugar es esencial en todos estos estudios, apreciándose en



Elementos geométricos de la esfera celeste.

la figura que es la intersección del propio meridiano con el plano del horizonte, esto es la línea Norte Sur, o primera dirección cardinal; la segunda (Este-Oeste) es perpendicular a la anterior, siendo la intersección del llamado primer vertical con el plano del horizonte. Obsérvese que la estrella de la figura podría ser del grupo de las circumpolares, pues no tiene orto ni ocaso y quedaría siempre por encima del horizonte. Aunque ya sea sabido que el movimiento de las estrellas es solo aparente y reflejo del que efectúa la Tierra en torno a su eje, todavía sigue siendo de gran utilidad didáctica el considerar que son las estrellas las que se mueven.

En la figura anterior se aprecia que el plano del meridiano del lugar es el determinado por el eje del mundo y el cenit, aunque también se pueda definir como el vertical del Polo. Es igualmente evidente que la estrella en su movimiento diurno pasaría dos veces por el citado meridiano. Pues bien a esa dos posiciones se les llama culminaciones: superior la más próxima al cenit e inferior la otra; siendo ambas de gran utilidad para medir el tiempo. Aunque en este contexto solo se hablará del tiempo astronómico, conviene recordar que a veces se le denomina sidérea a la revolución diaria de las estrellas, de modo que el periodo de revolución sería por tanto de 24 horas sidéreas. El origen de la medida de esos intervalos se sitúa precisamente en la culminación superior de una estrella dada, correspondiéndole a la otra las doce horas sidéreas. Al igual que el Sol se puede localizar sobre la esfera celeste mediante sus dos coordenadas, ascensión recta y declinación, lo mismo sucede con el resto de las estrellas: con la ventaja de que prácticamente son independientes del tiempo, al contrario de lo que sucedía con las coordenadas solares.



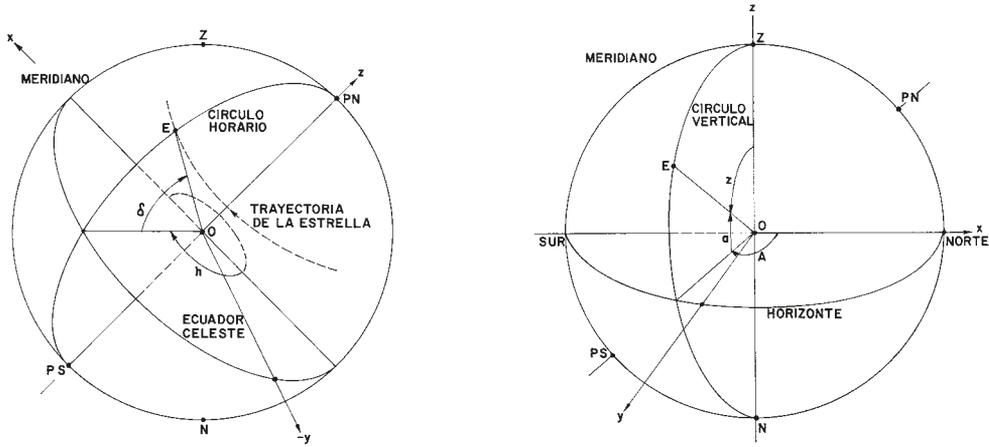
C.S. 0^h T. sidéreo
 C.I. 12^h T. sidéreo

Punto Aries o
 Equinoccio de
 Primavera

Proyección ortogonal de la esfera celeste sobre el plano del ecuador. La estrella, E, se movería en sentido retrógrado, en el de las agujas del reloj; se supone que «el observador está fuera de la esfera celeste».

La hora sidérea en el instante E es igual a la suma del ángulo horario (h) y de la ascensión recta (α). También se puede definir la hora sidérea como el ángulo horario del Punto Aries.

El estudio más detallado del movimiento diurno de las estrellas lo centraremos naturalmente sobre el Sol, una estrella singular que se desplaza aparentemente por la eclíptica a lo largo del año; un hecho que se traduce en la variación diaria de su ascensión recta y de su declinación, y en una diferente duración de los días y de las noches a los largo del mismo periodo. Para comprender mejor su movimiento y poder cuantificar analíticamente esas diferencias es necesario recurrir, con anterioridad, a otras coordenadas curvilíneas que localizan también su posición sobre la esfera celeste: las horizontales y las horarias. En el primer sistema el par es el formado por la altura sobre el horizonte y por el acimut, ángulo que forma el vertical de la estrella con el



Sistemas horizontal (a, A) y horario (δ , h).

meridiano del lugar. En el segundo sistema el par es el formado por la declinación, ya sabida, y por el ángulo horario, que sirve para hallar la hora de la observación y para localizar la estrella con relación al mismo meridiano. En la figura adjunta se representan ambos sistemas.

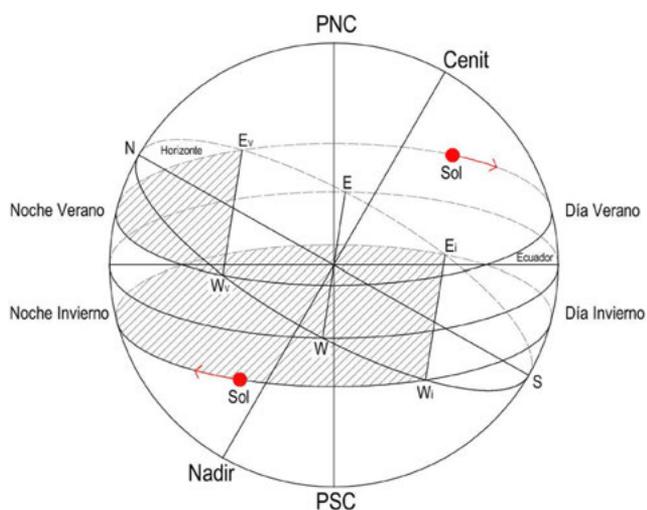
La relación analítica entre ambos viene dada por las formulas siguientes, teniendo en cuenta que φ es la latitud del lugar de la observación:

$$\begin{aligned} \text{sen } a &= \text{sen } \varphi \text{ sen } \delta + \text{cos } \varphi \text{ cos } h \\ \text{tg } A &= - \frac{\text{cos } \delta \text{ sen } h}{\text{sen } \delta \text{ cos } \varphi - \text{cos } \delta \text{ sen } \varphi \text{ cos } h} \\ \text{sen } \delta &= \text{sen } a \text{ sen } \varphi + \text{cos } a \text{ cos } A \\ \text{tg } h &= - \frac{\text{cos } \alpha \text{ sen } A}{\text{sen } \alpha \text{ cos } \varphi - \text{cos } \alpha \text{ sen } \varphi \text{ cos } A} \end{aligned}$$

Las expresiones anteriores se simplifican en determinadas ocasiones, por ejemplo cuando se pretende hallar el acimut del orto o del ocaso del Sol, o bien cuando se quiere saber a qué hora sale y a qué hora se pone; en este caso la escala del tiempo astronómico es diferente a la sidérea ya referida, pues será el solar que regula nuestra actividad cotidiana. La hora solar se puede definir de diferentes formas, bien como el mismo ángulo horario (h) o como $12^h + h$; de manera que en la culminación superior del Sol serían las 12^h , por ser nulo su ángulo horario, fijando ésta el instante del mediodía. En cambio, en la culminación inferior serían las 24^h , por valer 12^h el ángulo horario del Sol. En cuanto a las horas y puntos del horizonte por donde sale o se pone el Sol, pueden determinarse sin dificultad resolviendo el triángulo de posición ya citado, con las simplificaciones impuestas por el hecho de que se trataría de un triángulo rectilátero, pues el arco ZE valdría 90° .

En efecto aplicando el teorema del coseno se obtendrían las expresiones que se indican:

$$\text{cos } A = \text{cos } \varphi \text{ sen } \delta \text{ y } \text{cos } h = \text{sen } \delta \text{ sen } \varphi,$$



El movimiento anual del Sol sobre la esfera celeste, figurando rayadas las noches correspondientes a los solsticios de verano e invierno.

de forma que para un lugar dado el acimut del orto, y del ocaso correspondiente, varía a lo largo del año (tal como ocurre con la declinación δ), quiere decir que el Sol no sale siempre, ni se pone por el mismo sitio. Únicamente saldrá por el este y se pondrá por el oeste, dos veces al año; justo cuando se anula la declinación del Sol, esto es en los dos equinoccios. En tal caso se anularía el coseno del acimut, lo que equivale a decir que vale 90° o 270° , de donde se colige que el Sol sale por el este (acimut de 90°) y se pone por el oeste (acimut de 270°). En cuanto a la hora en que suceden ambos fenómenos², se puede deducir de manera similar que 6^h será la hora solar del orto en los equinoccios y 18^h la del ocaso; otra de las conclusiones que debe extraerse es que la duración del día será igual que la de la noche, 12^h en ambos casos.

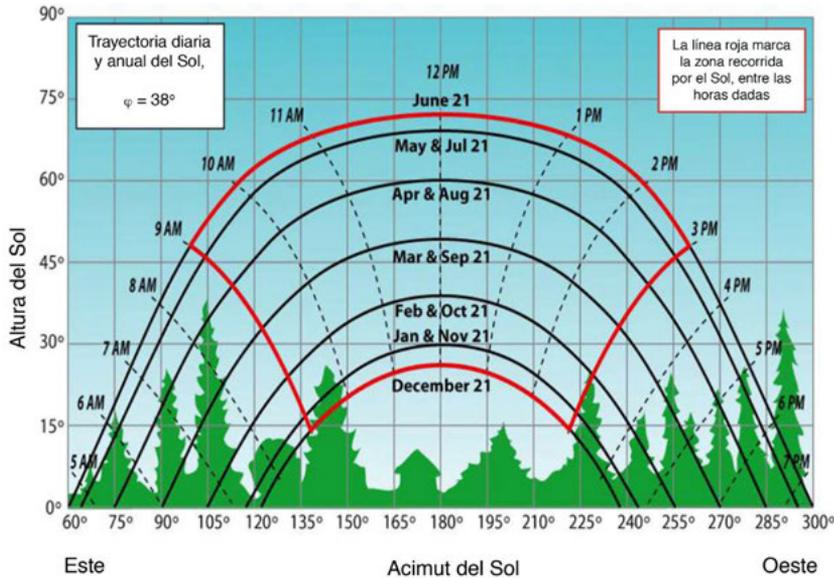
Es fácilmente constatable que la duración del día y de la noche será diferente a lo largo del año, por la variabilidad de la declinación; con la particularidad de que los días serán mayores que las noches mientras que la declinación sea positiva y al contrario cuando fuese negativa. El instante en que la declinación es máxima ($\delta = 23^\circ 26'$) se denomina solsticio de verano, siendo entonces cuando la sombra anual es mínima. El contrapunto se produce cuando la declinación es mínima ($\delta = -23^\circ 26'$), alcanzando entonces el solsticio de invierno, cuando la sombra anual es máxima.

Otra forma de visualizar la trayectoria diaria y anual del Sol, para un observador localizado en un cierto lugar de latitud conocida, es ir calculando para cada día del año la variación del acimut del Sol desde que sale hasta que se pone, así como la altura que va alcanzando sobre el horizonte. Las formulas correspondientes ya son sabidas: $\cos A = \cos \varphi \sin \delta$, para determinar el acimut del orto y del ocaso (la declinación irá variando para cada fecha), el acimut y la altura para el resto de puntos de la trayectoria serían las ya citadas con anterioridad:

$$\begin{aligned} \text{sen } a &= \text{sen } \varphi \text{ sen } \delta + \cos \varphi \cos h \\ \text{tg } A &= - \frac{\cos \delta \text{ sen } h}{\text{sen } \delta \cos \varphi - \cos \delta \text{ sen } \varphi \cos h} \end{aligned}$$

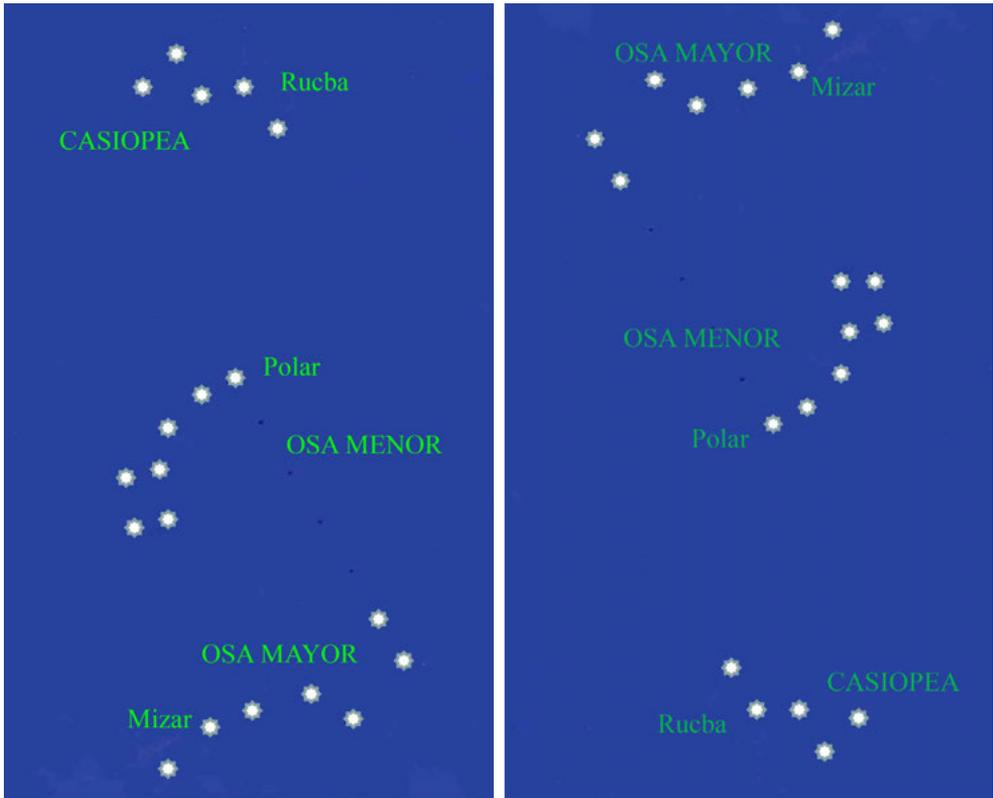
² Ha de tenerse presente que el ángulo horario se puede medir haciendo uso de la graduación sexagesimal o bien de la escala temporal. La relación entre ambas es la siguiente $1h = 15^\circ$.

Los valores obtenidos para cada día pueden ser tabulados y representados gráficamente en un sistema cartesiano, eligiendo como eje de ordenadas la variable de la altura (a) y como eje de abscisas la variable del acimut (A). Procediendo de esa manera se obtendría una gráfica similar a la que se presenta a continuación:



Una primera consideración es relativa a la simetría de las curvas, cuyo eje tiene un acimut de 180° , es decir la línea meridiana o línea norte sur. Algo ya sabido, puesto que el Sol alcanza siempre la máxima altura a las 12h locales, o al mediodía; esto es cuando se encuentra marcando la dirección del sur y arroja la sombra mínima. Otra manifestación de dicha simetría es el hecho de que los ortos y ocasos son posiciones correspondientes, en tanto que la suma de los acimutes respectivos es de 360° . De ahí que el Sol resulte imprescindible para conocer la orientación en un momento dado. El cielo nocturno también resulta ser una herramienta fundamental para orientarse en cualquier momento. Basta determinar el acimut de cualquier estrella y replantear la dirección de la meridiana. No obstante, si se quiere obtener una menor exactitud puede conseguirse sin dificultad localizando la estrella polar, pues su posición es muy próxima al polo norte celeste³. Tres constelaciones resuelven el problema de hallarla, a saber: Osa Menor, Osa Mayor, y Casiopea. La estrella polar es en realidad una de las que forman la Osa Menor, concretamente su estrella α . El problema es que se trata de una constelación no muy brillante y a veces no es evidente el verla de inmediato. Para ello se suele recurrir a las otras dos, a modo de comprobación. Hay dos procedimientos: en primer lugar puede prolongarse cinco veces el segmento formado por las estrellas Dubhe (α) y Merak (β) de la Osa Mayor, pues de ese modo se alcanzaría la estrella polar; otra posibilidad es unir la estrella Mizar (ζ) de la Osa Mayor con la estrella Ruchbab (δ) de Casiopea, pues ambas parecen estar alineadas con la estrella polar. Eso explica que a las estrellas Dubhe y Merak se les conociese en su momento como guías de la polar, no han de confundirse con la guardas: Kochab (β) y Pherkad (γ) de la Osa Menor.

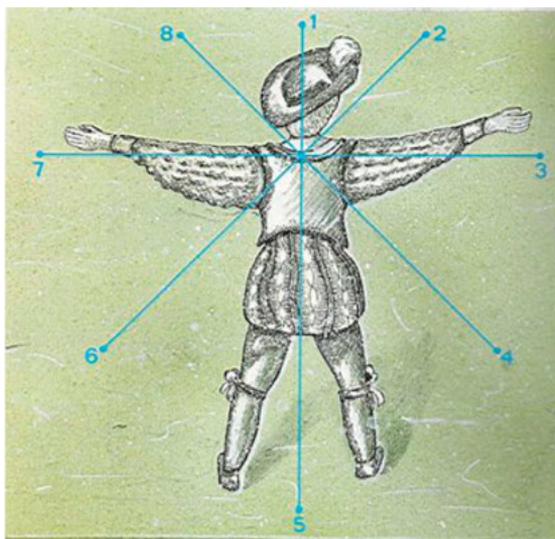
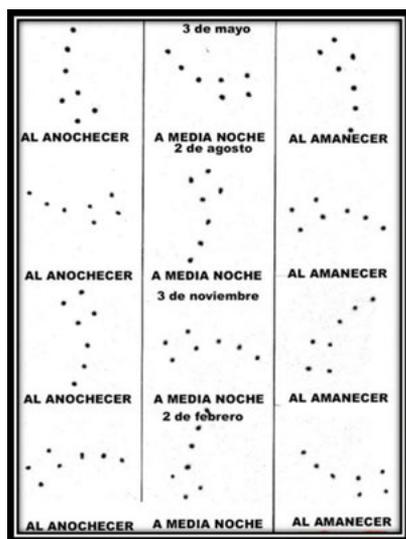
³ En verdad la estrella polar gira también alrededor del polo norte celeste, pero está tan cerca del mismo que su declinación es de $89^\circ 16' 49''$.



Orientación por la estrella polar en dos momentos dados. Sus guías son las estrellas α y β de la Osa Mayor, siendo sus guardas las estrellas β y γ de la Osa Menor.

Ambas constelaciones sirvieron también como reloj nocturno, de gran utilidad en las travesías oceánicas. Para ello se basaban en el movimiento diurno de las dos alrededor de la estrella polar, a razón de 15° la hora. Aunque las estrellas elegidas como referencia fuesen preferiblemente las guardas, pertenecientes a la Osa Menor, o las guías de la Osa Mayor, la dificultad del procedimiento radicaba en que la diferencia entre la hora sidérea y la solar dependía de la época del año en que se efectuase la observación, si bien la relación entre ambas es evidente teniendo en cuenta la aceleración de las fijas ya comentada. En el primer caso la metodología era más complicada, pues había que partir de la posición variable de la constelación. Se valían para ello de esquemas preparados a tal efecto e incluso de un imaginario «Hombre del Norte⁴», proyectándose las guardas sobre partes diferentes de su anatomía a lo largo del año. El procedimiento de las guías era más intuitivo, ya que se imaginaba un círculo graduado centrado en la estrella polar sobre el que marcaba la hora, una manecilla imaginaria definida por el segmento que unía la estrella con las guías. Basándose en tales circunstancias se idearon los nocturlabios, a los que nos referiremos en el capítulo VI.

⁴ «Su corazón era la Polar y sus miembros quedaban figurados por las Guardas». EL CIELO DE COLÓN: Técnicas navales y astronómicas en el viaje del Descubrimiento. José Luis Comellas García-Llera. 2015



Esquemas que facilitaban la determinación de la hora, por medio de las guardas de la estrella Polar.

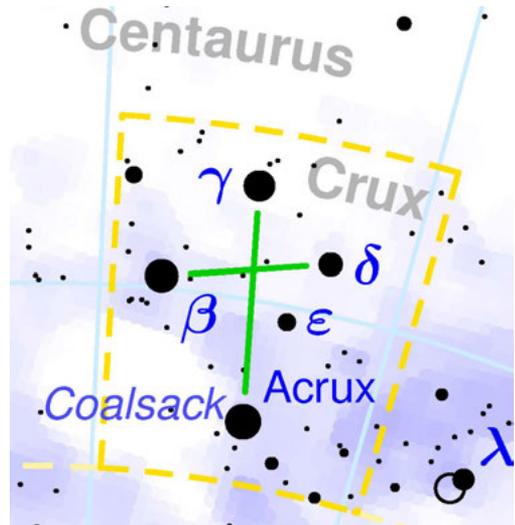
Aunque solo sea a título de curiosidad, merece la pena recordar que las guardas de la Polar son citadas indirectamente en el Quijote, concretamente en el capítulo dedicado a la Aventura de los Batanes, cuando Sancho Panza le recomienda a su señor que es mejor esperar a que amanezca: «...que a mí me muestra la ciencia que aprendí cuando era pastor, no debe haber de aquí al alba tres horas, porque la boca de la bocina está encima de la cabeza y hace media noche en la línea del brazo izquierdo». La bocina es una de las denominaciones que tenía la constelación de la Osa Menor durante la Edad Media. En cuanto a sus referencias anatómicas, se evidencia que Cervantes había navegado; ya que estaba al tanto de que para saber la hora nocturna, los marinos recurrían al «hombre del norte» que se acaba de mencionar. Las primeras referencias sobre las guardas parecen proceder del libro *Regimento do astrolabio e do quadrante* (≈1509), aunque las más detalladas figurasen en la obra de Pedro de Medina (1545): *Arte de navegar en que se contienen todas las reglas, declaraciones, secretos y avisos a que la buena navegación son necesarios, y se deben saber*⁵. A ella volveremos en el capítulo X del presente libro.



La constelación de la bocina, o trompetilla (Osa menor).

⁵ Concretamente en los capítulos 4º, 5º, 6º, 7º y 8º. El *Arte de navegar* tuvo un éxito inmediato, difundándose rápidamente por toda Europa. Se tradujo al francés, italiano, alemán, inglés y holandés, llegando a alcanzar más de veintisiete ediciones. Desde su aparición se convirtió en un manual de formación para pilotos no sólo en España, sino también en Europa. La Biblioteca Nacional conserva, como piezas de gran valor, ejemplares de las ediciones española, francesa e italiana.

La localización del Polo Sur sobre el firmamento no es tan evidente como la de su homólogo en el hemisferio boreal. La razón no es otra que la falta de una estrella que, como la polar de la Osa Menor, coincida sensiblemente con el polo. La más próxima es la llamada σ *Octantis*, perteneciente a la constelación del Octante, introducida por el astrónomo francés Nicolas Louis de Lacaille, aunque a veces sea referida también como la estrella Polar del hemisferio sur; la dificultad estriba en que apenas es perceptible a simple vista, siendo su declinación de $-88^{\circ} 57' 23,4''$. De ahí que suele recurrirse para su posicionamiento aproximado a la Cruz del Sur, una constelación que puede ser considerada como la guarda de dicha estrella. Aunque los astrónomos antiguos llegasen a identificarla en su momento, la precesión de los equinoccios hizo que desapareciese bajo el horizonte hasta que fue redescubierta por los navegantes españoles y portugueses.



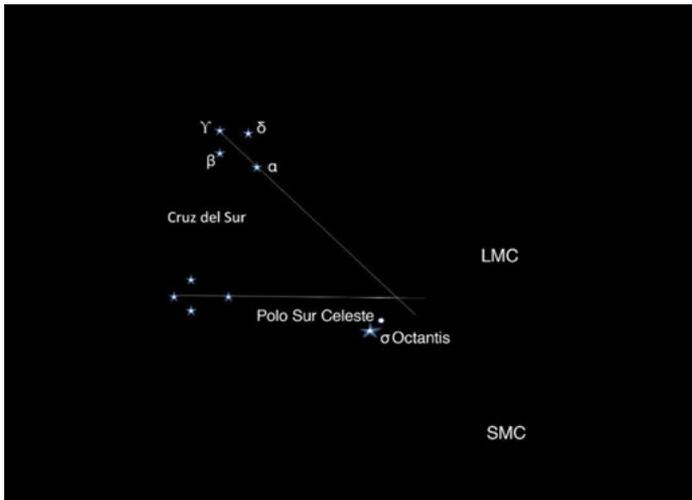
La constelación de la Cruz del Sur, en la que se apoyaron muchos de los mitos de las civilizaciones que poblaron aquel hemisferio. En ella se encuentra una de las nebulosas más conocidas del hemisferio sur, conocida como Saco de Carbón.

La Cruz del Sur llamó poderosamente la atención de tan intrépidos navegantes, siendo ellos los que la bautizaron con dicho nombre en el siglo XVI, llegando incluso a mencionar la posibilidad de saber la hora en función de su posición. Otra prueba de ello es que aparezca cantada en *La Araucana* de Alonso de Ercilla (1569), en los términos siguientes:

*Ya el presuroso cielo volteando,
En el mar las estrellas trastornaba:
y el crucero las horas señalando,
entre el sur y sudoeste declinaba:
en mitad del silencio y noche,
cuando visto cuanto la oferta la obligaba,
reprimiendo Tegalda su lamento,
la llevamos a nuestro alojamiento.*

El mismo Dante Alighieri, le dedicó un poema incluido en su referencia al purgatorio:

*I' mi volsi a man delira,
e posimente A l'altro polo,
e vidi quattro stelle
Non viste mai fuer ch'a la prima gente.
Goder pareua il ciel di lor fiammelle.
O Settentrional vedruo fito,
Pri che priuato sei di mirar quelle*



Las Nubes de Magallanes, la Cruz del Sur, el Polo Sur Celeste (PSC) y la estrella sigma de la constelación del octante, una constelación introducida por el astrónomo francés Nicolas Louis de Lacaille. La estrella en cuestión puede ser considerada como la estrella polar del Sur, en tanto que es la más próxima a ese punto.

Un soldado que participó en la conquista de Chile fue más explícito: «puso Dios en el celeste hemisferio inferior cuatro resplandecientes estrellas que forman una hermosísima cruz, cuya estrella de su pie, cuando más derecha se muestra con la de la cabeza, que es cuando está con ella norte sur, dista del polo antártico treinta grados, la cual cruz sirve de guía y norte a los que navegan por aquellas partes». Pigafetta, el cronista de la primera circunnavegación del mundo, hablaba de otra posibilidad para hallar ese polo antártico: «dos estrellas más grandes y brillantes, situadas en medio de dos grupos de otras pequeñas nebulosas, que parecen nubecillas»; se trataba por tanto de las conocidas, en la actualidad, como nubes de Magallanes, mayor y menor, dos galaxias del grupo local, integradas en el sistema de nuestra Vía Láctea. Las dos galaxias se identifican oficialmente con los acrónimos de su denominación inglesa: *Large Magellanic Cloud* y *Small Magellanic Cloud*, esto es LMC y SMC.

Lo cierto es que mediante la constelación de la Cruz del Sur, y con las dos Nubes de Magallanes, puede determinarse aproximadamente la posición del polo sur celeste, es decir el punto en que el eje de rotación de la Tierra corta a la esfera celestia. Podría por tanto replantearse la meridiana sobre el plano del horizonte y por ende las de las otras dos direcciones cardinales. Tres son los métodos expeditos que se van a comentar: 1) se prolonga cuatro veces y media el eje de la cruz, llegando de ese modo a un punto próximo al polo; 2) como por el movimiento aparente de las estrellas, en torno a ese polo, habrá cambiado la posición de la constelación, se trazaría una perpendicular al brazo menor de la misma, en su punto medio, y se prolongaría hasta que cortase a la prolongación del eje de la cruz, en un instante previo; 3) se construye un triángulo sensiblemente equilátero, apoyándose en la base formada por las dos nubes de Magallanes, verificándose que el tercer vértice, el del lado de la cruz, será la posición aproximada del polo buscado.

Son muchas las referencias históricas que hacen referencia a la Cruz del Sur. La serie la encabeza el navegante veneciano Alvise Cadamosto, quien al parecer la observó en el año 1455, estando en las proximidades del Río Gambia, y la llamó el Carro del Sur⁶; sin embargo el croquis que efectuó fue muy defectuoso. Al parecer fue el español João Faras (judío refugiado en Portugal) el primer europeo que la dibujo con acierto, en una carta enviada al rey portugués (1 de mayo

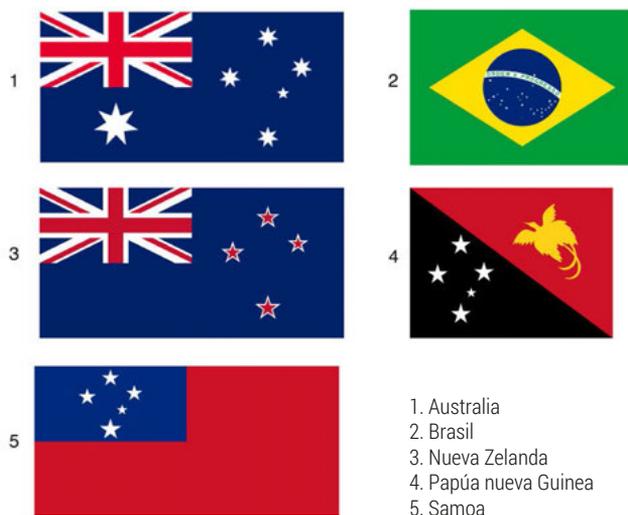
⁶ En clara analogía con la constelación de la Osa Mayor, conocida también como el carro.



El entorno del Polo Sur celeste, fotografiado desde el Observatorio de Radioastronomía situado en Atacama (Chile). Babak Tafreshi. ESO (European Southern Observatory).

de 1500) desde el litoral brasileño. Américo Vesputio fue otro de sus observadores privilegiados, el cual identificó también una de las nubes de Magallanes en su segundo viaje (1501-1502). Otra referencia notable fue la descripción de la Cruz realizada por Andrea Corsali, el navegante italiano que viajó a China y a la India, entre 1515-1517, en una expedición sufragada por el rey Manuel I. En el transcurso de la misma, Corsali remitió al rey un resumen de sus observaciones del cielo austral, incluyendo una representación rudimentaria del mismo; destacando entre las estrellas que rodeaban el polo, tanto la Cruz como las dos nubes de Magallanes.

El inglés Emery Molyneux y el flamenco Petrus Plancius son igualmente citados como los primeros cartógrafos que distinguieron la Cruz del Sur como una constelación propia, aunque la escasa fiabilidad de sus fuentes hizo que su posición fuese errónea. No obstante, se cree que la primera ocasión en que se situó correctamente fue en los globos celestes confeccionados por Plancius y Jodocus Hondius en 1598 y en 1600. Las estrellas que la componen no fueron catalogadas, como independientes de la constelación de Centauro, hasta que lo hizo Frederick de Houtman





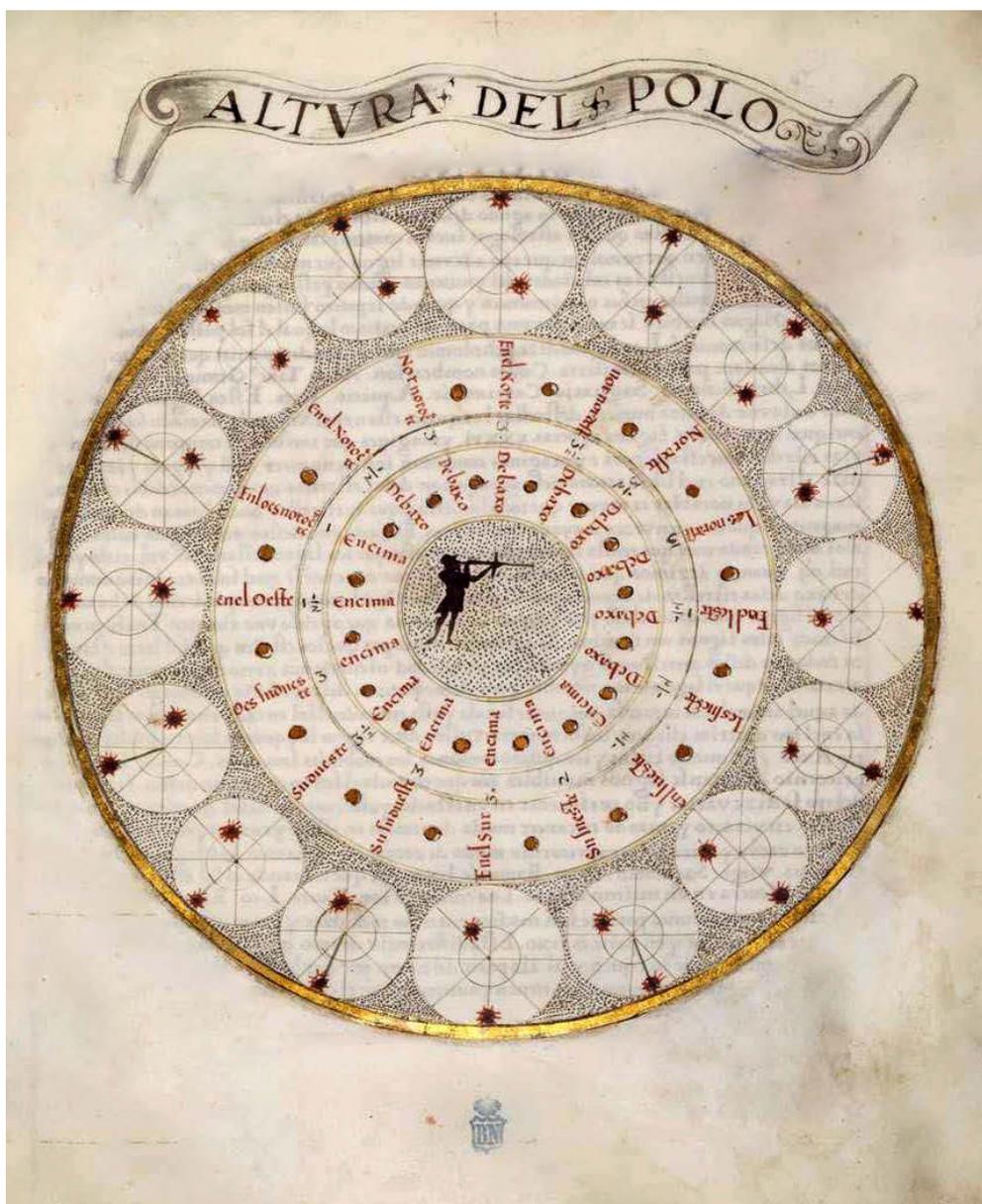
La bandera de Alaska (1927). Diseño ganador en el concurso de 1927. Autor Benny Benson, de tan solo 13 años.

en 1603. Pocos años después fue aceptada como constelación por el astrónomo alemán Jakob Bartsch en 1624. La imagen de la Cruz del Sur figura en numerosas banderas, aunque deban subrayarse las de las cinco naciones siguientes: Australia, Brasil, Nueva Zelanda, Papúa Nueva Guinea y Samoa.

Concluiremos esta aproximación al movimiento diurno de las estrellas recordando dos hechos históricos poco divulgados. En los prolegómenos de la Guerra de Secesión, algunos de los esclavos fugitivos lograron llegar a Canadá guiándose por la posición de la estrella polar, apoyándose en la Osa Mayor, a la que se referían con el nombre «*the drinking gourd*»⁷. Cuando el territorio de Alaska quiso tener su propia bandera en el año 1926, casi cincuenta años después de habérselo comprado a Rusia, se convocó un concurso para diseñar su bandera. El ganador fue el indígena Benny Benson, de tan solo 13 años, que se impuso a un total de 142 concursantes. El boceto que presentó era tan simple como elegante: con las siete estrellas de la Osa mayor y la estrella polar, localizada en la prolongación de sus dos guías.

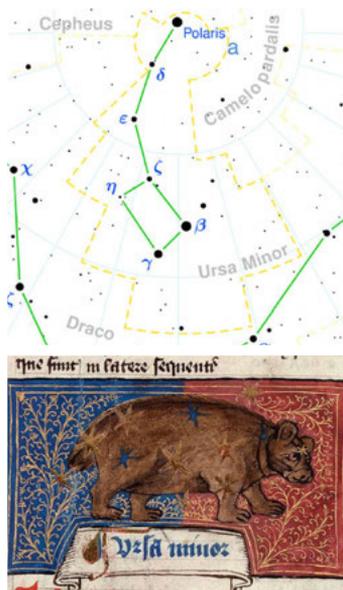
⁷ En español se le conoce también con el nombre de cazo. Las denominaciones de esta constelación son múltiples. El nombre de Osa Mayor procede del griego, pues Arktos significaba oso; un vocablo del que al parecer deriva Ártico.

CAPÍTULO V | La estrella Polar y su Altura sobre el Horizonte



CAPÍTULO V | La estrella Polar y su Altura sobre el Horizonte

En la geometría de la esfera, los polos son dos puntos situados sobre su superficie y asociados a planos diametrales de la misma. Para uno dado, se definen los polos como las intersecciones con la esfera de una recta perpendicular al plano en cuestión y trazada desde su centro. Elegido el plano del ecuador terrestre, sus polos serían el ártico y el antártico, localizados respectivamente en el hemisferio boreal y en el austral. Dicho plano, coincidente con el del ecuador terrestre, tiene otros dos polos sobre la esfera celeste: el polo norte celeste y el polo sur celeste. Si el plano en cuestión fuese el de la eclíptica los polos sobre la esfera celeste serían el polo norte de la eclíptica y el polo sur de la eclíptica. Estos últimos polos distan de sus homólogos, asociados al ecuador, $23^{\circ} 26'$; esto es la oblicuidad de la eclíptica o el máximo valor de la declinación del Sol, que define el instante del solsticio de verano. La localización sobre el cielo de los dos polos celestes, ligados al ecuador terrestre, ha sido una preocupación constante de los cosmógrafos, exploradores y marinos. La identificación del polo norte resultaba más fácil que la del sur, en tanto



Las Osas: Menor y Mayor en una página del Almagesto de Tolomeo, cuyo manuscrito se conserva en la *British Library*, en el listado figuran la localización de las constelaciones en las diferentes épocas del año. Se acompaña también la representación actual de la Osa Menor, con la identificación de sus siete estrellas.

que prácticamente coincide con la estrella polar¹ al ser su separación inferior al grado² y no haber en su entorno otra más brillante; no ocurre lo mismo con la polar del hemisferio sur (σ *Octantis*), la cual apenas es perceptible a simple vista, aunque también se encuentre muy cerca del Polo, a poco más de un grado.

Fue tal la relevancia alcanzada por la necesidad de localizar la polar, que pronto pasó al ámbito mitológico. En los catálogos estelares de Babilonia la Osa Menor era conocida como el carro celeste, aunque también fuese ligada a la diosa madre Damkina o considerada, hacia el año 1000 a.C., como estrellas de Enlil, el dios de los cielos. De acuerdo con Diógenes Laercio, Tales de Mileto midió las estrellas del carro con el que navegaban los fenicios. Al parecer fueron los griegos los primeros en introducir la denominación de Osas para algunas constelaciones circumpolares, comenzando con la Mayor y admitiendo después la Menor (La Osa fenicia), a instancias de Tales, ya que también podría ser de utilidad para la navegación; pues hasta entonces solo se valían de la Osa Mayor.

En la antigüedad el polo norte celeste estaba más cerca de la estrella β (*Ursa Minoris*) que de la α (la estrella polar actual), aunque generalmente se usase toda la constelación para marcar la dirección del norte. Es probable que fuese durante la Edad Media cuando se decidiera usar solo la estrella polar, aunque su separación del polo fuese de varios grados, movidos quizás por ser la más brillante de la constelación. El origen del nombre de esta constelación no está claro, al parecer el de Cynosura³ fue uno de los más antiguos; una de las ninfas Oréades que fue nodriza de Zeus y fue honrada por él con un sitio en el firmamento. No obstante hay otras explicaciones para ese nombre, una de ellas lo une al mito de la cazadora Calisto, la cual fue seducida por Zeus y transformada en Osa para evitar que su aventura llegase a oídos de su esposa. Otra de las sugerencias señala que la Osa Mayor era en realidad un buey, formando parte del mismo grupo que el pastor (Bootes), y la Osa Menor el perro que los acompañaba. Lo más interesante de esta digresión es el hecho de que las siete estrellas de la Osa Menor⁴ sean el origen de la palabra latina *septentrio*, para referirse al norte; debiendo añadir que las estrellas fueron sustituidas por osos, o por bueyes, que tiraban del arado, cuya imagen guarda cierto parecido con la de la constelación.

Las referencias mitológicas a la estrella polar son por tanto muy remotas, destacando siempre su visibilidad permanente sobre el horizonte. Las referencias concretas son más próximas. Así se hizo, por ejemplo en la Antología del macedonio Juan Estobeo (siglo v), cuando aún distaba varios grados del polo. No es de extrañar por tanto que en las tribus anglosajonas, del siglo x, fuese también conocida como la estrella del barco, reflejando su utilidad para la navegación. También debe traerse a colación que en la mitología hindú era conocida con el nombre de Dhruvá⁵, que incidía en su visibilidad permanente. Durante la Edad Media continuó siendo útil a la marinería, que la identificaba como la estrella del mar, tal como recoge Bartolomeo Inglés en su obra *de*

¹ De hecho es también referida como la estrella del norte.

² La separación angular de un grado es relevante, no debe de olvidarse que en el caso terrestre tiene un desarrollo próximo a los 111 km.

³ La traducción del griego clásico sería cola de perro.

⁴ Las mismas consideraciones se han usado con relación a las siete de la Osa Mayor.

⁵ Dhruvá fue un niño príncipe, con tanta devoción al dios Visnú que este le recompensó convirtiéndolo, ya de adulto, en la estrella polar.

Proprietatibus Rerum: «...por lo que es llamada *stella maris*, la estrella del mar, que ayuda a los marineros en sus travesías».

Tanto era el interés despertado por la estrella polar en la marinería que pronto se hizo objeto de culto y parte de la veneración Mariana: nuestra Señora y Estrella del Mar son títulos asociados a la virgen bendita. No obstante parece que el origen del despropósito está en una mala traducción de uno de los escritos de San Agustín, en el que se refirió a la virgen como *stilla maris* (lágrima del mar). El error de confundirlo con *stella maris* y luego con una falsa interpretación etimológica del nombre de María puede ser la explicación. En el siglo IX Pascasio Radbertus hizo una referencia expresa a la virgen como estrella del mar, pero en sentido metafórico⁶: *como una guía a seguir en el camino hacia Cristo para no zozobrar en medio de la tormenta que alza olas en el mar*. Una identificación aún más explícita de la Virgen María con la estrella polar queda recogida en el título *Cynosura seu Mariana Stella Polaris*, una colección de poesía mariana publicada por Niccolo Barsotti de Lucca en el año 1655. La denominación latina de *Stella Polaris* procede del Renacimiento, aunque continuase sabiéndose que estaba alejada varios grados del polo norte celeste; es digno de mención que el holandés Gemma Frisius determinase en el año 1547, que dicha separación ascendía a 3° 8'.

La inmutabilidad del polo norte celeste es solo aparente e imperceptible, ya que realmente gira alrededor del polo norte de la eclíptica a razón de 50".3 de arco por año. Ese movimiento es un fenómeno astronómico complejo que es conocido con el nombre de precesión de los equinoccios, el cual fue descubierto por Hiparco de Nicea⁷, el mejor astrónomo de la antigüedad, cuando confeccionaba su catálogo estelar (147-127 a.C.). El retroceso anual del equinoccio de primavera lo postuló como única explicación para la discordancia entre las posiciones estelares de sus predecesores caldeos y las que él dedujo por medio de sus observaciones y cálculos. Esa intuición genial no fue aclarada hasta que lo hiciese, muchos siglos después, Jean Le Rond d'Alembert en su obra *Recherches sur la Précession des Equinoxes, et sur la Nutation⁸ de l'Axe de la Terre, dans le Système Newtonien* (1749), a grandes rasgos consiste la primera en la desigual atracción solar ejercida sobre la Tierra, debida al abultamiento ecuatorial de la misma. La com-

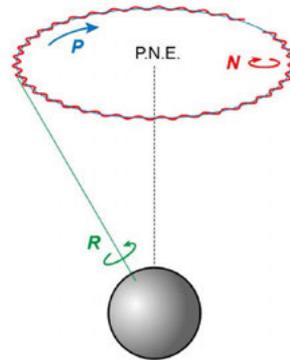
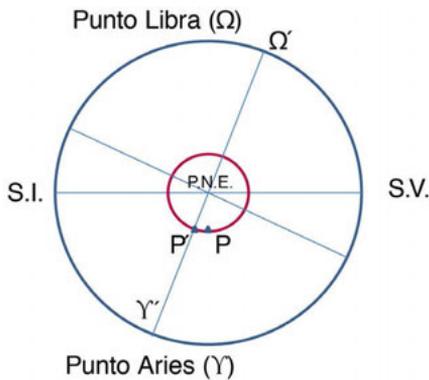


El entorno del polo norte celeste en el globo construido por Gemma Frisius y Gerardus Mercator en 1537, como modelo tridimensional de los planisferios grabados en madera por Albrecht Durer en el año 1515. *National Maritime Museum*. Greenwich. London.

⁶ De esta época procede también el himno *Ave Maris Stella*.

⁷ Localizada en su momento a orillas del lago turco de Iznik.

⁸ Al movimiento de la precesión se le ha de añadir una ligera variación (unos 9" de arco cada 18.6 años) en la posición del eje del mundo, con relación a su posición media, debido a la acción de las fuerzas gravitatorias asociadas al sistema Tierra Luna. Fue descubierto por el astrónomo James Bradley entre 1728 y 1748, y es conocido con el nombre de nutación.



Proyección ortográfica de la esfera celeste sobre el plano de la eclíptica: para presentar solo los efectos de la precesión. Actualmente se cifra el retroceso anual (γ') en unos $50''.3$. En la imagen de la derecha aparece reflejado el efecto conjunto de la precesión y de la nutación.

posición de los dos efectos: precesión y nutación, hace que la rotación del eje del mundo alrededor del eje polar de la eclíptica siga una curva compleja, una especie de festoneado que tarda en recorrer 26.000 años aproximadamente⁹; ese periodo tan prolongado se conoce con el nombre de año platónico o año mayor.

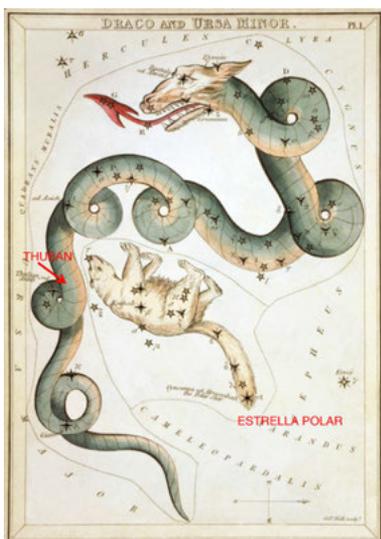
En la figura anterior se observa que al retroceder γ hasta γ' , el polo norte celeste P hace lo propio hasta alcanzar la posición P'. Una de las consecuencias es inmediata: la posición del polo varía con el tiempo, en otras palabras la estrella polar de esta época es distinta de la de épocas pretéritas y futuras. Efectivamente, hacia el año 3000 a.C. el papel de la estrella polar lo desempeñaba la estrella α (Thuban¹⁰) de la constelación del Dragón, la cual solo estaba alejada $6'$ del polo norte celeste. En torno al 1900 a.C. fue sustituida por la estrella β de la Osa Menor, aunque nunca llegase a estar lo suficientemente cerca del polo para tomarla como tal, de hecho el navegante griego Piteas comentó a comienzos del siglo IV a.C. que alrededor del polo no había estrella alguna. En el imperio romano se daba la circunstancia de que el polo era sensiblemente equidistante de las estrellas Polar y Kocab (o Kochab) de la Osa Menor. La rotación del polo norte celeste continuará hasta alcanzar en el año 3000 d.C. las estrellas situadas en el norte de la constelación de Cefeo¹¹, de modo que el polo llegará a equidistar de su estrella γ (Errai) y de la estrella polar.

Alrededor del 4200 d.C. será máxima la alineación de Errai con el polo, poco después de 5200 d.C. las estrellas ι y β de Cefeo estarán al otro lado del polo norte celeste; antes de que se produjese su mejor alineación con la estrella Alderamin (α) de esa constelación, la más brillante de la misma, alrededor del 7500 d.C. La revolución del Polo seguiría su curso, alcanzando la constelación del Cisne en el décimo milenio d. C., aunque ninguna de sus estrellas estará suficientemente cerca del polo como para identificar al mismo. No obstante, hacia el año 11500 d.C. su estrella δ si estaría más cerca del polo, aunque distará del mismo unos $3''$. Seguidamente alcanzaría la constelación de la Lira, donde su estrella Vega, la segunda más brillante del hemisferio norte, si

⁹ Esa cifra es el resultado de dividir $360''$ por los $50''.3$ que retrocede cada año el Punto Aries o equinoccio de primavera.

¹⁰ El nombre deriva del árabe *قَابَعث*, que significa cabeza de la serpiente. Esta estrella que sirvió de guía a los sacerdotes egipcios para replantear sobre el terreno la meridiana del lugar y poder así orientar las pirámides, procurando que sus caras estuviesen dirigidas hacia los cuatro puntos cardinales, ha cobrado de nuevo actualidad. El motivo es haber descubierto que no se trata de una estrella aislada, sino de un sistema binario en el que se producen eclipses; muy difíciles de observar por su escasa duración (seis horas solamente), aunque tengan lugar cada 51.4 días.

¹¹ Esposo de Casiopea y padre de Andrómeda.



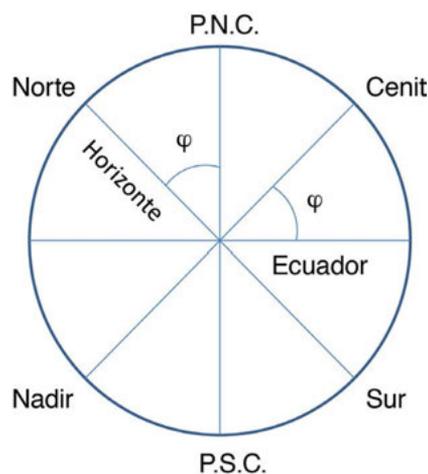
Localización de la estrella α Draconis



La constelación del Dragón rodeando a la Osa Menor. Se acompañan vistas aclaratorias sobre la posición relativa de la estrella Thuban con relación a las constelaciones de la Osa Mayor y de la Osa Menor, así como con las pirámides de Giza.

estaría también cerca del polo aunque a una distancia de 5° ; se habría alcanzado entonces el año 13.700 d.C. Evidentemente, el polo sur celeste experimentará una rotación similar a la descrita, moviéndose por las constelaciones más próximas de su hemisferio.

Se ha comentado hasta ahora, al menos de forma implícita, la utilidad del polo norte celeste y de la propia estrella polar para conocer durante la noche la dirección de la línea meridiana, básica para orientarse y para disciplinas tan interesantes como la gnomónica. Pero la utilidad de ambos puntos es también fundamental para resolver algunos problemas de posicionamiento, por usar una terminología que es de palpante utilidad gracias a la difusión del GPS (Global Positioning System); y más concretamente para el cálculo de la latitud geográfica. Se puede definir esta coordenada geográfica de varias formas: el ángulo que forma la vertical física con el plano del ecuador o la altura del polo sobre el plano del horizonte, son dos de las más conocidas; la práctica coincidencia de la estrella polar con el polo norte celeste hace que la latitud haya sido determinada, desde tiempo inmemorial, como la altura de la polar. La figura siguiente justifica plenamente esa forma tan simple de obtenerla.



Sección meridional de la esfera celeste: la latitud φ como altura del polo.

El conocimiento de la latitud permitió dividir la Tierra en zonas esféricas, o climas según Tolomeo, dependiendo del valor alcanzado por la latitud. En la actualidad se contemplan las siguientes: a) zona ecuatorial o tórrida¹², limitada por los paralelos de latitud $23^\circ 26'$ Norte y $-23^\circ 26'$ Sur, esto es por los Trópicos de Cáncer y de Capricornio; b) dos zonas

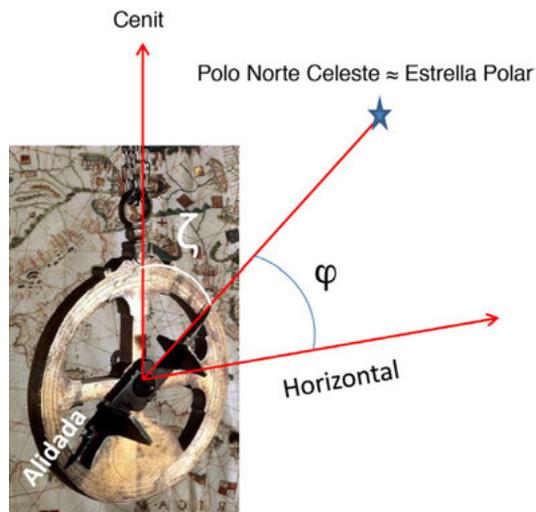
¹² Esta denominación es muy apropiada, pues se trata de la zona terrestre en la que el Sol puede alcanzar el cenit a mediodía, de manera que la inclinación de los rayos solares es máxima.

templadas, comprendidas entre dichos trópicos y los círculos polares respectivos, ártico y antártico, cuyas latitudes son de $66^{\circ} 34'$ Norte y de $66^{\circ} 34'$ Sur; c) dos zonas polares, es decir los casquetes esféricos limitados por los círculos anteriores y los polos respectivos. El paralelismo con la geometría de la esfera celeste es evidente en tanto que los círculos menores de los trópicos se corresponden con los paralelos celestes descritos por el Sol cuando alcanza los solsticios.

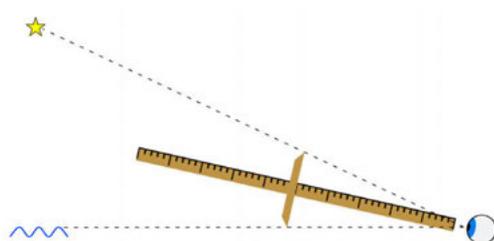
La medida de la altura del polo es una operación que no entraña dificultad alguna, pues solo se trata de evaluar una distancia angular. Únicamente ha de tenerse en cuenta que la denominación de la misma depende de la línea origen elegida: 1) si es una línea horizontal se obtendría la altura sobre el horizonte propiamente dicha, 2) si fuese una línea vertical habría dos posibilidades, medirla desde el cenit, en cuyo caso se obtendría la distancia cenital del polo (complementaria de la altura) o bien medirla desde el nadir, hallando entonces la distancia nadiral del polo, suplementaria de la anterior. No obstante hay una serie de inconvenientes que no son fáciles de evitar, en primer lugar el efecto de la refracción atmosférica, que en condiciones normales curva el rayo luminoso con la concavidad hacia el suelo y aumenta el valor de la altura o disminuye el de la distancia cenital; su efecto no es baladí baste decir que puede llegar a ser del orden de los $30'$, y que siempre se procuraba tenerlo presente para efectuar la corrección oportuna. También fueron considerables las dificultades para obtener resultados fiables antes de que se hubiese incorporado el antejo a los instrumentos de observación. Mención especial merece el balanceo del barco en los supuestos de que las observaciones se efectuasen a bordo del mismo. De ahí que en numerosas ocasiones los marinos optaran por determinar la latitud por medio de observaciones al Sol.

No se sabe a ciencia cierta quien fue el inventor del astrolabio, aunque todo apunta a que pudieran haber sido Apolonio de Pérgamo o Hiparco de Nicea, lo que sí parece incuestionable es su temprana utilización para calcular la latitud del lugar. En su versión más simple se trataría de un círculo graduado, con alidada incorporada; de manera que suspendido verticalmente podría medirse el ángulo que formaría la visual a la Estrella más cercana al polo con la dirección marcada por el centro del círculo y el origen de la división angular (generalmente coincidentes con su diámetro horizontal o vertical). A esa descripción tan sencilla respondían los numerosos astrolabios usados por los marinos en sus expediciones del Renacimiento, tal como puede comprobarse en el de la figura adjunta; aunque se le haya superpuesto una hipotética visual y las dos direcciones que frecuentemente se elegían como origen al medir las distancias angulares. La determinación de la latitud por ese procedimiento ganaba en incertidumbre cuando el operador estaba en las proximidades del ecuador, puesto que la refracción era mayor a medida que disminuía la altura sobre el horizonte.

Otro de los instrumentos empleados para ese mismo fin fue la ballestilla o escala de Jacob, ideada por el astrónomo Levi ben Gershon en el siglo XIII. Básicamente te-



Astrolabio marino y medida de la latitud: bien mediante la distancia cenital de la Estrella Polar (ζ) o mediante su altura sobre el horizonte (φ); evidentemente $\zeta + \varphi = 90^{\circ}$.



Determinación de la altura de la Estrella Polar por medio de la vara de Jacob.

nía forma de cruz, pues constaba de una regla graduada y de otra más pequeña perpendicular a la anterior, que se desplazaba a voluntad. La observación era sencilla, el operador colocaba el instrumento de modo que pudiera visar la estrella polar alineándola con el extremo del brazo menor, mientras que por el inferior veía el horizonte. Su principal dificultad radicaba en mantenerla situada de forma que se pudiese ver con el mismo ojo tanto a la estrella como a la línea del horizonte.

Durante la Edad Media surgieron otros procedimientos expeditos para determinar la latitud midiendo la altura de la Estrella Polar sobre el horizonte. Uno de ellos fue verdaderamente singular y se le atribuye al obispo Nicolás de Myra¹³, el cual lo recomendaba a los peregrinos que querían visitar la ciudad de Jerusalén. Les comentaba que para saber si habían alcanzado su destino deberían tumbarse boca arriba y flexionar su pierna derecha, a continuación colocarían su mano cerrada encima de la rodilla pero con el pulgar extendido, de manera que en tal supuesto deberían ver la Estrella polar alineada con el dedo. Más verosímil fue el empleado por los marinos que surcaban el océano Índico y del que dio cuenta Vasco de Gama. El vocablo árabe que lo identificaba fue el de *Kamal*, constando el invento de una sencilla cuerda anudada en cuyo extremo había una tableta rectangular. El operador sujetaría el otro extremo de la cuerda con la boca, regularía su longitud hasta ver la estrella polar alineada con el borde superior de la tableta y proyectado el



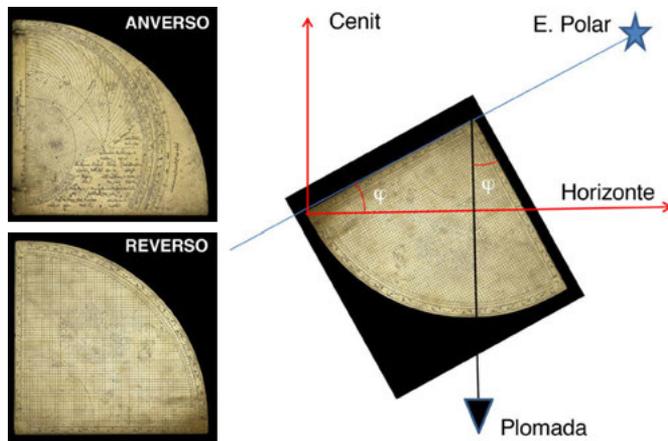
Reconstrucción de un Kamal (1977).

¹³ San Nicolás en Islandia y San Nicolás de Bari, por ser en esa ciudad italiana adonde fueron trasladados sus restos.

inferior sobre la línea del horizonte. Aunque se obtuviesen así resultados sorprendentes, es obvio que solo podría ser usado en latitudes próximas al ecuador (entre él y el trópico de Cáncer), cuando la latitud fuese tal que la estrella polar estuviese cerca del horizonte.

A modo de contrapunto ha de señalarse que los árabes contribuyeron decisivamente al progreso de la astronomía observacional. Aunque parece que la invención del cuadrante podría atribuirse a Tolomeo, es cierto que ellos lo utilizaron y perfeccionaron durante toda la Edad Media, extendiendo su empleo a la navegación. El instrumento era básicamente un sector cuadrangular graduado con el que se podían hacer mediciones de una exactitud análoga a la alcanzada usando el astrolabio, no en vano tenían ambos instrumentos un fundamento parecido. Con el plano del cuadrante en posición vertical, se apoyaba el operador en uno de sus radios para divisar la estrella polar y una vez materializada, se leía sobre el limbo el valor angular de la latitud, sirviendo como índice la línea de la plomada; tal como se aprecia en el dibujo que se acompaña, también podía determinarse la distancia cenital de la estrella, coincidente con la colatitud del lugar¹⁴.

Al comenzar a navegar por el hemisferio sur y perder de vista a la estrella polar, debió de producirse en los marinos un temor a lo desconocido al no disponer de la estrella que les guiaba en sus travesías. Esa sensación está bellamente reflejada en unas poesías escritas por José María de Heredia Girard¹⁵ en su obra *Les trophées (Les conquérants)*, publicada en el año 1893. En ella incluía un soneto que terminaba haciendo mención a la



La altura de la estrella Polar por medio de un sector cuadrangular, o simplemente cuadrante.

*Ou penches à l'avant des blanches caravelles,
Ils regardaient monter en un ciel ignoré
Du fond de l'Océandes étoiles nouvelles.*

*o, acodados en la proa de las blancas carabelas
veían elevarse en un cielo ignorado
las nuevas estrellas del fondo del océano*

pérdida de la estrella polar:

Aunque una de las expediciones más celebradas a tan lejanos territorios fuese la comandada por Magallanes, no constan en sus registros observaciones estelares, aunque si divisaran la Cruz del

¹⁴ Otra de sus aplicaciones más notables fue el cálculo de la hora mediante la observación del Sol, sobre todo en las travesías del hemisferio sur.

¹⁵ Un poeta francés de origen cubano, probable descendiente de aquellos conquistadores y un buen representante del parnasianismo.

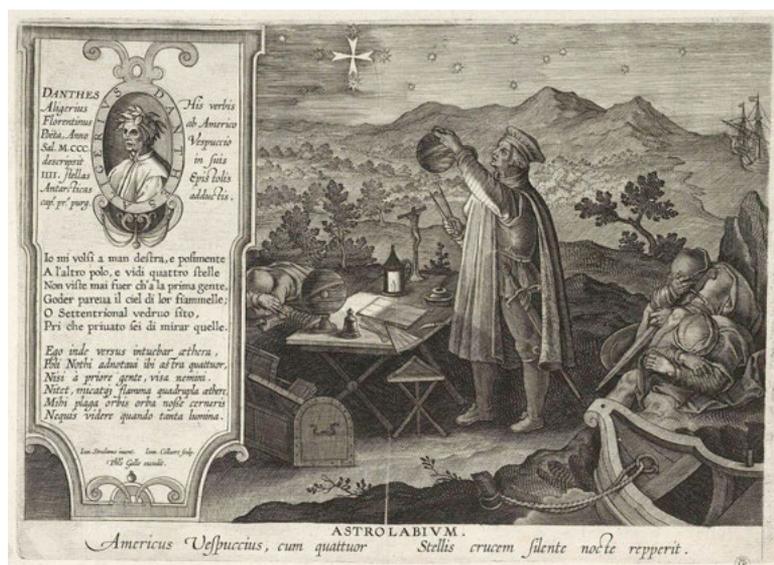
Sur y las nubes que luego llevarían su nombre. Si aparecen en cambio algunas referencias en los controvertidos viajes de Américo Vespucio. En una de sus cartas, concretamente en la que dirigió a Lorenzo di Pierfrancesco de Médici el 18 de julio de 1500, desde Sevilla, comenta lo siguiente: *Tanto navegamos por la zona tórrida hacia la parte del austro, que nos encontramos bajo la línea equinoccial, y teniendo un polo y el otro a final de nuestro horizonte, y la pasamos por seis grados perdiendo totalmente la estrella tramontana.* Al parecer Vespucio intentó buscar sin éxito una estrella polar del sur¹⁶, centrándose en la constelación que luego sería conocida como Cruz del Sur («que formaban como una almendra»), posteriormente, se inspiró en los versos de Dante y escribió lo siguiente:

Y a la derecha vuelto, alcé la mente al otro Polo, y vide cuatro estrellas que solo vio la primitiva gente.

¡Qué alegre el cielo de sus chispas bellas! ¡Oh viudo Septentrión que estás privado eternamente de la vista de ellas!

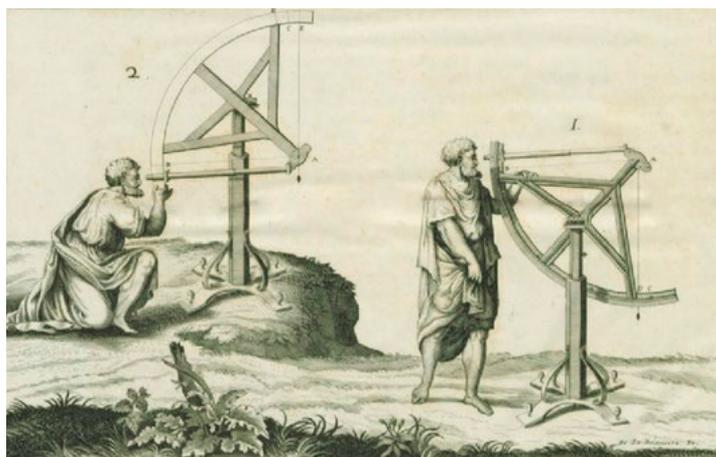
Tan singular escena fue plasmada un siglo después en uno de los grabados del pintor holandés Jan van der Straet, reproducido junto a estas líneas. Vespucio no efectuó observaciones tendentes al cálculo de la latitud, si bien si lo hizo para determinar la longitud, basándose en la conjunción de la Luna con Marte, tal como refiere en la misma carta: «En cuanto a la longitud digo, que para conocerla encontré tanta dificultad que tuve grandísimo trabajo en hallar con seguridad el camino, que había recorrido siguiendo la línea de la longitud, y tanto trabajé que al fin no encontré mejor cosa que observar y ver de noche la posición de un planeta con otro, y el movimiento de la Luna con los otros Planetas porque el planeta de la Luna es más rápido en su curso que ningún otro, ...»

En el año 1668 tuvo lugar en Francia la que quizás haya sido una de las observaciones más rigurosas de la estrella polar y desde luego de las más reseñadas en la historia de la astronomía geodésica.



Grabado que muestra la Cruz del Sur (ca. 1600), supuestamente observada por Américo Vespucio con un astrolabio esférico (esfera armilar) y un compás. A la izquierda figura también Dante Alighieri junto al poema dedicado a la misma.

¹⁶ Ese hecho obligó a determinar la latitud por medio de observaciones al Sol.



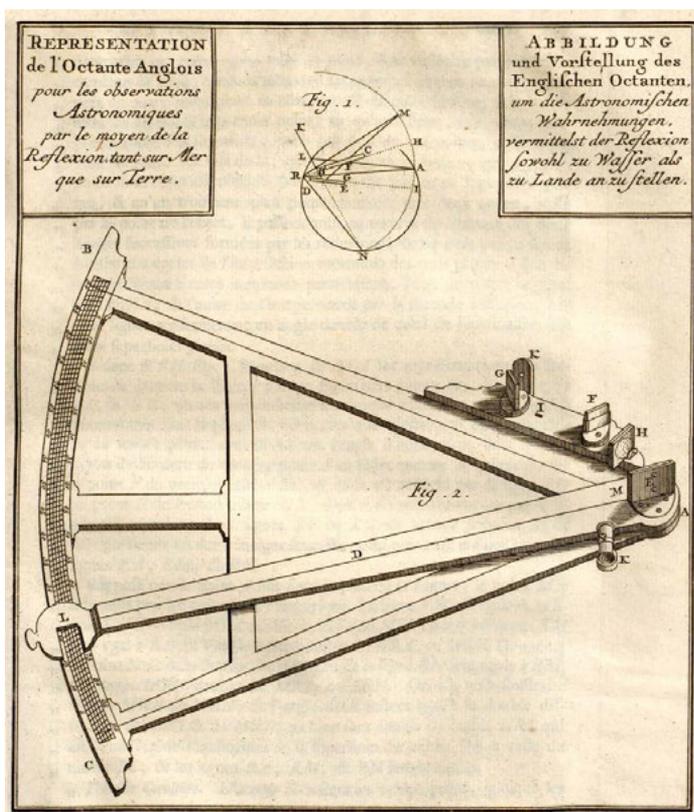
Dos observadores, vestidos a la usanza romana, visando por el anteojo incorporado al cuadrante de Picard.

Nos estamos refiriendo a la que realizó el abate Jean Picard, uno de los socios fundadores de su prestigiosa Academia de Ciencias. El instrumento utilizado fue un gran cuadrante graduado y diseñado por él mismo, efectuando la observación cuando pasaba por el meridiano de París: los resultados fueron $51^{\circ} 22'$ en la culminación superior y $46^{\circ} 24'$ en su paso inferior; prueba indirecta de que por entonces la estrella distaba $2^{\circ} 30'$ aproximadamente de la posición del polo norte celeste. Bien entendido que Picard efectuaría una serie prolongada de observaciones y calcularía los valores medios, el mismo se refería a ello en los términos siguientes: *La hauteur du Pole à Paris au Jardin de la Bibliothèque du Roi, par plusieurs Observations de l'Etoile Polaire faites aux Solstices d'Hiver, a toujours paru de $48^{\circ} 53'$, il en faut ôter $50''$, & l'on aura la hauteur du Pole de Paris, à l'endroit des Tours de N.D. de $48^{\circ} 52' 10''$; ou si l'on aime mieux désigner Paris par le milieu entre les Portes de S. Martin & de S. Jacques... la hauteur du Pole de Paris sera de $48^{\circ} 52' 20''$ & nous sommes certains que si les hauteurs du Pole sont fixes, il y aura peu à changer à celle-ci, lorsque dans l'Observatoire on pourra arriver à une plus grande précision*¹⁷.

Poco después de la observación de Picard, ideó Isaac Newton¹⁸ un instrumento más manejable, cuyo empleo propició sustancialmente la mejora de los resultados obtenidos en las observaciones efectuadas a bordo de los barcos. El aparato en cuestión fue otro sector circular de 45° de amplitud, de ahí su nombre de octante. Sin embargo también fue conocido como cuadrante, en tanto que se plasmaron sobre el limbo noventa divisiones de medio grado, las subdivisiones continuaron hasta figurar sobre él grados, minutos y décimas de minuto; por lo que eran posibles lecturas por interpolación con una incertidumbre de cinco segundos de arco. Parte consustancial de este novedoso instrumento era el telescopio montado en uno de los laterales del mismo, así como el espejo del horizonte fijado, con un ángulo de 45° , en frente del objetivo. El espejo era suficientemente pequeño para permitir que el observador viera la imagen partida con el horizonte y la estrella. El índice de las lecturas era otro radio móvil que llevaba incorporado otro espejo a

¹⁷ *Dégré du Méridien entre Paris et Amiens, déterminé par la mesure de M. Picard, et...Paris. 1740*

¹⁸ Aunque Newton idease este instrumento hacia el año 1699, su descripción fue realizada por Edmond Halley pero no se publicó hasta después de que falleciera en 1742. Se ignora el motivo por el que no fue realizada a su debido tiempo. El caso es que surgieron después aspirantes que reivindicaron sus derechos de autor: el matemático inglés John Hadley y el óptico norteamericano Thomas Godfrey.



Representación del octante inglés. Una de las ilustraciones del *Voyage historique de l'Amérique méridionale fait par ordre du Roi d'Espagne par Don George Juan... et par Don Antoine de Ulloa... qui contient une histoire des Yncas du Pérou, et les observations astronomiques et physiques, faites pour déterminer la figure et la grandeur de la Terre.* 1752.

45°. Las caras reflectoras de los dos espejos estaban enfrentadas, de modo que la imagen vista en el primer espejo era el reflejo de la del segundo.

Tanto el octante, como el sextante ideado por John Bird en 1757 (basado en parecidos principios), fueron usados por los marinos, y otros observadores, para realizar toda clase de observaciones astronómicas para saber la hora, o para determinar cualquiera de las coordenadas geográficas. Gracias al empleo de lentes y espejos, el operador tenía la posibilidad de ver en un solo cuadro las imágenes del horizonte y de la estrella polar, y de hallar el valor definitivo de la latitud, corrigiendo la lectura del brazo móvil aplicando las pertinentes correcciones.

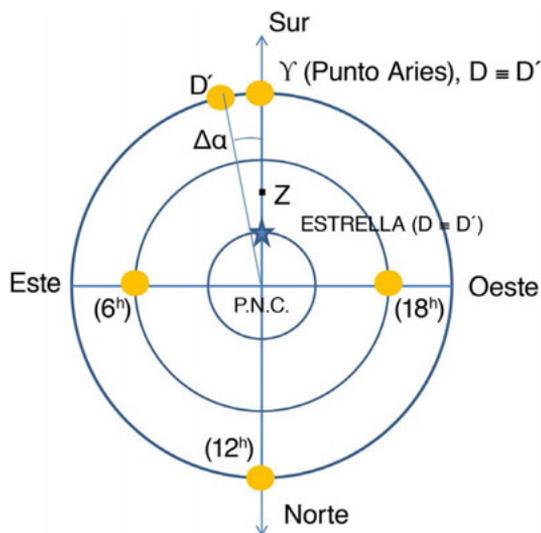
CAPÍTULO VI | El Nocturlabio, reloj de la Estrella Polar



CAPÍTULO VI | El Nocturlabio, reloj de la Estrella Polar

Para un observador del cielo nocturno parecería como si la estrella polar permaneciera inmóvil, mientras que las demás, incluidas las de su propia constelación (Osa Menor) giran en torno a ella. Ya es sabido que realmente la estrella polar gira también, como las otras estrellas, alrededor del polo norte celeste; punto imaginario del cielo septentrional que comparte con el eje del mundo, o de rotación de la Tierra. El periodo de revolución de ese giro diario y aparente de las estrellas es de 24^h sidéreas. Se introdujo así una nueva escala de tiempo, cuya unidad más conocida es la hora sidérea¹, siendo su múltiplo más nombrado el año sidéreo. Aunque esta escala sea diferente de la solar, guarda con ella una relación asociada a la traslación de la Tierra alrededor del Sol. Efectivamente, se define el año sidéreo como el periodo de tiempo invertido por el Sol en pasar dos veces consecutivas por el mismo punto de su trayectoria aparente sobre la esfera celeste, dicho de otra forma: como el tiempo invertido en completar un giro de 360°.

También es sabido que el año solar tiene 365^d.24 aproximadamente, aunque en realidad se deba de ajustar la cifra para fijarla en 365^d.2422 y decir que esa es la duración real del año, identificándolo entonces como año trópico. Este año solar se puede definir igualmente como el periodo de tiempo invertido por el Sol en pasar dos veces consecutivas por el punto Aries, el equinoccio de primavera. Una primera consecuencia de esa definición resulta inmediata si se tiene en cuenta la precesión anual de dicho pun-



Aceleración de las fijas. Proyección ortográfica de la esfera celeste sobre el plano del ecuador. Se representan las culminaciones superiores de la estrella polar y del Sol, sobre el meridiano del lugar.

¹ En los observatorios astronómicos hay relojes regulados de acuerdo con esa escala de tiempo.

to: en el año trópico el Sol no llega a recorrer los 360° de la circunferencia, sino 360° menos los $50''.3$ en que se evalúa la precesión equinoccial; lógicamente la duración del año sidéreo será un poco mayor, el tiempo invertido por el Sol en recorrer esos segundos². La relación entre ambos años, o entre la hora solar y la sidérea, se deduce teniendo en cuenta la traslación de la Tierra alrededor del Sol o la variación diaria de su ascensión recta, por idéntico motivo.

Para tratar de representarla, recurriremos a una proyección ortográfica de la esfera celeste centrada en el plano del ecuador. Considerando el instante en que tanto la estrella polar como el Sol primaveral (el Punto Aries) tienen su culminación superior sobre el meridiano del lugar. Si dicha culminación tiene lugar un determinado día D, es obvio que al culminar el día siguiente la estrella polar y el Punto Aries volverán a su posición inicial; en cambio el Sol aún no habrá culminado puesto que tendrá una ascensión recta, justamente el incremento diario de la misma: el resultado de dividir la variación anual de 24^h por los días que tiene el año trópico (365.2422), esto es $3^m 56^s.55$ o 4^m aproximadamente. En resumen, que el observador que esperase ver al día siguiente, D', la culminación de la estrella polar a la misma hora del día D, comprobaría que se habría adelantado unos cuatro minutos de tiempo, de ahí el nombre dado a ese fenómeno astronómico. El desfase temporal iría aumentando a lo largo del año: 6^h transcurridos tres meses, 12^h a los seis meses, 18^h a los nueve meses y 24^h al pasar un año; quiere esto decir que la estrella polar habría culminado una vez más que el Sol, es decir un número igual 366.2422. La relación entre las dos escalas de tiempo es por tanto obvia, el cociente entre 366.2422 y 365.2422, un valor próximo a 1.002738; de manera que el intervalo sidéreo se obtendría multiplicando el homólogo solar por dicho valor. Resultaría pues que si el año sidéreo tiene 365.2564 días solares, tendría también 366.2564 días sidéreos.

Así como el movimiento diurno y aparente del Sol sobre la bóveda celeste, con sus ortos y ocasos, propició la pronta aparición de la medida del tiempo mediante los relojes solares, es natural que también se pensara en la posibilidad de hacer algo similar durante la noche, apoyándose para ello en el movimiento relativo y diurno de las estrellas; máxime cuando algunas de ellas presentaban la ventaja de no ocultarse nunca sobre el horizonte por estar siempre cerca de los polos. Como en tantas otras ramas del saber ya hubo antecedentes al respecto en el antiguo Egipto, en donde se diseñaron desde tiempo inmemorial relojes estelares³. La hora se obtenía de diferentes formas, basándose en el fundamento común de observar la culminación de las estrellas (el tránsito) sobre el meridiano del lugar. Se conservan incluso algunos ejemplares de uno de los aparatos empleados a tal efecto: el merkhet (instrumento del conocimiento) y el bay; el primero era una tablilla horizontal grabada que tenía una plomada en uno de sus extremos, que junto al bay (una rama de palmera con una ranura en su parte superior) permitían materializar la visual a la estrella del norte, o cualquier otra de su entorno, o materializar la línea meridiana. No se conservan intentos de haber hecho algo parecido en el periodo grecorromano o en de la expansión musulmana. Sin embargo si hay constancia de tales intentos, en algunos pueblos nativos del nuevo mundo que usaban la posición cambiante del brazo mayor de la Cruz del Sur para poder fijar la hora de la noche; tal como sucede hoy día en Australia. Las primeras noticias al respecto en el viejo mundo surgen durante la Edad Media, aunque el jesuita belga Henri Michel defendiera que ya se efec-

² Como la velocidad es de $360^\circ / 365^d.24 22$, el tiempo necesario será igual a los $50''.3$ dividido por el cociente anterior; un valor que sumado a la duración del año trópico proporcionaría la duración del año sidéreo: $365^d.2564$, es decir unos $20^m 25^s$ mayor que la duración del año trópico.

³ Suelen clasificarse en decanales y ramésidas. Los primeros datan del llamado Periodo intermedio (2190 a.C - 2052 a. C.) y se hallaron sobre los sarcófagos de los altos dignatarios.

Bay

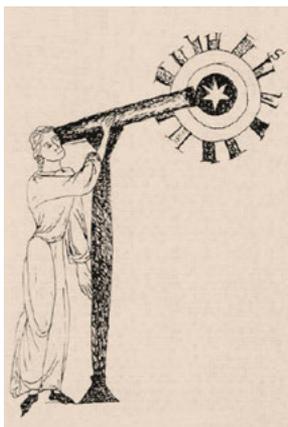


600 a.C

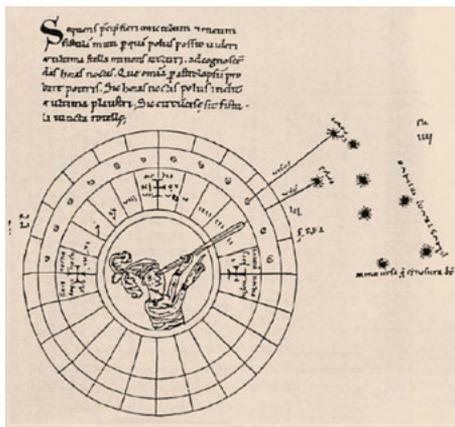
El Merkhet de Egipto, uno de los instrumentos astronómicos más antiguos. Se conserva en el Museo de la Ciencia en Londres. Perteneció a Bes, hijo de Khonsirtis, un astrónomo sacerdote del dios Horus en un templo de Edfu, en el Alto Egipto.

tuaban esas medidas en la China del siglo X a.C.; aunque recientes investigaciones sinológicas hayan refutado semejante posibilidad.

Pacificus, archidíacono de la catedral de Verona, ya reclamó en la primera mitad del siglo IX haber inventado un instrumento, al que llamó *horologium nocturnum*, cuya descripción la hizo en un poema; el instrumento iba provisto de un rudimentario tubo de observación, el cual fue citado y dibujado⁴ en manuscritos posteriores del siglo XI y XII. En la descripción de este clérigo se hablaba incluso de una estrella brillante cercana al polo norte celeste, a la que llamó *noccium horarum computatrix*. El análisis de la precesión de los equinoccios permite concluir que en esa época el polo estaba muy cerca de una de las estrellas de la constelación *32 Cameopardis* de Johannes Hevelius, de magnitud 4 o 5, pero que debió ser fácilmente identificable por estar aislada. No obstante lo más probable es que se tratara ya de nuestra estrella polar (α *Ursae minoris*), separada



Venedig, Bibliotheca Nazionale Marciana, Ms. Lat. VIII. 22, fol. 1^r



Chartres, MS 214, (olim 173)

Primeras referencias del reloj nocturno, en los manuscritos que se indican.

⁴ Los dibujos del artificio hicieron que algunos historiadores del siglo XIX llegasen a considerarlo como el más remoto antecedente del telescopio.

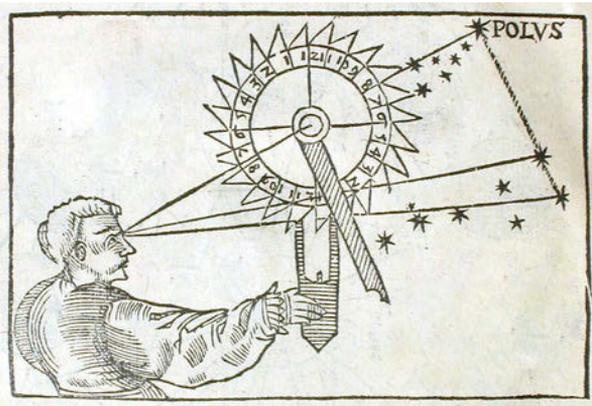


Imagen de un Nocturlabio rudimentario (*Liber cosmographicus* de Apiano. 1524). Obsérvese que el operador visa simultáneamente a la estrella polar, a través del centro del instrumento, y a las guías de la misma.

por aquel entonces unos 7° del polo norte celeste. En cualquier caso su *horologium nocturnum*, unido al reloj de agua y al astrolabio, permitirían regular la vida monástica.

Del mismo tenor fue lo recogido en el *Chronicon* de Tietmaro, príncipe obispo de Merseburgo, del año 997, ya que según él Gerberto de Aurillac, el futuro papa Silvestre II, había construido un tubo (*fistula*) para observar la estrella de los marineros (*stella nautarum duce*), o bien lo referido por Raimundo Lulio⁵ en el siglo XIII acerca del instrumento que denominó *Astrolabium nocturnum*. No existen demasiados manuscritos sobre esos relojes nocturnos, destacando la ausencia de ejemplos islámicos. Sin embargo hay constancia de dieciocho de ellos, escritos entre los siglos XV y XVI, que tratan de su construcción, de su empleo, o de ambas cuestiones; formando parte de otros documentos más genéricos, referidos a textos o tablas astronómicas. La primera referencia impresa sobre el Nocturlabio fue una de las ilustraciones incluidas en la *Cosmografía* de Peter Apianus (*Liber Cosmographicus*. 1524). Dicha obra fue ampliada por Gemma Frisius en 1529, y tuvo tanto éxito que fue reimpressa en treinta ocasiones y traducida a varios idiomas; es indudable que se contribuyó con ello a la difusión del instrumento.

El nocturlabio fue asimismo descrito en otra obra de Apiano (*Instrument buch*. 1533), esta vez combinada con otro instrumento universal de Regiomontanus, llamado *Horometer*. Otra nueva descripción fue efectuada por el médico y matemático alemán Johannes Dryander, el cual completó y publicó el tratado *Das Nocturnal Oder Die Nachtvhr* (1535) que había iniciado su compatriota Jakob Köbel. El afamado y prolífico cosmógrafo Sebastian Münster fue el autor de otra descripción, incluida en una de sus muchas obras⁶ sobre gnomónica, en la que se aprecian ya las principales partes de que consta este instrumento. Al parecer el primer libro inglés que se pronunció sobre este asunto fue escrito por el matemático Thomas Fale (*Horologigraphia*⁷. 1593). Se

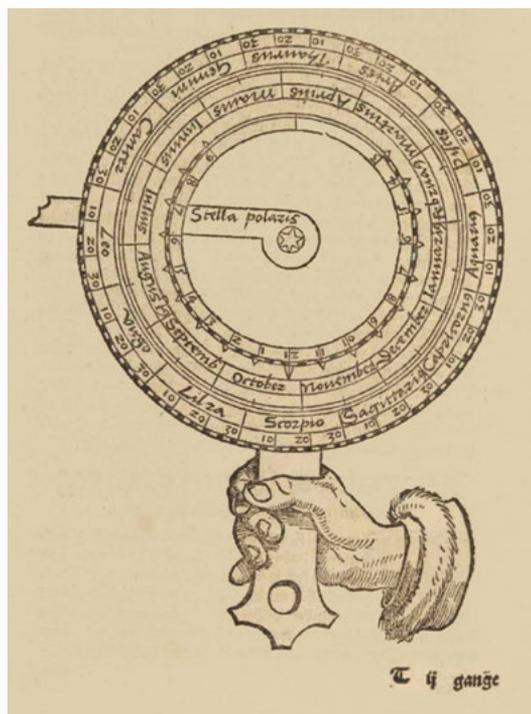
⁵ Dos son las obras en que hizo referencia al reloj nocturno: *Nova geometria* (1299) y en *Liber Principiorum medicinae* (1274-1278).

⁶ *Fürmalung vnd künstlich Beschreibung der Horologien nemlich wie man der sonnen vren mit mancherley weys vnd form, vnd auff allerley gattung entwerffen sol an die mauren, auff die nider vnnnd aufghebehte ebne, auff rotund, schlecht, außgraben vnd andere mancherley instrument* (1537).

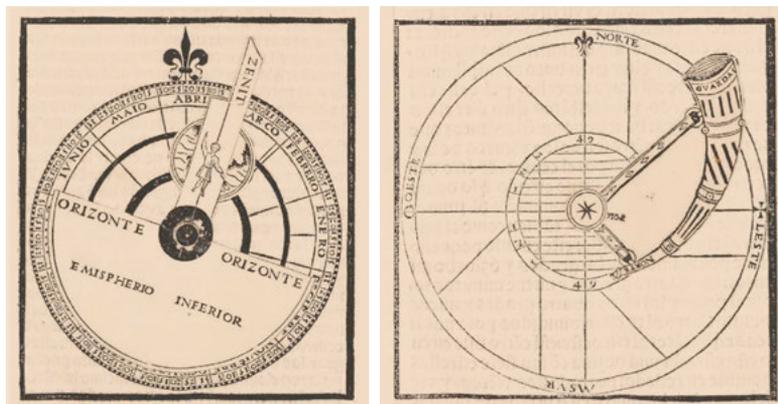
⁷ El título de esta obra, sobre relojes de Sol, fue mucho más extenso: *Horologigraphia. The Art of Dialling: teaching an easie and perfect way to make all kinds of Dials vpon any plaine Plat howsover placed: Vvith the drawing of the Twelue Signes, and Houres vnequall in them all. Whereunto is annexed the making and vse of other Dials and Instruments, whereby the houre of the day and night is knowe. Of speciall vse and delight not onely for Students of the Arts Mathematicall, but also for diuers Artificers, Architects, Surueyours of buildings, free-Masons, Saylors, and others.*

distinguen en primer lugar sus discos concéntricos, destacando el exterior con los signos del zodiaco (con separaciones decenales), otro interno con los doce meses del año en clara correspondencia con los anteriores, para terminar con el disco horario, el de menor radio. Destaca el centro común perforado en el que se dibujó la estrella Polar, para indicar que a través de él divisaría el operador la citada estrella. Otro de los aditamentos más característicos de este instrumento astronómico era su alidada móvil, un brazo radial que también hacía las veces de índice horario.

Hay otra serie de referencias al nocturlabio que figuran en diferentes tratados de náutica, en los que se contemplan las correcciones que deben sufrir las alturas medidas del polo norte celeste para obtener la latitud del lugar de la observación; correcciones relacionadas con las estrellas α y β de la Osa Menor, y con las α y β de la Osa Mayor, siendo las dos últimas conocidas las guías de la estrella polar (la primera citada). Curiosamente, el diagrama del «hombre del norte» fue transferido en cierto modo a un instrumento, descrito por Martín Cortés de Albacar en su celebrada obra *Breve Compendio de la Sphera y de la Arte de Navegar, con nuevos instrumentos y reglas, ejemplarizado con muy sutiles demostraciones*⁸, editado primero en Sevilla (1551) y luego en Londres (1561); a la que volveremos a referirnos en el capítulo X de este libro.



Nocturlabio descrito por Sebastián Münster.

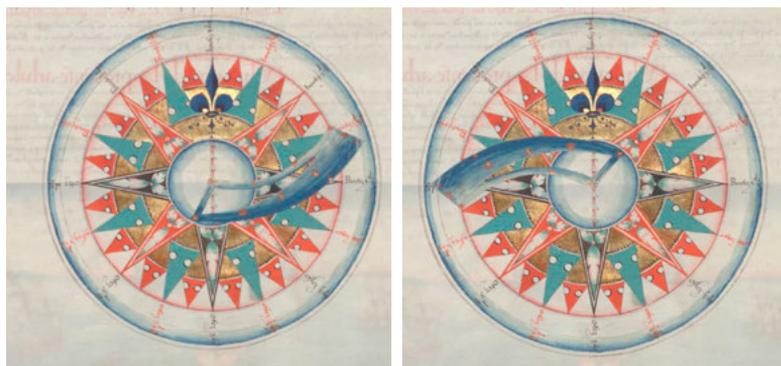


Primeras referencias del reloj nocturno, en los manuscritos que se indican.

⁸ Considerado el mejor tratado de navegación escrito hasta entonces, se convirtió en la referencia obligada para muchos marinos ingleses. Fue dedicado al emperador Carlos I.

Se trata de una lámina con los cuatro puntos cardinales, a la que se añadió una escala indicando las magnitudes de las correcciones que se habrían de aplicar una vez medida la altura de la estrella polar, además de una trompetilla simulando la Osa Menor en la que se marcó la posición de sus siete estrellas y especialmente las dos guardas de la principal. El uso de este instrumento era similar al del nocturlabio: se observaba la estrella polar a través del agujero central, entonces el puntero estaría alineado con las guardas y podría leerse directamente la corrección debida⁹. No obstante los resultados así obtenidos no serían correctos, puesto que la distancia de la estrella polar al polo norte celeste empleada por Cortés era errónea.

El valor adoptado por él, fue de $4^{\circ} 9'$, que ya había sido fijado por el astrónomo Johann Werner en 1541; a pesar de que en el texto él mencionase otro de $3^{\circ} 3'$ usado por los marineros, el cual era mucho mejor. La razón para haber elegido esa opción fue expuesta por el autor: *la altura se toma de la estrella del norte, la cual se encuentra en el extremo o fin de la cola de la Osa menor, una constelación comúnmente llamada el Cuerno... Esta estrella tiene una declinación de $85^{\circ} 51'$. Y el complemento a 90° (el cual es de $4^{\circ} 9'$) es su distancia al Polo. Y aunque los marineros crean que esa distancia no es mayor de tres grados y medio: ya que a mi juicio todavía merecen más crédito las opiniones de los astrónomos que las de los marineros: habida cuenta que los astrónomos conocen la posición de las estrellas... más perfecta y precisamente que los marineros. Pues ellos no solo cuentan por grados, sino que también lo hacen por minutos y segundos¹⁰.*



Dos imágenes de la Osa Menor, tal como fueron representadas en *Les Premières œuvres de Jacques Devaulx, pilote en la marine*. 1583.

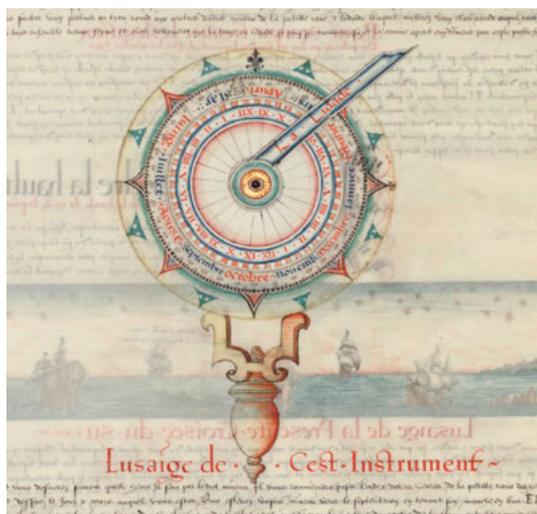
La obra de Martín Cortés sirvió de modelo a seguir, observándose sin dificultad su influencia en numerosos autores. De entre todos ellos nos hemos permitido seleccionar al cosmógrafo y piloto francés Jacques Devaulx, el cual publicó en el año 1583 un bello libro¹¹ dedicado al Duque de Joyeuse, almirante y gobernador de Normandía. Lo más llamativo de su trabajo fueron las ilustraciones, primorosamente dibujadas y coloreadas, debiendo destacar las referidas al Nocturlabio, del que comentaba como se podía obtener con él la hora de la noche en todo tiempo. Apoyándose en el esquema de Cortés presentó dos láminas para señalar como resultaba afectada la posición de la Osa Menor por el movimiento diurno. Más sobresaliente es todavía el primor con el que plasmó todos los detalles de ese reloj nocturno, en una imagen cuyo valor estético es difícilmente igualable.

⁹ En el siglo XVII proliferaron las tablas con las correcciones que deberían aplicarse a las alturas observadas de la Polar.

¹⁰ *On the history of the Nocturnal*. Günter Oestmann (2001). Technische Universität Berlin.

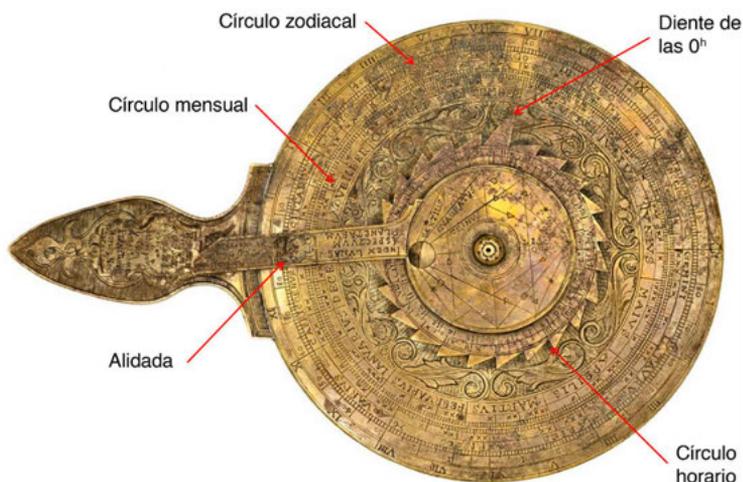
¹¹ *Les premières œuvres de Jacques Devaulx, pilote en la marine*. 1583.

Otra en la que todavía se evidenciaba la influencia de Martín Cortés fue en la voluminosa *Hydrographie, contenant la theorie et la pratique de toutes les parties de la navigation*, escrita por el jesuita Georges Fournier (1643; una verdadera enciclopedia marítima dedicada al rey Louis XIII, que fue varias veces reeditada. En el apartado XX, sobre el nocturlabio, de su libro X (dedicado a los instrumentos), se describía así: *Nocturlabe est un instrument par lequel... toute heur de la nuit on peut trouver combien l'Etoile du Nord est plus haute ou plus base que le Pole. On peut aussi servir pour savoir quelle heure il est*. El nocturlabio también se podía usar para calcular la hora de la marea alta en cualquier lugar, necesitando para ello saber el intervalo de tiempo transcurrido entre la culminación de la luna llena y la hora en que se preveía la siguiente. La descripción del instrumento siguió siendo habitual en los libros de náutica, aunque ya no se contemplara la posibilidad de hallar la latitud como altura de la estrella polar en los libros publicados a finales del siglo XVII; a pesar de ser más conveniente hacerlo así que a través de las observaciones al Sol. Sin embargo, el nocturlabio debió continuar siendo empleado hasta el siglo XVIII a la vista de la gran cantidad de instrumentos existentes.



El Nocturlabio en la obra de Jacques Devaulx. 1583.

Tras el recorrido histórico realizado, parece obligado describir con cierto detalle las diversas partes de que consta el nocturlabio, así como las líneas maestras de su funcionamiento. Generalmente se hicieron de madera o de latón, siendo su base un disco externo, o madre, en el que se grabaron los meses del año (divididos en días) o los doce signos del zodiaco, convenientemente graduados en sentido levógiro. Otro de sus discos fundamentales fue el interior dedicado a las horas, indicando ocasionalmente las medias y los minutos; este disco giraba en sentido directo de forma que la mar-

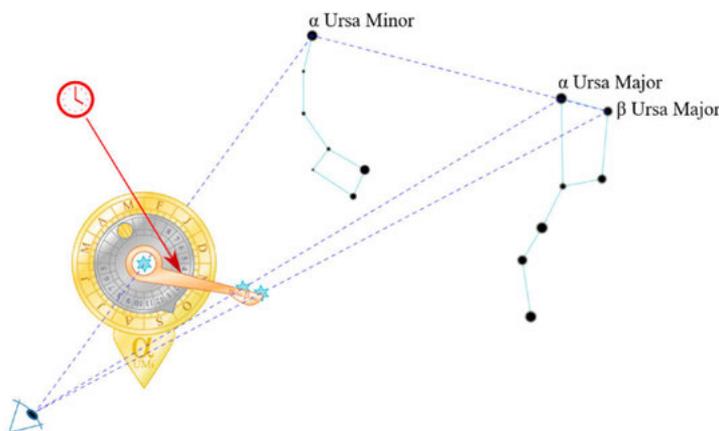


Elementos del nocturlabio ($\varnothing \approx 14.5$ cm), construido en Verona (ca.1501) por Johannes Paulus Cimerlinus. Museo Arqueológico Nacional (Madrid).

ca de la estrella elegida indicaba la fecha actual sobre el disco exterior. Sus dos elementos lineales básicos fueron el brazo radial, un marcador hacia el disco externo y una alidada con la que se podía divisar la estrella de referencia; la longitud de esta era mayor que la del radio del círculo externo, para facilitar la observación. El centro de los discos estaba perforado para poder visar la estrella polar, como ya se dijo. Dado que el instrumento era nocturno, solían resaltarse las divisiones para identificarlas con mayor facilidad. En ocasiones incluían hasta un diagrama con las constelaciones en el disco interno, así como la localización de las diez estrellas principales; tampoco era infrecuente que se indicase la separación real entre la estrella polar y el polo norte celeste. Un calculador de mareas en la parte central del instrumento era otro de sus posibles añadidos. La principal novedad que aportaba el nocturlabio era la de convertir automáticamente la hora sidérea en hora solar, para lograrlo se situaba la medianoche del disco horario sobre la fecha del día de la observación, es decir que la conversión se hacía de forma mecánica. En todos los casos constaba de un asidero, gracias al cual el observador podía sujetarlo con facilidad y colocarlo en la posición deseada.

El instrumento se centraba sobre la estrella polar, divisada a través de su centro. Las estrellas generalmente observadas eran las guías de la Osa Mayor: Merak (β UMa) y Dubhe (α UMa), casi alineadas con la estrella polar; o bien Kochab (β UMi), también llamada la Clara, por ser la más brillantes de las guardas en la Osa menor, una circunstancia que explica el hecho de ser de la más observadas. El origen en el círculo diurno dependía de las estrellas elegidas, según fuesen las guías o las guardas de la estrella polar; aunque en ocasiones se usara también la estrella Ruchbah (δ Cas) de la constelación Casiopea. Al iniciar la observación se colocaba el diente mayor del disco horario sobre la fecha y se mantenía en dicha posición. A continuación se visaba la estrella polar a través del centro del nocturlabio. Luego se extendía el brazo y se mantenía el instrumento bien sujeto por el mango. Los discos graduados deberían situarse de manera que fuesen perpendiculares a la visual a la polar, procurando que el mango estuviese contenido en el plano del meridiano del lugar. Manteniendo la estrella polar siempre a la vista, se giraba la alidada para alinearla con las guías Merak y Dubhe. Siendo entonces cuando la alidada marcaba la hora sobre el círculo horario¹².

Los nocturlabios, como otros instrumentos matemáticos de los siglos XVI y XVII empleados en las observaciones cosmográficas, fueron coleccionados por la nobleza, civil o eclesiástica, con la única intención de pretender aparentar un estatus social preponderante. Hay una prueba clásica que



Observación de las guías de la estrella polar con el nocturlabio.

¹² A veces se añadía información astronómica valiosa en el reverso del nocturlabio, o bien se diseñaba para poderlo usar también como cuadrante.

lo hace evidente: el Cuadro de los Embajadores (Jean de Dinteville y Georges de Selve) la obra maestra de Hans Holbein el joven que pintó en 1533. En ella figura finamente representado el *quadrivium* (Aritmética, Geometría, Astronomía y Música), destacando en este contexto los dos globos: terráqueo y celeste, y los numerosos instrumentos gnomónicos para medir el tiempo. Los modelos de todos ellos habían sido construidos por él matemático alemán Nicolas Kratzer, uno de los mejores instrumentistas de la época y astrónomo (astrólogo) del rey Enrique VIII. Kratzer también fue pintado por Holbein, apareciendo el protagonista sentado en su mesa de trabajo, sosteniendo en su mano izquierda un reloj poliédrico y en su derecha un compás. Sobre la mesa se observa uno de los discos del nocturlabio junto a su alidada, ocupando un lugar destacado otro par de relojes: uno de pastor o cilíndrico y otro ecuatorial.



Retrato de Nicolas Kratzer por Hans Holbein.

Otro notable instrumentista de su tiempo fue el cartógrafo alemán Caspar Vopel, que compaginó la enseñanza de las matemáticas con los trabajos en su taller desde los comienzos del año 1531. De entre sus muchos nocturlabios, repartidos por diferentes museos, hemos elegido el que se conserva en el *British Museum*. En realidad se trata de un instrumento doble, en tanto que en una de sus caras es nocturlabio y en la otra un reloj de Sol, siguiendo en este último el prototipo diseñado en su momento por Johann Müller, más conocido por su nombre latino de Regiomontanus. El borde del reloj nocturno es una escala diurna dividida en decenas de días, subdividiéndose cada intervalo en los días correspondientes; su diámetro es de 130 mm. El próximo limbo incorpora los nombres de los meses, rotulados en latín, alternándose con símbolos estelares. A continuación figura la corona circular con una escala zodiacal, dividida en decenas de grado, numeradas dentro de cada signo: 10, 20 y 30, y subdivididas en grados. Envuelve dicho anillo a las representaciones de los doce signos, con los símbolos de los Planetas que los gobiernan. La posición de tales signos, con relación al calendario referido, indica que los equinoccios tendrían lugar los días 11 de marzo y 15



Nocturlabio metálico (aleación de cobre) de Caspar Vopel. Colonia. 1551. *British Museum*.

de septiembre. El límite interno es otra corona circular con los nombres de cada uno de los signos, alternándose con símbolos estelares.

El disco dentado móvil y ligado al centro del nocturlabio, lleva incorporado un índice con una inscripción (*Index Solis*) y un grabado del Sol. Este disco horario incorpora dos escalas concéntricas: la exterior numerada del 1 al 12 y dividida en cuartos de hora y la interior, con el mes lunar del 1 al 29, también dividido en cuartos, y la interior con el mes lunar numerado de 1 a 29 y dividido en cuartos de hora. El siguiente disco móvil de menor diámetro lleva unido otro índice (*index Lunae*) con un grabado de la Luna en menguante. Es destacable la ventana circular de este mismo disco, gracias a la cual se podrían leer las fases lunares rotuladas en la placa inferior. La información astrológica se completa con el *aspectarium* lunar y con otras inscripciones del mismo tenor. La alidada del instrumento, ligada a su centro, contiene instrucciones sobre su manejo y lleva grabada en su extremo la constelación de la Osa Mayor, con sus siete estrellas, su longitud es de 226 mm. El asidero del nocturlabio, bajo un escudo de armas (no identificado), lleva la siguiente leyenda: *HOROMETRI DORSUM NOCTURNAS*

HORAS CONTUNCT OPPOSITI ASPECTUS Q3 PLANETARIUM INDICAN. Finalmente ha de reseñarse la leyenda que envuelve al centro hueco del instrumento: *STELLA POLARIS ALKURABA*¹³, recordando que a través del mismo se debería visar a la estrella polar.

La otra cara del instrumento no es más que una versión del reloj de Regiomontanus (una especie de reloj de Sol universal), de hecho así figura grabado en su mitad superior. Lamentablemente falta uno de los enganches del brazo plegable al borde del disco. A ambos lados del reloj, propiamente dicho, hay escalas divididas en grados simples, sobre las que se marcaron las decenas, desde 0 a 65. En la parte inferior del reloj, justo en la intersección de las escalas, se trazó un primer arco horario graduado de 1 a 12, de manera que el 6 se localizó bajo la citada intersección; el segundo, graduado de forma similar, está situado muy próximo al borde del instrumento. A la derecha del reloj aparece una escala con las declinaciones del Sol, marcadas con los símbolos del zodiaco. Las escalas de sombras se indicaron en el borde del disco: la exterior, con divisiones múltiplos de 5, desde 0 a 90; la interna también está dividida de manera análoga, con la salvedad de que en sus dos extremos se comienza con el 5 hasta llegar a 60 en la mitad de la escala. A la izquierda del reloj figura la signature del constructor, el lugar y la fecha de producción. Sobre el asidero se resumieron las prestaciones del reloj y se grabaron los símbolos de tres estrellas.



Reloj universal de Regiomontanus, construido en los talleres de Caspar Vopel.

¹³ Hace referencia al nombre árabe de la estrella del norte: ب كوكب ال (al-kaukab o al-kokab). Realmente se refirían a la estrella β de la Osa Mayor, usada en su momento como estrella polar.

Sin llegar a alcanzar la popularidad de los relojes de Sol, los relojes nocturnos también fueron muy solicitados; hasta el punto de ser contruidos con dimensiones reducidas para transformarlos en instrumentos de bolsillo fácilmente transportables. Uno de los ejemplos más sobresalientes de este tipo se conserva en el Rijksmuseum de Amsterdam, radicando su importancia en que pudiese haber sido fabricado expofeso para ser regalado a René Descartes¹⁴; así parece desprenderse, al menos, de la dedicatoria que lleva incorporada (*A RENÉ DESCARTES*). Es probable que el filósofo y matemático lo utilizara en sus viajes, a tenor de las longitudes geográficas de las ciudades que lleva incorporadas. No se sabe quién se lo regaló pero sí quién lo hizo: *fait à Amsterdam par J. Rolas van Vries*. A pesar de sus dimensiones, se distinguen perfectamente las partes esenciales del nocturlabio: un círculo externo con los doce meses del año, con sus días divididos en decenas, el círculo dentado de las horas, con el saliente de la media noche, y la alidada con su rótulo *Index*. En realidad el instrumento es un compendio astronómico, ya que el nocturlabio propiamente dicho es la tapa de un estuche, en cuyo interior hay una brújula y un reloj de Sol anular.



El compendio astronómico regalado a Descartes. *Rijksmuseum*. Amsterdam.

¹⁴ Descartes residió en Holanda gran parte de su vida, entre 1629 y 1650. Allí escribió muchas de sus obras. Para él las matemáticas eran la única cosa cierta. Su celebrado *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison, et chercher la vérité dans les sciences* fue en realidad la introducción a los tres ensayos que escribió en Leyden, a saber: *La Dioptrique* (Óptica), *Les Météores* (Meteorología) y *La Geometrie*, sin duda el más importante de los tres.

CAPÍTULO VII | Los sistemas cartográficos de Claudio Tolomeo

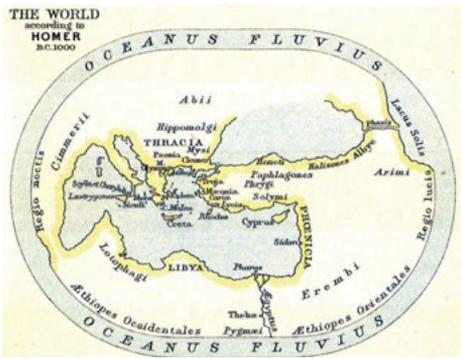


CAPÍTULO VII | Los sistemas cartográficos de Claudio Tolomeo

Entre las muchas manifestaciones artísticas de los hombres prehistóricos se conservan algunas, sin sentido aparente, y difíciles de encuadrar para los estudiosos que las analizan con criterios preconcebidos. En la historia de la cartografía se ha comprobado que tales imágenes no son más que representaciones ciertamente rudimentarias de los detalles geográficos con los que estaban familiarizados aquellos pobladores de la Tierra. No obstante, sus observaciones no se limitaban a su entorno inmediato, puesto que son diversos los ejemplos que se encuentran repartidos por el mundo y en los que pueden identificarse no solo el Sol y la Luna, sino también determinadas estrellas junto a alguna de las constelaciones en que las agrupaban. Mucho más familiarizados estamos ya con los sorprendentes avances, a ese respecto, de las civilizaciones asentadas en Egipto y Mesopotamia, en donde se manejaban planos, mapas y hasta cartas celestes; no debe olvidarse que a ellas se debe el establecimiento de las semanas y los avances astronómicos que les permitieron llegar a predecir los eclipses. El reconocimiento a las aportaciones de la antigüedad se hace más necesario todavía cuando se piensa en que no se sabe a ciencia cierta cuando se descubrieron los cinco Planetas clásicos: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno.

Herederos de ellas fueron los filósofos griegos, siendo ellos los que al parecer emprendieron por primera vez el estudio sistemático de la Tierra y trataron de dibujar la imagen del mundo habitado, el ecúmene. Tampoco es posible concretar cuándo aparecerían los primeros mapas, aunque es cierto que algunos de los relatos geográficos de los cronistas de aquella época, parece que fueron redactados teniendo a la vista una representación del territorio a que se estaban refiriendo. Se explica así que hayan proliferado luego bocetos cartográficos que pretendían reflejar el mundo de Homero o el de Heródoto. La creación de la Biblioteca de Alejandría fue el detonante para el desarrollo del conocimiento griego, basta pensar en todos los ilustres personajes que se formaron en tan señera institución¹. Fueron ellos los que acabaron conformando los primeros modelos del universo y de la Tierra, llegando a definir el par de coordenadas geográficas que permitiría localizar cualquier punto sobre la superficie de la misma; de igual periodo proceden los meridianos y los paralelos, cuyas imágenes han de aparecer dibujadas sobre cualquier mapa para que este merezca tal nombre.

¹ Entre los muchos que trabajaron en ella deben citarse los siguientes: Arquímedes, Euclides, Hiparco, Aristarco, Eratóstenes, Apolonio de Pérgamo, Herón de Alejandría y Claudio Tolomeo, el último sabio de la antigüedad.



Dos imágenes del ecúmene en tiempos de Homero (i) y de Herodoto (d). En el primero se observa la clara influencia del mapamundi babilónico, por la existencia del río amargo que envolvía el mundo. Los mapas fueron formados por el cartógrafo inglés William Hughes en 1867: *Map of the World According to the Ancients*.

El apogeo de las inquietudes cartográficas griegas se produjo en el segundo siglo de nuestra era, gracias a las aportaciones del polifacético Claudio Tolomeo. Su nombre es de obligada referencia en la Astronomía y en la Geografía, gracias a sus obras astronómicas y geográficas, escritas ambas hacia la mitad del siglo II. Aunque el título original de la más sobresaliente de las primeras fuese μαθηματικὴ σύνταξις (composición matemática), acabaría conociéndose con el nombre de Almagesto, una corrupción árabe de la palabra griega *megiste* (el más grande). Unos veinte años más tarde presentó Γεωγραφικὴ Ὑφήγησις (Manual de Geografía), recopilándose en él todo el saber grecorromano de su tiempo, más adelante se identificaría con los nombres de Geografía o de Cosmografía. Tanto con una como con otra obra, el sabio egipcio pretendió mostrar su competencia en ambas disciplinas². Como es de suponer, la influencia del Almagesto en el desarrollo cartográfico posterior fue casi testimonial, todo lo contrario de lo sucedido en el campo astronómico, al desarrollarse en él su modelo geocéntrico del universo y haberse difundido tan ampliamente mil años después merced a la primera versión latina de la misma, la que hizo el italiano Gerardo de Cremona en el siglo XII. La traducción al latín de su Geografía, la efectuó tres siglos después³, en 1406 o 1407, el también italiano Giacomo d'Angelo; mediatizando la producción cartográfica europea al hacer de puente entre las representaciones antiguas del mundo y las modernas. Es sabida la controversia existente a propósito de los supuestos mapas que ilustraron las múltiples versiones de la Geografía⁴, en el sentido de que pudiesen no haber sido dibujados por Tolomeo, aunque sea muy probable que hubiera dibujado algunos ya que en sus obras dio instrucciones para su confección y para la de los globos terrestres y celestes.

El imperio romano ya se había expandido cuando Tolomeo escribió sus obras, con lo que cabe pensar en que circulasen ciertas representaciones de los nuevos territorios conquistados. Se com-

² Hubo otras obras de Tolomeo en las que también abordó cuestiones relacionadas de una u otra manera con la geografía. En su *Analemma* efectuó el estudio de la gnomónica y de la proyección ortográfica. En el *Planisphaerium* analizó la proyección estereográfica. Incluso en su libro de astrología (El *tetrabiblos*), abordó también cuestiones geográficas. Las proyecciones ortográfica y estereográfica se integran en el grupo de las perspectivas, dependiendo su denominación de la posición del punto de vista: en la primera se encuentra en el infinito y en la segunda en la posición antípoda al punto de tangencia del plano del mapa.

³ Aunque no se editase hasta el año 1477 en Bolonia.

⁴ Incluso se afirma que Tolomeo se apoyó al escribirla en un supuesto atlas, ahora extraviado, que había escrito Marino de Tiro, otro cartógrafo ilustre al que nos referiremos a continuación.

prende por tanto que su intención fuese actualizar los mapas previos con las imágenes de los nuevos descubrimientos. En esa misma línea había actuado ya Marino de Tiro, un geógrafo contemporáneo en cuya información cartográfica se apoyaría tanto Tolomeo. No obstante, lo hizo con marcado sentido crítico y usando razones de peso, a pesar de que en ocasiones se mostrara más preocupado de cómo hacer el mapa que de su propio contenido. Tres fueron las cuestiones a las que debieron enfrentarse los cartógrafos de su época. La primera de ellas tenía que ver con el tamaño y con la posición del ecúmene sobre el globo terráqueo. Marino defendía indirectamente que la circunferencia de la Tierra tenía un perímetro de 180.000 estadios, al afirmar que el desarrollo lineal del grado equivalía a 500 estadios, dando por bueno el menor valor que supuestamente había deducido Posidonio en su medición de la misma; sin embargo fueron más los valores asignados por Marino de Tiro para concretar las dimensiones del mundo habitado. En efecto, la amplitud latitudinal del mismo la estimaba en 87° (es decir 43.500 estadios), suma de las dos latitudes extremas: los 63° de la isla de Tule⁵ y los 24° del promontorio de Prasum⁶; el ancho, o amplitud longitudinal, lo fijó en quince horas, es decir 225° o 90.000 estadios, medidos sobre el paralelo de Rodas⁷, con una latitud de 36°.

De acuerdo con tales medidas, el ecúmene de Marino de Tiro ocupaba más de la cuarta parte del globo terrestre, con la particularidad novedosa de que en el campo del mapa se tenía que representar también parte del hemisferio sur. Otro hecho singular que debe ser mencionado es la excesiva reducción de la masa oceánica entre los límites oriental y occidental del mundo habitado, una diferencia de longitudes de tan solo 135° o 54.000 estadios, siguiendo el paralelo de Rodas, cuando la separación por Tierra entre Hispania y China se suponía próxima a los 225° o 900.000 estadios. La diferencia parecía provenir de una mala transformación de Marino al convertir en estadios el número de días necesarios para trasladarse por tierra de un lugar a otro; es más, aseguraba Tolomeo que cuando suponía que eran muchos los estadios los reducía sin más de modo arbitrario.

La segunda desavenencia entre los dos cartógrafos se hizo patente al elegir el sistema cartográfico que habría de tenerse en cuenta al dibujar el mapa. Esa preocupación permanente de Tolomeo no la tenía Marino, como si no fuese consciente de las deformaciones



Claudio Tolomeo observando la Luna con un cuadrante astronómico, obsérvese además la esfera armilar. La ilustración procede de una versión italiana de su Geografía, publicada en Venecia (1574).

⁵ Supuesta isla escandinava

⁶ El extremo austral conocido de la costa oriental de África, sensiblemente coincidente con el Cabo Delgado, al Sur de Mozambique.

⁷ Sobre dicho paralelo se suponía que el desarrollo del grado era de tan solo 400 estadios.



El mundo habitado según Marino de Tyro. Mapa formado por Pascal-François-Joseph Gossellin e incluido en su obra *Recherches sur la géographie systématique et positive des anciens, pour servir de base à l'histoire de la géographie ancienne* (1795). En el pitipi se dibujaron dos escalas gráficas: una para las latitudes y otra para las longitudes, usando como unidad el estadio de 700 en el grado.

inherentes al proceso de representar en el plano una parte del globo. Como hicieron antes Eratóstenes y Estrabón, Marino se limitó a dibujar sobre un plano una cuadrícula rectangular en la que las imágenes de los meridianos y de los paralelos eran mutuamente perpendiculares, y separadas entre sí la misma distancia. En esa representación todos los paralelos tenían el mismo desarrollo que el de Rodas, un hecho severamente censurado por Tolomeo. Las consecuencias resultaban obvias: los desarrollos de los arcos en la imagen del ecuador resultaban menores de lo debido, al contrario de lo que pasaría en el paralelo más septentrional⁸.

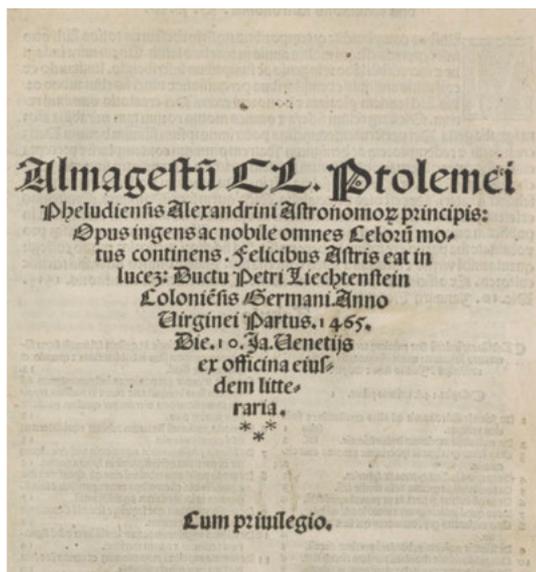
El tercer inconveniente que presentaban los mapas de Tiro estaba asociado a la compilación inadecuada de la información heterogénea proporcionada por diversas fuentes. De hecho, Tolomeo descubrió que algunos de sus comentarios sobre los territorios representados no eran acordes con sus imágenes cartográficas; Marino incurrió por lo visto en una práctica que seguiría vigente en los siglos venideros: cuando los cartógrafos incorporaban aleatoriamente la información relativa a las sucesivas ampliaciones del horizonte geográfico. Consiguientemente se comprende que Tolomeo decidiera finalmente rechazar la producción cartográfica de su contemporáneo, al considerar que las imágenes que se proporcionaban no resultaban coherentes ni prácticas; incluso llegó a detallar casos en los que solo corregía las latitudes, mientras que en otros solo rectificaba las longitudes, imposibilitándose así la localización de lugares cuyas coordenadas resultaran fiables.

La mejor herencia cartográfica proporcionada por Claudio Tolomeo fueron sus repetidas instrucciones para la formación de los mapas, aunque no olvidase la conveniencia de proporcionar a la

⁸ La relación entre los desarrollos de los arcos de diferentes paralelos coincide con la existente entre los cosenos de sus latitudes. Eso explica que el desarrollo del arco, de una cierta amplitud longitudinal, sea la mitad en el paralelo 60 que en el ecuador.

vez el armazón correspondiente: un listado con las coordenadas geográficas de las ciudades más relevantes del mundo habitado. Aunque se mencionasen al comienzo el *Almagesto* y la *Geografía* como obras independientes, en realidad pueden considerarse complementarias al contemplarlas bajo el prisma cartográfico: en el primero se detalló la construcción de globos celestes y en la segunda la de los globos terrestres, incluyendo en esta los pormenores de la representación plana de una parte de ellos. La base conceptual de Tolomeo la adquirió gracias a las continuadas observaciones astronómicas que efectuó durante los años que permaneció en el complejo de la Biblioteca de Alejandría. Fue allí donde pensaría en preparar un tratado, con fines didácticos, en el que se explicaran con claridad los elementos geométricos de la esfera celeste, los movimientos de los astros y de la propia esfera, en su relación con la Tierra. Como paso previo a la construcción del globo celeste, se vio obligado a preparar un catálogo estelar en el que figurasen todas aquellas que deberían ser localizadas sobre el mismo, por medio del correspondiente par de coordenadas astronómicas⁹.

A Tolomeo no deja de perseguirle la polémica, pues se afirma en ocasiones que su catálogo estelar no fue más que una copia del previamente efectuado por Hiparco, aunque pretendiese actualizarlo al corregir las coordenadas de las estrellas por los efectos de la precesión equinoccial dado el tiempo transcurrido. Lo que si es del todo evidente es que al menos ejerció una clara influencia, llegando a posicionar las estrellas de igual modo que había hecho Hiparco: como si estuviesen

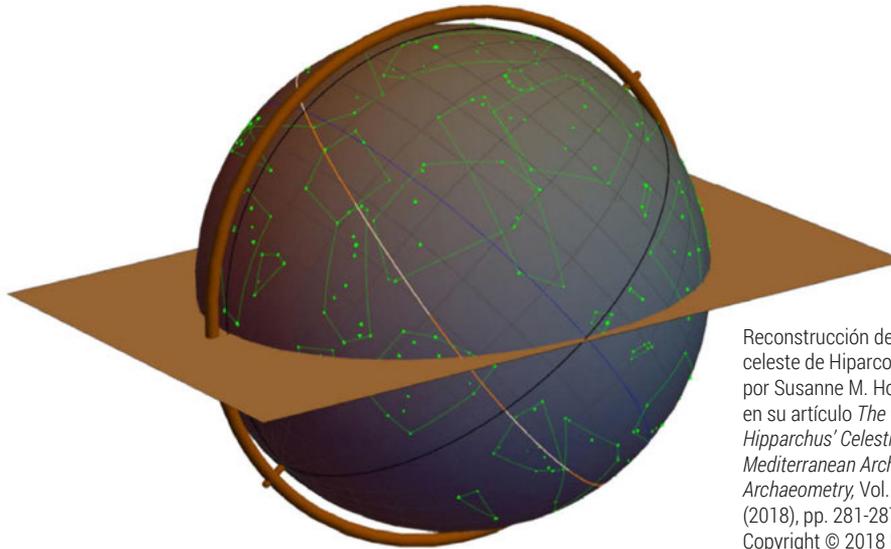


Grabado de Claudio Tolomeo, realizado por Tobias Stimmer en 1587, junto a la portada del *Almagesto* impreso por Petri Liechtenstein (Venecia. 1465).

⁹ Tolomeo eligió las elípticas: longitud y latitud eclípticas. La longitud de una estrella es la distancia angular entre el punto Aries (equinoccio de primavera) y el meridiano eclíptico de la estrella (círculo máximo de la esfera celeste que es su intersección con el plano formado por la estrella y el eje polar de la eclíptica), medida en sentido directo y sobre la eclíptica. La latitud estelar es también otra distancia angular, la existente entre la estrella y el plano de la eclíptica, medida sobre dicho meridiano. De sus definiciones se desprende que $0^\circ \leq \lambda \leq 360^\circ$ y que $0^\circ \leq |\beta| \leq 90^\circ$. Este par de coordenadas, asimismo independientes del lugar y del tiempo (obviando la precesión equinoccial), no es medible, de modo que solo podrá obtenerse a partir de cualquiera de los anteriormente comentados.

fijadas a la superficie cóncava de la esfera celeste, la que veía el observador localizado en el centro de la misma. Todas las estrellas las agrupó Tolomeo en constelaciones, del siguiente modo: 12 sobre la banda zodiacal, 21 al norte y 15 al sur de la misma. Esas 48 constelaciones contenían un total de 1022 estrellas, figurando todas ellas en el catálogo. Las coordenadas elegidas para su localización fueron las eclípticas, como ya quedó dicho, puesto que de ese modo resultaba más fácil su corrección por la precesión. En efecto, como la latitud eclíptica permanecía invariable, únicamente se tendría que modificar la longitud, sumándole la cantidad alícuota correspondiente, a razón de unos 50 segundos de arco por año transcurrido¹⁰, desde la confección del catálogo a la fecha de la consulta.

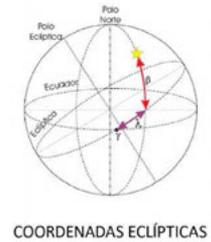
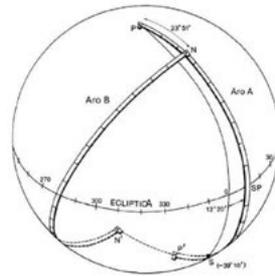
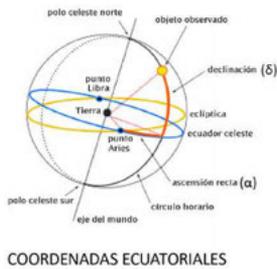
Tolomeo alteró en casos puntuales la posición de ciertas estrellas dentro de la constelación a la que pertenecía, según los astrónomos que le precedieron. Él mismo puso el ejemplo de la alteración que introdujo en la constelación zodiacal de Virgo: las estrellas que Hiparco había situado sobre la espalda de Virgo él las colocó a los lados. Los nombres de las estrellas tampoco se correspondían del todo con los recogidos en el catálogo de Hiparco, aunque permaneciese inalterable su posición relativa sobre el globo celeste. Una vez elegidas las estrellas que habían de situarse sobre la esfera, procedía describir como se tendría que construir. Así se hizo, con todo lujo de detalles en el capítulo tercero del libro octavo del *Almagesto*¹¹, bajo el epígrafe *Sobre la construcción de un Globo Sólido*. Tolomeo aconsejaba que fuese un globo oscuro para simbolizar mejor el cielo



Reconstrucción del globo celeste de Hiparco, incluida por Susanne M. Hoffmann en su artículo *The Genesis of Hipparchus' Celestial Globe. Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, Vol. 18, No 4, (2018), pp. 281-287. Copyright © 2018 MAA.

¹⁰ Tolomeo se confundió al aplicar la corrección pues supuso que era de un grado cada cien años, cuando debería de haber sido cada 72 años.

¹¹ El *Almagesto* constaba de los trece libros siguientes: 1) *Naturaleza del Universo. Teoría Trigonométrica*; 2) *Aspectos de la Astronomía Esférica. Latitudes Terrestres*; 3) *Teoría de la Luna*; 4) *Teoría de la Luna*; 5) *Teoría Avanzada de la Luna. Paralajes Lunares y Solares*; 6) *Teoría de los Eclipses*; 7) *Tratado de las Estrellas Fijas. Catálogo del Hemisferio Norte*; 8) *Catálogo del Hemisferio Sur. Construcción de un Globo*; 9) *Hipótesis de los Planetas. Longitudes de Mercurio*; 10) *Longitudes de Venus y de Marte*; 11) *Longitudes de Júpiter y de Saturno*; 12) *Movimientos Retrogrados y Elongaciones de Venus y Mercurio*; 13) *Latitudes Planetarias y Otros Fenómenos (Visibilidades)*.



$$\tan \lambda = (\tan \delta \operatorname{sen} \epsilon / \cos \alpha) + \cos \epsilon \tan \alpha \text{ y } \operatorname{sen} \beta = \operatorname{sen} \delta \operatorname{cose} - \operatorname{cos} \delta \operatorname{sene} \operatorname{sen} \alpha$$

$$\operatorname{sen} \delta = \operatorname{sen} \beta \operatorname{cose} + \operatorname{cos} \beta \operatorname{sene} \operatorname{sen} \lambda \text{ y } \tan \alpha = (-\tan \beta \operatorname{sene} / \cos \lambda) + \cos \epsilon \tan \lambda$$

Esquema del globo celeste de Tolomeo: El aro A, sobre el eje PP', se fija en el punto solsticial, 12° 20' al este del círculo horario de Sirio (representa su posición en el primer año del principado de Antonino Pío, el año 137 de nuestra era). Las coordenadas ecuatoriales de las estrellas pueden transformarse mecánicamente en eclípticas, por medio del aro B que gira alrededor del eje NN', cuya separación angular del eje PP' es de 23° 51', eso es la oblicuidad de la eclíptica. Figura incluida por Otto Neugebauer en su obra: *A History of Ancient Mathematical Astronomy* (New York: Springer-Verlag, 1975). Se incluyen también las relaciones trigonométricas que relacionan las coordenadas ecuatoriales (α , δ) con las coordenadas eclípticas (λ , β).

nocturno sobre el que brillan las estrellas¹². Sobre él se deberían elegir dos puntos diametralmente opuestos, símbolos de los polos eclípticos. Se le incorporarían además dos círculos máximos mutuamente perpendiculares, debiendo pasar uno de ellos por los polos anteriores y representando el otro la línea central de la banda zodiacal, esto es la eclíptica. Una de sus intersecciones serviría como origen de las longitudes eclípticas, cuyo valor estaría comprendido entre 0° y 360°.

Los aspectos prácticos también se comentaron en las instrucciones de Tolomeo, señalando la necesidad de adosar al globo dos semicírculos graduados para que facilitasen la transformación recíproca de las coordenadas eclípticas en coordenadas ecuatoriales. En ellas se indicaba la conveniencia de que las imágenes estelares fuesen materializadas mediante puntos amarillos, aunque se contemplara asimismo la posibilidad de usar otros que simbolizasen el brillo o la magnitud de cada una de las estrellas. Por otro lado se recomendaba que las figuras de las constelaciones fuesen dibujadas de manera esquemática, teniendo presente que en ningún caso deberían llegar a ocultar las imágenes puntuales de las estrellas¹³.

¹² He aquí el párrafo en cuestión una de las versiones españolas del Almagesto (la del argentino Fernando de Gorocica): *Hacemos [(pintamos)] un poco oscuro el color del globo en cuestión, de manera que se parezca, no a las horas de día, sino más bien al cielo nocturno, en el que aparecen actualmente las estrellas. Tomamos sobre él dos puntos precisamente opuestos diametralmente, y con esos como polos dibujamos un gran círculo: este en todo momento estará en el plano de la Eclíptica. Dibujamos otro [gran] círculo a ángulos rectos a este último y a través de sus polos, y comenzamos desde una de las intersecciones de este con el primer círculo dividiendo la Eclíptica dentro de los 360 grados [convencionales], y escribimos sobre ella [la Eclíptica] los números a intervalos de tantos grados como parezca conveniente.*

¹³ *En cuanto a las configuraciones de las formas individuales de las constelaciones, las hacemos tan simples como sea posible, conectando las estrellas solamente con [unas] líneas dentro de la misma figura, que además no deberían ser muy diferentes en color [con respecto] al fondo general del globo. El propósito de esto es, [por un lado], no perder las ventajas de esta clase de descripción pictórica, y [por el otro lado] no destruir la semejanza de la imagen con la original aplicando una variedad de colores, sino más bien hacerlo más fácil para que nosotros [podamos] recordar y comparar cuando comencemos actualmente a examinar [el cielo estrellado], dado que también estaremos acostumbrados a la apariencia sin adornos de las estrellas en sus representaciones en el globo.*

El globo de Tolomeo pretendía ser un instrumento útil para la astronomía observacional, mucho más que otros de los globos que le precedieron¹⁴; en tanto que en aquellos las figuras de las constelaciones prevalecían sobre las imágenes de las propias estrellas. Tolomeo en cambio pretendía hacer con el suyo mayor énfasis en la adecuada localización de la estrella que en la de la constelación a la que pertenecía. Puede afirmarse que en ese aspecto se adelantó a su tiempo, al procurar que primase el uso del par de coordenadas que figuraba en su catálogo.

Los climas ideados por los filósofos griegos fueron descritos también en el Almagesto, concretamente en su libro II, fijando los valores de las latitudes correspondientes a los paralelos que los limitaban y calculando la duración del día más largo del año para su zona central. Tolomeo se basó de nuevo en los trabajos previos de Hiparco, aunque modificase la separación entre tales paralelos fijada por este en un grado. Ciertamente, como para Tolomeo era prioritario hallar la duración del día del solsticio de verano, la separación variable entre paralelos vino impuesta por esa circunstancia: de modo que al pasar de un clima a otro la diferencia entre las duraciones de ese día fuesen bien de un cuarto de hora, de media hora e incluso de una hora. Por consiguiente la amplitud latitudinal de cada clima forzosamente tendría que ser diferente. Tolomeo identificó 33 paralelos entre el ecuador y el polo, comenzando con aquel en donde el día más largo duraba 12^h 15^m y la latitud de su paralelo superior era de 4° 15', finalizando en el borde inferior del círculo polar ártico, que tenía una latitud aproximada de 66° 10' y en donde el día más largo duraba 24^h. Más allá de ese paralelo refería aquellos otros en donde podía haber días con duraciones comprendidas entre uno y seis meses, dándose esa última posibilidad en el mismo polo. Cada clima recibía la denominación de la ciudad más relevante localizada dentro de esa zona esférica.

No obstante, en otros libros del Almagesto que contenían tablas astronómicas el número de climas propuesto por Tolomeo se redujo, con el fin de simplificar la confección de las mismas. Así sucedió por ejemplo en el capítulo VIII del libro II, donde solo consideró 11 climas, desde el del ecuador (12^h) hasta el del río Tanais¹⁵ (17^h), a intervalos regulares de media hora para la duración del día más largo del año; poco más adelante, los redujo a solo siete en el capítulo XII, siendo representados en igual número en la mayoría de los mapamundi con que se ilustraron las múltiples versiones de su Geografía.



Los climas en el extremo más occidental de sendas imágenes del ecúmene (siglo xv), la de la izquierda es una versión griega y la de la derecha latina. Obsérvese que el número de climas cambia de una a otra.

¹⁴ El llamado Atlas Farnesio por ejemplo, conservado en el Museo Arqueológico Nacional de Nápoles.

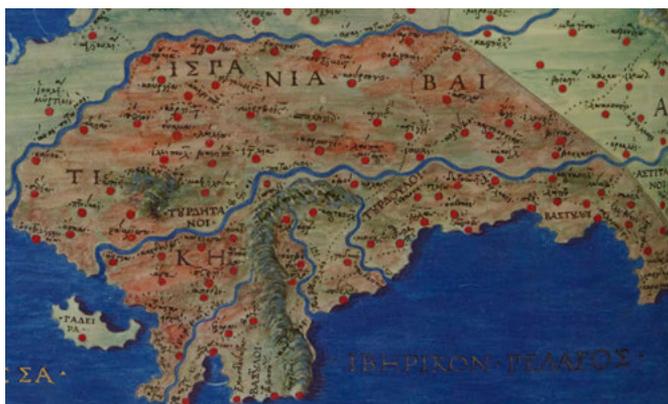
¹⁵ Actual río Don, el cual fluye desde la Rusia central al mar de Azov.

ALMAGESTO DE CLAUDIO TOLOMEO	
DENOMINACIÓN DE LOS SIETE CLIMAS	DURACIÓN DEL DÍA MÁS LARGO DEL AÑO
MEROE	13 ^h
SIENA	13 ^h 30 ^m
BAJO EGIPTO	14 ^h
RODAS	14 ^h 30 ^m
HELESPONTO (Los Dardanelos)	15 ^h
MAR NEGRO (Zona central)	15 ^h 30 ^m
RIO BORÍSTENES (Dniéper)	16 ^h

Al final del *Almagesto* anunció Tolomeo su intención de publicar en un futuro su *Geographike Hyphegesis*, que realmente resultó ser el primer tratado de cartografía matemática (usando el lenguaje actual). Previamente había indicado la necesidad de fijar la posición de las ciudades más importantes del ecúmene, mediante la latitud y longitud de cada una de ellas, con objeto de po-



Encabezamiento de un manuscrito griego de la Geografía de Tolomeo (Siglo xvi). Una alegoría de la interconexión entre la astronomía, la geodesia y la cartografía. Perteneció a Enrique II, rey de Francia, y se conserva en la Biblioteca Nacional de aquel país. Llama la atención, aparte de la figura de Tolomeo observando las constelaciones de las osas y sosteniendo en su mano izquierda un compás y un cuadrante astronómico, el cartógrafo con traje de la época midiendo sobre el globo terrestre reticulado con sus meridianos y paralelos. Se aprecian los continentes europeo, africano y asiático, e incluso parte del americano.



Detalle de la Bética en uno de los mapas de la Península Ibérica que incorporaba la Geografía de Tolomeo. Obsérvese que el trazado de los dos ríos, que discurren en sentido longitudinal, no se corresponde con la realidad, ya que desembocando en el Océano Atlántico se sitúa su cabecera en la cuenca mediterránea.

der efectuar en ellas los cálculos astronómicos correspondientes¹⁶: *sin embargo, la discusión de esas cuestiones serán objeto de un tratado geográfico que expondremos... donde incluiremos un listado con la posición de cada una de las ciudades, añadiendo la distancia angular de sus meridianos al meridiano de Alejandría, al este o al oeste, medida sobre el ecuador, dicho meridiano será el origen con relación al cual fijaremos la hora en que se efectúen las observaciones de los cuerpos celestes*¹⁷.

Tolomeo era plenamente consciente de la escasa fiabilidad de gran parte de la información geográfica con que contaba. Así se desprende de los títulos que dio a algunos de los capítulos del libro primero de su Geografía, sirvan de ejemplo los siguientes: 1) *los datos cuidadosamente observados deben ser preferibles a los referidos por los viajeros*, 2) *necesidad de corregir las distancias itinerarias obtenidas a partir de los días empleados en recorrerlas por tierra o por mar*. Sus temores resultaron muy ciertos entonces y después, puesto que fueron muchos los cartógrafos, de gran reputación, que no contrastaron la fiabilidad geométrica de los datos geográficos y cometieron por ello múltiples errores groseros, los cuales llegan a desvirtuar a los mapas que los contienen¹⁸; ha de pensarse que muchos de los cartógrafos confeccionaban sus representaciones del territorio sin disponer de información complementaria, proporcionada por quien lo hubiese visitado o lo conociese más que ellos.

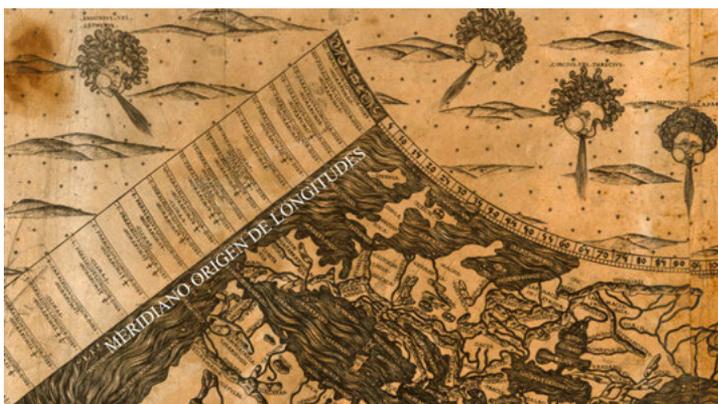
El contenido de la Geografía se expuso en ocho libros, dedicándose el primero a la presentación de la obra, a la crítica de las aportaciones de Marino de Tiro y al modo en que se podría obtener la representación plana de una porción del globo terráqueo. Para ello, se dividió ese primer libro en XXIV capítulos, siendo los cuatro últimos esencialmente cartográficos: XXI) *Qué se debe hacer cuando se quiere representar la Tierra en un plano*, XXII) *Como debe de mostrarse el mundo habitado sobre la esfera*, XXIII) *Explicación de los meridianos y paralelos en nuestra representación*, XXIV) *Como debe de mostrarse el mundo habitado en el plano del mapa para que sus medidas sean acordes con la forma esférica de la Tierra*¹⁹.

¹⁶ Hallar la duración del día más largo del año solo era uno de los posibles.

¹⁷ Traducción parcial y libre de un párrafo incluido por Gerald James Toomer en su libro *Ptolemy's Almagest*. Princeton University Press. 1984

¹⁸ No ha de olvidarse que el representar el continente euroasiático con una longitud excesiva influiría para que Colón realizase su viaje y creyera haber alcanzado la meta a la que pretendía llegar.

¹⁹ Los epígrafes son la versión española de la primera traducción al inglés de la Geografía, la realizada por Edward Luther Stevenson en el año 1932 y luego reeditada por Dover en 1991.



El meridiano de longitudes en la Geografía de Tolomeo. Obsérvese que el extremo más septentrional de esta imagen, justo bajo los soplores, aparece dividido de cinco en cinco grados para facilitar la localización de los diferentes meridianos. Fragmento del mapa del ecúmene grabado en Bolonia (1477) por Tadio Crivelli.

Los cinco libros siguientes proporcionan básicamente las coordenadas geográficas de diferentes lugares del ecúmene, aunque en parte del séptimo se continuaran sus lecciones de cartografía para representar el mundo habitado, deteniéndose antes en la descripción de la esfera armilar. Finalmente, en el libro octavo se hizo un detallado comentario de los mapas regionales que luego ilustrarían la geografía, señalando la duración de los días más largos del año, completando la información con los valiosos datos marginales referidos a la situación de los paralelos y de los climas. Una de las novedades más singulares que aportó esta obra fue el cambio del meridiano origen de las longitudes con relación al que se había usado en el *Almagesto*, ya que el de Alejandría fue sustituido por el de las islas Canarias²⁰.

Antes de representar el ecúmene sobre una esfera o sobre la superficie plana del futuro mapa, se necesitaban saber sus dimensiones, tanto en el sentido de los meridianos (latitudinal) como en el de los paralelos (longitudinal); solo así podría calcularse la escala del dibujo y acotarse en función de ella el campo de la imagen. Otra vez se apoyó Tolomeo en los trabajos cartográficos de Marino de Tiro, aunque los modificase de forma un tanto arbitraria. En primer lugar disminuyó la amplitud latitudinal, eliminando el paralelo más meridional del hemisferio sur para sustituirlo por otro simétrico del de Meroe, con una latitud de $16^{\circ} 25'$, esto es a unos 8200 estadios del ecuador. En cambio sí mantuvo el paralelo de la isla de Tule, con lo cual la dimensión del mundo habitado en esa dirección resultó ser de $79^{\circ} 25'$, alrededor de 40000 estadios²¹. La dimensión longitudinal fue asimismo reducida, pasando de los 225° (15^h) a los 180° (12^h), desde las Islas Afortunadas, en el extremo más occidental hasta la mítica ciudad de Catigara, en el límite más oriental. Se deduce por lo tanto que Tolomeo fijó el ancho del mundo habitado en 72000 estadios, medidos sobre el paralelo de Rodas²², concretando que la separación entre tales islas y el río Éufrates era de 72° , equivalentes a 28800 estadios, cifrando en $105^{\circ} 15'$, o 42100 estadios, la existente entre este y Catigara. Ateniéndose a tales cifras ha de concluirse que Tolomeo hizo suyas las cifras dadas por Posidonio, suponiendo que el mundo habitado ocupaba la mitad del hemisferio norte, 180° de longitud; con la novedad de que lo extendía en latitud por debajo del ecuador, ocupando una franja considerable del hemisferio sur.

²⁰ Llamadas por él afortunadas.

²¹ Teniendo en cuenta que Tolomeo si respetó el valor de 180000 estadios para la circunferencia máxima de la Tierra, a razón de 500 estadios por grado.

²² Recuérdese que el desarrollo del grado sobre ese paralelo es de 400 estadios.



Copia bizantina (1420) del mundo de Claudio Tolomeo. El mapa se dibujó de acuerdo con el segundo sistema cartográfico que propuso, obsérvense las imágenes rectilíneas de los meridianos en el extremo noreste del mismo.

Parece incuestionable que Tolomeo sentó las bases de la cartografía matemática cuando decidió estudiar la posibilidad de hacer mapas del mundo habitado y comprendió que, en la medida de lo posible, había que tratar de mantener las propiedades geométricas de la esfera en su representación plana. Suyas fueron las siguientes reflexiones acerca de las posibles representaciones del ecúmene. Según él resultaba obvio que cuando se pretendiera hacerlo sobre una esfera, sería más factible conseguirlo sin efectuar modificación alguna, aunque se plantearía de inmediato un problema prácticamente irresoluble: cuando se quisiera construir una, a escala tal que se apreciaran los detalles topográficos, su diámetro la haría totalmente inmanejable. Mucho más asequible sería la representación del ecúmene sobre un plano, pues es evidente que el mapa sería manejable, al contrario que la esfera, aunque al pasar del globo terráqueo al plano del mapa aparecerían una serie de errores ineludibles como consecuencia de que esta no es una

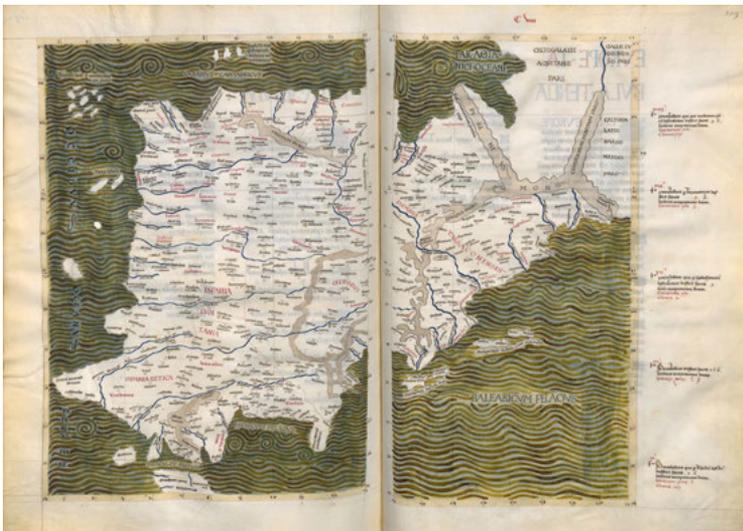


Tolomeo en un detalle del planisferio septentrional dibujado por Albrecht Dürer a comienzos del siglo xvi.

superficie desarrollable; no obstante siempre se podría aminorar la magnitud de tales errores modificando algunas de las propiedades geométricas del mapa, siguiendo el protocolo marcado por el sistema cartográfico elegido.

En las copias manuscritas, o ediciones, de la Geografía de Tolomeo se solía incluir una explicación pormenorizada de los cuatro sistemas cartográficos que propuso para representar el mundo habitado, por medio de un mapa global y de una amplia serie de mapas regionales. El primero de los sistemas fue una modificación del que había ideado Marino de Tiro, en el que las imágenes de los meridianos y de los paralelos eran segmentos rectilíneos mutuamente perpendiculares. El segundo fue un sistema en el que los meridianos se representarían por rectas convergentes y los paralelos por medio de arcos circulares concéntricos. En el tercero, las imágenes de los meridianos serían curvas convergentes y la de los paralelos arcos circulares. El cuarto fue verdaderamente singular, puesto que ofrecería la imagen del ecúmene sobre una esfera vista por un observador alejado de la misma. El estudio de tales sistemas es un tanto complicado, ya que fueron modificados durante el Renacimiento. Suelen conocerse con el nombre de proyecciones, aunque no se realice para su formación proyección alguna; es como si la denominación hubiese sido debida a alguien sin los conocimientos geométricos necesarios. Johannes Keuning²³ lo aclaró aún más cuando afirmó que tales sistemas eran calificados frecuentemente como proyecciones cónicas aunque no lo fuesen, añadiendo que en la época en que se propusieron todavía no se habían ideado las proyecciones sobre un cono o sobre un cilindro.

En el primer sistema, las imágenes de los meridianos y de los paralelos formaban una malla rectangular, en la que se suponía constante la escala del mapa sobre los meridianos y a lo largo del paralelo de Rodas ($\varphi \approx 36^\circ$), el central de la representación. Tolomeo alteró ligeramente el valor del desarrollo del grado sobre dicho paralelo, para que la proporción entre él y su homólogo



La Hispania Romana, representada usando el primer sistema cartográfico de Claudio Tolomeo. Mapa incluido en la versión latina de su Geografía, realizada por Jacobus Angelus en 1406. Perteneció al rey francés Charles X. La presente imagen se estampó en la edición del año 1485.

²³ *The History of Geographical Map Projections until 1600. Imago Mundi* (Vol. 12 (1955), pp. 1-24). Así fue reseñado en el primer volumen de la colección *THE HISTORY OF CARTOGRAPHY* (1987), concretamente en su capítulo XI (*The Culmination of Greek Cartography in Ptolemy*) redactado por Oswald Ashton Wentworth Dilke e incluyendo aportaciones de los editores científicos John Brian Harley y David Woodward. Sin ese capítulo XI no hubiera sido factible el presente trabajo.

sobre el meridiano, o sobre el ecuador, fuese de $93/115$, un valor prácticamente coincidente con el coseno de su latitud. Este primer sistema fue ampliamente usado para algunos de los mapas regionales que iluminaron la Geografía. Sin embargo, Tolomeo lo consideró inapropiado para la representación global, entendiendo, con razón, que si varios paralelos tenían idéntico desarrollo lineal se alteraría sustancialmente la geometría de la imagen ecuménica, pues al separarse del paralelo central las deformaciones podrían alcanzar valores intolerables.

El segundo sistema cartográfico fue ideado por Tolomeo con la intención de superar al anterior, con la particularidad de representar los meridianos como rectas radiales que convergerían en el centro de los paralelos, ya que sus imágenes serían arcos concéntricos. Ese sistema es el que fue empleado para formar el mapa del ecúmene en los manuscritos más recientes de la Geografía. Su principal ventaja sobre el anterior fue mantener la proporción entre el desarrollo del grado en los paralelos y el correspondiente del ecuador en todo el campo del mapa: aunque solo lo asegurase de manera efectiva para los de Rodas, el central del sistema, y el de la isla de Tule. Tolomeo justificaba su decisión en los términos siguientes: *al ser imposible mantener la proporción que guardan los paralelos en la esfera, bastará hacerlo para el paralelo de Tule y la equinoccial, con el fin de que así se conserve en lo posible el mismo valor de la escala en todo el mapa; la relevancia del paralelo de Rodas sigue manteniéndose, pues son muchas las distancias a él referidas, habiéndolo dibujado de manera que se siga cumpliendo su relación de $4/5$ con las distancias homólogas medidas sobre el ecuador.*

El dibujo del mapa propiamente dicho se apoyaba en el trazado previo de un marco rectangular, siendo su lado vertical la mitad que el horizontal, cuyas dimensiones serían sensiblemente coincidentes con las amplitudes latitudinal y longitudinal del ecúmene. Seguidamente se trazarían por su centro dos rectas perpendiculares a sus lados, representando una de ellas el meridiano medio del mapa y siendo la otra tangente a la imagen del paralelo de Rodas. El centro de las imágenes de los paralelos se situaría fuera del rectángulo y sobre la imagen de ese meridiano medio. Los valores de los radios correspondientes a los paralelos más singulares del mapa son obligados, al depender de las latitudes de cada uno de ellos y del hecho de que el paralelo del hemisferio sur, simétrico al de Meroe, debiera ser tangente al lado más meridional del rectángulo. El dibujo de los meridianos en el mapa²⁴ se podría efectuar a partir del medio, una vez dividido el arco del paralelo de Rodas en 36 partes, para que la separación entre sus imágenes fuese de 5° , lo que equivalía a decir que la diferencia de longitudes entre dos meridianos consecutivos sería de 20^m . La parte del mapa situada al sur del ecuador llegaría hasta la latitud de $16^\circ 25'$, correspondiente al paralelo simétrico al de Meroe, localizándose antes de alcanzarlo el paralelo de Catigara, a una latitud de $8^\circ 25'$ sur, esto es a media hora del ecuador²⁵.

Tolomeo explicaba luego como se tendría que ir dibujando el mapa punto a punto, teniendo en cuenta las coordenadas geográficas de cada uno de ellos. Previamente había graduado también la equinoccial con las longitudes, de modo que colocando una regla (también graduada con las la-

²⁴ Es cierto que el dibujo de ese abanico de meridianos recuerda al que caracteriza a los desarrollos cónicos y directos utilizados en los sistemas cartográficos modernos. En ellos se utiliza como superficie auxiliar un cono de revolución tangente a lo largo de un cierto paralelo y se considera que las generatrices son las intersecciones del mismo con los planos de los meridianos terrestres. El plano del mapa coincidiría después con el de la superficie del cono una vez desarrollado, sobre él se trazarían arcos circulares centrados en el vértice para simbolizar las imágenes de los paralelos. El radio del paralelo de tangencia en el plano del mapa sería el producto del radio de la esfera y de la cotangente de la latitud que lo identifica. La constante del cono, o amplitud angular del sector circular del mapa, sería igual a $360^\circ \text{sen } \varphi$.

²⁵ Recuérdese a ese respecto lo ya comentado a propósito de la duración del día en el solsticio de verano, el más largo del año.

PARALELO	LONGITUD DEL DÍA MÁS LARGO DEL AÑO	LATITUD
NORTE DEL ECUADOR		
1	12 hr 15 min	4°15'N
2	12 hr 30 min	8°25'N
3	12 hr 45 min	12°30'N
4 Meroe	13 hr	16°25'N
5	13 hr 15 min	20°15'N
6 Siena	13 hr 30 min	23°50'N
7	13 hr 45 min	27°10'N
8	14 hr	30°20'N
9	14 hr 15 min	33°20'N
10 Rodas	14 hr 30 min	36°N
11	14 hr 45 min	38°35'N
12	15 hr	40°55'N
13	15 hr 15 min	43°05'N
14	15 hr 30 min	45°N
15	16 hr	48°30'N
16	16 hr 30 min	51°30'N
17	17 hr	54°N
18	17 hr 30 min	56°10'N
19	18 hr	58°N
20	18 hr 30 min	61°N
21 Tule	19 hr	63°N
SUR DEL ECUADOR		
Rhapta	12 hr 30 min	8°25'S
Meroe	13 hr	16°25'S



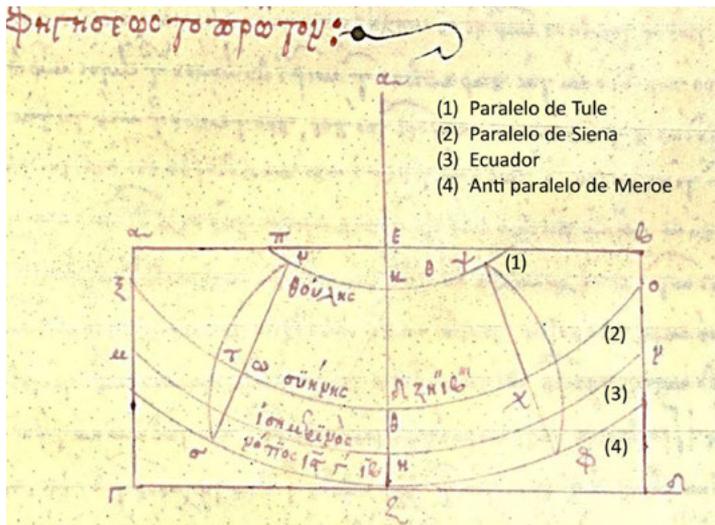
Cuadro con los paralelos más señalados del ecúmene, indicándose en cada caso la duración del día más largo. Figura también un esquema del segundo sistema cartográfico ideado por Claudio Tolomeo, que ilustró la versión latina de su Geografía efectuada por Jacobus Angelus.

titudes) sobre la división correspondiente a una longitud dada y en la dirección de los meridianos, se podrían situar fácilmente los lugares o detalles topográficos sobre el mapa, en una posición análoga a la que tuviesen sobre la esfera terrestre. Unas instrucciones tan prolijas permiten pensar que Tolomeo las hubiese aplicado al formar algún mapa, independientemente de que confeccionase o no los mapas que solían ir acompañando a su Geografía.

Tolomeo continuó con sus investigaciones y propuso un nuevo sistema cartográfico, que pretendía mejorar los resultados obtenidos con el que se acaba de referir. La principal novedad que



Imagen del mundo habitado, usando el segundo sistema cartográfico de Tolomeo. El mapa ilumina la Traducción latina de la Geografía efectuada por Jacobus Angelus. Se conserva en la *Bibliothèque Nationale de France*.



Esquema del tercer sistema cartográfico de Tolomeo. El punto a es el centro de las imágenes de los paralelos. Ilustración de un manuscrito griego del siglo XVI.

introdujo fue la eliminación de los ángulos agudos que formaban las imágenes de los meridianos con la del ecuador, aunque también procurase mejorar las proporciones entre las distancias medidas sobre los paralelos y sobre el ecuador. Manteniendo el mismo marco rectangular, ideó una retícula curvilínea de meridianos y paralelos, más parecida a la que formaban sobre la superficie terrestre, en la que las imágenes de los primeros serían perpendiculares a la línea equinoccial. El paralelo central del mapa sería ahora el de Siena, con una latitud de $23^{\circ} 50'$, casi equidistante entre el de Tule ($\varphi \approx 63^{\circ}$) y el anti paralelo de Meroe ($\varphi \approx 16^{\circ} 25'$ sur); esto es, sensiblemente coincidente con el Trópico de Cáncer.

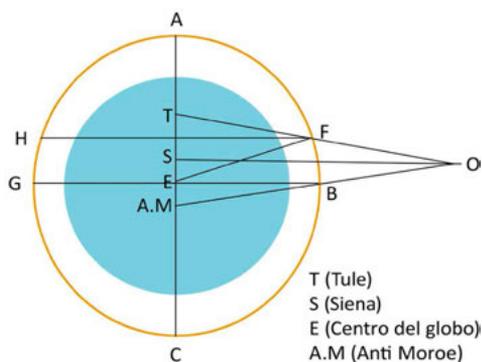
Acto seguido recomendaba Tolomeo que a partir del centro, localizado en la perpendicular al lado mayor del rectángulo, se dibujasen primeramente los tres arcos de circunferencia correspondientes a los tres paralelos citados: Tule, Siena y el más meridional simétrico del de Meroe, con relación al ecuador; las proporciones respectivas serían las siguientes: ecuador (5), Tule (2.25), Siena (4.35), siendo 4.4 la elegida para el anti paralelo de Meroe. Se dibujarían después treinta y seis meridianos, también como arcos circulares, dieciocho a cada lado del meridiano medio, el cual contenía al centro de los arcos de paralelo ya trazados; la separación entre las imágenes de dos meridianos consecutivos sería naturalmente de cinco grados, equivalentes a 20^m de tiempo. Siglos después se constataría la imposibilidad de que las imágenes de los meridianos fuesen arcos circulares si los paralelos conservaban en el mapa los desarrollos reales sobre la esfera.

Al finalizar este apartado de las instrucciones cartográficas, se incluyó una nota en la que Tolomeo se mostraba convencido de que con este sistema se mejorarían las prestaciones geométricas de los anteriores, aunque estuviese igualmente convencido de la dificultad que entrañaría el dibujo del mapa en esta ocasión. Se entiende así que este nuevo sistema tardase en ser usado para representar el ecúmene. Uno de los primeros ejemplares que se conservan es el que figura en la versión toscana de la Geografía efectuada por el italiano Francesco Berlinghieri (*Firenze*. 1480). Pocos años después haría lo propio el alemán Heinrich Hammer con su mapamundi de 1489, una versión actualizada del ecúmene que incluyó la totalidad del continente africano. Por otro lado, Johannes Werner analizaría con detalle dicho sistema en la traducción que realizó del primer libro de la Geografía de Tolomeo, en el año de 1514.



Representación del ecúmene, de acuerdo con el tercer sistema cartográfico de Tolomeo, incluida en la versión italiana de la Geografía de Tolomeo efectuada por Francesco Berlinghieri. Firenze (1480). *Accademia della Crusca. Firenze.*

El cuarto sistema fue ideado por Tolomeo para construir una representación globular del ecúmene sobre una esfera concéntrica con otra armilar y con menor diámetro que esta. Realmente fue más un divertimento teórico que un proyecto de aplicación inmediata, no es extraño por lo tanto que fuese pronto olvidado durante siglos hasta que se recuperó en pleno Renacimiento. Su mérito más sobresaliente fue el haber introducido la perspectiva en la disciplina cartográfica, llegando a sugerir Samuel Youngs Edgerton que los capítulos 6º y 7º del libro VII de la Geografía de Tolomeo pudieron haber contribuido al desarrollo de la teoría perspectiva en el Renacimiento. Con esta nueva representación parece como si Tolomeo hubiera querido mostrar la vista del globo terráqueo enmarcada por los círculos de la esfera armilar²⁶, aunque en su Geografía no se detallara suficientemente el procedimiento para ello.



Esquema del cuarto sistema cartográfico de Tolomeo, que muestra el globo de la representación del ecúmene dentro de la esfera armilar ABCG.

²⁶ Una versión espacial de su tercer sistema cartográfico.

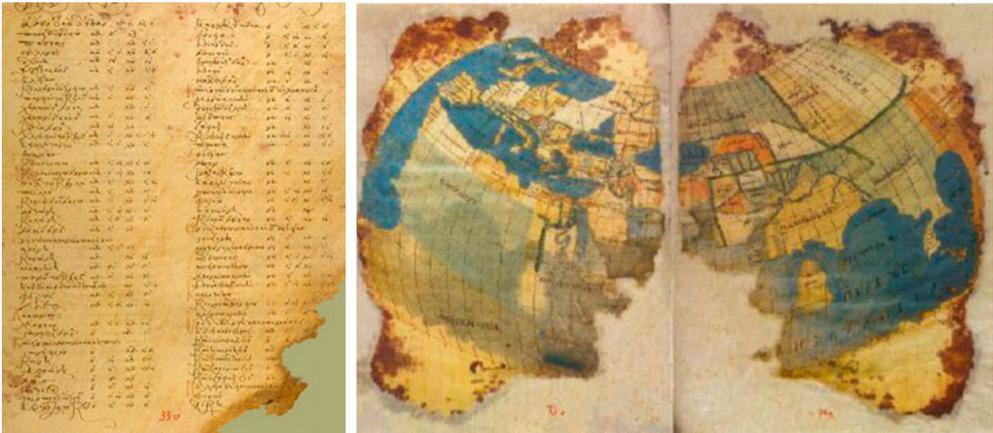
El observador imaginario de la representación globular fue localizado fuera de la esfera armilar y a una distancia tal que el círculo que representaba al trópico de Cáncer (HF, solsticio de verano) se proyectase sobre el paralelo de la isla de Tule, y el correspondiente al ecuador celeste (GB) sobre el anti paralelo de Meroe; conservándose las latitudes sobre el meridiano medio del ecúmene. En la figura anterior, el punto de vista del observador es la intersección de las prolongaciones de las rectas TF y AMB, materialización de las visuales que proyectaban sobre el eje del mundo a los paralelos respectivos: Tule y anti Meroe; localizándose el eje del haz proyectivo en el plano del paralelo de Siena. Para conseguir tales efectos, supuso Tolomeo que el radio del globo interno, con la imagen del ecúmene, debería ser de 90 partes y que la proporción entre su radio y el de la esfera armilar sería de 3/4, de manera que desde el punto de vista (O) se observarían el meridiano y el paralelo de Siena como rectas perpendiculares, y el resto de meridianos y paralelos como curvas que presentarían su concavidad hacia el centro del ecúmene, ocupando su imagen la cuarta parte del globo interno²⁷.

A modo de conclusión ha de insistirse en la importancia que tuvieron los sistemas de Tolomeo para el desarrollo posterior de la cartografía. Aunque él y sus contemporáneos no realizasen mapas de acuerdo con las instrucciones que preparó, un hecho muy poco probable, la contribución griega a la cartografía matemática se produjo a través de la geografía, usando como vehículo transmisor tanto a los cartógrafos y geógrafos árabes como a los bizantinos, posibilitando así su llegada a las escuelas de la Europa renacentista. Las instrucciones de Tolomeo fueron las únicas disponibles para confeccionar los mapas regionales presentes en los incunables griegos y en las primeras traducciones latinas de los mismos, las cuales permitieron dibujarlos siguiendo la estela de Marino de Tiro, descrita y criticada en el texto de la Geografía. Sin embargo, su inconsistencia geométrica impidió que los mapas globales del mundo habitado pudiesen formarse como unión de los regionales, propiciándose así el



El cuarto sistema de Tolomeo en la versión latina de su Geografía realizada por Jacobus Angelus e iluminada por Francesco Antonio del Chierico (finales siglo xv). *Bibliothèque Nationale de France*.

²⁷ No tendría nada de extraño que Mercator se hubiese inspirado en ese diseño al fabricar el doble globo que regaló al emperador Carlos V. El globo de la Tierra era de madera y estuvo cubierto con un mapamundi, estando a su vez envuelto por una esfera de cristal transparente sobre la que se grabaron las imágenes de las estrellas.



Hoja del listado con las coordenadas geográficas, junto a la imagen del ecúmene usando el tercer sistema cartográfico de Tolomeo. Se conserva ambos en el *Codex Seragliensis 57*. Biblioteca del Sultán. Estambul.

empleo extensivo del segundo y tercer sistema cartográfico de Tolomeo. El segundo sistema fue el empleado con carácter casi exclusivo en las primeras versiones impresas de la Geografía. El tercero en cambio fue empleado en menor número de ocasiones, aunque destacasen ejemplares como el denominado *Seragliensis 57*, de finales del siglo XIII conservado en Estambul (Biblioteca del Sultán).

El complemento indispensable de las instrucciones cartográficas de Tolomeo fue su listado con las coordenadas geográficas de los lugares más destacados del orbe de su tiempo. Sin ellas no hubiera sido posible la construcción de las valiosas colecciones de mapas que ilustraron el texto de su Geografía. Paradójicamente reside ahí el enigma que persigue al Tolomeo cartógrafo y que aún permanece sin aclarar: el núcleo del problema es saber si Tolomeo o sus contemporáneos dibujaron tales mapas o fueron incorporados luego bajo el imperio romano o incluso después en el de oriente. Todo apunta a que se trata más bien de mapas confeccionados durante la época bizantina. El historiador ruso Lev Solomonovich Bagrow²⁸ fue más concreto al defender que muchos de los mapas que figuran en tantas ediciones y manuscritos de la Geografía obedecían más bien a prototipos anteriores al siglo XII.

²⁸ Luego llamado Leo Bagrow, es uno de los referentes más destacados de la historia de la cartografía. Fue el fundador en el año 1935 de la prestigiosa revista *Imago Mundi*.

CAPÍTULO VIII | Aproximación cronológica al problema de la longitud



CAPÍTULO VIII | Aproximación cronológica al problema de la longitud

La longitud, al contrario que la latitud, ha sido a lo largo del tiempo la coordenada geográfica cuyo cálculo resultaba más complicado, hasta el punto de que solo se pudo conocer con la exactitud debida en la segunda mitad del siglo XIX. El problema de su determinación, o el problema de «echar el punto» como se decía siglos atrás, al hacerlo en el mar, mediatizó toda la producción cartográfica y la propia historia, pues no debe de olvidarse que esa circunstancia propició el descubrimiento del nuevo mundo. Para entender mejor las dificultades, ha de recordarse necesariamente su definición y su estrecha relación con los elementos geométricos de la esfera celeste. La diferencia de longitudes geográficas entre dos puntos dados es la medida del diedro formado por los meridianos de ambos, siendo el meridiano de cada punto el plano formado por el eje del mundo y el propio punto. Esos planos, que cortan al elipsoide de revolución, según las elipses meridianas, coinciden con otros de la esfera celeste, esto es la esfera hipotética sobre la que se proyectan todas las estrellas, justamente con los círculos horarios de las mismas ó planos formados por el citado eje y una estrella dada.

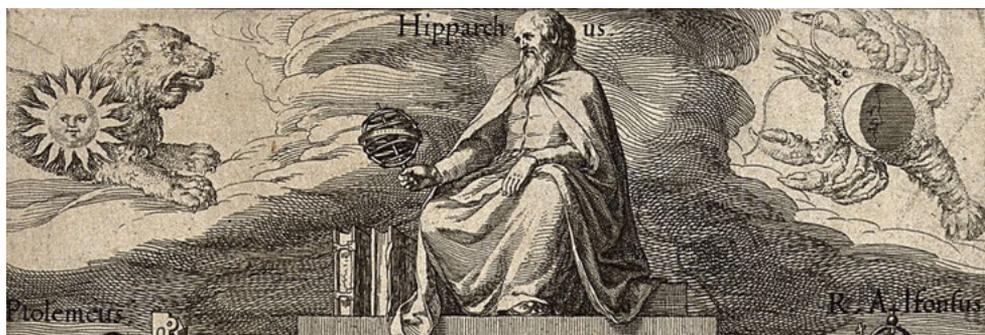
El nombre de círculo horario se corresponde con el del ángulo horario de la estrella, medida del diedro formado por el meridiano del lugar y el citado círculo de una cierta estrella. El apelativo horario hace especial mención al tiempo astronómico, concretamente podría definirse la hora como el ángulo horario ó en función del mismo, de manera que el tiempo tiene carácter local¹. Se entiende por tanto que la diferencia de longitudes entre dos puntos coincida con la diferencia que existe entre los ángulos horarios ó entre las horas locales en tales puntos. Ahí radica precisamente el principal inconveniente para su correcta evaluación. Determinar la hora local del observador, que identifica un instante determinado², no es nada trivial, pues se trata de hallar el valor del ángulo horario, de una estrella dada, a partir del triángulo astronómico cuyos vértices son: la proyección de la estrella sobre la esfera celeste, el Polo³ y el Cenit⁴; aunque se pueda simplificar sobremanera si el instante elegido

¹ La hora solar se puede determinar sumándole doce horas al ángulo horario del Sol. La hora sidérea sería la suma del ángulo horario de la estrella y de su ascensión recta.

² Los instantes de la observación estaban asociados al comienzo de ciertos fenómenos, generalmente, astronómicos. Los eclipses fueron de los más usados en la antigüedad, aunque posteriormente se fueron eligiendo otros más fáciles de concretar, como el paso de las estrellas por el meridiano del lugar.

³ Los polos celestes, Norte y Sur, son la intersección del eje de rotación de la Tierra (el eje del mundo) con la esfera celeste.

para la observación es el del paso de la estrella por el meridiano del lugar, ya que en ese supuesto el triángulo esférico se reduciría a un arco y el ángulo horario valdría 0^h o 12^h . Sin embargo, la verdadera dificultad se planteaba en realidad cuando se pretendía saber la hora local del meridiano elegido como origen de las longitudes, ante la imposibilidad de transmitirla exactamente al observador situado sobre el punto incógnita⁵; evidentemente la hora se refería al mismo instante anterior. Se entiende así que las numerosas fórmulas magistrales, surgidas al amparo de otras tantas convocatorias de concursos, fuesen meras aproximaciones a la solución definitiva que proporcionó el imparable desarrollo de las telecomunicaciones. El problema de la longitud ha estado siempre tan presente en la historia de la cartografía, que al llegar al siglo en el que prácticamente se resolvió, parece obligado hacer un esfuerzo de síntesis y resumir algunos de los intentos más señalados para lograrlo.



Grabado de Hiparco en la portada de la obra *Tabulae Frisicae Lunae-Solares quadruplices*. Nicolai Muleri. 1611.

Hiparco de Nicea, el más grande astrónomo de la antigüedad, determinó al parecer la diferencia de longitudes entre Rodas y Alejandría, apoyándose en la observación simultánea de eclipses lunares. Cerca de trescientos años después, el insigne Tolomeo anunció la posibilidad de calcular la longitud mediante la resolución de un triángulo esférico, del que se conocía la latitud de un vértice, así como el acimut y desarrollo del segmento máximo que partía de él. Tolomeo fue de los primeros en referirse a las longitudes en términos parecidos a los actuales, su imagen del mundo habitado se extendía desde el meridiano de Canarias, tomado como origen, al situado a 180° al Este de las mismas. Él legó a la posteridad el exagerado ensanchamiento del ecumene, con tan conocidas consecuencias en la era de los descubrimientos, al corroborar, en cierto modo, los datos erróneos de Aristóteles. Ejemplo de ello es la diferencia de longitudes entre Tánger y Alejandría, que creía de 54° , cuando el valor actual es de $35^\circ 39'$.

El tratado de al Biruni, *Kitab tahdid nihayat al-amakin li-tashih masafat al-masakin*⁶, es una obra geodésica de obligada referencia en la que citaba sus trabajos para obtener la longitud de Ghazna, cuyo meridiano tomaría como referencia para fijar las longitudes contenidas en las tablas de al-Qanun. Naturalmente tuvo que calcular la diferencia de longitudes entre dicha ciudad y otras

⁴ El Cenit y el Nadir son la intersección de la esfera celeste con la vertical física, es decir la línea de la plomada. El primer punto está sobre la cabeza del observador.

⁵ El transporte de relojes que marcaran la hora del meridiano origen no resultaba operativo, ya que durante el trayecto se desajustaban los péndulos, teniendo en cuenta que los medios de amortiguación dejaban mucho que desear.

⁶ Una posible traducción sería: *Determinación de las coordenadas de posiciones para la corrección de distancias entre ciudades*.

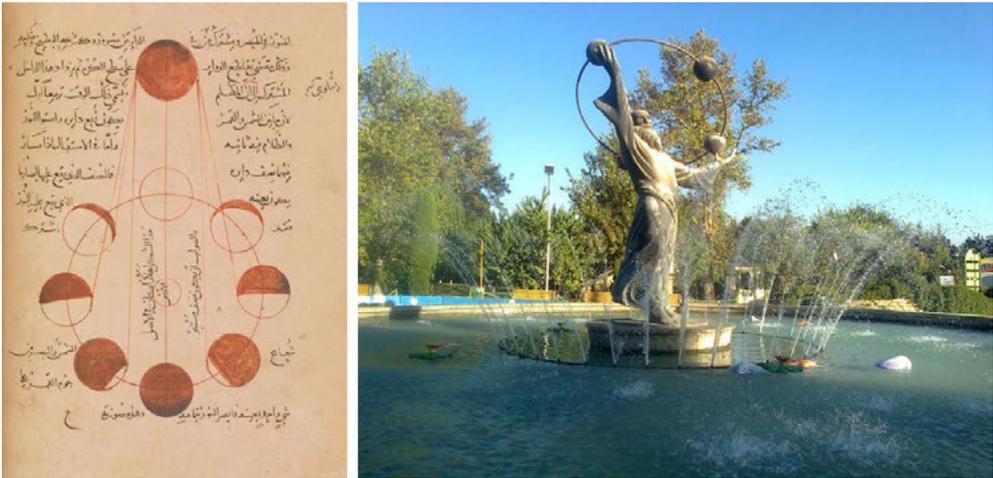


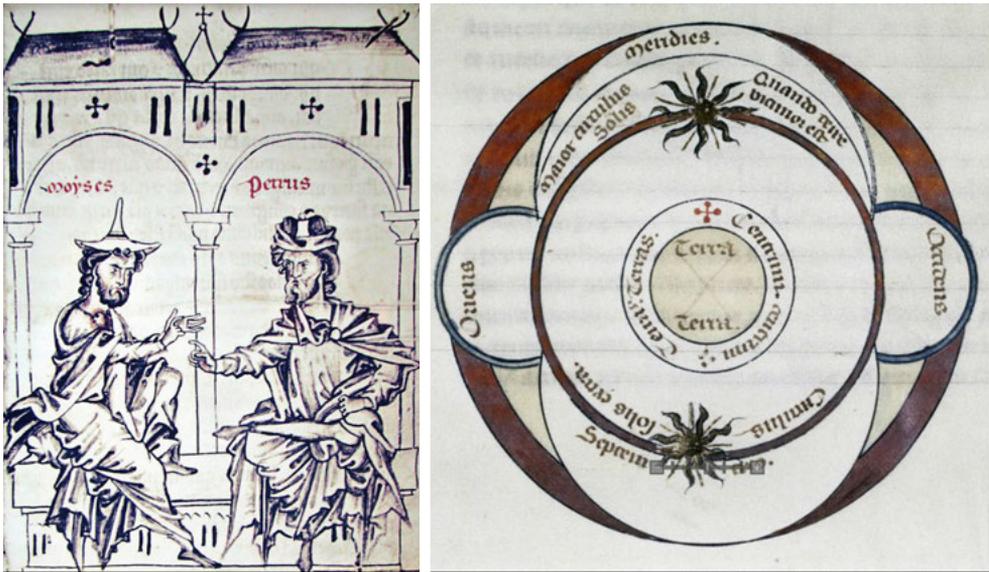
Ilustración sobre los eclipses en el tratado de al Biruni y fuente en su honor, construida en Teherán.

como Bagdad o Alejandría, cuyos meridianos ya habían servido de origen para otras tablas. Para ello realizó una serie de itinerarios entre Ghazna y Bagdad, cuyos desarrollos sobre el círculo máximo correspondiente obtuvo tras corregir los datos proporcionados por los relatos de los viajeros; en otro trabajo obtuvo la diferencia de longitudes entre Bagdad y Alejandría. En cada uno de los itinerarios citaba las latitudes de las ciudades extremas que determinó con exactitud mediante observaciones astronómicas. Una vez transformadas las distancias en arcos ($1^\circ \approx 56 \frac{2}{3}$ millas) y conocidas las latitudes de las ciudades respectivas evaluó la diferencia de longitudes obteniendo la cuerda sobre un cierto paralelo y extrapolando su valor al ecuador terrestre. De ese modo mejoró sustancialmente las coordenadas geográficas de Tolomeo, en torno a un grado, a pesar de que las longitudes continuasen siendo defectuosas. Generalmente se acepta que los cartógrafos árabes corrigieron la longitud del Mediterráneo, aumentada por aquel⁷ en torno a los 20° . La longitud la redujo al Jwarizmi a $43^\circ 20'$, y al Battani a $35^\circ 30'$.

En el mundo occidental del medievo debe subrayarse la obra *Dialogi cum Judeo*, por equipararse en ella tiempo astronómico y longitud. Su autor fue el aragonés Pedro Alfonso, también conocido como Moisés sefardí, el cual llegó a ser el médico de Enrique I de Inglaterra. Su discípulo, el monje Walcher, observó eclipses de Luna entre los años 1107 y 1112, defendiendo la posibilidad de que la longitud se podía hallar como la diferencia horaria entre los lugares de Italia e Inglaterra, desde los que se había divisado simultáneamente uno de ellos. En la segunda mitad de ese mismo siglo, Roger de Hereford señaló que el eclipse del 12 de septiembre de 1178, observado desde su ciudad, Marsella y Toledo, permitió calcular sus longitudes con relación al meridiano de Arín (India). La observación simultánea de los eclipses lunares⁸ fue también el procedimiento elegido, en los Libros del Saber de Astronomía, para determinar la longitud geográfica. La cuestión es tratada concre-

⁷ La motivación del sabio alejandrino no está exenta de controversia, podría haber sido el procurar que el ecumene alcanzase la cifra redonda de los 180° , aunque también se sugiere que la equivocación se podría haber debido al observar el eclipse en el que supuestamente basó su determinación.

⁸ Los eclipses lunares se observaban, a efectos de calcular la longitud, todavía en el siglo XVIII, según se desprende de los trabajos realizados por el alemán T. Mayer, para el taller cartográfico de J. B. Homann. Mayer llegó a optar al premio prometido por el Consejo de la Longitud de Inglaterra, recibiendo sus herederos un total de 3000 libras.



El modelo geocéntrico del universo en la obra de Pedro Alfonso, junto a una ilustración de su obra *Dialogus Petri et Moysi indei*, en la cual refiere el primer meridiano como punto de partida para el cálculo de longitudes.

tamente en el capítulo LXIX (Libro segundo. *Libros del astrolabio redondo*) bajo el epígrafe «De saber las longuras de las ciudades». La transcripción completa del texto, realizada por Manuel Rico y Sinobas, es la siguiente:

«Si esto quieres saber. a mester que rectificquen dos rectificadores el eclipsi lunar. et que sea ell un rectificador dellos en lugar que sea su longura sabuda. et ell otro en aquel lugar de que tú quieres saber su longura. et que rectificquen cada uno dellos en so lugar et començamiento dell eclipsi. et la fin de la tiniebla. si fuer ell elipsi complido. et el començamiento de la claridad. et so cumplimiento. Et sepa cada uno dellos en so lugar sobre cuántas oras comienza cada uno destos términos sobredichos. et fágalo saber all otro rectificador. et tomen la diferencia que es entre las oras en cada uno destos términos sobredichos. et a de seer esta diferencia una en todos los términos. Et multipliquen aquella diferencia en. XV. et lo que fuer póngale nombre la longura que es entre las dos ciudades. Et despues caten a la diferencia de las oras a qual cibdat es. et si fuera la cibdat de que fue sabuda la longura. sepan que la cibdat de que quieren saber la longura es oriental de la cibdat que es sabuda. et minguen la longura que es entre las dos ciudades. de la longura de la ciudad sabuda. et lo que fincar. esso será la longura de la cibdat que quieren saber. Et si fuer la diferencia de las oras a la cibdat non sabuda, sepan que aquella cibdat non sabuda es oriental de la sabuda. et añadan la longura de la cibdat sabuda. et lo que se ayuntar. Esso será la longura de la cibdat non sabuda. et si se avinieren las oras de los términos en uno en amas las ciudades. Sepan que de una longura son amas».

Ya se ha comentado la especial incidencia que tuvo el problema de la longitud en el descubrimiento de América⁹, pues bien, fue durante el primer viaje, justamente en la noche del día 13 de septiem-

⁹ La mejor evidencia gráfica de ello es la superposición del nuevo continente sobre el globo terráqueo de Martín Behaim, construido en Nuremberg en el año 1492 ó 1493; una obra clásica de la cartografía globular que podría haber sido concebida para dar mejor cobertura a las tesis de Colón, con el que había coincidido en Lisboa.

bre de 1492, cuando Colón comprobó que la declinación magnética¹⁰ variaba con esa coordenada geográfica. Aquella noche cruzaron, sin ser conscientes de ello, la llamada línea agónica, o de declinación nula; un hecho que conmocionó a toda la tripulación, acostumbrada hasta entonces a que la aguja imantada estuviese siempre del mismo lado de la meridiana¹¹. El almirante llegó a pensar a raíz de entonces en la existencia de un meridiano singular con unas propiedades similares a las de la línea ecuatorial. Esa idea colombina¹² influyó en la opinión de otros cosmógrafos ilustres, como



Cristóbal Colón mostrando su equivocación. Pintura del austriaco Johann Nepomuk Geiger (1805-1880) situada en el Salón del trono del Castillo de Miramar en la ciudad de Trieste.

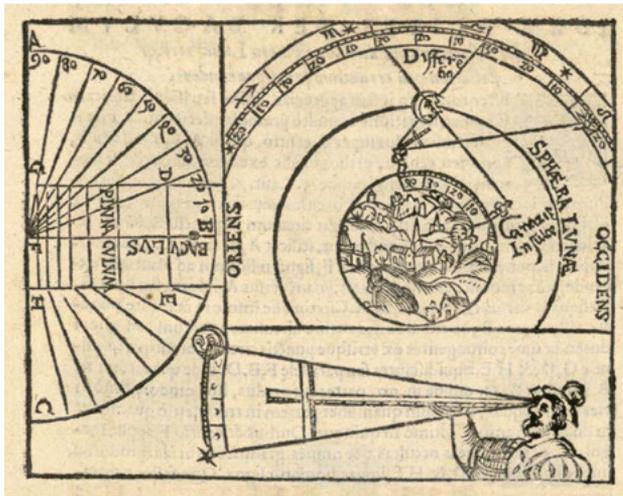
¹⁰ La declinación magnética es el ángulo que forma la componente horizontal del vector intensidad del campo con la meridiana geográfica, dicha componente también es conocida con el nombre de meridiana magnética. La declinación magnética es pues la diferencia entre rumbos y acimutes, o bien el acimut geográfico del meridiano magnético.

¹¹ El jueves día 13 de Septiembre se recoge en el diario, de a bordo, lo siguiente «Aquel día con su noche, yendo a su vía, que era el Oeste, anduvieron XXXIII leguas, y contava tres o quatro menos. Las corrientes le eran contrarias. En ese día, al comienzo de la noche, las agujas noruesteaban y a la mañana nordesteaban algún tanto, de lo que conoció que la aguja no iba derecha a la estrella que llaman del Norte, o Polar, sino a otro punto fijo e invisible».

¹² El propósito de relacionar las coordenadas geográficas con el magnetismo terrestre fue auspiciado por el propio rey Felipe II, el cual llegó a convocar un premio para el que descubriese la pretendida dependencia.

Mercator¹³ o Alonso de Santa Cruz, el cual trató de establecer un claro paralelismo entre los parámetros magnéticos: inclinación¹⁴ y declinación, y las coordenadas geográficas: latitud y longitud. Durante todas las expediciones posteriores fueron permanentes, además de los trabajos magnéticos, las observaciones astronómicas, todavía imprescindibles para calcular la posición sobre el globo terráqueo de los diferentes lugares; empleando generalmente las alturas meridianas del Sol para la latitud y la observación simultánea de la ocultación de estrellas por la Luna para la longitud. Ese último procedimiento fue empleado, por ejemplo, para determinar la longitud de Río de Janeiro durante la travesía de Magallanes, aunque verdaderamente se apoyasen en la ocultación de Júpiter por la Luna; no obstante, el resultado no fue nada aproximado, pues fijaron su longitud en 17^h 15^m al Oeste de Sevilla, es decir que localizaron a la bahía brasileña cerca de China.

Aunque Regiomontanus ya había sugerido en 1472 un nuevo procedimiento para calcular la longitud, el primero en hacerlo de un modo más convincente fue su compatriota, el astrónomo y cartógrafo Johannes Werner, más de cuarenta años después, en 1514. El método no era otro que el de las distancias lunares, basado en el desplazamiento horario de la Luna en ascensión recta, que llega a ser de más de dos segundos por minuto¹⁵. La observación consistía en medir con instrumentos de la familia del sextante la distancia angular entre el borde de la Luna y diversas estrellas, tomando nota de las horas locales correspondientes; para compararlas, acto seguido, con las asociadas a las mismas distancias en el meridiano elegido como origen; se obtenían así una serie de diferencias, cuyo promedio proporcionaba el valor de la longitud. El método requería, evidentemente, el empleo de numerosas tablas lunares con sus efemérides, diseñadas a tal efecto, en las que se detallaran las posiciones relativas, incluidas distancias y horas, de la Luna con relación a las estrellas; unas tablas de las que se haría uso ininterrumpidamente hasta comienzos del siglo XIX.



Midiendo la distancia de la Luna a las estrellas con la ballestilla o vara de Jacob. Ilustración de la Cosmografía de Peter Apianus (1574).

¹³ Mercator, especialmente interesado en el magnetismo y en la navegación, pretendió resolver mediante aquel el problema de las longitudes. En su declaración al emperador Carlos, de 1553, afirmaba «...hay mucho que decir sobre la utilización de la aguja imantada...es por lo que yo expongo ahora su uso en la investigación de las longitudes de los lugares, una cosa desconocida...»

¹⁴ La inclinación magnética es el ángulo que forma el vector intensidad de campo con el plano del horizonte.

¹⁵ Se puede admitir que la Luna recorre cada hora una distancia angular equivalente a su diámetro, por decirlo en términos coloquiales.

Una muy conocida fue la del marino José de Mendoza y Ríos (*Tablas para los usos de la navegación y astronomía náutica*), publicada por vez primera en 1800, que alcanzó su quinta edición, debidamente actualizada¹⁶, en 1898. Al parecer fue otro español, el navegante Pedro Sarmiento de Gamboa¹⁷, el primero en emplear este método de las distancias lunares en alta mar, cuando viajaba hacia el Estrecho de Magallanes. En realidad la distancia angular medida por Sarmiento fue la existente entre la Luna y el Sol, realizando la operación astronómica con una especie de ballesta que fabricó a tal fin... «y con este instrumento, con la ayuda de Dios, tomó los grados de longitud por la llena de la Luna y nacimiento del Sol...»¹⁸. Otro ejemplo de su utilización fue la que tuvo lugar durante la expedición de A. Malaspina (1789-1794), contando con el auxilio de los cronómetros de Harrison para tomar la hora local, que tanto ayudó a la renovación de la cartografía náutica española.

La invención del telescopio, en la frontera de los siglos XVI y XVII, y su inmediata aplicación astronómica conmocionó al mundo ilustrado, llegando a revolucionar la historia del conocimiento. El protagonista excepcional fue Galileo, con sus pormenorizadas observaciones y el descubrimiento de los satélites de Jupiter, las estrellas mediceas. La primera constatación de su existencia tuvo lugar el 7 de enero de 1610, deduciendo rápidamente que giraban alrededor del planeta por variar su



Galileo Galilei en el frontispicio de la recopilación de sus obras, publicada en 1656 en Bolonia. Se presenta también una reproducción de su antejo, conservada en el Museo de Greenwich.

¹⁶ Una variación mejorada del método de las distancias lunares se centraba en la observación del paso del borde lunar por el meridiano del lugar. Antes y después se observaban además estrellas previamente seleccionadas, con declinaciones similares a las que tuviese la Luna.

¹⁷ Este marino, nacido en Alcalá de Henares, marchó pronto al nuevo mundo en busca de fortuna, simultaneando sus viajes con el aprendizaje de la astronomía. Su vida fue un tanto azarosa, llegando a tener problemas con la inquisición: fue encarcelado en Lima (1564) por orden de su arzobispo e inquisidor ordinario.

¹⁸ Pedro Sarmiento de Gamboa, el Navegante. Boletín de la Real Academia de la Historia. Tomo XXVIII. Abril. 1896.

posición relativa en días sucesivos. Desde abril del año siguiente, ya distinguía Galileo unos de los otros, trató de hallar el periodo de cada uno de ellos, al tiempo que estudiaba el número de veces que eran ocultados por su planeta y confeccionaba unas tablas en las que se predecían sus apariciones y desapariciones. Y es que desde el primer momento intuyó la posibilidad de observar simultáneamente sus eclipses, desde lugares diferentes, para obtener la diferencia de longitudes entre ambos. La segunda contribución del sabio italiano al problema de la longitud fue su concienzudo estudio del péndulo, comprendiendo que su oscilación era un medio ideal para medir intervalos de tiempo y un posible mecanismo en que basar la construcción de un reloj exacto; así lo puso de relieve con un dibujo V. Viviani, uno de sus alumnos.

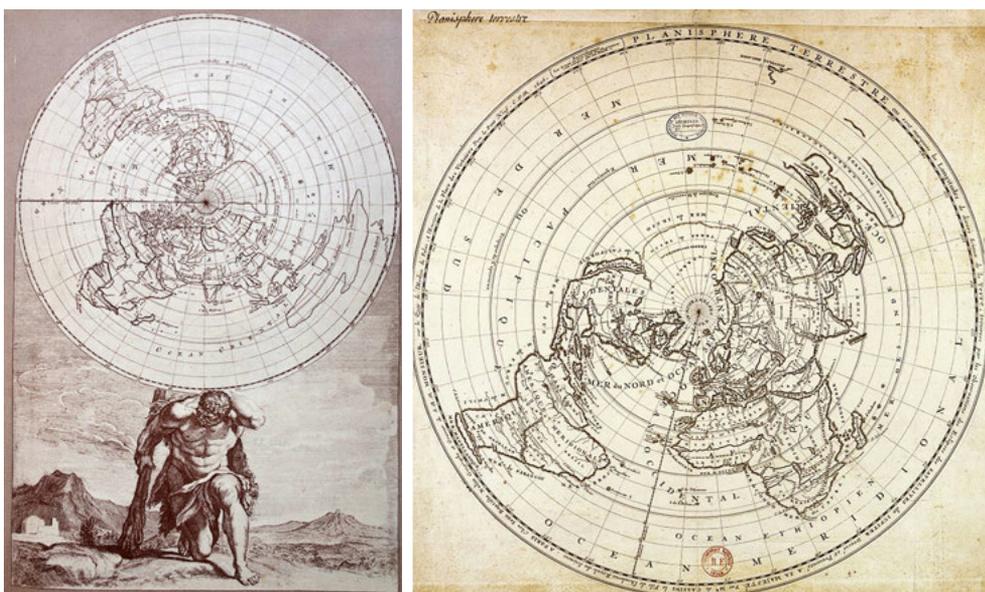
Más tarde, en el año 1616, solicitó¹⁹ el premio que había ofrecido el rey Felipe III, en 1598, al «descubridor de la longitud», asegurándole una pensión indefinida de 8000 ducados, además de pequeños adelantos para aquellas ideas que pudiesen conducir al descubrimiento definitivo. Galileo le presentó también el «celatone», el instrumento astronómico que había fabricado con ese objeto, una especie de casco de bronce con un antejo incorporado, a través del cual el observador podía ver los satélites con uno de sus ojos, mientras que con el otro contemplaba a simple vista la luz procedente de Jupiter. Sin embargo fue rechazada su oferta por considerarla poco operativa para la navegación, teniendo en cuenta que no se podrían observar los satélites con la frecuencia ni con la estabilidad necesarias para obtener unos resultados verdaderamente fiables. Todo lo contrario ocurrió en tierra firme, en donde la observación simultánea de los eclipses de tales satélites permitió comprobar de inmediato la falsedad de algunos mapas considerados hasta entonces como paradigmáticos. El impacto fue tan importante que, a partir del año 1650, el método recomendado por Galileo era reconocido universalmente como el que lograba mejores resultados en las aplicaciones cartográficas terrestres; a él se debe, en cierto modo, el empuje necesario para lograr su posterior desarrollo.

Aunque quedase demostrada su utilidad cartográfica, era evidente que se podían mejorar las tablas con las efemérides de Jupiter y sus satélites. Uno de los primeros en hacerlo, en 1668, fue el astrónomo italiano G. D. Cassini²⁰, a la sazón profesor de la Universidad de Bolonia. Es probable que el prestigio que alcanzó por su publicación influyera sobre Picard, a la hora de proponerle al rey Luis XIV que lo nombrara Director del flamante Observatorio de París, creado, por decisión real de 1667, como anexo astronómico de la Academia de Ciencias, fundada en el año anterior. Mediante las observaciones de los eclipses de los satélites, realizadas desde París y Uraniburgo²¹, se enlazaron astronómicamente ambas ciudades, gracias a los trabajos de Picard, llegando a que su diferencia de longitudes era de 42^m 10^s, un valor mucho más exacto que todos

¹⁹ La participación en esa especie de concurso quedó perfectamente documentada por un despacho enviado al virrey de Nápoles, el 28 de enero de 1620, diciendo el rey lo siguiente: «que Galileo Galilei, matemático del gran Duque de Toscana y lector de la Universidad de Pisa, ofrecía dar el modo de poder graduar la longitud y facilitar y asegurar la navegación del Océano, y que ofrecía también otra invención para las galeras del Mediterráneo, con que se descubrían los bajeles del enemigo diez veces más lejos que con la vista ordinaria»

²⁰ Cassini fue el fundador de una dinastía de astrónomos y geodestas, siempre ligados al Observatorio de París. Ciudadano francés, desde 1671, pasó a la posteridad por sus trabajos en el meridiano de Francia, que a la postre desencadenaron la encendida polémica sobre los dos modelos elipsoidales de la Tierra.

²¹ El celebrado observatorio, entonces en ruinas, fue dirigido por T. Brahe, profesor de Kepler; siendo allí donde este último recopiló la información astronómica necesaria para formular sus tres leyes. Puede que fuese en aquella isla en donde se empleó por primera vez la triangulación, como medio ideal para obtener el desarrollo de un arco de meridiano y calcular el radio de la Tierra. Blaeu debió tener constancia de ello durante su etapa de colaborador de Brahe, así se podría explicar mejor su deseo de que Snell hiciese algo parecido en Holanda.



El gigante Atlas con el planisferio de Cassini y detalle del mismo. En el texto perimetral se indica que las longitudes fueron halladas mediante la observación de los eclipses de los satélites de Júpiter.

los que anteriormente habían sido fijados. Dicho método fue usado durante los años 1672-1674 y 1679-1681 para calcular la longitud geográfica de un gran número de ciudades que jalonaban el contorno de Francia. Al mismo tiempo coordinaba Cassini la formación de un mapamundi, teniendo en cuenta el novedoso procedimiento, que ya podía catalogarse de moderno, en cuanto que la posición relativa de los meridianos era más ajustada desde el punto de vista geométrico; otra de las novedades que aportaba era que, por fin, la imagen que ofrecía del Mediterráneo se parecía más a las representaciones actuales que a todas las que le habían precedido.

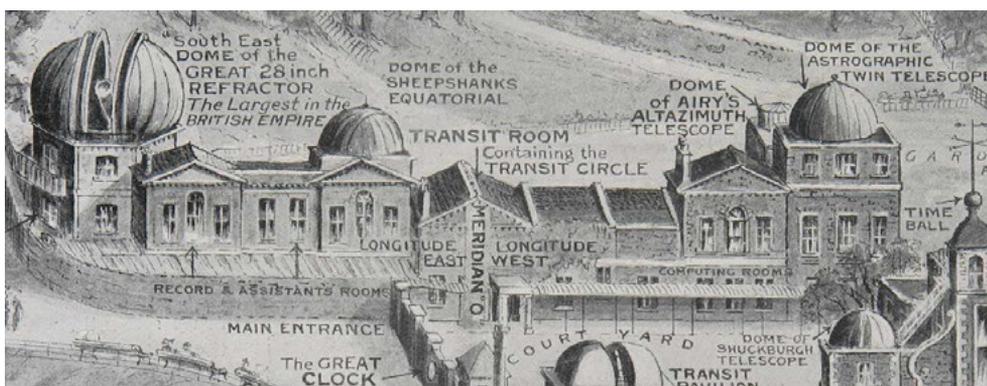
El mapa, *Planisphère terrestre*, adornó el suelo de la torre occidental de París desde que se presentó en 1682, desgraciadamente el original se destruyó en un incendio, conservándose solo la copia realizada por su hijo en el año 1696. Tres años antes había aparecido la obra *Neptune françois*, considerado entonces como la primera obra de la Cartografía Náutica moderna, al haberse confeccionado sus mapas apoyándose en las nuevas coordenadas geográficas que se habían calculado. Este procedimiento de hallar las longitudes geográficas y sus diferencias continuó empleándose en el siglo siguiente. Uno de los posibles ejemplos, fue su utilización por V. Tofiño, con ocasión de sus levantamientos hidrográficos del litoral peninsular, cuya expresión gráfica fue el Atlas Marítimo Español. También se emplearon los satélites de Jupiter frecuentemente durante la expedición científica francesa que acompañó al ejército de Napoleón cuando invadió Egipto; el responsable de las observaciones fue el astrónomo Nouet, miembro de la Comisión de Sabios y del Instituto del Cairo. En el cuadro siguiente se da un ejemplo referido precisamente a esa capital²², una vez elegido el Observatorio de París como meridiano origen.

²² Verdaderamente la posición de la capital egipcia quedó fijada por los tres resultados siguientes: A través de los eclipses de los satélites de Júpiter $1^{\text{h}} 55^{\text{m}} 54^{\text{s}}.0$. Por la ocultación de la estrella δ de Escorpio por la Luna $1^{\text{h}} 55^{\text{m}} 54^{\text{s}}.0$. Por la ocultación de Venus por la Luna $1^{\text{h}} 55^{\text{m}} 53^{\text{s}}.5$. Es decir que se llegó a un valor medio de $1^{\text{h}} 55^{\text{m}} 53^{\text{s}}.8$.

Eclipses de los satélites de Júpiter		
Observación	Fecha	$\Delta\lambda$
Inmersión del III satélite	19 septiembre	1 ^h 57 ^m 50 ^s
Inmersión del I satélite	19 septiembre	1 ^h 56 ^m 00 ^s
Inmersión del I satélite	21 septiembre	1 ^h 56 ^m 04 ^s
Inmersión del I satélite	28 septiembre	1 ^h 55 ^m 58 ^s
Inmersión del II satélite	28 septiembre	1 ^h 56 ^m 27 ^s
Inmersión del II satélite	5 octubre	1 ^h 56 ^m 04 ^s
Inmersión del I satélite	7 octubre	1 ^h 55 ^m 53 ^s
Inmersión del I satélite	12 octubre	1 ^h 55 ^m 40 ^s
Inmersión del I satélite	21 octubre	1 ^h 56 ^m 03 ^s
Inmersión del II satélite	23 octubre	1 ^h 56 ^m 50 ^s
Inmersión del III satélite	25 octubre	1 ^h 57 ^m 55 ^s
Inmersión del I satélite	28 octubre	1 ^h 55 ^m 44 ^s
Inmersión del I satélite	30 octubre	1 ^h 55 ^m 56 ^s
Inmersión del II satélite	30 octubre	1 ^h 56 ^m 39 ^s
Emersión del I satélite	21 octubre	1 ^h 55 ^m 50 ^s
Inmersión del I satélite	12 enero 1799	1 ^h 55 ^m 57 ^s

Observaciones de Nouet en el Cairo, comenzadas en el año 1798. El promedio de los resultados obtenidos fue 1^h 55^m 54^s al Este de París. Fuente: *Description de l'Égypte ou Recueil des observations et des recherches qui ont été faites en Égypte pendant l'expédition de l'armée française.*

Con independencia de las investigaciones pendulares de Galileo, C. Huygens, miembro fundador de la Academia de Ciencias de París, hizo las suyas para desarrollar la teoría matemática del péndulo y llegar al convencimiento de que podría regular el mecanismo de los relojes. El astrónomo holandés contribuyó así a la realización de medidas más exactas de los intervalos de tiempo y por tanto a la correcta determinación de la longitud. Durante su estancia en París, adonde fue llamado por Luis XIV, publicó una de sus obras más sobresalientes, *Horologium Oscillatorium* (1673), detallando los resultados de sus trabajos y asegurando que su reloj era el mejor instrumento para hallar la longitud de puntos localizados mar adentro. Algunos de los relojes construidos de acuerdo con sus directrices llegaron a probarse con resultado satisfactorio durante un viaje a Cabo Verde en 1664. En sus últimos prototipos sustituyó el sistema pendular, normalmente afectado por el balanceo del barco, por otro alternativo: el muelle espiral del volante del reloj. A pesar de los innegables avances que se habían producido, aún estaba lejos de resolverse satisfactoriamente el problema de las longitudes, sobre todo cuando se trataba de localizar un punto en alta mar, tal como ya quedó dicho. Esa fue la razón fundamental que informó la creación del Observatorio de Greenwich en el año 1675, por orden del rey Carlos II. Su director, el astrónomo J. Flamsteed, recibió el encargo de formar un catálogo estelar que mejorase el de T. Brahe, pero sobre todo unas tablas lunares específicas que permitieran a un observador naval conocer en todo momento su longitud como diferencia de horas (entre el punto y Londres) relativas a una cierta posición de la Luna; la apuesta por el método de las distancias lunares era por tanto más que evidente.



Detalle con los antiguos cometidos astronómicos de cada una de las estancias del Real Observatorio de Greenwich.

Sin embargo, no se logró confeccionar el deseado almanaque náutico hasta 1763, año en que se publicó *The British Mariner's Guide*, resultado brillante de los trabajos astronómicos efectuados por N. Maskelyne, el cual había observado dos años antes, en la Isla de Santa Elena, un tránsito de Venus, determinando durante su viaje la longitud por medio del ya citado método de las distancias lunares; Maskelyne fue también director del Observatorio y el primero en medir el tiempo con indeterminaciones próximas a las décimas de segundo. La creación del Observatorio despertó las consiguientes expectativas, máxime cuando seguían vigentes las soluciones peregrinas que tanto proliferaban en las postrimerías del siglo XVII, de modo que al no cumplirse, se movilizaron los sectores más directamente afectados²³, hasta el punto de conseguir que se crease una Comisión parlamentaria a tal efecto. La Comisión solicitó el oportuno informe pericial a una figura tan respetada como Newton, el cual explicó el estado del conocimiento, comenzando por enumerar los procedimientos al uso para calcular la longitud, reconociendo la bondad de sus principios y la dificultad de llevarlos a la práctica²⁴. Antes de entrar de lleno en los pormenores de las soluciones astronómicas, mencionó la que supuestamente proporcionaría un reloj portátil en los siguientes términos: «*One is by a watch to keep time exactly. But, by reason of the motion of the slip, the variation of heat and cold, wet and dry, and the difference of gravity in different latitudes, such a watch hath not yet been made*»; palabras que indirectamente apuntaban hacia la imposibilidad de hallar la solución por esa vía. La Comisión tomó buena nota del informe de Newton, sugiriendo al Parlamento que admitiese cualquier propuesta y que, en su caso, recompensara al ganador. Acto seguido se publicó el llamado Decreto de la Longitud (Longitude Act) el día 8 de julio de 1714, el cual establecía tres tipos de premios: uno de 20000 libras para el que hallase la longitud con un error menor de 30', otro de 15000 libras si el error era inferior a 2/3 de grado y un tercero de 10000 libras si el error alcanzado era del orden de un grado.

El Decreto contemplaba además la creación de un Consejo evaluador que no llegó a disolverse hasta el siglo siguiente, concretamente en el año 1828, tras haber desembolsado más de 100000 libras²⁵. Finalmente los mayores premios recayeron en J. Harrison, quien anunció su reloj H-4

²³ Se llegó a dirigir un escrito al gobierno, firmado por: Captain's of her Majesty's Ships, Merchants of London, and Commanders of Merchants-Men. (*The illustrated Longitude*)

²⁴ Ya antes de hacer su dictamen había asegurado Newton: «*That, for determining the Longitude at Sea, there have been several projects, true in theory, but difficult to execute*»



Grabado de John Harrison y del cronómetro (H4) con el que resultó premiado.

en 1755, aunque no lo completase hasta el año 1759. El modelo ganador fue un reloj portátil de cerca de 13 cm de diámetro y apenas 1.4 kilogramo de peso. Aunque el autor estaba orgulloso de los tres modelos anteriores, era este su preferido a tenor de lo que escribió: «*I think I may make bold to say, that there is neither any other Mechanical or Mathematical thing in the World that is more beautiful or curious in texture than this my watch or Timekeeper for the Longitude... and I heartily thank Almighty God that I have lived so long, as in some measure to complete it*». El reloj de Harrison fue probado con éxito en dos travesías: Jamaica (1761-1762) y Barbados (1764), comprobándose fehacientemente que los errores que presentaba eran despreciables en relación con las tolerancias fijadas en el Decreto. Sin embargo la cicatería del Consejo impidió que cobrase el primer premio, entregándole solo el importe del segundo. En cambio la Royal Society le concedió su medalla de oro y el Parlamento un total de 8750 libras, una recompensa que venía a reconocer su ingenio y virtuosismo instrumental, y su decisiva aportación para solucionar el problema de la longitud en alta mar.

Las innovaciones introducidas por el relojero inglés causaron pronto sensación en los gobiernos europeos, cumpliéndose sobradamente las expectativas que él mismo había despertado al enviarles antes los libros que publicó sobre el particular. Una vez recibidos en España, su Ministro de Marina e Indias, Julián de Arriaga y Ribera, solicitó un informe a Jorge Juan, entendiéndolo que él era la persona con mayores conocimientos al respecto. La respuesta²⁵ a la petición del sustituto de Ensenada la firmó Jorge Juan en Madrid el 12 de abril de 1765, probando que sí estaba al tanto del problema de la longitud. He aquí parte del mismo, concretamente la que se refiere a los experimentos realizados

²⁵ Aunque sea difícil fijar su equivalencia con la moneda actual, puede estimarse que la cantidad entregada en los premios de longitud ascendería a una cantidad superior a los 40 millones de euros.

²⁶ El informe es un documento de incuestionable interés que fue reproducido por Fernández Dauro en 1879 (Volumen IV de sus Disquisiciones náuticas).

con el cuarto cronómetro, que había construido Harrison cuatro años antes, durante la travesía que se inició en Portsmouth, con destino a Jamaica, el 18 de noviembre de ese mismo año:

«El cronómetro se puso en una caja segura con cuatro llaves, una de ellas llevaba Harrison, otra el gobernador Lytelton, otra el capitán Digges y otra el primer teniente del navío, con orden expresa de que no se abriera sin concurrir los cuatro que debían dar certificación de haberse procedido con la legalidad necesaria. Antes de salir de Portsmouth se tomaron las alturas correspondientes²⁷ del Sol para arreglar el cronómetro por M. Robertson, profesor de matemáticas, en presencia de Harrison, el gobernador Lytelton y del capitán, y teniente del navío con el Comisario del Puerto, Hughes, y el matemático Juan Robinson; se firmaron y sellaron dichas observaciones y se remitieron al Almirantazgo. El matemático Robinson se mandó embarcar en el propio navío para celar el todo, y que llegado a Jamaica pudiese tomar las alturas correspondientes del Sol, y observar la longitud de los satélites de Júpiter, a fin de comparar con la que diese el cronómetro; pues no era asunto de poderse fiar de la signada por las cartas, mayormente cuando Harrison pretendía aún mayor exactitud de cuanta hasta ahora se ha podido imaginar, siendo acreedor a los premios que se han ofrecido sobre el asunto... Puede ser que ahora en los principios no condesciendan los ingleses a participarnos el secreto, pero es seguro que después de las próximas experiencias no puedan evitarlo. Las medidas que será preciso tomar son de que se vayan a su tiempo dos o tres relojeros españoles de los que se conocen aplicados, a que aprendan con el mismo Harrison, procurando contentar a este; pues aunque llegue el caso de que nos vendan los cronómetros, no es esto suficiente; es preciso que haya después quien los tenga limpios y corrientes; porque en esto consiste el beneficio; y que si llegase el caso que se rompa una rueda, haya quien la sepa hacer de nuevo».

A estas alturas del siglo XVIII la solución astronómica, por antonomasia, continuaba siendo el método de las distancias lunares, no solo por disponer de tablas con efemérides cada vez más rigurosas, sino también por contar con instrumentos que proporcionaban datos más fiables. De nuevo se pone de manifiesto que la mejor contribución de los ingleses a las Ciencias de la Ilustración fue la derivada de su reconocida faceta de constructores de instrumentos geodésicos²⁸ o de navegación. En el año 1731 ideó J. Hadley su octante²⁹, llamado así por disponer de un limbo con una amplitud de 45°, que disponía de un dispositivo óptico para medir las alturas de las estrellas sobre el plano del horizonte y la distancia angular que las separaba en la esfera celeste. Su evolución natural desembocó en el sextante, especialmente proyectado para la medida directa de las distancias lunares; uno de los que causó sensación fue el que construyó J. Ramsdem en 1772, ya que fue empleado con éxito durante la tercera travesía del capitán Cook, junto al cronómetro de Harrison.

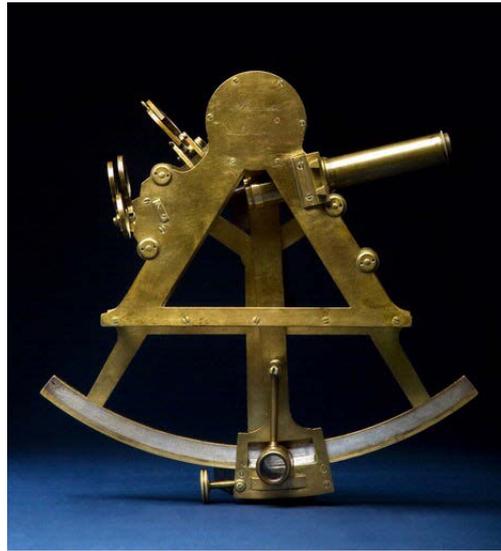
Mientras tanto proseguía la investigación sobre la diferencia de longitudes «terrestres». Fruto de ello fue el método de las señales de fuego. Su autor, el astrónomo La Caille, lo llevó a la

²⁷ El método astronómico de las alturas correspondientes trataba de hallar la hora del paso del Sol por el meridiano del lugar. La hora se obtenía como promedio de las que se iban obteniendo al observar el Sol en instantes en que tuviese la misma altura, antes y después de su culminación; instantes que se conocen con el nombre de posiciones correspondientes, en tanto que son simétricas con relación al citado meridiano.

²⁸ J. Ramsdem, uno de los mejores instrumentistas, ideó en 1763 una máquina de graduar con la que resolvió la cuestión de dividir un círculo de bronce. Poco después fabricó su gran teodolito, con un limbo de 91 cm de diámetro, que con ayuda de micrómetros permitía hacer lecturas de hasta un segundo de aproximación. La construcción del instrumento fue financiada por la *Royal Society*, haciendo posible la primera triangulación precisa de las Islas.

²⁹ Los más directos antecedentes de este instrumento fueron la vara de Jacob, o ballesta, debida a Levi ben Gerson (1330) y el sector cuadrangular ideado por J. Davis en 1595, con el que se podía observar indirectamente el Sol. El astrónomo francés La Caille homenajeó a Hadley, dando el nombre de octante a una constelación del hemisferio Sur.

práctica en el transcurso de las operaciones geodésicas relacionadas con el paralelo de Brest, París y Estrasburgo; aunque las primeras experiencias las había realizado antes, en 1738, entre las montañas francesas de Sète (Hérault) y Saint-Victoire (Aix-en-Provence). Los resultados de las cuatro medidas efectuadas, $7^m 34^s$, $7^m 33^s.5$, $7^m 32^s.5$ y $7^m 33^s$, mostraron que la exactitud alcanzada superaba con creces a los que se podrían haber obtenido observando los eclipses de los satélites de Júpiter. Esta novedosa metodología se empleó, con ligeras modificaciones, en las operaciones más señaladas del siglo XIX, tal como se tendrá ocasión de comprobar poco más adelante.



Sextante construido por Jesse Ramsdem. *Smithsonian National Air and Space Museum.*

Otra de las contribuciones más sobresalientes a la resolución del problema de la longitud fue el uso de las técnicas geodésicas, basadas en la geometría del elipsoide de revolución y en las ecuaciones diferenciales de sus líneas geodésicas. La cuestión entraña una cierta dificultad, al tratarse de una compleja generalización de las transformaciones simples que permiten pasar de las coordenadas polares, módulo y argumento, a las coordenadas cartesianas, abscisa y ordenada. El papel del módulo y del argumento lo jugarían la distancia, reducida al elipsoide, y el acimut, mientras que el de las cartesianas lo desempeñarían las coordenadas geográficas. En otras palabras, conocidas la latitud y longitud de un punto se pueden hallar las de otro, si se conocen los parámetros que definen el elipsoide, el desarrollo del arco geodésico que los une y el acimut de este último³⁰.



Triangulación geodésica que unió los observatorios de Greenwich y de París, y permitió determinar la diferencia de longitudes geográficas entre ambos.

³⁰ En realidad, las coordenadas así obtenidas no coincidirían con las que se hubiesen determinado por vía exclusivamente astronómica (coordenadas astronómicas); sin embargo las diferencias entre ellas son insignificantes y relacionadas con la desviación de la vertical. De ahí que a las coordenadas curvilíneas que figuran en la iconografía cartográfica se les conozca con el nombre de coordenadas geográficas, refiriéndose indistintamente a las coordenadas astronómicas y a las geodésicas, aunque en rigor se trate de estas últimas.



Apunte del Observatorio del Retiro (Madrid) por Francisco de Goya. Se conserva en el Museo del Prado.

Basándose en esta última metodología se efectuaron los primeros enlaces astronómicos, de los tiempos modernos, entre puntos muy alejados sin intervisibilidad. El más sobresaliente fue el realizado entre los Observatorios de Greenwich y París, durante el año 1787, llevando a la práctica la propuesta que había realizado en su momento Cassini de Thury. Para ello se proyectó y observó una triangulación en forma de cadena y compuesta por veinte triángulos, los instrumentos usados fueron los teodolitos de Ramsden y los círculos repetidores de J. Borda.

Llegados al siglo XIX ha de reseñarse el marcado protagonismo que adquiere España en este campo de la geografía matemática, gracias a las aportaciones de sus geodestas y de sus astrónomos; sobresaliendo Carlos Ibáñez entre los primeros y Miguel Merino entre los segundos, ambos miembros de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Tan brillante trayectoria la había iniciado el valenciano J. Chaix, subdirector que fue de la Escuela de Ingenieros Cosmógrafos y estrecho colaborador de Coronado, quien en el año 1799 determinó la diferencia de longitudes entre Madrid y París, observando el paso de Mercurio por el Sol. El valor obtenido aseguraba que Madrid estaba $24^m 8^s$ al Oeste de la capital francesa, aunque se modificase después como fruto de las campañas emprendidas por los Observatorios astronómicos de ambas ciudades³¹, en las que participó muy activamente el ya citado Merino, el cual llegó a dirigir el Observatorio madrileño del Retiro.

Chaix colaboró también en una operación de gran envergadura, el enlace geométrico³² de las Islas Baleares con las costas levantinas, que nació al amparo de la prolongación del meridiano de Francia y de la definición del Sistema Métrico Decimal. Tanto él como J. Rodríguez³³, el sabio español en palabras de J. B. Delambre, intervinieron decisivamente junto a los franceses J. B. Biot y J. F. Ara-

³¹ *El Real Observatorio Astronómico de Madrid (1785-1975)*, es una publicación rigurosa y amena que repasa la historia de tan señera institución, de la que su autor, Manuel López Arroyo, fue uno de sus últimos directores.

³² Sin embargo el enlace no se pudo completar del todo hasta muchos años después, cuando lo hizo el equipo dirigido por Carlos Ibáñez, primero como Director del Distrito Geodésico y Catastral de Levante y luego como Director General del Instituto Geográfico y Estadístico. Las operaciones dieron comienzo en 1865 y finalizaron en 1885, tan considerable periodo de inactividad se debió al compromiso adquirido con el gobierno francés, con relación al enlace astronómico y geodésico entre España y Argelia. *Memorias del Instituto Geográfico y Estadístico. Tomo VII. 1886*. La escala de la red geodésica, formada con esa ocasión, la proporcionó una regla que había diseñado el propio Director y que luego sería conocida con el nombre de aparato de Ibáñez.

³³ Los pormenores de esa interesante observación figuran, entre otras, en *Los trabajos geodésicos de José Rodríguez González*. Rodríguez fue un astrónomo muy valorado fuera de España

go, que habían sido nombrados directores del proyecto por P. S. Laplace.

A las determinaciones previstas de latitud y gravedad, se añadieron las de la longitud geográfica y la del acimut de una referencia, para poder replantear la dirección de la meridiana. Esa última operación era imprescindible para poder hallar las horas de paso por el meridiano del lugar³⁴, de las diferentes estrellas que habían previsto, y por tanto la longitud del mismo, como diferencia entre esas horas locales y las que les servían de referencia. El propio Arago incluyó después en el segundo tomo de sus Memorias Científicas el valor obtenido, que localizaba la estación elegida, el vértice geodésico Mola en la Isla de Formentera, a $0^{\circ} 48' 11''$. 26 al Oeste de París.



El vértice geodésico de primer orden Mola (Isla de Formentera) en la actualidad.

Antes de que comenzasen esos trabajos, Biot ya había expresado, en sus informes previos a las autoridades francesas, la conveniencia de prolongar el meridiano de París más allá del litoral valenciano, hasta lograr enlazar el continente europeo con el africano. Hubo que esperar al último tercio del siglo para que los gobiernos de España y Francia decidieran abordar el proyecto, nombrando como responsables a Carlos Ibáñez y a François Perrier. Tan ambiciosa operación discurrió con los sobresaltos propios de altitudes tan extremas, las dificultades inherentes a visuales excesivamente largas y al hecho, tan problemático y novedoso, de ser casi rasantes al Mediterráneo. El caso es que se logró un éxito irrepitible y de común acuerdo se realizó la publicación internacional que daba cuenta de las observaciones realizadas, de los cálculos efectuados y de los resultados obtenidos: *Enlace geodésico y astronómico de la (sic) Argelia con España, realizado en 1879, por Orden de los Gobiernos de España y de Francia, bajo la dirección de los señores: General Ibáñez, por parte de España, y Coronel Perrier, por parte de Francia*³⁵.

C. Ibáñez confió la dirección de las observaciones astronómicas a Miguel Merino y Melchor, contando con él desde el primer momento: ya que participó en todas las reuniones preparatorias que tuvieron lugar para discutir tanto las cuestiones científicas que se pensaban analizar, como los pormenores de la intendencia, nada despreciables por la localización tan peculiar de los dos vértices españoles. El mismo Perrier se responsabilizó de las observaciones astronómicas del lado francés, siendo esta la última campaña de campo en que participó. En realidad los instrumentos astronómicos solo se estacionaron en dos vértices del cuadrilátero: Tetica y M'Sabiha (cerca de Orán), habida cuenta de que el acceso a los mismos y sus previsibles condiciones atmosféricas

³⁴ El cálculo de la longitud basada en ese fenómeno astronómico de la culminación pasó a ser uno de los más empleados en el futuro. Su fiabilidad estaba pues condicionada por la asociada a la determinación del acimut y de la latitud, también necesaria para el cálculo del anterior.

³⁵ Bajo sus nombres respectivos figuraba lo siguiente: Ibáñez (Individuo de la Academia de Ciencias de Madrid, Director General del Instituto Geográfico y Estadístico), Perrier (Individuo de la Academia de Ciencias del Instituto de Francia, Jefe del Servicio Geográfico del Ejército).

los hacían preferibles a los otros dos: Mulhacén y Filhaoussen. Su cometido principal era calcular la diferencia de longitudes entre los dos vértices anteriores, sus latitudes y los acimutes astronómicos de dos direcciones cualesquiera que partieran de ellos. Las observaciones propiamente dichas dieron comienzo el diez de octubre de ese año 1879, una vez instalados en los correspondientes pilares, del nuevo campamento astronómico, todos los instrumentos necesarios³⁶.

La observación más compleja que se pretendía realizar culminaba con el cálculo de la diferencia de longitudes geográficas entre los vértices, debiendo determinar, en primer lugar, la hora local en cada uno de ellos. Inmediatamente después había que proceder a su comparación, apoyándose para ello en la emisión y recepción de señales luminosas³⁷, sucesivas y recíprocas, correspondientes a un mismo instante físico. La hora se obtuvo observando numerosas culminaciones de estrellas circumpolares. Todas las observaciones se registraron temporalmente por medio de los cronógrafos, con receptor Morse incorporado, cons-truidos en talleres franceses.

La luz eléctrica que marcaba el instante preciso en que debería de fijarse la hora en cada vértice, para luego hallar su diferencia, se



Mapa del enlace geodésico y astronómico entre España y Argelia



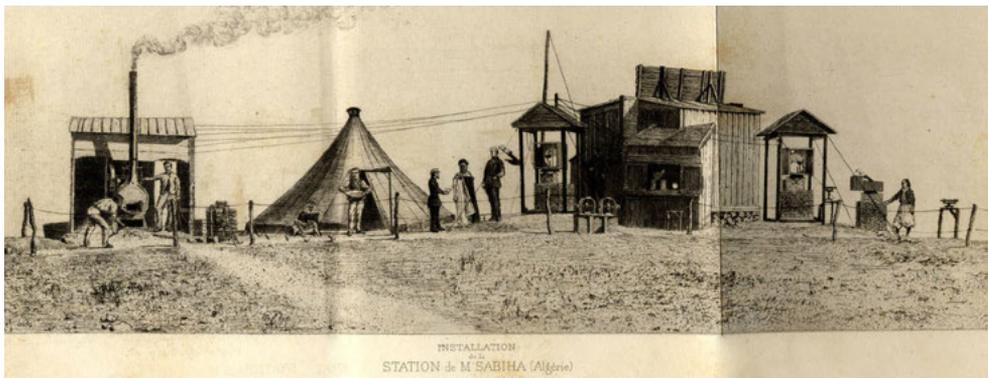
El vértice Tetica el 2 de noviembre de 1987, la placa rectangular recuerda el enlace intercontinental.

³⁶ Para hacerse una idea de la complejidad del proyecto se relaciona seguidamente el instrumental que hubo que transportar a la cumbre de la Tetica, curiosamente próximo al Observatorio hispano alemán de Calar Alto: un anteojo de pasos, convertible en círculo meridiano portátil, un teodolito Repsold, un péndulo sidéreo de Matthäus Hipp y un cronógrafo portátil, además de toda la maquinaria, requerida como auxilio imprescindible para el éxito de la operación, relacionada con la emisión y recepción de las señales luminosas.

³⁷ Ese método para calcular la diferencia de longitudes era la variante moderna del método de las señales de fuego, ya referido en varias ocasiones.

consiguió añadiendo al instrumento óptico original un antejo, mediante el cual podía dirigirse la luz en la dirección deseada. Al final de la operación se habían visado alrededor de 190 estrellas, aunque el número de punterías realizadas fuese mucho mayor, ya que hubo algunas que se observaron veinticinco veces. Tras efectuar las oportunas correcciones, el valor adoptado finalmente para la diferencia de longitudes geográficas dado por Merino y Perrier fue $\Delta\lambda = 6^m 14^s.979 \pm 0^s.013$, debiendo entender que el vértice español se encuentra al Oeste del argelino³⁸. Entre los estudiosos de la historia de la ciencia continua manteniéndose el respeto por todos aquellos que hicieron posible la aventura científica del doble enlace. Unos de los últimos comentarios al respecto fue el realizado por el prestigioso geodesta francés, Jean Jacques Levallois, Ingeniero Geógrafo y antiguo Secretario general de la Asociación Geodésica Internacional, el cual aseguraba en el año 1988 (*Mesurer la Terre, 300 ans de géodésie française. De la Toise du Châtelet au Satellite*) que con el enlace hispano argelino se habían cumplido los deseos de sus compatriotas Biot y Arago, añadiendo después «esta ambiciosa operación, perfectamente estudiada y proyectada, favorecida por la buena suerte y coronada por un rotundo éxito, proporcionó a sus responsables el reconocimiento científico universal, además de los honores académicos y recompensas oficiales».

La reseña sobre la cuestión de la longitud se va a culminar con varios extractos de un discurso de Carlos Ibáñez ante la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales³⁹, dando la bienvenida a Joaquín Barraquer y Rovira, que había sido elegido miembro de esa institución en abril de 1878, aunque su recepción tuvo lugar el día 1 de mayo de 1881. Se daba la circunstancia de que Barraquer era el geodesta del Instituto Geográfico que había dirigido, desde el pico del Mulhacén, las observaciones geodésicas del enlace anterior. En esta ocasión, el discurso de bienvenida leído por Ibáñez fue marcadamente institucional, reflejándose tanto su posición al frente del Instituto Geográfico y Estadístico como su condición de presidente de la Asociación Geodésica Internacional. En su disertación, una brillante lección en la que se aborda la reciente historia de la geodesia, se aprecian tres bloques perfectamente diferenciados y referidos respectivamente a su vertiente



Campamento instalado en el vértice argelino de M'Sabiha durante el enlace astronómico y geodésico entre Europa y África.

³⁸ Los detalles de esta gran aventura científica se pueden consultar en el artículo *El enlace astronómico entre Europa y África de 1879*.

³⁹ Tanto este discurso como el que pronunció al recibir al nuevo académico Pedro Alcántara de la Llave han sido recientemente comentados en el artículo *Los discursos de recepción del General Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero en representación de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*.

geométrica, física y metrológica; aunque solo se referan aquí los aspectos directamente relacionados con la longitud.

El discurso de Ibáñez cobra especial interés, en este contexto, cuando se encarga de relatar con evidente amenidad unos acontecimientos de capital importancia en el desarrollo de la localización geográfica del territorio, pues apoyándose en ellos pudo resolverse definitivamente el secular problema de la determinación de la longitud. Ni que decir tiene que el protagonista de excepción en los mismos no fue otro que Samuel Morse. Así se expresaba Ibáñez:

«Navegaba en 1832 a bordo del *Sully*, desde el Havre a Nueva-York, un renombrado pintor americano, que en los ocios de la travesía, departiendo con algunos pasajeros y meditando sobre los experimentos de Franklin, imaginaba los fundamentos del pequeño aparato que ha cambiado la faz del sistema de comunicaciones entre los habitantes de la Tierra. Samuel Morse, que no era otro el pintor, hubo de dejar por entonces sin realización práctica su peregrina idea, que vimos planteada doce años después, cuando se puso en comunicación electro-telegráfica a las ciudades de Washington y Baltimore. No se hizo esperar mucho tiempo la aplicación de tan prodigioso invento a la geodesia, puesto que el mismo año de 1844 tuvo el Capitán Carlos Wilkes la idea de medir la diferencia de longitudes geográficas entre las mencionadas ciudades, valiéndose del telégrafo eléctrico; y dos años después la determinó Walter, por el indicado procedimiento, entre Washington y Filadelfia. Pero en las aplicaciones científicas era ante todo necesario determinar, con precisión, el tiempo invertido por la corriente eléctrica para recorrer la distancia que media entre los puntos unidos por un hilo telegráfico; experimento realizado con este objeto bajo la dirección del mismo Walter, en el intervalo de 1849 a 1851. El promedio de los resultados concordantes, entonces, obtenidos, entre diferentes líneas, es de 24.800 kilómetros por segundo. El Nuevo Mundo se hallaba en posesión de un procedimiento completo para determinar la diferencia de longitudes geográficas, el cual ha llevado, con toda justicia, el nombre de *método americano*».

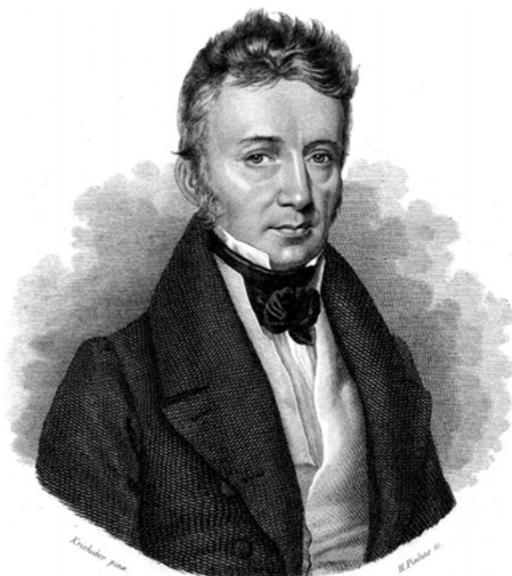


El geodesta y académico
Joaquín Barraquer y Rovira.



Samuel F.B. Morse,
junto al primer
instrumento telegráfico
y al primer mensaje
enviado por el mismo:
What hath god wrought
(Qué ha hecho Dios).

Como era previsible, las noticias de los experimentos americanos no tardaron en llegar a Europa, indicando Ibáñez que fue el astrónomo austriaco J. J. Litrow, Director del Observatorio de Viena, el primero en usar el nuevo procedimiento telegráfico para calcular la diferencia de longitudes entre Viena y Praga en el año 1831. La unión permanente entre los dos continentes no se consiguió hasta el año 1866, merced a los cables metálicos instalados en el fondo oceánico; fue entonces cuando, en palabras de Ibáñez, se «vio por primera vez tal maravilla: una diferencia de longitudes determinada a 4300 kilómetros de distancia por observaciones de las mismas estrellas». Seguidamente detalla los logros conseguidos:



El astrónomo austriaco Joseph Johann von Litrow, director del Observatorio de Viena entre 1819 y 1840.

«El resultado alcanzado, en tan extraordinaria operación, fue que la diferencia de longitudes entre los observatorios de Cambridge, en los Estados-Unidos, y de Greenwich, en Inglaterra, es de $4^{\text{h}} 44^{\text{m}} 30^{\text{s}}, 99$, con un error probable de *una décima de segundo*. Repetida la operación por el cable francés de Duxbury, en 1870, no difirió del anterior resultado obtenido más que en una *centésima de segundo*, y el error probable de la determinación bajó a *seis centésimas de segundo*. Otra determinación se llevó todavía a cabo, en 1872, por el cable francés de Saint-Pierre; resultando la diferencia de longitudes exactamente igual a la anterior, hasta las centésimas de segundo inclusive, con un error probable de *cuatro centésimas de segundo* tan solo. Maravillosa concordancia, que ensalza el sistema americano, cuya precisión era ya entonces tan grande».

Después refiere Ibáñez otro invento del año 1848 con especial incidencia en las observaciones de la astronomía geodésica e igualmente asociado a la determinación fiable de la longitud geográfica; en esta ocasión el inventor fue también americano, el astrónomo W. C. Bond, el cual lo ideó en plena efervescencia de las medidas americanas al respecto. La utilidad de tan ingenioso instrumento la describe Ibáñez a la perfección.

«Desde la invención del cronógrafo, multitud de geodestas avezados a las observaciones terrestres, se han puesto, en cortísimo plazo, en disposición de observar los pasos de las estrellas y otros fenómenos análogos, con la misma precisión que el más hábil astrónomo de un observatorio, y con una superior a la del mas diligente observador que operase sin tan ingenioso aparato; el cual proporciona, además, la inapreciable ventaja de conservar la impresión gráfica del tiempo y de la observación del fenómeno en las cintas de papel, circunstancia que permite comprobar y rectificar el resultado de la observación cuantas veces se considere conveniente».

Carlos Ibáñez no tardó en disponer que el método americano se emplease en el Instituto Geográfico y Estadístico, para calcular las diferencias de longitud, ya que entre los años 1882 y 1883 así lo hicieron Eugenio de Eugenio y Antonio Esteban en el triángulo Badajoz, Lérica y Madrid.

Las estaciones elegidas⁴⁰ se unieron telegráficamente mediante un hilo directo, «sin interposición de revelador alguno en ningún punto intermedio de la línea». En las memorias del referido Instituto (Tomo VI. Año 1886) se da cuenta de que la Dirección General de Correos y Telégrafos «puso a disposición de los observadores este hilo durante el tiempo necesario, así como las pilas, aparatos Morse y demás accesorios electro-telegráficos que, para facilitar y asegurar el buen éxito de la operación principal, eran indispensables». Los cronógrafos empleados fueron los de Fuees, con ligeras modificaciones. El informe sobre los trabajos, que ocupó un total de 350 páginas del citado tomo, proporcionó los siguientes resultados:

Lérida-Madrid..... (17^m 15^s.423 ± 0^s.011),
Madrid-Badajoz..... (13^m 10^s.459 ± 0^s.014),
Lérida-Badajoz..... (30^m 25^s.844 ± 0^s.009).

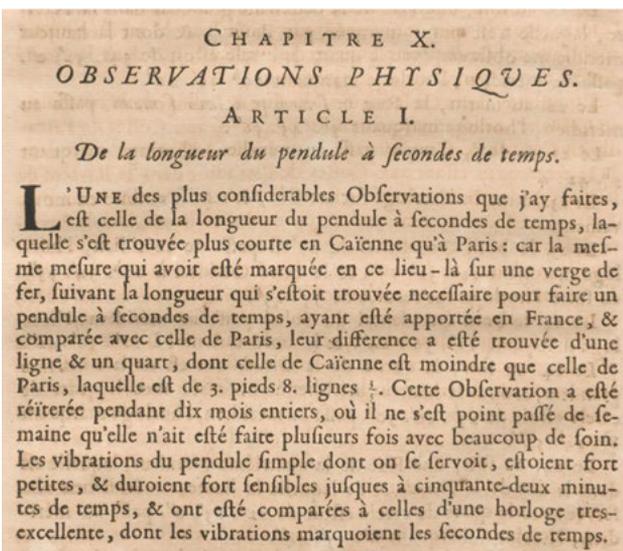
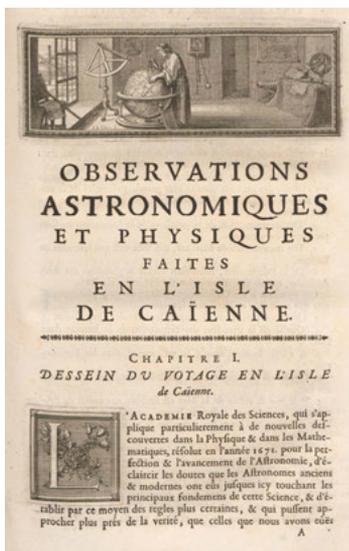
⁴⁰ En Badajoz fue el vértice geodésico Reducto, llamado así por encontrarse en un enclave levantado por las tropas francesas durante el primer sitio a la ciudad. En Madrid fue el Observatorio del Retiro. El vértice denominado Lérida estaba situado al pie de la torre del castillo, junto a la puerta del cuartel de Claustros.

CAPÍTULO IX | De cómo el geómetra Pierre Louis de Maupertuis acható la Tierra



CAPÍTULO IX | De cómo el geómetra Pierre Louis de Maupertuis acható la Tierra

La forma de la Tierra ha despertado desde siempre el interés de los grandes matemáticos; aunque haya aumentado considerablemente en los últimos cuarenta años: Newton (1689), Huygens (1690), Cassini (1701), Maupertuis (1732), Clairaut (1733), Euler (1740), Mac Laurin (1742), D'Alembert (1756), Lagrange (1759), Laplace (1772), Legendre (1784), Monge (1787), Poisson (1811), Gauss (1813), Cauchy (1815), Jacobi (1834), Stokes (1849), Dirichlet (1857), Dedekind (1860), Riemann (1860), Poincaré (1885), Darwin (1906, el hijo de Charles Darwin), Jeans (1917), Cartan (1924), Chandrasekhar (1960), y otros. Entre los españoles han de citarse a: Nebrija, Jorge Juan, Ulloa, Rodríguez, Saavedra, Ibáñez de Ibero, Merino y Julio Rey Pastor.

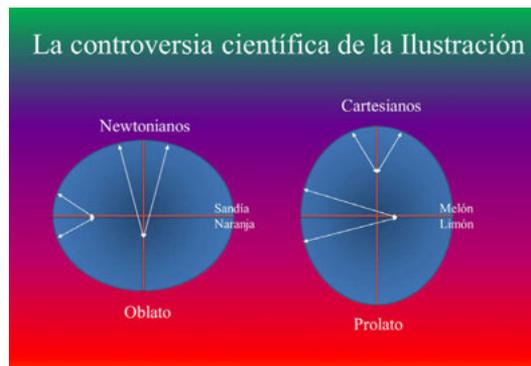


Memoria presentada en la Academia de Ciencias por Jean Richer (1679), dando cuenta de las observaciones realizadas en la Isla de Cayena (Guayana francesa) en los años 1672 y 1673. El texto es el fragmento en el que se constató que el valor de la gravedad era menor en la colonia que en la metrópoli.

La aparición del elipsoide como modelo matemático de la Tierra, tiene su origen en el experimento gravimétrico de la Guayana francesa, realizado por el astrónomo Jean Richer y en los consiguientes estudios teóricos de Newton y Huyghens. El astrónomo fue comisionado por la Academia de Ciencias para efectuar una serie de observaciones astronómicas en la Isla Cayena. Allí fue enviado como matemático, con la intención de medir la paralaje de Marte en su oposición¹, de estudiar los movimientos del Sol y los Planetas, así como para evaluar la refracción atmosférica en el ecuador. Durante ellas usó dos tipos de péndulos: que batían segundos y medios segundos. En el transcurso de ellas fue cuando quedó atónito, al comprobar el retraso sufrido por su reloj de péndulo. La causa resulta ahora evidente: la gravedad era menor de la esperada. Ateniéndose a la fórmula dada por Huygens que la relacionaba con el periodo y la longitud del péndulo, se concluyó que la estación estaba más lejos del centro de la Tierra que París; en otras palabras, la Tierra presentaba un abultamiento ecuatorial². Un descubrimiento capital en el que continuamente se apoyaron tanto el holandés como Newton para elaborar su modelo matemático de la Tierra. Esta contribución geodésica, y la anterior de Newton, fueron los primeros pasos que se dieron en la dirección de modelar teóricamente la forma de la Tierra, sustituyendo la esfera tradicional por el novedoso elipsoide de revolución. Sin embargo, la sustitución real se produjo definitivamente en el siglo siguiente, al estar avalada por las numerosas observaciones de campo con las que obtener los correspondientes radios de curvatura.

La primera constatación geométrica de la curvatura variable de la Tierra se efectuó cuando se prolongó el meridiano de París en los dos sentidos, extendiéndose la triangulación correspondiente desde Dunkerque hasta Perpiñán. Los trabajos comenzaron en 1683, encargándose del segmento de menor latitud Giovanni Domenico Cassini, en su calidad de director del proyecto, mientras que el otro se le encomendó a Philippe de la Hire. Cassini I fue luego sustituido por su hijo Cassini II, autor de la obra *Traité de la grandeur et de la figure de la Terre* (1723), en la que incluyó su célebre frase: *...ainsi, il parait avec assez d'evidence que les degrés d'un méridien sont plus grands, plus ils sont près de l'Equateur et diminuent au contraire à mesure qu'ils s'approchent du pôle*. Incluso fijó la excentricidad de la elipse meridiana (próxima a 0.144, es decir la relación entre el semieje polar y el ecuatorial era del orden de 1.08). Es decir que Cassini II defendió justo lo contrario de lo que habían previsto tanto Newton como Huygens en sus estudios teóricos y comprobado físicamente por Richer, el hecho de que el modelo terrestre debía ser un elipsoide aplastado por el ecuador y no por los polos.

Se originó así la controversia científica trajo consigo las mayores discusiones que mantenidas a todo lo largo del siglo XVIII;



Los dos modelos elipsoidales de la Tierra, que desataron la mayor controversia científica de la Ilustración.

¹ Gracias a esta observación, Cassini I que también la había medido en París, pudo fijar por primera vez la distancia de la Tierra a Marte y al Sol. El valor obtenido para la segunda (la Unidad Astronómica), próximo a los 140 E6 km, fue el más aproximado hasta entonces.

² Se define el aplastamiento del elipsoide de revolución como el cociente entre la diferencia de los dos semiejes (ecuatorial y polar) y el semieje ecuatorial: $f = (a-b) / a$.

un periodo que debe identificarse desde el punto de vista geodésico como la era elipsoidal, pues fue entonces cuando quedó definitivamente superado el modelo esférico de la Tierra. Sin embargo, eran tan opuestos los elipsoides propuestos, el oblató de los newtonianos frente al prolato de los partidarios de Cassini, que decidió intervenir la Academia de Ciencias de París para zanjar la discusión. El propio Newton había recomendado en su momento que la cuestión no se resolvería hasta que se evaluara la curvatura del modelo elipsoidal en dos lugares de latitudes muy dispares.

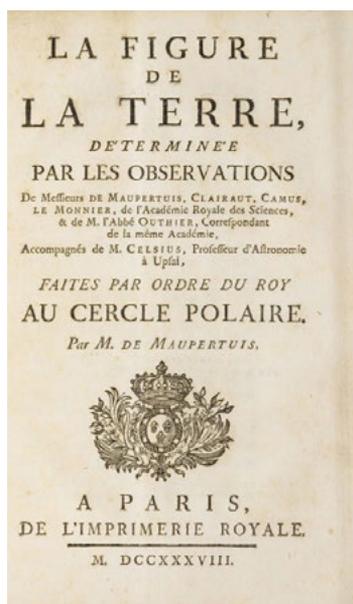
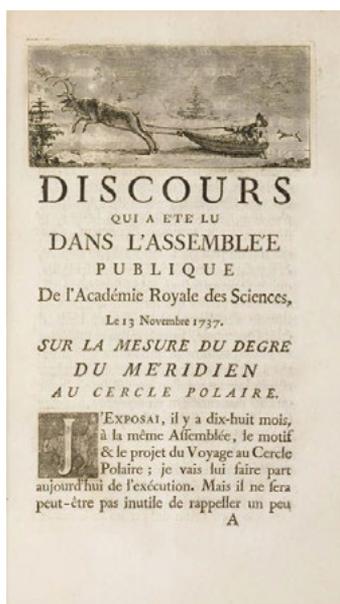
Se entiende así que la Academia optara por subvencionar el proyecto que, en el año 1735, le presentara Louis Godin para medir grados de meridiano en el Ecuador. Poco tiempo después fue Pierre Louis Moreau de Maupertuis el que propondría realizar una operación parecida en la zona polar, siendo también aceptada su proposición. De esa manera quedaría definitivamente resuelta la polémica ya que el radio de curvatura del meridiano elíptico sería mínimo en el primer caso y mucho mayor en el segundo (máximo en los polos). El ministro Maurepas fue el encargado de realizar las gestiones diplomáticas ante los gobiernos de España y Suecia para conseguir las autorizaciones pertinentes, y poder así realizar los trabajos en el virreinato de Perú y en el golfo de Botnia.

Maupertuis dirigió la expedición de Laponia, contando con la colaboración de personajes tan ilustres como Celsius o Clairaut, el cual aprovechó su participación para comprobar que la intensidad de la gravedad aumentaba con la latitud. La operación duró poco más de un año, entre 1736 y 1737, determinándose el desarrollo del arco por medio de la triangulación que discurría por el río Torne y su amplitud angular a través de las distancias cenitales meridianas de las estrellas α y δ de la constelación del Dragón. Los resultados calculados sobre el terreno permitieron estimar en 111949 m el desarrollo lineal de un grado de meridiano. Una cifra que les permitió asegurar, de vuelta en París, que la Tierra era un elipsoide achatado por los polos. El día 13 de noviembre de ese año 1737 tuvo lugar en la Academia de Ciencias la sesión pública y solemne en la que Maupertuis informó del resultado de sus medidas, añadiendo que con ellas quedaba probado que la Tierra estaba achatada por los polos³.



Medalla conmemorativa de las dos expediciones científicas auspiciadas por la Academia de Ciencias de París.

³ En realidad, ya se lo había comunicado informalmente el 20 de agosto, nada más llegar a París. Siete años después, 14 de noviembre de 1744, Bouguer hizo lo propio en su comunicación a la Academia; fijando en 56.753 toesas el valor del grado y en 1/179 del aplastamiento elipsoidal (teniendo en cuenta los resultados de sus medidas de grado en el virreinato de Perú y los cálculos de Maupertuis).



Pronunciamento formal de Maupertuis en la Academia de Ciencias, las primeras 78 páginas de su libro *La Figure de la Terre*; una publicación clave en la historia de la geodesia, en la que se constató, por medio de la geometría y de la física, la existencia del aplastamiento polar de la Tierra.

El prestigio de Maupertuis fue en aumento tras su exitoso viaje y la publicación de su libro *La Figure de la Terre*⁴, aunque un tanto empañado por sus ataques a los cartesianos, especialmente virulentos en el caso de Jacques Cassini. En el año 1740 fue invitado por el rey Federico el Grande a presidir la futura Academia de Berlín, aunque el nombramiento no se pudiera hacer efectivo hasta seis años después. En el intermedio llegó a presidir también, durante poco tiempo, la de París. Las relaciones con sus contemporáneos no fueron nada fáciles, buena muestra son las que mantuvo con Voltaire, que pasó de las alabanzas más sentidas (*Discours en vers sur l'homme, quatrième discours*⁵) a las críticas más acervadas (*Diatribes du docteur Akakia*⁶). Voltaire trató de desvirtuar sus méritos con un ataque personal, mencionando el hecho cierto de que se trajo desde Laponia a dos hermanas atraídas por sus dotes de buen músico.

Al abordar este trabajo sobre la obra geodésica de Maupertuis se barajaron dos posibilidades: optar por *La Figure de la Terre* (1738), como libro de referencia o hacerlo por *Éléments de géographie*, otra publicación del mismo autor editada en el año 1740. El primero de ellos es una especie de memoria de los trabajos llevados a cabo para cumplir con la misión que le había encomendado

⁴ Una de las mayores alabanzas fue debida a Voltaire: «je viens de lire une histoire et un morceau de physique plus intéressant que tous les romans...»

⁵ *Héros de la physique, Argonautes nouveaux*
Qui franchissez les monts, qui traversez les eaux
Dont le travail immense et l'exacte mesure
De la Terre étonnée ont fixé la figure.
Dévoilez ces ressorts, qui font la pesanteur.
Vous connaissez les lois qu'établit son auteur.

⁶ *Courriers 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
Ce que Newton connut sans sortir de chez lui.



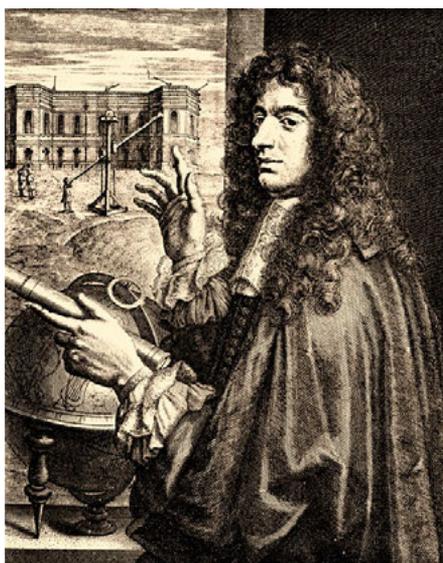
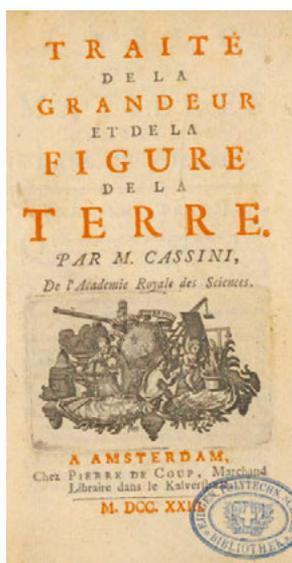
Monumento a Maupertuis en Tornio, levantado el 19.7.1959, y un grabado (Robert Le Vrac de Tournières, 1741) en el que se le ve aplastando la Tierra, sobre un dibujo que hace alusión a la zona polar.

la Academia de Ciencias. Se dividió en tres partes, por ser su contenido perfectamente diferenciable. En la primera de ellas, que constó de 15 capítulos, figuraron todas las operaciones hechas sobre el meridiano que cortaba el círculo polar. Esta se dividió a su vez en otras dos: una referida a las medidas propiamente dichas y la segunda a la repetición de todas ellas y a su verificación. En el segundo libro, que constó de 8 capítulos, se expusieron las observaciones para obtener las alturas de la estrella polar en Torné y en el monte Kittis, el valor de la refracción en el Círculo Polar y otras tendentes al cálculo de la longitud geográfica de Torné⁷. El tercer y último libro, con siete capítulos, es una interesante aportación gravimétrica, ya que lograron probar que el aplastamiento polar era considerablemente mayor que el previsto por Newton. Mención especial merece el comentario de Maupertuis acerca de la importancia de la física para la determinación de la figura de la Tierra, pues recordó a ese propósito que tanto Newton como Huygens creyeron que el conocimiento de la intensidad de la gravedad en diferentes lugares bastaría por sí mismo para determinar esa figura, logrando incluso una mejor aproximación que la esperable con las medidas del grado que se estaban efectuando en aquel tiempo.

El título elegido por Maupertuis para el segundo libro: *Éléments de Géographie*, se presta al equívoco, en tanto que su contenido no era el típico de los tratados al uso, sino una especie de alegato en favor de sus pronunciamientos favorables sobre el aplastamiento polar de la Tierra. No obstante, en su prólogo aseguraba que era el lector quien debería pronunciarse acerca de la controversia⁸

⁷ Aunque se intentó hacerlo a partir de las emersiones y ocultaciones de los satélites de Júpiter, las dificultades meteorológicas lo impidieron. Finalmente, solo fueron posible las observaciones de la ocultación de estrellas por la Luna.

⁸ La discusión alcanzó tal virulencia que Maupertuis decidió abandonar por un tiempo su país natal. Fuera de Francia contó siempre con el apoyo incondicional de Euler, el cual le animaría a mantenerse firme en su posición: no debe olvidarse que a su comprobación geométrica del achatamiento polar se añadía la física de Clairaut, otro de los expedicionarios a Laponia, brillantemente plasmada en la fórmula de la gravedad elipsoidal: $g_{\varphi} = g_e (1 + \beta \operatorname{sen}^2 \varphi)$, que permite calcular la relativa a un paralelo dado en función del valor que toma en el ecuador y de la latitud. Se constata así que aumenta con la latitud hasta alcanzar su máximo en los polos, β es el llamado aplastamiento gravimétrico (≈ 0.005).



Jacques Cassini, con el Observatorio de París al fondo, junto a la portada de su obra. En ella defendió que el modelo matemático de la Tierra debería de ser el elipsoide de revolución achatado por el ecuador. Fue el principal oponente que tuvo Maupertuis en la Academia de Ciencias.

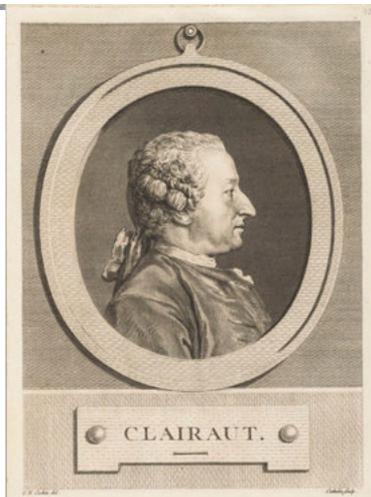
que mantenía con Jacques Cassini, desde que este defendiera su modelo de elipsoide prolato en la obra: *Traité de la grandeur et de la figure de la Terre*. La prueba más concluyente la aportó Maupertuis como colofón a su libro: un listado a doble columna con los desarrollos del grado de meridiano, desde el ecuador hasta el polo, uno realizado por Cassini y otro por él mismo. En ambos se apreciaba la variación del desarrollo con la latitud, disminuyendo al pasar del ecuador al polo (elipsoide prolato) o aumentando a medida que crecía la latitud (elipsoide oblato).

El temario del libro se estructuró en 22 apartados, manteniendo en todo momento un enfoque generalista al estudiar la figura de la Tierra, sin dejar de referir los principales hitos históricos que jalonaron su desarrollo. Esa circunstancia fue determinante a la hora de elegir este segundo libro como soporte documental para este trabajo, pensando que el contenido tan específico del primero haría que el lector medio sintiese un cierto rechazo hacia el mismo; dificultando así el objetivo que se pretende alcanzar: dar a conocer la primera constatación geométrica y física que tuvo lugar durante la expedición científica a Laponia, bajo la dirección expresa del matemático y geodesta Pierre Louis de Maupertuis.

La primera edición de la Geografía de Maupertuis fue anónima, un hecho sorprendente pero explicable por la gran tensión a que estaba sometido por aquel entonces; quizás actuase así con la creencia de que de esa forma se sospecharía que podría haber alguien con una cualificación parecida a la suya y que cuestionase, como él, el modelo francés de la Tierra, tan vehementemente defendido por Cassini y sus partidarios. Esa edición anónima incluyó en su portada un verso que ha pasado generalmente desapercibido, a pesar de que se indicase que el autor fue Virgilio (*Ecloga Tertia*). Su significado merece una cierta explicación, máxime cuando la selección de Maupertuis, del texto latino, impedía cualquier pronunciamiento. Su intención de permanecer en el anonimato parece clara, aunque diese la pista indirecta de que el autor debía ser astrónomo. El verso en cuestión: *quis fuit alter, descripsit radio totum qui gentibus orbem*, forma parte del diálogo mantenido por los pastores Menalcas y Damoetas. Concretamente cuando el primero de ellos, que decía haber perdido la memoria, no recordaba el nombre del astrónomo, que acompañaba a Conon en la escena referida, al formular su pregunta:

*De grege non ausim quicquam deponere tecum.
Est mihi namque domi pater, est iniusta nouerca,
bisque die numerant ambo pecus, alter et haedos.
Verum, id quod multo tute ipse fatebere maius,
insanire libet quoniam tibi, pocula ponam
fagina, caelatum diuini opus Alcimedontos,
lenta quibus torno facili superaddita uitis
diffusos hedera uestit pallente corymbos.
In medio duo signa, Conon et —quis fuit alter,
descripsit radio totum qui gentibus orbem,
tempora quae messor, quae curuus arator haberet?
Necdum illis labra admoui, sed condita seruo⁹.*

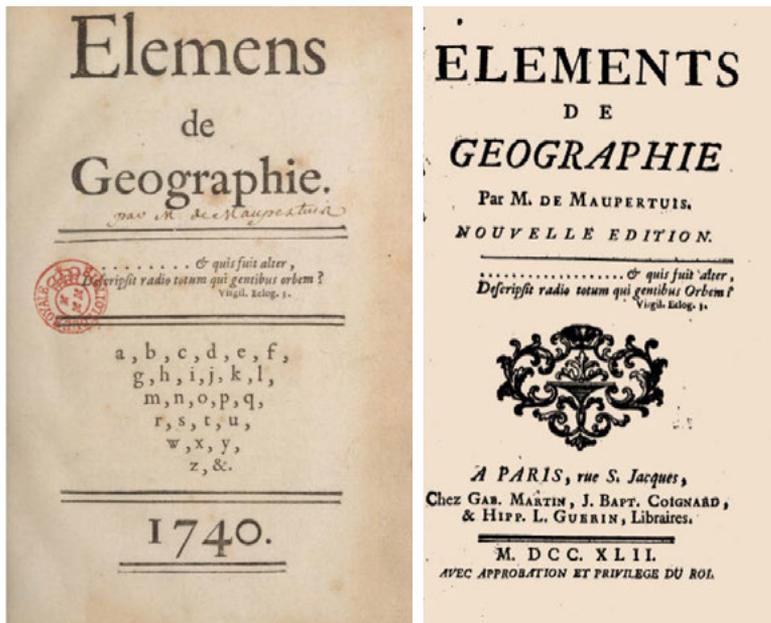
El paralelismo con la situación planteada por Maupertuis es evidente, puesto que en torno a ese párrafo se mantenía desde la antigüedad una controversia sobre la identificación del segundo personaje: el poeta Arato, citado en el texto, Eudoxio e incluso Arquímedes, amigo de Conon, son solo unos de los posibles; es comprensible por lo tanto que Maupertuis la asociara con la que se venía manteniendo a propósito de la forma de la Tierra. Movido seguramente por los consejos de Alexis Clairaut y de Leonhard Euler, se decidió a salir del anonimato dos años después y solicitar a la Academia de Ciencias la publicación de sus Elementos de Geografía. El 11 de mayo de 1742 fue leída en su sede, por parte de Nicole Reine Etable¹⁰ y de Alexis Clairaut, la presentación de la obra y recomendada su utilidad, tanto para la vida cotidiana como para la navegación.



Los matemáticos y astrónomos que defendieron la bondad del trabajo de Maupertuis: Nicole-Reine Etable Lapaute y Alexis Claude Clairaut.

⁹ Del ganado no me atrevería a apostar nada contigo. Pues tengo en mi casa un padre, una madrastra cruel, y los dos cuentan dos veces al día el ganado, y uno de los dos los cabritos. Pero, cosa que tú mismo reconocerás mucho mayor, puesto que te agrada hacerte el loco, me apostaré dos copas de haya, obra cincelada del divino Alcimedonte, en las cuales con fácil torno una vid flexible en relieve viste los desparramados racimos con la verde hiedra. En medio dos figuras, Conón y ¿quién fue el otro, que describió con el compás todo el orbe para los pueblos, qué épocas debía observar el segador, cuales el curvado labrador? Todavía no he acercado mis labios a ellas, sino que las conservo guardadas.

¹⁰ La matemática y astrónoma Nicole-Reine Etable Lapaute (1723-1788). Gran calculadora, colaboró con el matemático Alexis Clairaut y el astrónomo Jérôme Lalande para verificar las predicciones de Edmund Halley sobre el regreso del cometa (13 de abril de 1759).



Pierre Louis de
Maupertuis:
Primera edición de
los Elementos de
Geografía de 1740
y de su reedición
en 1742.

Se resume a continuación la lectura de ambos: se trataba de un texto inusual en el que se abordaba el estudio de la Tierra de un modo general, sin perder de vista la relevancia de su forma, tamaño y división; tan importantes para hallar el verdadero valor de las coordenadas geográficas de cualquier lugar. La utilidad para la navegación se concretó en la recomendación para transformar adecuadamente las leguas en grados, cuyo desarrollo dependería naturalmente del modelo elegido para la Tierra. Para los dos presentadores del trabajo de Maupertuis, los lectores del futuro libro se enfrentarían, tras las primeras reflexiones sobre la esfericidad terrestre, a los argumentos más rigurosos en que se apoyaron los geómetras para probar que el modelo matemático de nuestro planeta era el de un esferoide achatado por los polos. De él se conocían ya no solo la magnitud de su diámetro, sino también la diferencia existente entre sus dos semiejes: ecuatorial y polar. Su informe final fue taxativo: *Tout cela nous fait concluire que l'ouvrage est digne d'être imprimé.*

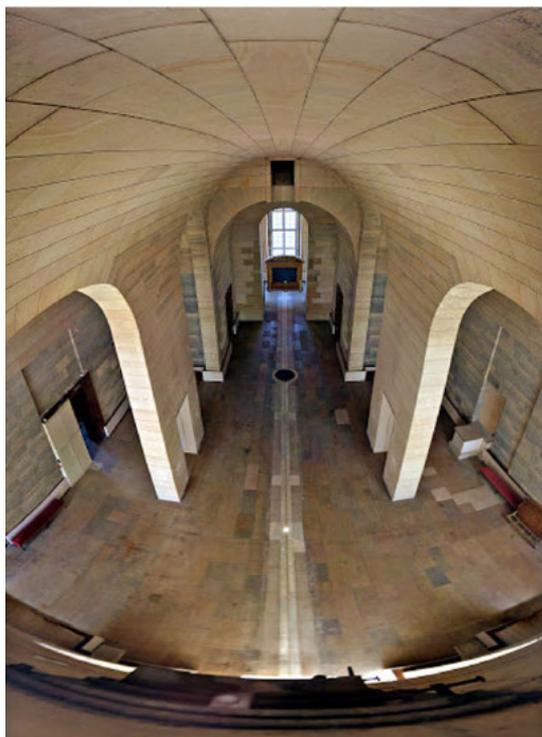
Así debieron entenderlo los académicos puesto que el día 31 ya estaba firmada la preceptiva certificación del Secretario Perpetuo de la Academia de Ciencias, la cual figuró transcrita en el propio libro justo después del índice de materias:

EXTRAIT DES REGISTRES de l' Académie Royale des Sciences, du 26. May 1742.

Mrs NICOLE & CLAIRAUT, ayant lu par ordre de l'Académie un Livre de M. de Maupertuis, intitulé *Eléments de Géographie*, & en ayant fait leur rapport, l'Académie a jugé sur toutce qu'ils y ont remarqué d' excellent, tant pour le fonds, que pour la forme, & sur le détail qu'ils ont fait de des parties, que cet Ouvrage étoit digne de l'impression. En foi de quoi j'ai signé lepresent Certificat. A Paris, ce 31. May 1742. Signé DORTOUS DE MAIRAN¹¹, Secr. Perp. De l'Acad. R. des Sc.

¹¹ Se da la paradoja de que este matemático, y eminente astrónomo (ya había descubierto en 1731 la nebulosa M43 en las proximidades de la de Orión), fue uno de los opositores más tenaces que tuvo Maupertuis.

La exposición de Maupertuis, desarrollada en las veinte lecciones contenidas en sus Elementos de Geografía, comenzó con el recordatorio de lo que significa esta y del papel crucial que jugaron las estrellas como guía de los primeros desplazamientos del hombre, por tierra o mar, para comunicarse entre sí. Pronto observarían que a mediodía alcanzaba el Sol su mayor altura y se encontraba en el lado opuesto al que estaban las estrellas que parecían no cambiar de posición a lo largo de la noche; siendo ese el verdadero origen de la línea meridiana, que a partir de entonces sería tan tenida en cuenta para ir de un lado a otro. Al observar el cielo con más detenimiento constatarían que las estrellas realmente giraban en torno a un punto fijo, a una altura media sobre el horizonte, que era precisamente al que apuntaba uno de los extremos de la meridiana.



Pasados los milenios aparecieron los instrumentos capaces de medir las alturas de las estrellas y del Sol, además de las amplitudes angulares. Al comprobar que las estrellas daban una vuelta cada día en torno a ese punto tan especial del cielo, observarían que había dos momentos singulares en esa trayectoria, justamente aquellos en que sus alturas sobre el horizonte fuesen extremas; de modo tal que su diferencia coincidiría con el diámetro del círculo descrito y su promedio con la altura de ese punto central, el cual sería luego conocido con el nombre de polo. Más adelante se rectificaron esas meridianas rudimentarias, ya que para su formación se habían elegido las estrellas próximas a dicho punto como si se tratasen realmente del propio polo, al haber creído que permanecían inmóviles durante toda la noche. Esta nueva línea, materializada sobre el terreno, facilitó la identificación de cualquier trayectoria para alcanzar un determinado lugar, bastaba con saber el ángulo que formaba con dicha línea meridiana.

La meridiana del Observatorio de París. Fue diseñada en 1669 por Jean Dominique Cassini¹², nada más llegar a París por invitación del rey Luis XIV; sin embargo, solo se pudo construir en 1729, bajo la dirección de su hijo Cassini II (Jacques Cassini). Sus 32 m, y el cuidado con que fue materializada la convirtieron en su tiempo en un instrumento astronómico de alta precisión.

En la segunda lección explicó Maupertuis como pudieron ser conscientes los pensadores de la antigüedad de que la Tierra debería tener una cierta curvatura, usando para ello razonamientos exclusivamente astronómicos. El primero de ellos fue la evidencia de que a medida que más se alejaban de su posición habitual, en sentido opuesto al del Sol de mediodía, iba cambiando el aspecto del cielo nocturno, alzándose paulatinamente sobre el horizonte las estrellas circumpolares que les parecían inmóviles y apareciendo otras que antes no podían ver¹³; un fenómeno

¹² Ya había proyectado con éxito, en 1655, la gran meridiana (≈ 67 m) de la basílica de San Petronio en Bolonia (Italia).



Prueba visual de la curvatura de la Tierra. Vista de la costa levantina de España desde unos 20 km mar adentro. Obsérvese como no son visibles las bases de las construcciones que aparecen por encima del horizonte.

análogo al que observarían los que se desplazasen hacia el Sur, aunque iría disminuyendo la altura en lugar de aumentar. En ambos casos los observadores se habrían desplazado manteniéndose en un mismo plano, el del meridiano terrestre. Mucho más tardía sería la constatación de que los desplazamientos siguiendo la otra dirección cardinal principal eran proporcionales a las diferencias entre las horas de los ortos y ocasos estelares, correspondientes a los puntos de partida y de llegada. Solo entonces se concluiría que la Tierra era redonda en todas direcciones, aunque todavía no pudiesen deducirlo por la sombra de esta sobre la luna en el momento del eclipse, tal como hizo el genio de Aristóteles.

Aunque no fuese empleado por Maupertuis, hubo otro recurso geográfico ampliamente difundido durante siglos hasta hace tan solo algunas décadas: el hecho de que los observadores del litoral que veían alejarse los barcos, mar adentro, lo último que observaban era la parte superior del palo mayor. A pesar de estar en desuso, parece que ha cobrado actualidad la versión opuesta, ante la caterva de ignorantes supinos que alardean de ser contrarios a la esfericidad y defienden insistentemente que la Tierra es plana. El argumento que pude esgrimirse es el hecho de que llega un momento en que el navegante, que se aleja de la costa, observa que las construcciones de la orilla parece que surgen del mar, una extraña sensación que fue plasmada en la imagen que ilumina estos comentarios.

Los dos principales movimientos de la Tierra: rotación diaria sobre su eje y traslación anual alrededor del Sol, fueron citados en la tercera lección, sin que Maupertuis mencionase en ningún momento a Kepler, un astrónomo indefectiblemente unido al segundo; no obstante, es loable su decisión en un tiempo en el que todavía resonaban las fuertes críticas a ambos dentro de la comunidad científica¹⁴. Sorprende sobremanera que Maupertuis indicase que se tardó poco en comprender que el movimiento aparente de la esfera celeste era en realidad el movimiento relativo a la rotación diaria de la Tierra en torno a su eje: *...l'on vit bientôt que tout ce mouvement qu'on attribuait aux Etoiles seroit sauvé, si au lieu de supposer la Terre immobile au centre de ce mouvement,*

¹³ La estrella polar está muy cerca del horizonte para los observadores cercanos al ecuador y próxima al cenit para los de las zonas polares.

¹⁴ Cassini I no aceptó en su integridad el modelo heliocéntrico de Copérnico ni tampoco las elipses orbitales propuestas por Kepler, proponiendo óvalos en lugar de eclipses.



Grabado de 1870, *Niccolo Copernico fra gli astronomi del mondo*: Galilei, Astronomo Egiziano, Mosè, Astronomo Indiano, Czau-Kong, Giovanni Sniadecki, Giovanni Hevelio, Bradley, Kepler, Laplace, Newton, Tycho- Brache, Tolomeo, Iparco y Alberto Brudzewski. Impreso por Józef Holewiński.

on supposoit qu'elle faisoit en 24 heures une révolution sur elle même. Más adelante explica ese movimiento relativo al asociar el movimiento circular de las estrellas alrededor de la Tierra al que realiza cada lugar de ella con idéntico periodo; de manera que las estrellas podían considerarse fijas en la bóveda celeste.

La explicación del movimiento de traslación es un tanto más complicada, señalando el desfase diario entre la posición del Sol con relación a las estrellas, que cifró en torno al grado diario¹⁵. Maupertuis añadía que ese fenómeno no se podía explicar recurriendo a un movimiento de rotación pero sí a uno de traslación: *Il falloit que le corps même du Soleil fût transporté dans les Cieux, & décrivît autour de la Terre une route à peu près circulaire*¹⁶; *ou que la Terre fit ce même chemin autour de lui: car, comme nous avons dit, tout mouvement apparent entre deux corps, s'explique également, soit qu'on suppose le premier en repos, & le second en mouvement, soit qu'on attribue le mouvement au premier, & le repos au second.*

¹⁵ Ese fenómeno conocido hoy día con el nombre de aceleración de las fijas es debido a la variación diaria de la ascensión recta del Sol, una coordenada curvilínea que fija su posición sobre la eclíptica. La cuantía de la variación es próxima a un grado, en medida angular, o a cuatro minutos si se opta por la temporal (recuérdese la equivalencia $1^h = 15^m$).

¹⁶ La afirmación de Maupertuis de que se trata de un movimiento casi circular no es gratuita, puesto que la elipticidad de la órbita de la Tierra alrededor del Sol (o la relativa del Sol alrededor de la Tierra) es cinco veces menor que la del meridiano terrestre.

Más adelante recordaba que en la historia de la astronomía se identificaron pronto unos cuerpos celestes, diferentes de las estrellas, del Sol y de la luna. Pronto fueron identificadas como estrellas errantes, ya que no conservaban siempre sus distancias a las estrellas de su alrededor. Ese es el origen de la denominación de Planetas asignada a los cinco descubiertos desde tiempo inmemorial: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. Comentaba Maupertuis que al estudiar su movimiento se comprobaba un mayor ajuste suponiendo que se movían alrededor del Sol que alrededor de la Tierra. Acto seguido refiere los periodos orbitales de esos cinco Planetas, apostando claramente por el sistema heliocéntrico¹⁷: tres meses (Mercurio), ocho meses (Venus), dos años (Marte), doce años (Júpiter) y treinta años (Saturno).

Al finalizar la lección, se justifica Maupertuis por no haber indicado las características astronómicas y físicas del movimiento de traslación de la Tierra, por entender que no son propias de la Geografía. No sucede lo mismo con el de rotación alrededor de su eje, en tanto que parece tener cierta influencia sobre la figura de la Tierra: *...c'est le mouvement de révolution de la Terre autour de son axe; celui là semble avoir quelque influence sur la figure de la Terre, & c'est pour cela que nous en avons parlé.*

El cuarto apartado del libro de Maupertuis, titulado *Tentatives pour déterminer la grandeur de la Terre*, es la primera lección geodésica que impartió. Siendo conscientes de la esfericidad de la Tierra, no tardó en surgir la necesidad de saber su tamaño; cuestiones tan perentorias como determinar la distancia recorrida cuando se iba de un lado a otro, o bien la existente entre dos lugares en que las alturas de las estrellas sobre el horizonte eran diferentes, así lo exigían. *¿Mais comment mesurer un corps dont les dimensions ont si peu de proportion avec nos organes?* Se preguntaba el autor. La empresa no era fácil en absoluto, incluso los antiguos filósofos la consideraron tan temeraria como impía; así se pronunciaba al respecto Plinio el Viejo: *ausus rem etiam Deo improbam*¹⁸, cuando se refería al catálogo estelar formado por Hiparco (Historia Natural. Libro 2, cap. 26). Sin embargo, Maupertuis justificaba esa tentativa por la propia capacidad del hombre y por tener una idea más justa de la Divinidad, que no le permitía hacer ese tipo de comparaciones.

En ningún momento pretendió el geodesta detallar los diversos intentos de medir la Tierra llevados a cabo por sabios como Aristóteles, Eratóstenes o Posidonio, aunque si le valieron para comentar que semejante operación se había considerado útil desde la antigüedad; a pesar de que la dispersión



Fundación de la
Academia de Ciencias
y del Observatorio
(detalle). Por Henri
Testelín (≈ 1675).

¹⁷ *Le Soleil, globe immense de feu, étoit placé au centre du monde.*

¹⁸ Que se atrevía a hacer algo malo a los ojos de Dios.

de los resultados alcanzados impidiese tenerlas en cuenta. Las dificultades inherentes a la medición se mantuvieron durante los siglos siguientes, como prueban los valores tan dispares hallados por Snellius¹⁹ y Riccioli en el siglo pasado: *différoient encore de 7550 toises sur la longueur qu'ils donnoient au degré; c'est-à-dire, de plus de 1/8 sur la circonférence de la Terre*. Maupertuis precisa que había otras medidas con resultados más acordes para el desarrollo del grado, pero que deberían ser consideradas como fruto del azar, tanto por la metodología como por el instrumental empleados.

Como era previsible, dedicó parte de esta lección a glosar la importancia del rey Luis XIV, por su decidido apoyo a este tipo de observaciones, y de la medida llevada a cabo por el abate francés Jean Picard, socio fundador de la Academia de Ciencias: ... *Louis XIV. ordonna cette fameuse mesure, & M. Picard, qui en fut chargé, l'exécuta avec le soin & le exactitude que les ordres du Roi & l'importance de la chose exigeoient*. Para Maupertuis no había duda sobre el tamaño de la Tierra deducido entonces, aunque si era obvia la existente acerca de su forma; las medidas de la intensidad de la gravedad en diferentes latitudes así lo anunciaban, pues se deducía a partir de ellas que el globo terráqueo no era perfecto. Tampoco se conocía a ciencia cierta su verdadero tamaño, por variar el desarrollo del grado con la latitud: *on ne connoissoit plus aussi sa grandeur, parce que les degrés du Méridien n'étoient plus lors égaux, comme les avoit supposés M. Picard*.

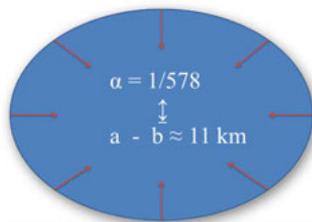
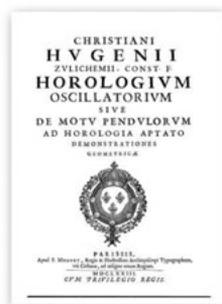
Así como el capítulo anterior puede y debe encuadrarse en la geodesia geométrica, el siguiente ha de serlo en la gravimetría o geodesia física, así se desprende del título elegido por Maupertuis: *Comment les expériences sur la pesanteur pouvoient faire croire que la Terre n'étoit pas sphérique*. La importancia que concedió a las mismas se dejó sentir en su primer comentario, al indicar que eran las que habían causado tanta confusión en la geografía. Las experiencias no eran otras que las que llevó a cabo Richer durante la expedición astronómica a la Isla de Cayena. El descubrimiento lo detalla con exactitud Maupertuis, al señalar que el reloj regulado en París y transportado a la colonia atrasaba cada día 2^m 28^s, en un lugar cuya latitud no llegaba a los 5° norte. La sorpresa del astrónomo fue trasladada de inmediato a París, como bien apuntaba el matemático: *Il rapporta en France cette expérience, plus importante qu'aucune de toutes celles qu'il avoit faites, & elle fut l'objet de l'attention & des recherches de tous les Philosophes & de tous les Mathématiciens*.

Para Maupertuis no había duda: *On vit d'abord que cette expérience supposoit que la pesanteur étoit moindre à Cayenne qu'à Paris*, aunque se preguntase inmediatamente después cual sería la causa de semejante disminución. La pregunta era solo retórica, ya que dio la respuesta y se apoyó en una detallada explicación del concepto de fuerza centrífuga, de acuerdo con la ley gravitacional



El Observatorio de París en la época de Picard y grupos de astrónomos con instrumentos.

¹⁹ Sorprende que Maupertuis no hiciera mención alguna a la novedad de usar la triangulación para medir el desarrollo del arco de meridiano, tal como hizo Snellius en Holanda.

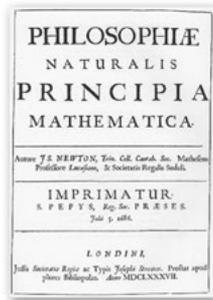


Los primeros elipsoides teóricos: Huygens. Portada del libro del libro *Horologium Oscillatorium*, el péndulo de Huygens y su modelo elipsoidal de la Tierra, con gravedad central.

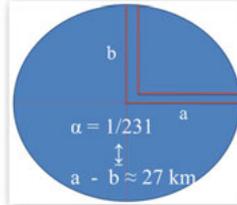
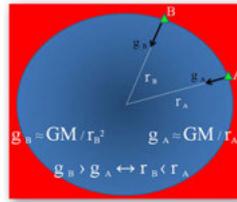
de Newton: *Tout corps qui circule autour d'un centre, fait un continuel effort pour s'écarter de ce centre... On appelle cet effort, force centrifuge. Tous les corps qui tournent y sont sujets; & dans ceux qui font leur révolution dans le même tems, elle est proportionnelle à la grandeur du cercle qu'ils décrivent.* Tampoco podía faltar en su exposición un resumen de las aportaciones gravimétricas de Huygens y de Newton, a cuyos oídos no tardaría en llegar la importante novedad descubierta por Richer; sirviéndoles de acicate para continuar con sus investigaciones sobre la gravedad y la figura de la Tierra. Comentaba Maupertuis *que chacun de ces deux grands Mathématiciens fit son Calcul, & ils ne differerent que dans le plus ou le moins d' aplattissement.*

Huygens ya había publicado en el mismo año 1673 su obra más conocida: *Horologium Oscillatorium*, un brillante trabajo dedicado al rey Luis XIV en que se contiene, perfectamente desarrollada, toda la teoría matemática del péndulo con la deducción de las fórmulas correspondientes. En su *Discours de la cause de la pesanteur* (1691) incluye una explicación de la gravedad, con clara influencia cartesiana, si bien es más interesante el intento que realiza para determinar la curvatura de los meridianos terrestres y por tanto el aplastamiento del globo. Para Huygens la gravedad era central y constante en todas las direcciones. Con sus criterios gravitacionales llega también a que la forma del cuerpo en rotación es un elipsoide con un aplastamiento demasiado pequeño ($\alpha \approx 1/578$); su modelo matemático era pues muy próximo a la esfera, la diferencia entre los dos ejes era del orden de 11 km. Otra de sus aportaciones más sobresalientes fue descubrir el péndulo como regulador del mecanismo de los relojes, contribuyendo por lo tanto a solucionar el problema de la medida exacta del tiempo, es decir el de la diferencia de longitudes.

El estudio de la forma de la Tierra lo realiza también Newton en el tercer libro de los *Principia* (proposiciones XVIII, XIX y XX), atendiendo a la existencia de una atracción mutuamente proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Por otro lado, las partículas superficiales se encuentran en equilibrio bajo la acción resultante de la fuerza de la gravedad que las atrae hacia el centro de la Tierra y de la fuerza centrífuga que, con la excepción de los polos, tiende a separarlos del eje de rotación. Newton considera también que la Tierra es una masa fluida y homogénea en rotación con todas sus partículas sometidas a la ley de atracción. Más tarde trata de encontrar la relación existente entre el eje polar y el ecuatorial estudiando el equilibrio de dos columnas fluidas que confluyen en el centro de la Tierra y se suponen de igual peso. Finalmente, tras diversos cálculos, deduce que el aplastamiento de la esfera ha de ser próximo a $1/231$; de manera que el radio ecuatorial debía ser unos 27 km mayor que su homólogo polar.



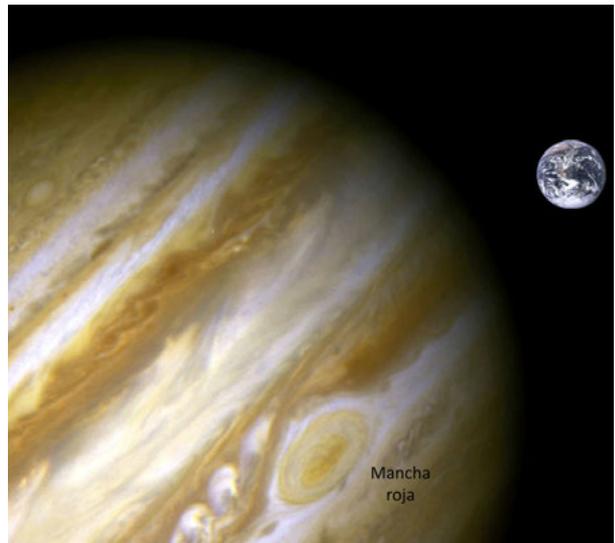
1687



Los primeros elipsoides teóricos. Isaac Newton en la Biblioteca del Congreso de los EE. UU., junto a la portada de la primera edición de sus Principia y del modelo elipsoidal que propuso para la Tierra, basado en su ley de gravitación universal.

Aunque Maupertuis hubiera asegurado que no tomaría partido en favor del achatamiento polar de la Tierra, incluyó el siguiente capítulo para reivindicarlo de manera indirecta. Se habían observado en Júpiter una serie de manchas que permitieron fijar el periodo de rotación en torno a su eje en 10 horas, es decir que su velocidad era considerablemente mayor que la de la Tierra; la consecuencia era inmediata para el matemático: *Cette révolution beaucoup plus rapide que celle de la Terre, devoit imprimer à toutes les parties de cette Planete une très grande force centrifuge, qui devoit aplattir considérablement sa forme.* Para comprobarlo se midieron diferentes diámetros del planeta, concluyendo que era sensiblemente aplastado hacia los polos. Así lo refería Maupertuis: *C'étoit une preuve qui paroissoit très-forte pour l'aplatissement de la Terre.* Terminaba este breve capítulo recordando que la validez de los trabajos de Huygens y de Newton quedaba un tanto empañada al no haberse puesto de acuerdo en el valor del aplastamiento terrestre.

Planteada la duda, no cabía más que tratar de resolverla. La tarea correspondía a Francia, responsable de la mejor medida de la Tierra efectuada hasta entonces. El gobierno la encargó a los Cassini, ligados como es sabido al Observatorio de París, sin regatearle ningún apoyo presupuestario derivado de la exactitud requerida en cada momento, ya que estaba en juego el honor de la nación; Maupertuis dio buena cuenta de ello en el capítulo séptimo. A raíz de tales operaciones surgieron los dos modelos elipsoidales tan presentes en la Ilustración, esto es el de la naranja y el del limón. Así lo recogía el autor de la Geografía: *Les expériences sur la pesanteur, qu'on avoit trouvée moindre près*



El tamaño de Júpiter comparado con el de la Tierra. Obsérvese que nuestro diámetro coincide sensiblemente con la mayor dimensión de la mancha roja. El núcleo de Júpiter es el doble que el de la Tierra, pero su masa es once veces mayor.

l'Equateur que vers les Pôles, avoient fait penser que la Terre, au lieu d'être un globe parfait, devoit être un peu applatie vers les Pôles, & avoir la figure d'une orange; les mesures de Mrs Cassini donnerent à la Terre une figure toute opposée, celle d'un Sphéroïde allongé, ou d'un citron.

Si bien se mantuvo el buen tono del discurso, puede leerse entre líneas una velada crítica de Maupertuis al trabajo de los Cassini. Añadía este que las medidas se habían repetido en épocas diferentes, en distintos lugares, con diferentes instrumentos y metodología diversa; *le Gouvernement y prodigua toute la dépense & toute la protection imaginable pendant trente-six ans*. Maupertuis se remitió luego a las Memorias de la Academia de Ciencias, correspondientes a los años 1701, 1713, 1718, 1733, 1734 y 1736, para concluir que los resultados señalaban siempre *que la Terre étoit allongée vers les Poles*. Se quejaba este de que los matemáticos parecían disfrutar considerando que las medidas eran más poderosas que cualquiera de los razonamientos, *fondés sur des Théories subtiles*, en los que podrían no haberse tenido en cuenta todas las circunstancias que tan singular cuestión requería.

Terminaba Maupertuis alabando a la Academia, ya que lejos de aceptar sin más los resultados de los Cassini optó por solventar cualquier duda sobre el modelo de la Tierra, sufragando sendas operaciones en latitudes muy dispares cuyos resultados no se pudiesen prestar a confusión alguna. No obstante, Maupertuis pospuso el desarrollo de las mismas para centrarse antes en la explicación de las medidas en sí, entendiendo que de esa manera se estaría en mejores condiciones de decantarse por uno u otro modelo de la Tierra; estas fueron sus palabras: *Mais pour faire comprendre ce que c'est que ces mesures, ce qu'on en peut conclure, & comment elles peuvent faire voir si la Terre est allongée ou applatie; je veux expliquer l'opération dont elles dépendent: & cela peut être d'autant plus utile, que c'est sur cette opération qu'est fondée toute la Géographie.*

Se llega así al capítulo VIII, dedicado a la filosofía propia de las medidas de los arcos de meridiano, aunque no se refirieran todos los métodos que se habían empleado hasta entonces, habida cuenta de que condujeron a errores inevitables por sus inadecuados planteamientos; la mayoría estaban condenados de antemano al fracaso por las irregularidades propias de la refracción atmosférica, siempre difícil de cuantificar y de corregir. Los instrumentos también eran tan rudimentarios que forzosamente limitaban la bondad del resultado. En ese momento recuerda Maupertuis a los Cassini: *...qui dans ces tems-là étoient bien éloignés de l'exactitude où ils ont été portés sous M. Cassini*, y muestra su temor a no ser leído: *Nous ne nous étendrons point sur toutes ces Méthodes dans un Ouvrage aussi court que celui-ci, où nous fondons sur notre briéveté l'espérance d'être lûs.*

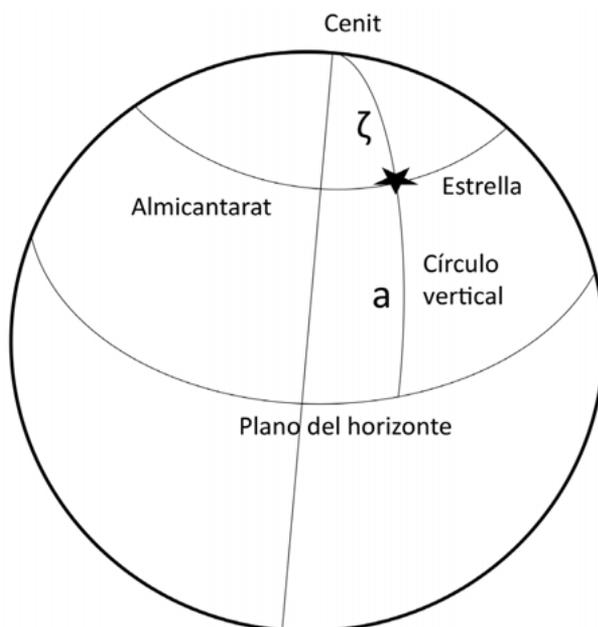


Pierre Louis Moreau de Maupertuis. Los versos que lo acompañan son de Voltaire:

*De globe mal connu qu'il à seu mesurer,
Devient un Monument u sa gloire se fonde,
Son sort est de fixer la figure du monde,
De lui plaire et de l'éclairer.*

No obstante, apuntaba a que su compromiso por instruir a los posibles lectores sobre todo lo referido a la forma de la Tierra, le obligaban a tratar de explicar la metodología seguida a tal fin por todos los matemáticos modernos. Su fundamento ya había sido referido al comienzo del libro, cuando se indicaba que la altura de las estrellas sobre el horizonte aumentaba al desplazarse por la meridiana en el sentido del polo; incluso llegó a concretarlo en los siguientes términos: *après une marche de 20 lieues, on trouvoit une différence d'un degré dans l'élevation des Etoiles; on concluoit de-la qu'un degré de la circonférence de la Terre étoit de 20 lieues²⁰, & que la circonférence entiere étoit de 7100.*

A continuación, explicó a qué se refería cuando hablaba de la altura de las estrellas, el ángulo que formaba la visual a las mismas con el plano del horizonte. Ello no fue óbice para que propugnase su sustitución en favor de la distancia cenital, es decir del complemento a 90° de la referida altura; la justificación radicaba en la necesidad de elegir para la observación estrellas en las proximidades del cenit, para evitar así los temidos efectos de la refracción. Maupertuis hizo entonces una interesante digresión a propósito de la línea vertical, entendiéndolo por ella aquella *ligne à plomb, perpendiculaire à la surface des eaux, pour la perpendiculaire à la surface de la Terre, ou pour la perpendiculaire au plan qui touche la surface de la Terre dans ce lieu. Cette ligne verticale est toujours dirigée exactement vers un point, qu'on imagine dans les Cieux élevé directement au-dessus de chaque lieu, & qu'on appelle le Zenith de ce lieu. C'est des distances des Etoiles au Zenith, ou de cette ligne verticale, qu'on se sert avec le plus de sûreté pour mesurer les degrés du Méridien de la Terre. Mais il faut auparavant expliquer ce que c'est qu'un degré du Méridien.*



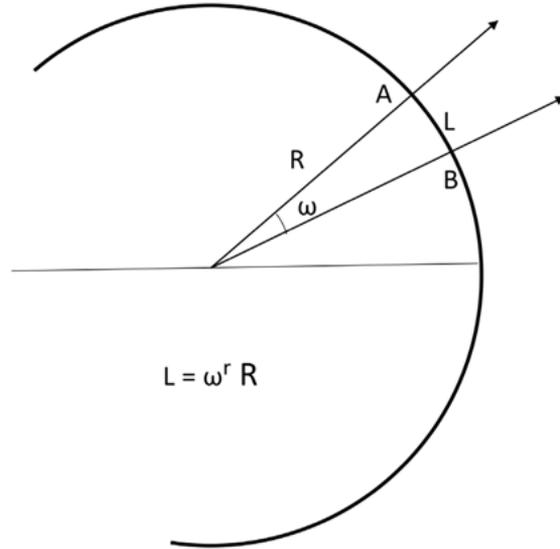
Altura sobre el horizonte (a) y distancia cenital (ζ) de la estrella, ambas suman 90° .

El capítulo noveno fue necesariamente breve, puesto que en él se trató solamente de hacer ver a que se refería Maupertuis cuando hablaba del grado de meridiano. Básicamente vino a decir que el grado de meridiano no es más que un arco de círculo máximo y como tal tendría una amplitud angular y un desarrollo lineal; la primera sería el ángulo formado por los radios que localizan sus extremos y el segundo la medida sobre la superficie terrestre del arco considerado. Si la amplitud angular fuese de tan solo un grado, el desarrollo correspondiente sería precisamente a lo

²⁰ La inconsistencia metrológica de la época también estuvo presente en esta afirmación de Maupertuis, ya que había varios tipos de leguas (incluso dentro del mismo país). El mismo incluyó leguas de dos tipos en el gráfico de la triangulación que efectuó para medir el grado de meridiano en Laponia: una de 25 en el grado y otras suecas de mayor desarrollo.

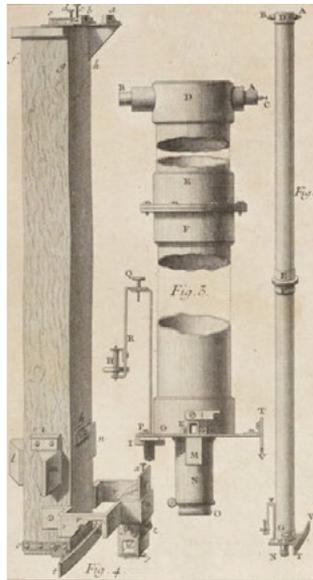
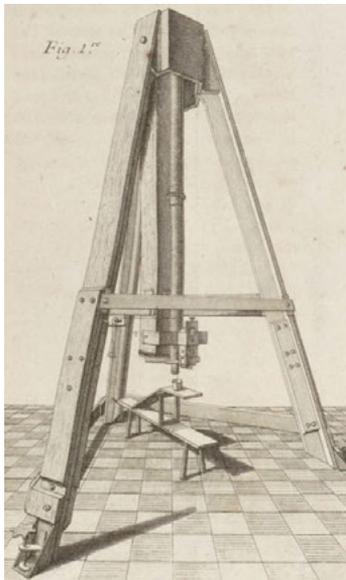
que se refería el autor cuando hablaba de un grado de meridiano. Su medida dependería naturalmente del tamaño supuesto para la Tierra²¹.

Cobra actualidad el párrafo con que se cierra este capítulo, pues se comenta que el concepto de grado terrestre no tendría sentido en el supuesto absurdo de negar la curvatura del modelo matemático de la Tierra²²: *On voit par-là que si la surface de la Terre étoit absolument plane, il n'y auroit point d'amplitude, il n'y auroit point de degré. Les lignes qui passeroient par les Zeniths, ne formeroient entr elles aucun angle, & seroient toutes parallèles.*



El capítulo X fue eminentemente práctico, puesto que se daba a conocer el procedimiento empleado para determinar la amplitud angular de un determinado arco de meridiano, usando como ejemplo el medido previamente por Jean Picard, es decir aquel cuyos extremos fueron las ciudades de

El desarrollo de un grado de meridiano. Su valor dependerá del radio de la Tierra, cuando su modelo matemático es la esfera.



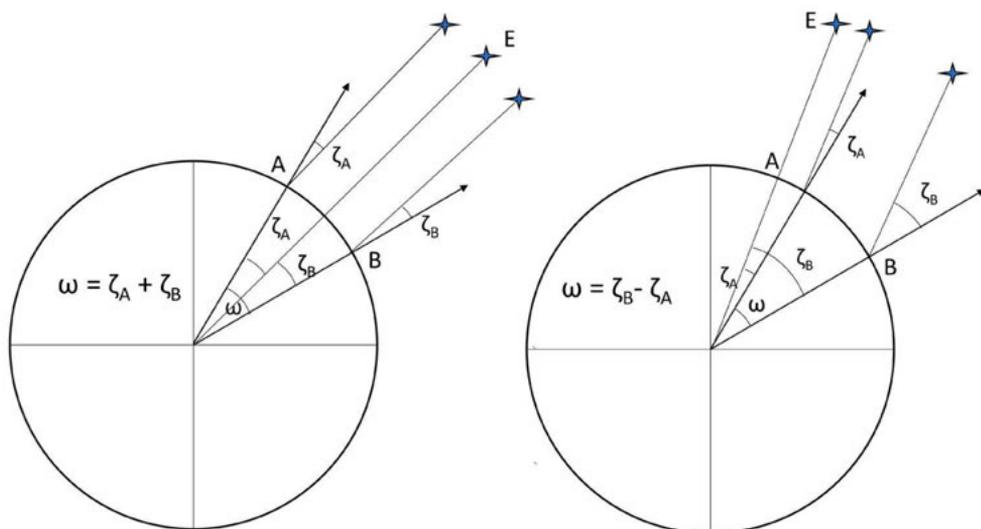
Vista general y detalles del sector cenital construido por George Graham, con él determinó Maupertuis la amplitud angular del arco de meridiano: primero en Laponia y luego en Francia.

²¹ La longitud del arco es el producto de la amplitud angular, expresada en radianes, y del radio. Se trata por tanto de una relación idéntica a la más conocida del perímetro de la circunferencia $2\pi R$, pues la amplitud angular de 360° expresada en radianes es exactamente 2π .

²² De hecho hasta existe la *International Flat Earth Society*, creada en el año 1956.

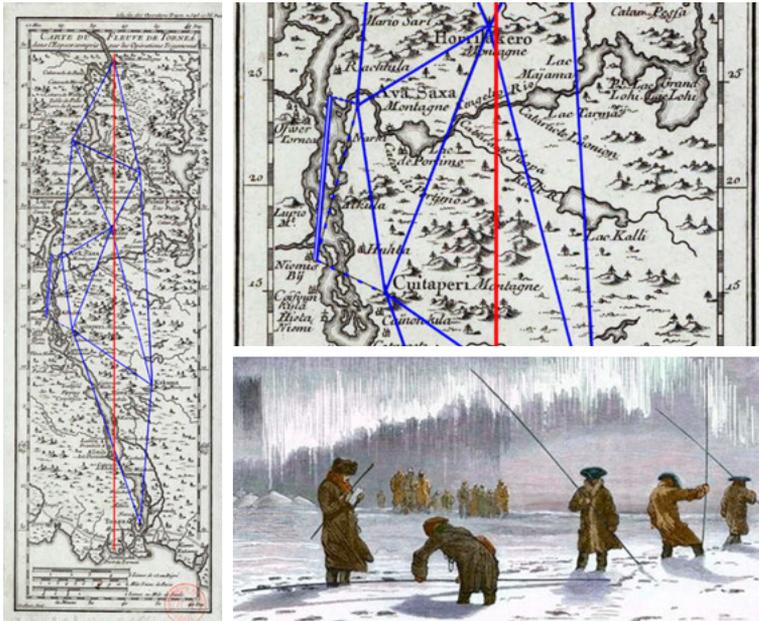
Amiens y París. La explicación de Maupertuis fue prolija pues no pudo darla a la vista de figura alguna. Básicamente vino a decir que desde tales extremos se tenía que medir la distancia cenital de una cierta estrella en un mismo instante, al no poderse dividir entre sí los dos extremos del arco. Dos posibilidades se podían presentar, que la estrella se encontrase dentro del sector circular formado por las verticales de los extremos del arco o bien que se localizase fuera del mismo. En el primer caso la amplitud sería la suma de las distancias cenitales medidas y en el segundo la diferencia, como queda de manifiesto en la figura que se adjunta. Una vez hallada la citada amplitud, solo ha de saberse el desarrollo del arco para obtener el correspondiente al grado de meridiano, tal como indicaba Maupertuis²³: *Et connoissant cet angle, il n'est plus question que d'avoir exactement la mesure de la distance de Paris à Amiens, Pour voir combien le degré entre ces Villes contient de toises.*

La operación geodésica de medir el arco de meridiano, o simplemente el grado, requería la determinación del desarrollo del arco en cuestión: el segmento circular comprendido entre los dos extremos del arco; al modo de lograrlo dedicó Maupertuis el capítulo siguiente, el undécimo de su libro (*Comment on mesure la longueur d'un arc du Meridien*). El método seguido fue análogo al que ya habían usado Snell y Picard, esto es proyectar y observar una cadena de triángulos distribuidos sensiblemente a lo largo del repetido arco. Se procuraba que la forma de los triángulos fuese lo más regular posible, tratando de evitar los ángulos demasiado agudos. En todos los vértices de los triángulos se estacionaba el instrumento matemático con el que medir los ángulos, consistente en un sector circular graduado (cuarto de círculo). Finalizadas las observaciones de campo se procedía al cálculo de todos los lados, necesitando conocer para ello la longitud de uno de ellos como mínimo. Ese lado, llamado base, se medía en aquella época usando perchas de cinco metros o cadenas; procurando localizarla siempre en un terreno lo más llano posible.



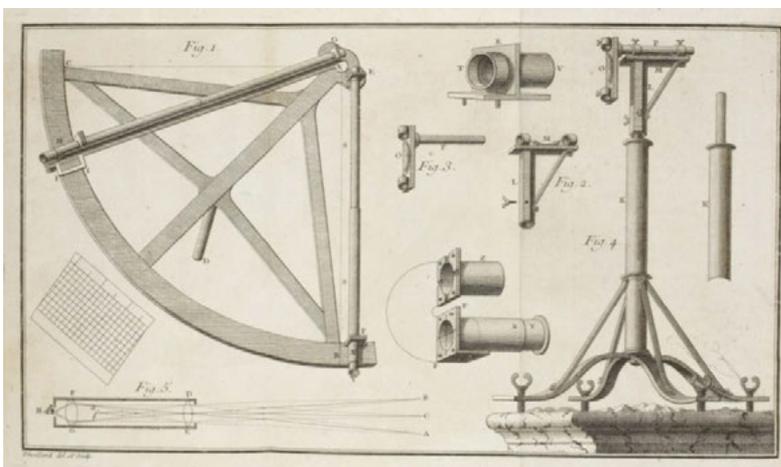
La amplitud angular del arco de meridiano como suma o diferencia de las distancias cenitales de una estrella, en un instante dado y medidas desde los dos extremos del arco.

²³ Aunque Maupertuis no mencionase en este libro los pormenores de su medición en Laponia, para no influir en el lector, es obligado referir que durante su expedición a Laponia obtuvo la amplitud angular del arco midiendo las distancias cenitales de las estrellas α y δ de la constelación del Dragón.



Cadena triangular proyectada por Maupertuis en su expedición a Laponia. La base de la triangulación de Laponia, el lado con doble línea, y un grabado en la que se está midiendo. Ninguna de estas imágenes ilustró su Geografía.

Una vez conocido este, el proceso de calcular la longitud de todos los demás consistía en la aplicación sucesiva del teorema del seno, propio de la trigonometría. Generalmente se medía otro lado, a modo de comprobación, en uno de los extremos de la cadena triangular. La fase final de la operación consistía en proyectar todos esos lados sobre el segmento de meridiano, para conocer así su desarrollo. Para ello era necesario conocer la orientación de la cadena, es decir su desviación angular con relación al meridiano; bastando para ello saber el de uno de sus lados, ya que la de cualquier otro era evidente al haber medido cada uno de los ángulos de los triángulos involucrados. La orientación de la triangulación era objeto de observaciones astronómicas al Sol o a la estrella polar. Hallada la distancia entre los dos extremos del arco, solo quedaba dividirla por la amplitud angular para saber el desarrollo lineal del grado, tal como señalaba Maupertuis: *On a ainsi la longueur terrestre d'une partie de la ligne Méridienne, ou d'un arc du Méridien; & pour*



Cuarto de círculo de dos pies de radio y accesorios. Instrumento empleado por Maupertuis para medir los ángulos de la triangulación y las alturas sobre el horizonte.

avoir la grandeur du degré, il ne faut plus que comparer cette longueur avec l'angle formé par les deux verticales qui passent par les extrémités de cet arc. Si cet angle étoit précisément d'un degré, l'arc du Méridien mesuré seroit d'un degré; s'il est plus grand, ou plus petit, on connoît à proportion la grandeur du degré par la longueur de cet arc.

Sabido ya como se hallaba la medida de un arco de meridiano, procedía referirse a las operaciones efectuadas hasta entonces y que habían evidenciado la variación de la curvatura terrestre, de esa forma debió entenderlo Maupertuis cuando tituló el capítulo XII así: *Mesures de M. Picard, de M. Cassini & de Mrs du Nord*²⁴. Picard usó el mismo método descrito en el capítulo anterior para medir el arco formado por Amiens y París, obteniendo para el grado terrestre un desarrollo de 57060 toesas. Con la intención de mejorar dicha medida y comprobar fehacientemente cual era la forma de la Tierra, se encargó a Cassini la medida del meridiano de Francia; dividido a tal efecto en dos tramos, uno desde París hasta el extremo más septentrional con un desarrollo de 6° 20' y otro hasta el extremo más meridional con un desarrollo de 2° 12'.

Esta nueva operación tenía la ventaja de abarcar un arco mayor, incrementada aún más por todas las precauciones que se habían previsto y que supusieron la práctica coincidencia de las dos bases medidas: *comme M. Cassini nous dit qu'elle s'est toujours trouvée dans ses opérations*. Añadía Maupertuis que el error esperado sería en este caso menor al no aumentar con la magnitud del arco, máxime cuando *cette erreur répandue sur plusieurs degrés, n'altère que peu la jusie valeur de chacun*. Otra de las ventajas de esta nueva medida sobre la de Picard era la de poder comparar los resultados del desarrollo del grado en latitudes diferentes: una al mediodía y otra al norte; *car s'il y avoit quelque inégalité entre les degrés de la Terre, comme le prétendoient Mrs Newton & Huygens, cette inégalité devoit par-là être découverte, & découverte d'autant plus sûrement, que sur plusieurs degrés, ces différences devoient se trouver accumulées*.

Con la medida de los Cassini, el hijo acabaría sustituyendo al padre, se evidenció efectivamente la variación de la curvatura de la Tierra, pero en un sentido opuesto al previsto tanto por Newton como por Huygens, como afirmaba con cierta sorna Maupertuis: *Mais elle s'étoit trouvée tomber dans un sens opposé à celui où elle devoit être, si la Terre eût été aplatie*. No solo era menor el desarrollo del arco septentrional que el meridional, sino que incluso era también menor que el grado medido por Picard; la conclusión era obvia: *de-là s'étoit ensuivi que la Terre au lieu d'être d'être aplatie, étoit allongée*.

Las conclusiones a las que llegó Jacques Cassini fueron recogidas en su obra sobre el tamaño y la forma de la Tierra, aparecida en el año 1718, tal como recordaba Maupertuis. Además de relatar pormenorizadamente las operaciones realizadas, detalló las dimensiones del elipsoide, incluyendo su aplastamiento ecuatorial. El eje polar, el mayor, resultaba tener 6579368 toesas; el ecuatorial, menor, solo tenía 6510796 toesas; en cuanto al grado que Picard había cifrado en 57060 toesas, se quedaba en tan solo 56975 toesas. Para Maupertuis, la utilidad principal de la obra de Cassini quedaba reflejada en la tabla anterior, en la que se resumían todas las demás medidas tomadas por Cassini en los años 1733, 1734 y 1736.

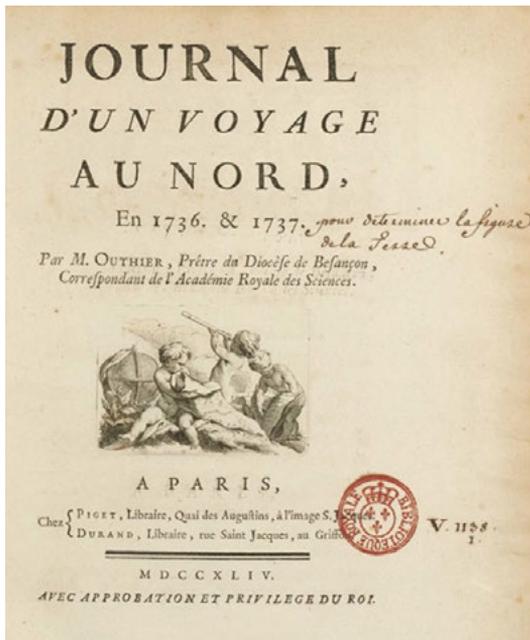
Los comentarios de Maupertuis fueron rotundos, a pesar de que hubiese anunciado su mal entendida imparcialidad: *Ces mesures se trouvant si contraires à la figure que les loix de l'Hydrostatique sembloient donner à la Terre, & la décision de cette Queflion paroissant fort importante, le Roi ordon-*

²⁴ Eufemismo para no citarse a sí mismo y a los otros miembros que lo acompañaron en la expedición a Laponia.

Hauteur du Pôle.		Distance du Pôle au Zénith.		Grandeur des Degrés d'un Méridien.		Hauteur du Pôle.		Distance du Pôle au Zénith.		Grandeur des Degrés d'un Méridien.	
Degrés.	Degrés.	Toises.	Pieds.	Degrés.	Degrés.	Toises.	Pieds.	Degrés.	Degrés.	Toises.	Pieds.
90	0	56224	4	60	30	56682	5	30	60	57580	3
89	1	56225	5	59	31	56710	3	29	61	57607	2
88	2	56228	2	58	32	56738	3	28	62	57633	4
87	3	56232	1	57	33	56766	5	27	63	57659	2
86	4	56237	1	56	34	56795	4	26	64	57684	3
85	5	56243	2	55	35	56824	5	25	65	57709	0
84	6	56250	3	54	36	56853	2	24	66	57732	4
83	7	56258	3	53	37	56884	0	23	67	57755	4
82	8	56267	2	52	38	56914	0	22	68	57777	5
81	9	56277	0	51	39	56944	2	21	69	57799	1
80	10	56287	3	50	40	56975	0	20	70	57819	3
79	11	56299	0	49	41	57006	0	19	71	57838	5
78	12	56311	3	48	42	57037	0	18	72	57857	1
77	13	56324	5	47	43	57068	1	17	73	57874	3
76	14	56339	1	46	44	57099	2	16	74	57890	2
75	15	56354	5	45	45	57130	3	15	75	57905	4
74	16	56370	4	44	46	57161	3	14	76	57920	2
73	17	56387	5	43	47	57192	4	13	77	57934	0
72	18	56405	5	42	48	57223	4	12	78	57946	4
71	19	56424	4	41	49	57254	3	11	79	57958	2
70	20	56444	3	40	50	57285	2	10	80	57969	0
69	21	56465	1	39	51	57316	0	9	81	57978	4
68	22	56486	4	38	52	57346	4	8	82	57987	2
67	23	56508	5	37	53	57377	1	7	83	57995	0
66	24	56531	4	36	54	57407	3	6	84	58001	4
65	25	56555	1	35	55	57437	3	5	85	58007	2
64	26	56579	2	34	56	57467	1	4	86	58012	0
63	27	56604	1	33	57	57496	2	3	87	58015	4
62	28	56629	4	32	58	57525	0	2	88	58018	2
61	29	56655	5	31	59	57553	0	1	89	58019	4
60	30			30	60			0	90		

Table des Degrés d'un Méridien de la Terre. Listado con los desarrollos del grado a diferentes latitudes, recuérdese que son idénticas a la altura del polo en cada paralelo. La forma del elipsoide oblongo se pone de manifiesto con los desarrollos del grado en las latitudes extremas: ecuador (58019.4 toesas) y polo (56224.4 toesas). De la Grandeur et de la Figure de la Terre (Segunda parte, página 245).

na en 1736, que deux Troupes d'habiles Mathématiciens iroient, les uns à l'Equateur, les autres au Cercle Polaire, prendre des mesures qu'on regardoit comme plus décisives, que celles que Mrs Cassini avoient prises en France.



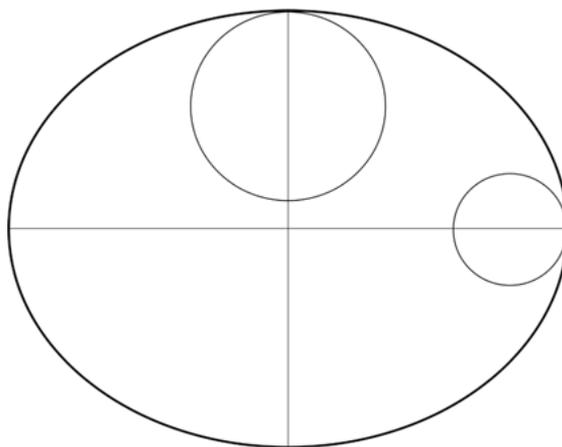
Portada del diario de la expedición científica a Laponia, realizada por el abate y geodesta Reginald Outhier, el cual lo dedicó al obispo de Bayeux.

Acto seguido anunciaba que, aunque aún no se sabía nada de la expedición al virreinato del Perú, los resultados de la expedición polar eran del todo concluyentes y contrarios a los resultados obtenidos por Cassini, puesto que el modelo matemático a que habían llegado era el del elipsoide de revolución aplastado por los polos. Aquí si reclamó Maupertuis su merecido protagonismo, en los siguientes términos: *M. de Maupertuis & ses illustres Compagnons*²⁵, *ont trouvé le degré du Méridien, là où il coupe le Cercle Polaire de 57438 toises, c'est à-dire, d'environ 1000 toises plus grand qu'il ne devoit être, suivant la Table de Mrs Cassini.*

El capítulo XIII abordó por fin la cuestión tan controvertida del achatamiento elipsoidal, tratando de explicarlo en función del desarrollo lineal de los grados del meridiano; su título no se prestaba a confusión: *Pourquoi les degrés plus petits vers les Pôles que vers l'Equateur, supposent la Terre allongée vers les Pôles & pourquoi les degrés plus grands la supposent applatie.* Aunque con los conocimientos geométricos actuales resulte una obviedad, en la época de Maupertuis no se trataba de un asunto trivial, así lo reconocía este gran matemático: *Les mesures une fois bien prises, c'est à ce point que se réduit la Question; & c'est un point sur lequel d'assez habiles gens se sont trompés.* La discusión se iniciaba dando por supuesto que si la Tierra fuese una esfera todos los grados tendrían igual desarrollo, en tanto que los radios respectivos se cortarían todos en su centro, que lo sería también del meridiano.

Una vez admitida la variabilidad de su curvatura, es constatable el hecho de que los radios no serían geocéntricos y que el desarrollo del grado dependería de la longitud del radio considerado, dependiente siempre de la latitud del lugar; debiendo concluir que no todos los grados tendrían igual desarrollo. De manera que allá donde el meridiano sea más curvo, más próximo a la superficie terrestre estará el punto de intersección de los radios extremos del arco; lo contrario sucedería en la zona de menor curvatura, donde la intersección se alejaría más de la superficie. La conclusión es obligada, si el desarrollo del grado depende del valor del radio, es inmediato que será menor en las zonas de mayor curvatura (menor radio) que en las más aplastadas (mayor radio y menor curvatura). Todo se limitaba por tanto a comprobar lo que afirmaba Maupertuis: *Si donc les degrés du Méridien vont en diminuant de l'Equateur vers les Pôles, les bouts de l'ovale sont aux Pôles, & la Terre est allongée; si au contraire les degrés du Méridien sont plus grands au Pôle qu'à l'Equateur, les Pôles sont au milieu de l'ovale, & la Terre est applatie.*

En el siguiente capítulo (XIV: *Objections contre l'opération par laquelle on mesure les degrés du Méridien*) se puso de relieve el rigor con que abordaron la cuestión del aplastamiento elipsoi-



Curvatura y radio de curvatura en el elipsoide oblat.

²⁵ Los franceses Alexis Claude Clairaut, Charles Étienne Louis Camus y Pierre Charles Le Monnier, a los que se uniría después el abate Reginald Outhier (autor de *Journal d'un voyage au Nord*, en el que dio cuenta detallada de aquella expedición). Asimismo, participaron activamente los representantes científicos de Suecia: Anders Celsius y Anders Hellant.



Portada del libro *OUVRAGES DIVERS DE MR. DE MAUPERTUIS. Eléments de géographie. Discours sur les différentes figures des corps célestes. Discours sur la parallaxe de la lune et Lettre sur la comète.* Amsterdam 1744.

dal Maupertuis y sus colaboradores, pues decidieron tratar de la fiabilidad esperable en las operaciones geodésicas de las medidas de grado; *par la quelle on détermine la grandeur & la figure de la Terre, & d'où dépend toute la Géographie.* Aunque mantuvieran que la bondad de la operación estaba asegurada solo por consideraciones geométricas, estaban suponiendo que se cumplían las tres condiciones siguientes: 1) En todos los lugares de la Tierra, la vertical física es perpendicular al plano del horizonte; 2) Durante el tiempo invertido en una observación estelar, cuando se miden sus distancias cenitales, la estrella solo tiene el movimiento diurno aparente y asociado a la rotación de la Tierra en torno a su eje; 3) La Tierra tiene una figura regular en la que todos sus meridianos son curvas idénticas.

Maupertuis estaba muy interesado en analizar las posibles dudas que podían surgir con relación a esas tres consideraciones, por ser las únicas que podrían justificar las críticas a las medidas de arcos de meridiano, efectuadas por los enemigos de los Cassini y de los académicos enviados tanto al ecuador como al círculo polar: *car il n'y auroit rien de si ridicule, que de travailler pendant quarante ans à mesurer les degrés du Méridien, & d'aller au bout du Monde pour faire de semblables opérations si ces opérations, quelque bien exécutées qu'elles fussent, ne pouvoient donner ni la figure de la Terre, ni la juste grandeur des degrés. Nous allons discuter par ordre les trois Articles précédens.*

De acuerdo con su declaración, el capítulo XV se centró en el primer punto, con la importante novedad de referirse a lo que se llamaría más tarde desviación de la vertical: *Si la ligne à plomb est par-tout perpendiculaire. Attraction des Montagnes.* En principio daba por sentado que la superficie de los mares coincidía con la de la Tierra: *... on, peut regarder la Surface de la Terre comme la Surface de la Mer continuée,* de manera que las líneas verticales siempre serían perpendiculares a las mismas. Más adelante aseguraba que esto sucedía en todos los lugares de la Tierra, como probaban las observaciones astronómicas, en caso contrario los errores asociados al cálculo de la altura del polo (latitud) pasarían desapercibidos, con las consiguientes diferencias en las medidas de las declinaciones estelares; un hecho que no se había observado hasta entonces, como bien apuntaba Maupertuis: *c'est ce qu'on est bien éloigné d'observer.* Es más, a medida que las observaciones astronómicas se fueron perfeccionando y aumentando las determinaciones de las declinaciones en observatorios diferentes, nunca se habían constatado discrepancias achacables a esa circunstancia.

Sin embargo introducía seguidamente la duda sembrada por los newtonianos, para los que la gravedad era el resultado de las atracciones ejercidas por todas las partes que constituyen la Tierra. En cualquier caso se daba por supuesto que la masa de la mayoría de las montañas, consideradas de forma aislada, ejercería una atracción despreciable si se comparaba con la producida por toda la Tierra. No obstante dejaba abierta la posibilidad de que así pudiese suceder como caso excepcional: *il se trouve quelques Montagnes, dont l'Attraction doit avoir un effet sensible, & doit être*

capable de faire pancher vers elles la surface des eaux & le fil à plomb. Maupertuis dió un ejemplo relevante sobre el cálculo de esa posible desviación de la vertical, pues fue realizado por el propio Newton: *M. Newton a calculé (& le calcul n est pas difficile) l'Attraction d'une Montagne, dont la hauteur feroit de trois milles, & la largeur de six; & il trouve, en supposant une telle Montagne formée de matière homogene, & la même que celle qui forme la Terre, qu'elle causeroit au fil à plomb une déviation de 2' vers elle.*

Realmente el cálculo de Newton fue solo a nivel teórico, de hecho fue incluido en sus Principia. Indirectamente vino a proponer la realización de un experimento de campo que confirmase tal posibilidad: el que la normal al elipsoide no coincidiese con la vertical física, la línea de fuerza del campo gravitatorio materializada por la línea de la plomada. Los primeros en realizar el experimento fueron los expedicionarios franceses al virreinato del Perú, concretamente Pierre Bouguer y Charles de la Condamine, así lo recogió Maupertuis antes de que concluyesen su viaje, lo que prueba que estaba al tanto de las investigaciones sobre esa materia: *Ce qu'avoit prétendu M. Newton, paroît confirmé par quelques observations que M. Bouguer²⁶, l'un des Académiciens envoyés à l'Equateur, a faites. Etant dans le voisinage d'une très grosse Montaigne appelée Chimborazo, il a trouvé par plusieurs expériences, que le fil à plomb avoit en effet quelque déviation vers cette Montagne, quoiqu'elle soit moindre encore que celle qu'il devoit avoir d'après des calculs semblables à ceux de M. Newton.* La desviación observada fue de tan solo 7".5, cuando la prevista a nivel teórico ascendía a 1'43"; con independencia del resultado (hoy se admite que es del orden de los 11"), Bouguer sentó las bases de la gravimetría práctica como método para comprobar la atracción gravitacional prevista por Newton.

Maupertuis concluyó su explicación asegurando que aunque existiera tal atracción siempre sería despreciable a los efectos de las medidas del arco de meridiano y que por otra parte, no eran muchas las moles montañosas como la del Chimborazo y si es que las hubiera bastaría con proyectar la triangulación alejada de la misma: *Je ne m'étendrai pas beaucoup sur la validité de l'Attraction ni de ces expérience. Il me suffit de remarquer que quand il seroit vrai que le voisinage d'une Montagne énorme pût causer au fil à plomb quelque déviation & quelque trouble aux opérations qu'on fait pour*



En las estaciones A y B las verticales observadas serían las líneas AM y BM', que si no fuese por la influencia del Chimborazo habrían sido AO y BO'. *Les mesures gravimétriques de Bouguer au Pérou © 2013 Vincent Deparis / Pierre Thomas.*

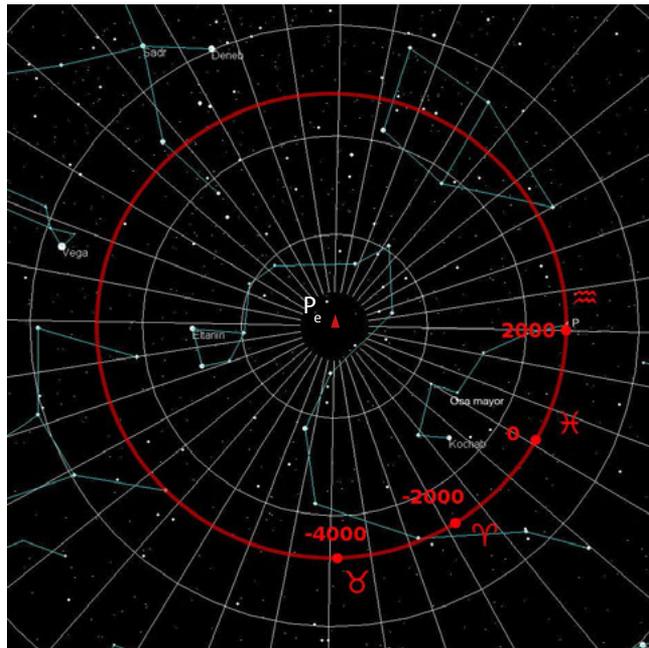
²⁶ Años después, en 1749, publicó Bouguer el libro *La Figure de la Terre, Déterminée par les Observations de Messieurs Pierre Bouguer, & Charles-Marie de la Condamine, de l'Académie Royale des Sciences, envoyés par ordre du Roy au Pérou, pour observer aux environs de l'Equateur.* Figurando su contribución gravimétrica en la sección séptima del mismo, concretamente bajo los epígrafes siguientes: *Mémoire sur les attractions & sur la maniere d'observer si les montagnes en sont capables, Examen des attractions sur Chimborazo, Hauteurs méridiennes observées dans la premiere station au pied de la montagne, Hauteurs méridiennes observées dans la seconde station.*

la mesure des degrés du Méridien, heureusement les Montagnes, comme Chimborazo, sont rares; il n'est pas à craindre qu'elles échappent à la vue des Observateurs, & on peut les éviter facilement dans le choix des lieux où l'on doit faire ces opérations.

El segundo punto, relativo a los posibles movimientos de las estrellas, fue el objeto del capítulo número XVI (*Sur les mouvemens des Etoiles*). Comentaba Maupertuis que los peligrosos eran los desconocidos ya que no se sabía cómo evitar sus efectos, todo lo contrario de lo que ocurriría cuando son reglados. Así consideraba al movimiento asociado a la precesión equinoccial, una de cuyas manifestaciones más singular es la rotación del polo norte celeste alrededor del polo norte de la eclíptica, a razón de unos 50 segundos de arco por año; de manera que tardaría alrededor de 25920 años en recorrer los 360°, recordemos que a ese periodo tan prolongado se le suele llamar año mayor o año platónico, tal como se dijo en el capítulo V.

Maupertuis no fue muy concreto al referirse a este movimiento, aunque diese una pista clara:... *par lequel chaque Etoile fixe Semble s'avancer d'un degré dans soixante & douze ans autour d'un certain point des Cieux*. Aunque su efecto sobre las distancias cenitales de las estrellas es cuantificable, es cierto que apenas es perceptible cuando el tiempo transcurrido entre dos observaciones sucesivas no es considerable:... *écoulé entre les observations est assez considérable, pour que cette différence soit sensible*.

El geómetra, miembro de la Royal Society desde el año 1728, estaba al tanto del descubrimiento trascendental que había realizado James Bradley²⁷ tres años antes, de ahí que en esta ocasión fuese más concreto y prolijo en sus comentarios al respecto. Se trataba en definitiva de la aberración de la luz o de Bradley, un fenómeno derivado de que la velocidad de traslación de la Tierra alrededor del Sol (del orden de 30 km/s) no es despreciable al compararla con la de la luz (próxima a los 300000 km/s); la consecuencia es el desplazamiento aparente de la estrella sobre una elipse homotética a la descrita por la Tierra. Así era referido por Maupertuis: *Il attribue l'apparence de ce mouvement à la combinaison du mouvement*



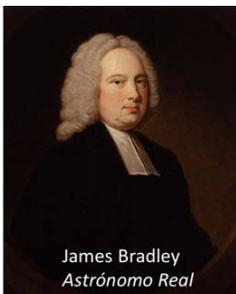
Movimiento circular del polo norte celeste (P) alrededor del polo norte de la eclíptica (PE). Se cifra su periodo en 25772 años, llamado año mayor o año platónico. Los símbolos zodiacales indican la posición del equinoccio de primavera (Punto Aries) en la época señalada.

²⁷ El descubrimiento de Bradley fue considerado como uno de los más importantes en la historia de la astronomía, hasta el extremo de situar a su autor a la misma altura de Kepler y de Hiparco.

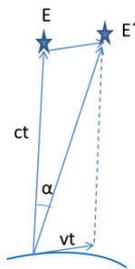
*de la lumiere de l'Etoile avec le mouvement de la Terre dans son orbite. Ces deux mouvemens changent la direction, suivant laquelle l'Observateur recevrait le rayon visual ou la lumiere de l'Etoile*²⁸.

La separación entre las posiciones real y aparente puede alcanzar los 20".6 (constante de aberración), correspondientes al cociente 1/10000; insistiendo en que la teoría era acorde con las observaciones efectuadas por el astrónomo inglés: *M. Bradley nous assure que cette Théorie, à laquelle il n'a été conduit que par les observations, s'y est toujours trouvée parfaitement conforme*. Asegurando Maupertuis que siempre debería ser tenido en cuenta y corregido cuando llegase a ser necesario, para que no se produjera error alguno en las mediciones de grado. No obstante, concretó la cuantía de la corrección, de acuerdo con las observaciones que había hecho Bradley durante un año sobre una zona del cielo con más de 200 estrellas: *sans avoir jamais trouvé qu'aucune de celles qu'il a observées, se soit éloignée du lieu où elle devoit être de plus de 2", quantité qu'il est toujours douteux si l'on doit plutôt attribuer au mouvement de l'Etoile, qu'à l'erreur de l'observation*. Su consideración final fue especialmente interesante, pues indicaba que el intervalo transcurrido entre las observaciones estelares en los dos extremos del arco no era lo bastante elevado como para que se tuviesen que tener en cuenta correcciones ocasionadas por los movimientos de las estrellas en dichos intervalos.

Del tercero y último punto a debate se ocupó el capítulo XVII (*Si Terre n'a point des irrégularités dans sa figure*). La idea de que la Tierra no fuese una figura regular, abstracción hecha de su orografía²⁹, se oponía a los sentidos a juicio de Maupertuis: bastaba observar su sombra proyectada sobre la luna durante los eclipses o pensar en el equilibrio de las aguas que cubren la mayor parte del globo. En tal supuesto no tendrían sentido alguno todas las medidas efectuadas por orden de la Academia de Ciencias: *si la Terre a de telles irrégularités, toutes les mesures de Mrs Cassini,*

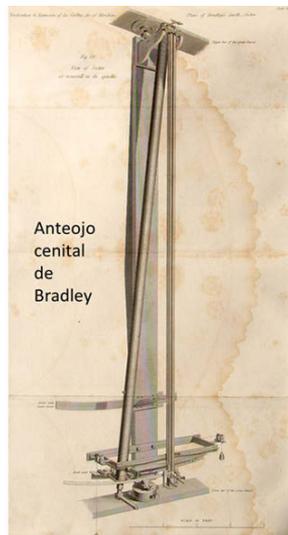


James Bradley
Astrónomo Real



E es la posición real de la estrella, E' la aparente, c es la velocidad de la luz, v la de traslación de la Tierra, α es la constante de aberración

IV. A Letter from the Reverend Mr. James Bradley Savilian Professor of Astronomy at Oxford, and F.R.S. to Dr. Edmond Halley Astronom. Reg. &c. giving an Account of a new discovered Motion of the Fix'd Stars.



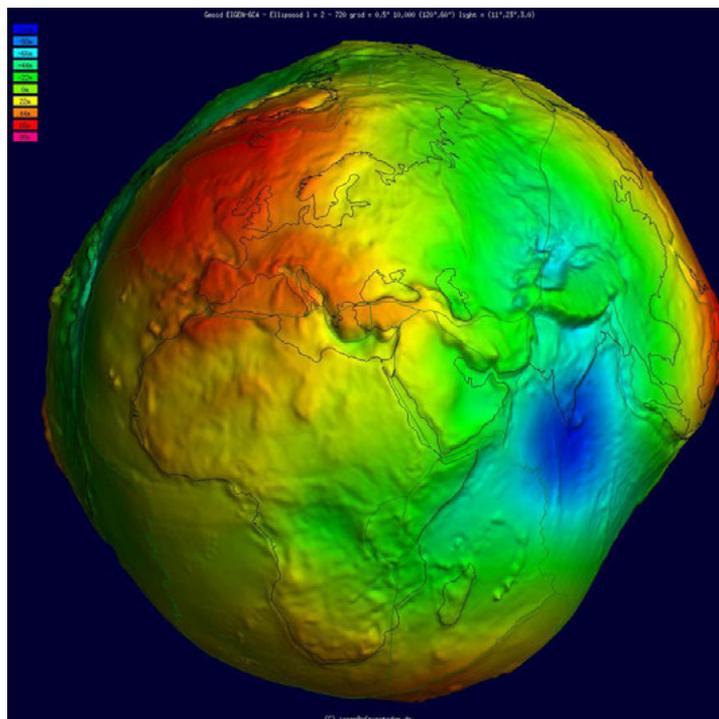
Anteojos cenital de Bradley

Bradley dio cuenta de su descubrimiento a otro astrónomo genial (Edmond Halley), por medio de la carta cuyo encabezamiento figura en la imagen adjunta.

²⁸ Maupertuis llega a dar un ejemplo para aclarar aún más el concepto: *Il en est ainsi de la direction qu'il faut donner au fusil, pour que le plomb frappe l'oiseau qui vole; au lieu d'ajuster directement à l'oiseau, le Chasseur tire un peu au-devant, & tire d'autant plus au-devant, que le vol de l'oiseau est plus rapide par rapport à la vitesse du plomb.*

²⁹ No debe olvidarse que el mayor desnivel terrestre, el orden de los 20 km (los existentes entre la más profunda de las fosas oceánicas y el pico Everest), es despreciable al compararlo con el radio medio de la Tierra (≈ 6371 km).

*ni de Mrs du Nord, ni de Mrs de l'Equateur, ne feront point connoître sa figure. Al mismo tiempo recordaba que ni en la Geografía ni en la Navegación se estudiaba nada que permitiera dudar de su regularidad global³⁰, argumentando a propósito de la segunda lo siguiente: *Mais on sait que les Navigateurs conduisent leur Vaisseau là où ils veulent, & l'y conduissent avec d'autant plus de sûreté, qu'ils pratiquent plus exactement les réglés de leur Art.**



Las ondulaciones del geodeo en falso color. El factor de escala para el relieve es 10000. EGM 96. *Earth Gravitational Models*

De nuevo se retoma la cuestión del tamaño y la forma de la Tierra en el capítulo XVIII (*Utilité de la connoissance de la grandeur & de la figure de la Terre*), bajo un enfoque esencialmente didáctico y dirigido al colectivo de escépticos que, desde su ignorancia, no dejaban de criticar al grupo selecto de académicos involucrados en la misma. Así comenzaba Maupertuis: *Après avoir levé les doutes de ceux qui craindroient que la détermination de la grandeur & de la figure de la Terre, fût un Problème impossible; & après avoir fait voir que ce Problème doit être aujourd'hui résolu, par le grand nombre des opérations qu'on a faites, si l'on sait seulement faire un examen juste & désintéressé de toutes ces opérations: passons à l'utilité dont est la décision de cette fameuse question, & tâchons d'en faire connaître tous les avantages.* El argumento principal dado por el matemático era que tales ventajas tenían que ser expuestas para evitar que sus enemigos pudiesen seguir atrincherados en su postura: *que se retrancheroient les ennemis de Mrs Cassini, ou de Mrs du Nord. L'inutilité de ce qu'on disoit d'abord impossible, est toute la ressource de l'envie, lorsqu'on le voit exécuté.*

³⁰ Más de cien años después se sustituiría el modelo matemático de la Tierra por el físico asociado a una superficie equipotencial de su campo gravitatorio. Tal superficie fue denominada, en el año 1873, geodeo por Johann Benedict Listing, discípulo de Carl Friedrich Gauss. La separación máxima entre el modelo matemático y físico (las alturas u ondulaciones del geodeo) es del orden de los 100 m.

Maupertuis continuaba afirmando que hasta podría resultar ridículo seguir insistiendo todavía sobre la posibilidad y utilidad de un asunto en el que se venía trabajando desde hacía 40 años y para el que el gobierno había librado tantos presupuestos y la Academia tantos esfuerzos. No se entendería que el rey hubiera decidido apostar por las ciencias y auspiciar empresas tan ambiciosas por el simple deseo de obtener bagatelas. El alegato posterior merece ser reproducido íntegramente:

Il nest donc pas douteux, que quand le Ministere a ordonné les travaux qui se sont faits depuis quarante ans, pour déterminer la grandeur & la figure de la Terre, il n'en ait reconnu toute l'utilité, & n'ait vu que cette découverte meritoit sa protection & ses soins: on ne peut non plus douter, que quand l'Académie s'en est tant occupée, & y a sacrifié plusieurs de ses plus illustres Membres, elle n'ait jugé que ses Académiciens en allant à l'Equateur & au Pôle, travailleraient plus pour sa gloire, qu'en restant renfermés dans les murs du Louvre³¹. Maupertuis remitía a

sus lectores a la Historia de la Academia, pues en ella se podría comprobar su pronta dedicación a la empresa de medir la Tierra, aunque anunciara que en el siguiente capítulo se recogería su opinión y la de Cassini sobre ese particular.



El rey Luis XIV visitando la Academia de Ciencias. Al fondo se ve el Observatorio de París en construcción. Grabado de Sébastien Leclerc (1671).

En efecto, en el capítulo XIX (*Ce qu'ont dit Mrs Cassini & de Maupertuis sur l'utilité dont est la connoissance de la grandeur & de la figure de la Terre*) se recogen las opiniones de ambos personajes, extraídas respectivamente de las dos obras siguientes: *Mémoires de l'Académie, année 1718. Mém. de M. Cassini* y *De la Figure de la Terre, déterminée par les observations de Messieurs de Maupertuis...*

He aquí la exposición referida a Jacques Cassini:

Uno de los primeros objetivos de esta Academia desde su fundación fue tratar de perfeccionar la Geografía y la Navegación, ciencias que como es sabido son muy útiles a la sociedad civil y al comercio, lo que hace florecer las artes. Ahora bien, la medida de la Tierra es la base y el fundamento de esas dos ciencias. Porque habiendo determinado astronómicamente la longitud y latitud de diversos lugares de la Tierra, es preciso saber la magnitud de los grados para poder transformarlas en una medida cierta y poder determinar la verdadera distancia entre ellos; y recíprocamente, conocida la verdadera distancia entre diversos puntos de la Tierra por procedimientos geométricos, o por medidas itinerarias, para reducirla a grados es necesario saber exactamente su tamaño. Unos defienden que mediante las

³¹ Primera sede de la Academia de Ciencias, por decisión del propio Luis XIV.

mediciones efectuadas en diferentes latitudes, se ha comprobado como los desarrollos del grado eran más pequeños hacia los polos que hacia el ecuador, de manera que los grados de un mismo meridiano van disminuyendo a medida que se alejan del ecuador; consiguientemente, la figura de la Tierra es elíptica y alargada hacia los polos. Habiendo considerado los otros que la amplitud de las oscilaciones del péndulo era dependiente de la latitud, dedujeron, que de acuerdo con la fuerza que ellos llaman centrífuga, la Tierra era aplastada por los polos y que el desarrollo de los grados aumentaba a medida que se aproximaban a ellos.

Esa cuestión, más útil en la práctica que curiosa en la reflexión, merecía ser examinada con todo el rigor posible, midiendo sobre un mismo meridiano la mayor distancia que se pudiera materializar, comparando los valores obtenidos en diferentes segmentos para poder deducir la relación existente entre ellos. Habiendo procedido de ese modo y sumando los distintos desarrollos de los grados de meridiano se ha obtenido para la circunferencia de la Tierra, de uno a otro polo, 20563100 toesas; 108826 toesas, o 54 de nuestras leguas, más que la circunferencia del ecuador. Por tal procedimiento se podrá conocer lo más exactamente posible el tamaño y la forma de la Tierra, dos conceptos que como ya ha sido dicho son tan necesarios para la Geografía y la Navegación, de los que son la base y el fundamento.

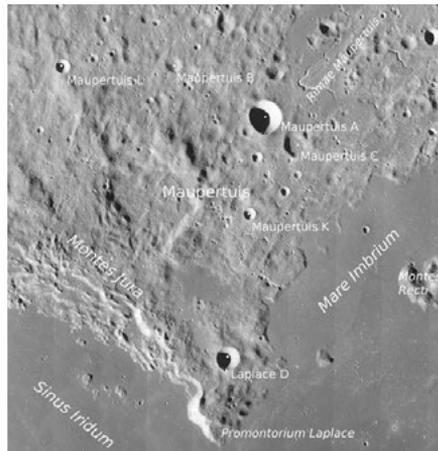
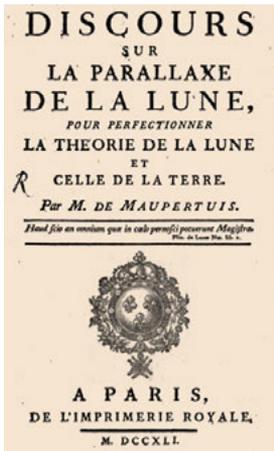
Las reflexiones de Maupertuis fueron las siguientes:

Se comprueba que el modelo de esferoide aplastado defendido por Newton y el esferoide alargado, cuyas dimensiones ha fijado Cassini en el libro De la Grandeur & Figure de la Terre, dan distancias diferentes para lugares situados sobre uno y otro, con las mismas latitudes y longitudes; un hecho que deben tener en cuenta los navegantes que creen ir navegando por uno cuando en realidad van por el otro. En cuanto a los puntos que están situados sobre un mismo meridiano, la diferencia entre las distancias sobre uno y otro modelo no parecen ser muy considerables. Pero para lugares situados sobre un mismo paralelo si son mayores las diferencias entre las distancias medidas en uno y otro esferoide. En travesías de cien grados de longitud se cometerían errores de más de dos grados de ir navegando sobre el esferoide de Newton o sobre el establecido en el libro De la Grandeur & Figure de la Terre. ¡Y cuantos navíos han naufragado por errores de menor magnitud!

Hay otra circunstancia a tener en cuenta y es que antes de la determinación de la figura de la Tierra no se podía saber si ese error sería todavía mayor. Y así sucede efectivamente, de acuerdo con nuestras medidas, si se supone que está navegando sobre un esferoide alargado siguiendo los paralelos al ecuador. No hablo en absoluto de los errores propios de las trayectorias oblicuas, pues su cálculo nos parece aquí poco útil; comprobándose que su magnitud puede llegar a ser considerable cuando se aproximan a los paralelos al ecuador. Los errores de los que acabamos de hablar merecen ciertamente que se les preste atención. Pero si el navegante no siente hoy día la necesidad de ello es que la forma de la Tierra está bien determinada. Hay otros errores referidos a la velocidad del barco y al rumbo de su travesía, que pueden enmascarar el que se comete al ignorar la forma de la Tierra. Sin embargo siempre será fuente considerable de error la inadecuada elección del esferoide terrestre, máxime cuando llegue el momento en que se hayan perfeccionado otros elementos de la navegación.

Por otro lado, el conocimiento de la figura de la Tierra es de gran utilidad en Astronomía, cuando se pretende calcular la paralaje de la Luna³². Tal conocimiento contribuiría a un mayor conocimiento del movimiento lunar, que tanta influencia tiene en nuestra vida; debiendo destacar la atención que

³² Si el modelo de la Tierra fuese la esfera, la paralaje lunar sería el ángulo bajo el que se vería desde ella el radio de la misma.



Pierre de Maupertuis:
Discours sur la paralaxe de la lune (1741) y cráteres lunares que llevan su nombre.

le han prestado a la Luna los más hábiles astrónomos, con el fin de calcular la diferencia de longitudes³³. En fin, para descender a objetos menos elevados, pero que no son menos útiles, ha de insistirse en que la perfección de la navegación está ligada al conocimiento de la forma de la Tierra. Hay tal concatenación entre las ciencias, que los mismos elementos que sirven para guiar un barco en el mar, sirven también para entender mejor el movimiento de la luna en su órbita e incluso para el adecuado abastecimiento de agua. Es indudable, que atendiendo a tales consideraciones ordenó el Rey que se efectuasen las expediciones al ecuador y al círculo polar. Si ocasionalmente se han hecho grandes viajes para descubrir tierras, o buscar pasos que abreviasen ciertas rutas, siempre se han hecho pensando en una utilidad particular. Pero la determinación de la figura de la Tierra es útil para todos los pueblos y para todas las épocas.

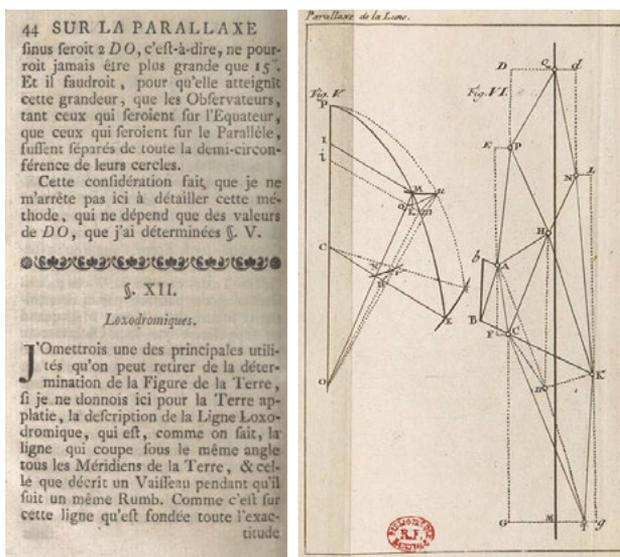
En el capítulo XX (*Autre utilité dont est la connoissance de la grandeur & de la figure de la Terre*) continuó comentando Maupertuis las ventajas que suponía tener una idea más ajustada de las dimensiones y de la forma de la Tierra. Nada más empezar su disertación incide en el contrasentido que supone que Cassini y él defendiesen modelos contrapuestos: *C'est ainsi que Mrs Cassini & Maupertuis parlent de la découverte de la figure de la Terre ; & quoique ce que l'un dit pour prouver l'utilité de sa mesure, prouve nécessairement le péril auquel expose la mesure de l'autre, il est pourtant vrai que chacun a raison dans ce qu'il dit de l'utilité dont est la découverte de la vraie figure de la Terre, quiconque soit qui ait fait cette découverte.* No obstante, Maupertuis añadió otra consideración gravimétrica que hacía más importante el descubrimiento de la verdadera forma de la Tierra, relacionando entre sí el movimiento de rotación en torno a su eje (*dont personne ne doute plus aujourd'hui*), con la gravedad y la fuerza centrífuga. En efecto, semejante descubrimiento era para él uno de los más importantes de la física, en tanto que gracias a él se podía saber la naturaleza real de dicha fuerza; *qui faisant agir toutes les machines dont les hommes se servent, s'étend jusques dans les Cieux, pour y faire mouvoir la Terre & les Planetes, & semble être l'Agent universel de la Nature.*

No creyó Maupertuis que era ese el lugar para explicar cómo se descubrió que esa misma fuerza de la gravedad, responsable del movimiento del péndulo, es la que mantiene la luna en su órbita y la que regula la trayectoria de todos los cuerpos celestes; pues su intención era solo la de insistir sobre la importancia que tenía la figura de la Tierra para la Geografía y la Navegación, dadas las ventajas

³³ Observación de los eclipses, la ocultación de estrellas por la Luna y las medidas de sus distancias a ellas, fueron tres de los procedimientos empleados.

que suponía para las dos el tenerla en cuenta. Toda la Geografía, y por ende la Navegación, se fundan en la determinación de la distancia entre diversos puntos del globo terráqueo en función de sus coordenadas geográficas: latitud y longitud, dependiendo su cuantificación del desarrollo de cada grado, y este a su vez de la forma de la Tierra. La Geografía y la Navegación, tratadas hasta entonces como si la Tierra fuese esférica, se transformaban en ciencias diferentes cuando se supone para ella otro modelo matemático.

Es indudable que la adopción del elipsoide terrestre, sea prolato u oblato, hace que la Geografía resulte más complicada que cuando se suponía que la Tierra era esférica: *mais la difficulté ne doit jamais éloignée du vrai*. La siguiente reflexión de Maupertuis fue muy perspicaz: la verdad está del lado en que se encuentra, siempre es más difícil alcanzarla que caer en el error. Sin embargo, todas las dificultades que plantean para la Geografía y la Navegación la cuestión del tamaño y de la forma de la Tierra solo afectan a los entendidos. Siempre se podrán colegir de las diferentes figuras, reglas prácticas, tan simples como las que se obtenían en el caso esférico. *C'est les Géomètres à former ces Regles, & à les donner aux Géographes & aux Navigateurs*³⁴.



Capítulo dedicado a las loxodrómicas por Maupertuis en su trabajo sobre la paralaje de la Luna. Se incluye una de las figuras con que ilustró su estudio, además de otra sobre sus mediciones en Laponia. En esta última se representó la base de la triangulación (bB), parte del arco de meridiano medido y la proyección sobre él de varios lados, a fin de calcular el desarrollo lineal del mismo.

³⁴ Aunque Maupertuis no incluyera en su libro de geografía una referencia expresa a las loxodrómicas y al cabotaje, hizo una aportación muy interesante al respecto después de haber deducido que la Tierra tenía un aplastamiento polar. Su estudio lo incluyó precisamente en su opúsculo sobre la paralaje de la luna, mereciendo el elogio de D'Alembert. Así lo resumíó este en su celebrada enciclopedia (*Texte établi par D'Alembert, Diderot, 1751. Tome 2, p. 637*): *M. de Maupertuis a traité le même sujet d'une manière plus élégante & plus commode pour la pratique, dans un mémoire qui, quoiqu'assez court, renferme toute la théorie du capotage dans l'hypothèse de la terre aplatie. Ce mémoire imprimé parmi ceux de l'académie des Sciences de 1744, est intitulé: Traité de la loxodromie. On y réduit tout le capotage à ces quatre problèmes, dont il donne la solution en très peu de pages.*

I. Étant connue la longueur de la route faite sur un même cercle parallele à l'équateur, trouver la différence en longitude; ou réciproquement, étant connue la différence en longitude sur le même parallele, trouver la longueur de l'arc du parallele.

II. Étant connue la latitude d'un lieu de la surface de la terre, trouver l'arc du méridien intercepté entre l'équateur & ce lieu.

III. Étant connus l'angle de la route & la latitude d'un lieu, trouver l'arc de la loxodromie terminé par l'équateur, & ce lieu.

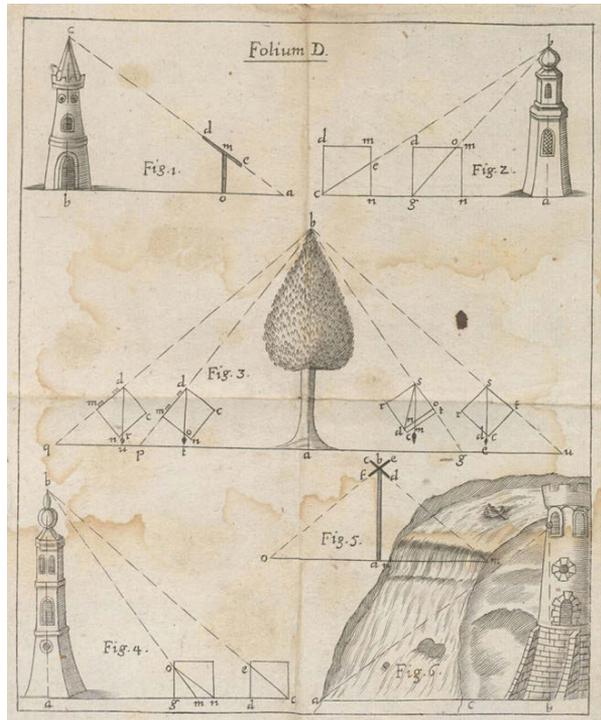
IV. Étant connus l'angle de la route & la latitude d'un lieu, trouver la différence en longitude entre ce lieu & le point où la loxodromie coupe l'équateur.

M. de Maupertuis donne des formules algébriques pour résoudre ces questions, & fait voir comment on y peut rapporter tous les problèmes qu'on peut proposer sur la navigation.

Il seroit à souhaiter qu'on réduisît ces formules algébriques en tables toutes calculées, pour l'utilité & la commodité des pilotes.

Con el capítulo XXI (*Table des degrés de latitude & de longitude. Peril des Navigateurs*) se alcanza el objetivo que se había marcado Maupertuis al redactar sus *Elementos de Geografía*: confeccionar una tabla en la que aparezcan los desarrollos de los grados de meridiano y de paralelo, obtenidos por Cassini y por él mismo (desde el anonimato), *de maniere qu'elle ne donne aucune préférence à l'une ni à l'autre figure que ces Mrs donnent à la Terre*. La tabla la formó de manera que los resultados obtenidos para cada grado, por uno y otro, estuviesen enfrentados en la misma fila para facilitar el cálculo de su diferencia que también aparece reflejada en ella. A juicio de Maupertuis, la tabla era el reflejo de todos los trabajos efectuados para averiguar la forma de la Tierra, a los cuales se refiere a continuación: *que Mrs Cassini ont fait tant, & de si grandes opérations; que Mrs Godin, Bouguer & la Condamine, sont allés à l'Equateur, & que Mrs de Maupertuis, Clairaut, Camus & le Monnier, ont été au Cercle Polaire*.

Maupertuis hacía saber que, a través de la tabla, el navegante podía llegar a saber cuál era la forma de la Tierra por la que navegaba, o al menos entrever la importancia en sí de la misma para los cartógrafos que formaban las cartas náuticas o los marinos que preparaban las instrucciones a seguir en cada travesía. Las diferencias ya comentadas figuraban en la cuarta columna de la tabla, mostrando los errores cometidos al navegar supuestamente sobre el modelo defendido por Casini y creer que lo están haciendo sobre el de Maupertuis; *ou réciproquement, si la Terre a la figure que lui donne M. de Maupertuis, & qu'on croye qu'elle a celle que M. Cassini lui donne*. De un primer examen se deducía que cuando se navegaba sobre un mismo grado de meridiano, hacia el ecuador o hacia los polos, el error podría llegar a ser de media legua y mucho mayor cuando el trayecto fuese de varios grados, por la acumulación de los mismos.



Mediciones topográficas con el cuadrado geométrico, efectuadas por Maupertuis y sus colaboradores durante la misión en Laponia.



Sello para conmemorar los 250 años de la misión geodésica a Laponia.

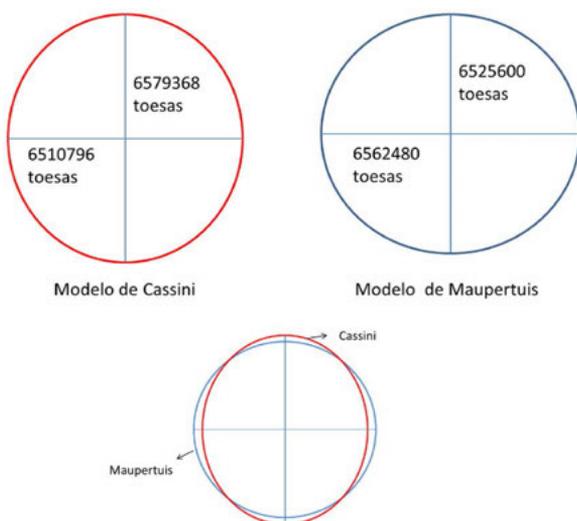
Para fijar mejor los conceptos, Maupertuis detalló varios ejemplos de navegación. Si un piloto que partiera del ecuador pretendiendo alcanzar o evitar un cierto territorio, o una dificultad localizada en el paralelo de 20° y sobre el meridiano por el que navega; si los cálculos de la ruta se hubiesen efectuado de acuerdo con las medidas de *Mrs du Nord* y por error hubiese seguido las de Cassini, los resultados sería muy dispares. En efecto, cuando hubiera recorrido 406 leguas marinas creería haber superado el lugar que buscaba o trataba de evitar, y supondría que se había alejado 9 leguas del mismo, cuando realmente estaría encima y a punto de encallar. El segundo ejemplo es análogo, aunque se introduzca la sutileza de suponer que las de Maupertuis son las verdaderas: *Il est exposé au même péril s'il calcule sa route sur les mesures de Mrs Cassini, & que ce soit celles de Mrs du Nord qui soient les véritables; lorsqu'il aura fait 397 lieues, il croira n'avoir point encore atteint le lieu qu'il cherche il s'en croira encore éloigné de neuf lieues, lorsqu'il fera prêt à périr contre.*

La tabla muestra con igual claridad que los navegantes que se dirigieran hacia los polos estarían expuestos a los mismos errores, con la diferencia de que si la Tierra tuviese la forma propuesta por Cassini y se navegase de acuerdo con las medidas de Maupertuis, cuando se quisiera saber la latitud del lugar se creería haber avanzado menos de lo previsto; justo lo contrario de lo que hubiese ocurrido de haber navegado suponiendo que la Tierra tenía la forma propuesta por Maupertuis y de acuerdo con las medidas de Cassini. La misma tabla indica que los errores en la longitud serían aún más considerables que los cometidos en latitud. Efectivamente, al navegar siguiendo paralelos alejados del ecuador habría casos en los que los errores alcanzarían hasta el dos por ciento: *où l'on se croiroit éloigné de quarante lieues de la Terre, lorsqu'on seroit dessus.* Tales errores serían independientes de los inherentes a la navegación: velocidad, deriva, variación etc., tal como señalaba Maupertuis; quien añadía que siendo tan perfecta bajo otros puntos de vista, ni el piloto más experto podría evitar la comisión de los errores asociados a la forma de la Tierra.

Esos posibles errores, que por sí solos llegaban a ser relevantes, cuando se combinaban con los propios del arte de navegar podían alcanzar valores considerables. Maupertuis hizo a continuación una seria advertencia a los navegantes osados que menospreciaran los posibles errores del dos por ciento, indicándoles que incluso cuando fuesen menores no se podría hacer nada para evitarlos; terminándola con una pregunta retórica: ¿si un beneficio menor se vuelve precioso cuando se aplica a una gran multitud, qué precio tendría un descubrimiento que disminuye sobremanera el peligro de un incontable número de hombres que exponen su fortuna y su vida en el mar? Es indudable que todos los que habrían evitado el naufragio por una de las columnas de la tabla habrían perecido si hubiesen seguido la otra, de manera que puede parecer tan útil como peligrosa. Continuaba Maupertuis llamando a la prudencia de los navegantes al elegir entre las medidas propuestas por Cassini o por él mismo. Algún día se conocerá la verdad con más evidencia y el bien común exige que se determine de una vez cuál de las dos columnas debe ser seguida y cual rechazada: *Sans cela, toutes les grandes choses qu'on a faites en France pour déterminer la figure de la Terre, demeureroient inutiles, ou deviendroient fort nuisibles.*

En el último capítulo de los Elementos de Geografía (XXII. *Construction de la Table*) aportó Maupertuis la tabla que se acaba de referir, señalando que en una de las columnas se vaciaron las medidas publicadas por Cassini en las páginas 242, 243 y 245 de su libro *de la Grandeur & de la Figure de la Terre* y en la otra las suyas³⁵. En cuanto a las suyas, concretó que el desarrollo del grado obtenido, a una latitud de 66° 20', había resultado ser de 57438 toesas, tal como se había

³⁵ En la versión anónima de *Éléments de Géographie*, se dice: *L'autre Colonne est formée sur les mesures de Mrs du Nord.* Sin embargo en la de 1742 ya si se identificó al indicar: *L'autre Colonne est formée sur nos mesures.*



Los dos modelos de la Tierra, el elipsoide prolato de Cassini y el oblató de Maupertuis. En ambos casos se cometió un error por exceso en el tamaño, aunque a Maupertuis le cupiese el honor de haber acertado en la forma. La superficie encerrada por la elipse meridiana resultó ser aproximadamente un 10% mayor de la real.

indicado en la página 125 de su libro de 1738 *La figure de la Terre, déterminée par les observations...* Asimismo hizo saber que con igual instrumental se había medido el grado en Francia³⁶, a una latitud de $49^{\circ} 22'$, obteniendo un valor de 57183 toesas; es decir 208 toesas más que el valor fijado en su momento por Jacques Cassini. De acuerdo con sus medidas, y suponiendo que los meridianos terrestres eran elipses (como ya habían dicho tanto Newton como Cassini), dedujo Maupertuis un diámetro ecuatorial de 6562480 toesas y un eje polar de 6525600, añadiendo³⁷: *ces deux nombres sont à peu près l'un à l'autre, comme 178 à 177*.

Maupertuis era plenamente consciente de que el valor asignado por él al achatamiento de la Tierra mejoraría, en cuanto se dispusiera del valor del grado medido por los expedicionarios al virreinato de Perú. Confirmando así lo que ya había recomendado Newton, que la figura de la Tierra mejoraría en cuanto se efectuase la comparación de los grados medidos en latitudes muy diferentes. No obstante expresaba también su temor a heterogeneidad de la comparación, pues por una parte dependería esta de la exactitud asignada a cada grado y por otra, podría suceder igualmente que la exactitud de sus propias medidas fuese tal que enmascarase la supuesta ventaja de realizar dos operaciones en lugares tan alejados entre sí: *C'est aux Géomètres à apprécier ces choses*. Otra apreciación de Maupertuis merece ser añadida, pues comentaba la importancia de que las amplitudes de los grados a comparar se hubiesen determinado con igual instrumento.

Cuando los dos grados del meridiano han sido bien medidos es inmediata la obtención del desarrollo del grado, basándose en un teorema enunciado por Newton y demostrado por el propio Maupertuis: *Que los grados del Meridiano, desde el Ecuador a los Polos, crecen como el cuadrado del seno de la latitud*. En cuanto a los desarrollos de los grados de longitud³⁸ d_{\parallel} , verificarían lo siguiente:

³⁶ Página LIV del libro: *Degré du méridien entre Paris et Amiens déterminé par la mesure de M. Picard et par les observations de MM. de Maupertuis, Clairaut, Camus, Le Monnier,...* d'où l'on déduit la figure de la terre par la comparaison de ce degré avec celui qui a été mesuré au cercle polaire. 1740.

³⁷ Se estaba refiriendo Maupertuis al valor del achatamiento polar, esto es al cociente entre la diferencia de los dos valores dados y el mayor de ellos; su resultado es del orden de $1/177.94$, de ahí las dos cifras: 177 y 178.

³⁸ O desarrollo del grado del paralelo al ecuador que tuviese la latitud considerada.

TABLE DES DEGRES de Latitude.			
Latit. du Lieu.	Degrés de M. CASSINI	Degrés de M. DE MAUVERTUIS	Diffe. reues.
0	58020 Toif.	56625 Toif.	+1395 T.
5	58007	56630	1377
10	57969	56655	1314
15	57906	56690	1215
20	57819	56740	1079
25	57709	56800	909
30	57580	56865	715
35	57437	56945	492
40	57285	57025	260
45	57130	57110	20
50	56975	57195	-110 T.
55	56825	57275	455
60	56685	57350	667
65	56555	57420	865
70	56444	57480	936
75	56355	57530	1175
80	56287	57565	1278
85	56243	57585	1342
90	56225	57595	1370
	Axe de la Terre 617968 Toif.	Axe de la Terre 612560 Toif.	53768 T.

TABLE DES DEGRES de Longitude.			
Latit. du Lieu.	Degrés de M. CASSINI	Degrés de M. DE MAUVERTUIS	Diffe. reues.
0	56820 Toif.	57270 Toif.	450 T.
5	56695	57050	455
10	55935	56410	475
15	54845	55340	495
20	53325	53850	525
25	51400	51955	555
30	49075	49665	590
35	46380	46995	615
40	43335	43970	635
45	39965	40610	645
50	36295	36930	635
55	32360	32970	610
60	28185	28755	570
65	23805	24315	510
70	19255	19685	430
75	14560	14900	340
80	9760	10000	235
85	4900	5020	120
90	0	0	0
	Diametre de l'Equateur 6110796 Toif.	Diametre de l'Equateur 6161480 Toif.	50484 T.

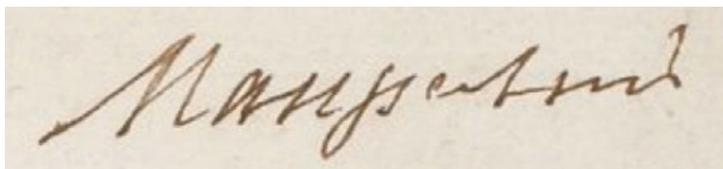
Tablas con los desarrollos del grado de meridiano y de paralelo publicadas por Maupertuis en su libro *Éléments de Geographie*.

te: $d_p = a^2 d / (a^4 + b^2 t^2)^{1/2}$; siendo b, el semieje polar; a, el semidiámetro ecuatorial; t, la tangente de la latitud y d, el desarrollo del grado ecuatorial. Terminaba la disertación de Maupertuis, comentando que con esa fórmula se podría ir rellenando la tabla siguiente: *où je n'ai donné les degrés que de cinq en cinq, & y placer tous les degrés intermédiaires*. Ahora bien como el cálculo reiterado requeriría una atención constante y hasta incómoda, Maupertuis ofreció la posibilidad de usar otra fórmula con la que se alcanzarían resultados suficientemente exactos al calcular el desarrollo del grado de paralelo, o grado de longitud. Si δ es la diferencia entre a y b; c es el coseno de la latitud y s el seno de la latitud, se tendría que $d_p = (dc/a) (1 \pm s^2 \delta/a^3)$; teniendo en cuenta que el signo menos es para la Tierra oblonga y el más para la Tierra oblat.

Las dos tablas son en definitiva la descripción numérica de los dos modelos para la Tierra. En el de Cassini, con aplastamiento ecuatorial, la curvatura será menor en las proximidades del ecuador y por tanto el desarrollo del grado del meridiano sería mayor por esas latitudes que en las polares (58007 toesas a los 5° y 56243 toesas a los 85°). En el de Maupertuis ocurriría justamente lo contrario, puesto que la curvatura sería menor en las zonas polares que en las ecuatoriales y el desarrollo del grado de meridiano sería mayor en el círculo polar que en la zona tórrida (56630 toesas a los 5° y 57585 toesas a los 85°). En los dos modelos se observa que el desarrollo del grado de paralelo va disminuyendo al alejarse del ecuador, si bien siempre es mayor el calculado por Maupertuis (sobre todo entre las latitudes comprendidas entre los paralelos 30° y 55°). Aunque pueda parecer superfluo me parece obligado subrayar la importancia de los valores consignados en cada una de las tablas, que si bien se corresponden con modelos matemáticos contrapuestos de la Tierra, las diferencias entre los ejes de ambos elipsoides, expresadas en términos relativos no son perceptibles. En otras palabras, los dos elipsoides son sensiblemente esféricos y su representación tan exagerada, con escalas diferentes para sus dos ejes, es generalmente con fines didácticos. De no ser así el aplastamiento ecuatorial o polar sería del todo inapreciable.

EPÍLOGO

Pierre Louis de Maupertuis estuvo interesado por la música, la literatura, la matemática, la geometría, las ciencias naturales..., y es que era el prototipo de hombre de la Ilustración: sabio, filósofo, organizador, inventor, viajero, escritor, seductor y hasta un tanto bigardo. Fue desde luego una figura relevante de su tiempo, siendo reconocido como tal por otros personajes aún más sobresalientes: Jean Le Rond d'Alembert y Leonhard Euler. Los dos lo apoyaron en momentos claves de su vida, a propósito de las polémicas científicas en que se vio involucrado. El primero lo hizo en la que mantuvo sobre la forma de la Tierra con todos los cartesianos, especialmente con Jacques Cassini, cuando afirmó en el discurso preliminar de su enciclopedia que había sido el primero que tuvo el valor de declararse newtoniano, al publicar en 1732 su *Discours sur les différentes figures des astres*³⁹. El segundo lo apoyó decisivamente⁴⁰ en la controversia, sobre la prioridad en la formulación del principio de mínima acción, que mantuvo con Johann Samuel König, el cual la atribuyó a Leibniz en lugar de a Maupertuis; cuando este ya lo había enunciado⁴¹, siendo presidente de la Academia de Ciencias de Berlín, en su *Essai de Cosmologie* (1746).



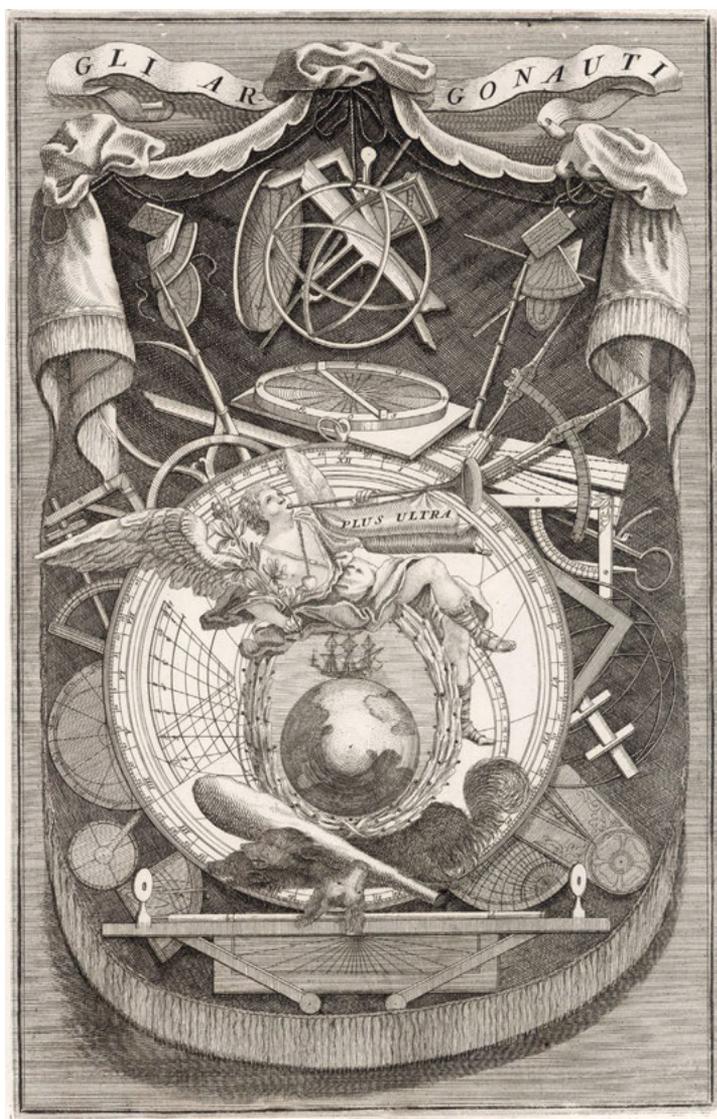
Firma de Maupertuis en un ejemplar del libro *Degré du méridien entre Paris et Amiens*, dedicado al Conde de Argenson (Ministro de Estado con Luis XIV).

³⁹ Su primer capítulo lo tituló *Refléxions Générales sur la figure de la Terre*, reivindicando en él la importancia del experimento llevado a cabo por Richer en la isla de Cayena y los estudios teóricos de Newton; en resumen que venía a defender de nuevo su postura en torno a la conveniencia de suponer para la Tierra un modelo matemático elipsoidal con achatamiento polar.

⁴⁰ Se conservan muchas de las cartas intercambiadas entre Euler y Maupertuis.

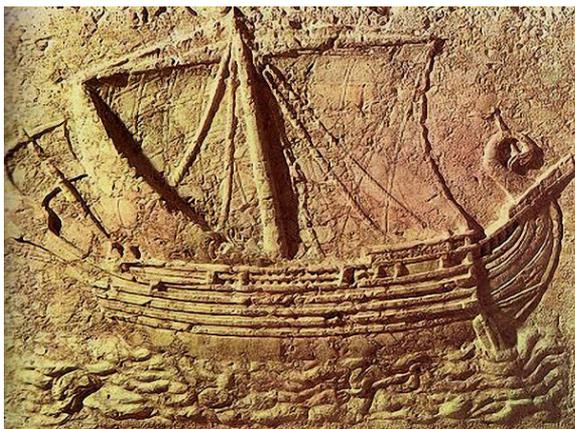
⁴¹ *En todas las distribuciones de movimientos que hay en la naturaleza, la cantidad de acción (que es la suma de los productos de las masas por los espacios que recorren y por las velocidades con las que ellas las recorren) es siempre el menor posible: que en reposo, el cuerpo que se encuentra en equilibrio debe estar situado de manera que si se produce cualquier movimiento, la cantidad de acción sea la menor.*

CAPÍTULO X | Astronomía Náutica, de la estrella del norte a las distancias lunares



CAPÍTULO X | Astronomía Náutica, de la estrella del norte a las distancias lunares

El inicio de la astronomía náutica coincide con el declive de la navegación de cabotaje, esto es con aquella en la que no dejaba de verse el litoral durante la travesía. En cualquier caso, la orientación astronómica permitió saber siempre la dirección del viento. Ese problema que no planteaba dificultad alguna durante el día gracias a la observación del Sol, que siempre se sitúa al sur cuando alcanza su máxima altura sobre la bóveda celeste, no era tan evidente durante la noche. La necesidad de navegar mar adentro debieron sentirla todos los pueblos de la costa, por muy diversas circunstancias: obligación de ampliar su territorio de influencia, transacciones comerciales o meros afanes de conquista. En la historia de la humanidad, escrita en occidente, cumplen esos requisitos los fenicios, instalados en una estrecha franja litoral limitada en su interior por la barrera de la cadena montañosa dispuesta en paralelo a la línea de costa¹. No es extraño que se refieran a ellos las primeras referencias sobre la navegación, llegando a citar algunas crónicas que circunnavegaron África muchos siglos antes de que lo hiciesen los portugueses. En



Nave mercante fenicia (siglo II a.C.) procedente de un sarcófago en los alrededores de Sidón. Museo Arqueológico de Beirut.

¹ No obstante, investigaciones más recientes (2018) parecen probar la existencia de navegación a vela en el Mediterráneo occidental, tal como se refleja en la variada iconografía del abrigo de Laja Alta (Jimena de la Frontera. Cádiz). Cuya datación se remonta al cuarto y tercer milenio a.C. Antonio Morgado Rodríguez y otros: *Embarcaciones prehistóricas y representaciones rupestres. Nuevos datos del abrigo de Laja Alta*. *Complutum*, Volumen 29(2), 239-265. <https://doi.org/10.5209/CMPL.62580>.

cuanto a la astronomía, también debieron de ser ellos unos de los primeros en aplicarla en sus grandes expediciones marítimas; de hecho, hubo un tiempo en que a la estrella polar, o del norte, se le conoció con el nombre de estrella de los fenicios.

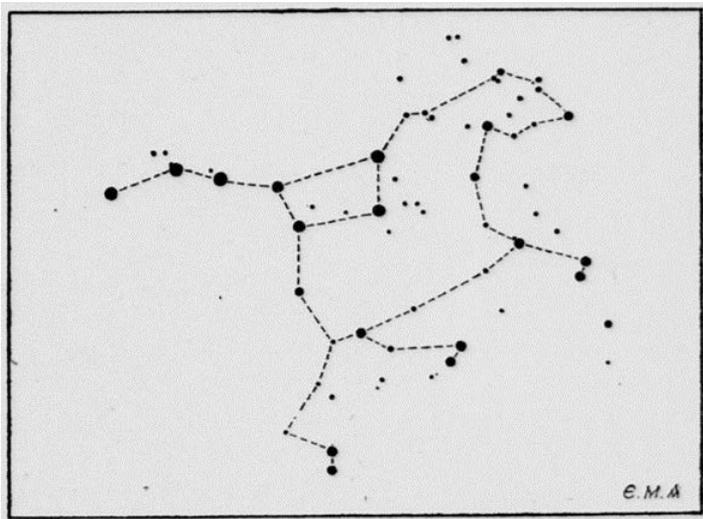
Todo apunta a que efectivamente fueron los fenicios los que tuvieron la perspicacia de elegir como blanco, sobre la bóveda celeste nocturna, a la constelación de la osa menor, posibilitando así la navegación de altura. Son múltiples las referencias que apuntan en esa dirección, siendo Homero el que comentó que dicha constelación fue transmitida a los griegos por los fenicios. Arato pensaba que los fenicios se guiaban en sus viajes por las mismas siete estrellas, añadiendo que tenían la ventaja de describir un círculo menor que el de la osa mayor. Análogo pensamiento tuvo Ovidio al afirmar que la osa menor servía de guía a los navegantes de Sidón.



Culminación inferior de la estrella η de la osa mayor en la época de Homero y en la actualidad. La precesión de los equinoccios explica, que hoy día se produzca el fenómeno cuando está bajo el horizonte.

El reconocimiento del saber de los fenicios fue más allá de la astronomía náutica. Platón defendía que la nitidez del cielo del verano les había permitido observar los astros durante siglos, llegando inclusive a considerar divinidades al Sol, la luna y los Planetas. Estrabón que achacaba a los fenicios la creación de la ciencia del cálculo y de la aritmética, también pensó que fueron ellos los que enseñaron astronomía a los griegos. Plinio el Viejo, por su parte, comentó que les cupo el honor de haber inventado las letras y de haber hecho otros descubrimientos en astronomía, navegación y en el arte de la guerra. No menos esclarecedor fue Porfirio, quien aseguraba que Pitágoras y Platón habían visitado Fenicia y que el primero de ellos había aprendido las ciencias matemáticas de los fenicios.

Los navegantes de la Grecia clásica se basaron también en la astronomía para que sus travesías llegasen siempre a buen puerto. Fueron incluso observadores más pacientes que los fenicios, puesto que, además del Sol y de la estrella polar, se valieron de la constelación del dragón y sobre todo de la Osa Mayor. Igualmente usaron para ese fin el cúmulo abierto de las Pléyades, las Híades, el Boyero y Orión. El repertorio de autores que así lo justifican es vasto. Sirvan de ejemplo los siguientes. Apolonio de Rodas comentaba que Tifis, el capitán de la nave Argo era, amén de hábil en prever las tempestades, fiel seguidor del Sol y de la estrella polar a la hora de navegar. Cayo Valerio Flaco también defendía la competencia de Tifis, indicando que su guía era la constelación del dragón, «que siempre planea por encima del horizonte y no se esconde jamás entre las olas». Ovidio aclaró que los fenicios tomaron partido por la Osa Menor, mientras que los griegos optaron por la Osa Mayor.



Alineaciones estelares que conforman la constelación de la Osa Mayor, ampliando la figura conocida del carro, o cazo. Se aprecian así las patas traseras e inclusive el hocico puntiagudo de la fiera. El dibujo lo incluyó Eugène Michel Antoniadi en su artículo: *La première application de l'astronomie a la navigation* (1932).

Homero fue otro de los cronistas de excepción que dejó constancia de estos hechos, al señalar que el principal personaje de la Odisea dirigió varios días su nave manteniendo constantemente la Osa Mayor a su izquierda. Sin embargo, Ulises no se guiaba solamente por ella, ya que también tuvo en cuenta las posiciones de otras estrellas y constelaciones, tales como las Pléyades, el Boyero y la de Orión. Es muy significativo el comentario añadido a propósito de la Osa Mayor, de la que decía que se trataba de la única que no bañan las aguas del océano².

La expedición de los Argonautas desató la imaginación de los sabios de la antigüedad y de los del siglo pasado. Algunos autores modernos pretendieron ver en ella una especie de alegoría astronómica, aunque otros como Camille Flammarion la consideraron real, al igual que hizo Newton, y movida por intereses políticos, religiosos y comerciales. Los héroes partieron de Yolco, al fondo del golfo de Tesalia, hacia el año 1230 a.C., atravesaron el Helleponto (Dardanelos), la Propóntide y el Bósforo; entraron con decisión en el temible Ponto Euxino (mar Negro) y bordeando el Asia Menor, desembarcaron en Colchida para recoger allí el vellocino de oro. En la vuelta deshicieron el itinerario de ida, lo que permite suponer que recorrerían un total aproximado de 5.000 km.



El jarrón de las sirenas (480 a. C- 470 a.C.). En ella se observa como Ulises está amarrado al palo mayor, y mirando a popa, para no poder atender la llamada tan persistente de las sirenas³. *British Museum*.

² Nos remitimos a la figura segunda de este mismo capítulo, en la que se evidencia que esa constelación (en tiempos de Homero) siempre se encontraba por encima del horizonte.

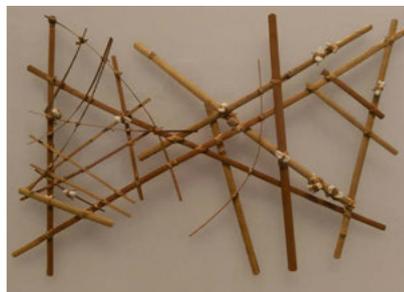
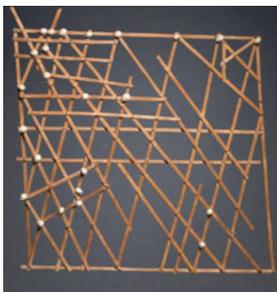
³ Las sirenas eran seres fabulosos: mitad mujer y mitad pájaro, con probable influencia de las Ba egipcias. Ya en la Edad Media se transformaron cambiando la ave por el pez.



Territorio recorrido por los héroes en la Argonáutica de Apolonio de Rodas. El mapa lo hizo Abraham Ortelius en el año 1624.

La nave era de una construcción esmerada, con unas dimensiones nunca vistas (5 m de ancho y unos 30 de largo) y de un colorido excepcional. Llamó tanto la atención de sus contemporáneos que no tardó en convertirse en un hecho mitológico, que pasó a la posteridad como una constelación más de la bóveda celeste⁴, aunque se localizara en el hemisferio sur de la misma. Reconocida por Tolomeo, fue la mayor del cielo hasta el siglo XVIII en que el francés Nicolas Louis de Lacaille decidió dividirla en las tres siguientes: *Carina* (quilla), *Puppis* (popa) y *Vela*. Algunos historiadores griegos, como Plutarco, creyeron que esta constelación era una mera actualización de la del Barco de Osiris, instaurada en Egipto alrededor del año 1000 a.C. aunque con el transcurso del tiempo fuese exclusivamente asociada al mito de Jasón y de los Argonautas.

Análogas reflexiones a las que se hicieron sobre la localización geográfica de la nación fenicia, son obligadas cuando se trata de estudiar la interconexión entre las numerosas islas bañadas por el océano Pacífico. Es obvio que en la historia de la navegación escrita en occidente no pudiesen hacerse en un principio referencias a la misma, baste decir que las Islas Filipinas no fueron descubiertas hasta que desembarcaron en ellas los integrantes de la expedición a las Molucas, comandados por el intrépido Magallanes. Sin embargo, en la actualidad son más verosímiles las dataciones de las travesías efectuadas por los pueblos austronesios que las hasta aquí comentadas.



Cartas de navegación de las Islas Marshall. Localizadas al Noreste de Australia, fueron descubiertas por el español Alonso de Salazar en el año 1526, durante la expedición capitaneada por García Jofre de Loaisa. Su actual denominación recuerda al explorador inglés John Marshall que desembarcó en ellas en 1799.

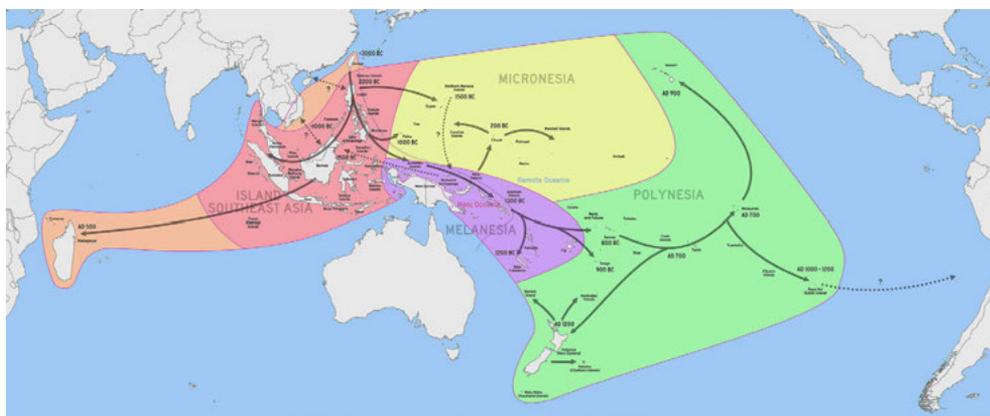
⁴ La *Argo Navis*, en la que viajaron Jasón y los argonautas. Fue descrita por Claudio Tolomeo, aunque ya no figure como tal en la cartografía estelar.

Las noticias sobre ellas no han procedido de documentación alguna, sino de la transmisión oral entre generaciones; teniendo así constancia de que su navegación tuvo también una importante componente astronómica, al apoyarse en la observación de los ortos y ocasos de ciertas estrellas. Lo que si se conserva, por la consistencia del soporte empleado, son muchas de sus cartas náuticas; en las que se representan tanto los itinerarios seguidos por las embarcaciones como algunas de las islas, materializándose la posición de estas últimas mediante conchas.

La información de que se dispone hoy es tan interesante como sorprendente, demostrando una vez más la importancia de la transmisión oral ya citada. La navegación en el extremo oriente tuvo su origen en las migraciones que partiendo de la isla de Taiwan se dirigieron a las del sudeste asiático y a la de Melanesia, durante dos milenios (3000 a.C.- 1000 a.C.). La primera expedición de largo recorrido fue la que concluyó con la colonización de Micronesia a partir de las Filipinas en torno al año 1500 a.C. Alrededor del 900 a.C. sus descendientes navegaron más de 6000 km, a través del Pacífico, hasta llegar a las islas de Tonga y Samoa; desarrollándose allí una cultura propia que distingue a los habitantes de la Polinesia. En los siglos siguientes alcanzaron esos nativos Hawaii, Nueva Zelanda, la isla de Pascua y muy probablemente Sudamérica.

Los polinesios conocían perfectamente las aguas por las que navegaban, apoyando sus largas travesías tanto en las observaciones estelares como en las de aves o en las de otros hechos por los que deducían la proximidad de tierra. Todas sus experiencias las plasmaron en sus peculiares cartas náuticas, en otras del cielo y hasta en canciones o en relatos ancestrales, que no dejaron de usar para mantener la relevante información que fueron acumulando desde tiempo inmemorial. Mientras tanto los austronesios comenzaron a imponer su dominio marítimo alrededor del año 1000 a.C. enlazando China con India, Oriente Medio y la costa oriental de África. Marinos procedentes de Borneo llegaron a Madagascar a comienzos del primer milenio de nuestra era, colonizándola hacia el año 500.

No obstante, las influencias de las estrellas y constelaciones sobre la navegación no siempre fueron positivas, puesto que en ocasiones se las consideraba responsables de fenómenos atmosféricos nada agradables. Digamos en primer lugar que a los marinos de antaño parecían preocuparles especialmente las tempestades que solían desencadenarse en las proximidades de los equinoccios. Plinio el Viejo, por ejemplo, pensaba que la constelación de Orión debería ser conside-



La migración y expansión marítima de los austronesios a partir del año 3000 a. C.

rada peligrosa por ser responsable de las tempestades. Polibio concretaba además que la flota romana naufragó, durante la primera guerra púnica, por haberse obstinado los cónsules en navegar entre los ortos heliacos de Orion y de Canis, a pesar de las advertencias recibidas. Teón de Alejandría sospechaba que la constelación del Águila era borrascosa al salir del mar al final de la noche. De igual opinión era Apolonio de Rodas, a propósito del orto de Arturo, una estrella lluviosa relacionada también con las tempestades. Se le atribuye a Demóstenes el pasaje siguiente: «he estado esperando en este lugar 45 días hasta que partieron los barcos del Ponto tras el orto de Arturo». Virgilio se refirió igualmente a esas supuestas correspondencias, identificando a Capricornio con cabritos lluviosos; los cuales, a juicio de Avieno, desencadenaban vientos terribles apenas salían del océano. Terminamos estos apuntes con el importante papel jugado por las Pléyades⁵. Ovidio pensaba que eran la sede de los

vientos, mientras que Demóstenes las consideraba causantes de tormentas y de la aparición de vendavales en el momento de su ocaso. De igual modo pensaba Columela, cuando insistía en que las Pléyades, al ocultarse por la mañana, anunciaban el mal tiempo. Finalmente se reproduce el amigable consejo que daba Hesiodo a los jóvenes marinos: «si el deseo de una navegación peligrosa se apodera de tu amo, teme la época en que las Pléyades, huyendo del impetuoso Orión, se sumergen en el océano; pues es entonces cuando se desencadena el soplo de todos los vientos, y no expongas ninguno de tus barcos al furor de la mar tenebrosa».

La experiencia astronómica de la antigüedad no fue aprovechada en la primera mitad de la Edad Media, a pesar de que la herencia fue valiosa. Ciertamente, a Hiparco de Nicea se le atribuye la invención del astrolabio, un instrumento astronómico que siglos después sería el más usado en la astronomía náutica, y la determinación de la diferencia de longitudes geográficas entre Rodas y Alejandría, por medio de la observación simultánea de un eclipse lunar desde ambas localidades. También fue él quien diseñó la red ortogonal de meridianos y paralelos que cubren el globo terráqueo, gracias a la cual se pudieron definir el par de coordenadas geográficas que localizan cualquier punto de su superficie. Marino de Tiro es otro de aquellos personajes que ha de ser referido



El cúmulo abierto de las Pléyades (M45) y el cuadro que les dedicó Elin Wedder en 1885. *Metropolitan Museum of Art*. New York.

⁵ Las siete hijas del titán Atlas y de la ninfa Pléyone. Eran ninfas en el consejo de Artemisa. Sus nombres fueron los siguientes: Alcione, Celeno, Electra, Estérope, Maya, Mérope y Táigete. Todas mantuvieron relaciones con los dioses más importantes del Olimpo, salvo Mérope.



Marino de Tiro (d) y Claudio Tolomeo (i) en el frontispicio de una de las versiones de su Geografía. El autor fue el cartógrafo Pieter van Bert (Petrus Bertius) en el año 1618, apoyándose en la previa de Mercator (1578).

por sus innovadoras cartas marinas. Contemporáneo suyo fue el gran Tolomeo, quien incluyó en su geografía un nuevo método para calcular la diferencia de longitudes. Si A y B son los puntos implicados, se forma un triángulo esférico con ellos dos como vértices, siendo el tercero el polo norte. Los tres datos de partida serían la latitud de A, lo que equivaldría a conocer el lado PA (cuya amplitud coincidiría con su colatitud), la amplitud angular del arco AB y el ángulo formado por él y el meridiano de A. De modo que mediante los cálculos propios de la trigonometría esférica, se podría obtener el ángulo formado por los meridianos de A y B, coincidente con la diferencia de longitudes entre ellos.

Quizás fueran los navegantes árabes los primeros que continuaron con las observaciones astronómicas previas, usando para ello el kamal. Un artilugio rudimentario con el que lograron medir no solo la altura de la estrella del norte sino también las de otras muchas estrellas. Su incuestionable interés por la astronomía les llevó a idear un novedoso instrumento, el cuadrante astronómico, siendo esta una de sus principales aportaciones a esta disciplina; aunque fuese diseñado para otros menesteres, al final acabó usándose como un instrumento más de navegación. Sus travesías más memorables se enmarcaron en el espacio geográfico definido por el Mediterráneo, el Mar Rojo, el Golfo Pérsico, el Mar Árabe y la Bahía de Bengala. Una evidencia más de su notable desarrollo en la navegación fue el hecho de que las carabelas, las naves más señaladas de portugueses y españoles, solo fueron una versión mejorada de alguno de los navíos flotados por los exploradores andalusíes del siglo XIII.

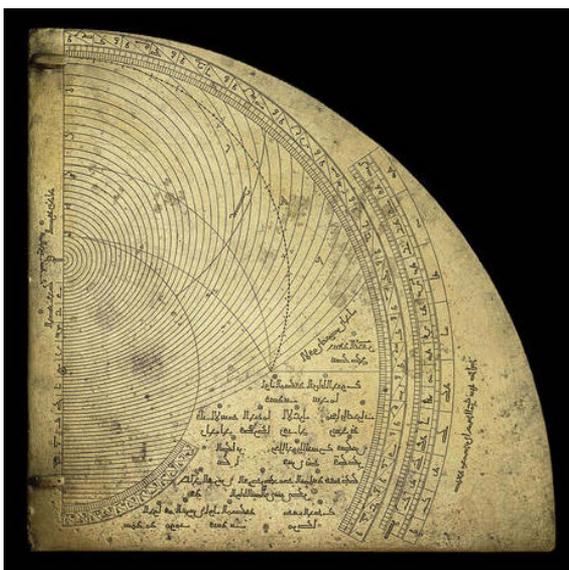
En plena Edad Media se produce un doble acontecimiento que, sin ser astronómico, marcó el devenir de la navegación de altura, favoreciendo su desarrollo y convirtiéndola pronto en una actividad científica. Ciertamente, la aparición, casi simultánea, de la brújula y de los portulanos, supuso llegar a un punto de no retorno al transformarse de inmediato en instrumentos imprescindibles para la práctica de la navegación. La brújula es una manifestación directa del magnetismo terrestre, que al parecer fue descubierta en China. Su elemento esencial es una aguja imantada que marca permanentemente la dirección de la meridiana magnética sobre un limbo graduado, en cuyo centro se sustenta; ocasionalmente se incorporaba en torno al mismo una rosa de los vientos. Fue tal la sensación que causó la brújula en la comunidad científica que creyeron haber resuelto con su concurso el problema secular de la longitud geográfica. Nada más lejos de la realidad, pues cometieron el error de suponer coincidentes el norte geográfico y el norte magnético, cuando realmente forman un ángulo (la declinación magnética) que varía con el lugar y con el tiempo. La confusión se produjo porque las líneas isógonas (de igual declinación) seguían sensiblemente direcciones próximas a las de los meridianos geográficos. Una de las primeras observaciones de ese fenómeno tan singular se realizó durante el primer viaje de Cristóbal Colón, justamente cuando cruzaron la llamada línea ágena o de declinación nula. Así quedó reflejado en el cuaderno de bitácora:

Jueves, 13 de septiembre

Aquel día con su noche, yendo a su vía, que era al Oeste, anduvieron treinta y tres leguas, y contaba tres o cuatro menos. Las corrientes le eran contrarias. En este día, al comienzo de la noche, las agujas noroesteaban, y a la mañana noroesteaban algún tanto.

La brújula fue desde que se incorporó a la navegación el medio ideal para materializar la dirección de los vientos y fijar el rumbo del barco, relegando las observaciones astronómicas al cálculo de la latitud (siempre necesario para localizar un determinado paralelo).

Los portulanos fueron representaciones iconoclastas y alejadas por tanto del fundamentalismo religioso que impregnó otros mapas medievales (T en O y derivados). Su origen es incierto y hay unanimidad al considerar que las escuelas española e italiana fueron preponderantes. En España se distinguieron dos grupos principales: el mallorquín y el levantino. Abraham Cresques fue el representante más genuino del primero, muy conocido por ser el autor del mejor mapamundi del medievo (1375); con la particularidad de añadir información geográfica en el interior del campo del mapa, una característica que no tenían los portulanos italianos. Jafuda Cresques, hijo



Cuadrante astronómico del siglo XIV. Damasco.

del anterior que emigró a Portugal temeroso de la persecución contra los judíos, es probable que crease su propia escuela en el país vecino. Los cartógrafos musulmanes también dibujaron portulanos de gran colorido, sobresaliendo la figura del almirante turco Piri Reis. Los portulanos fueron una documentación determinante para la navegación costera, no en vano ofrecían una imagen fidedigna del litoral, bien iluminada con una amplia y correcta información toponímica.

Los portulanos y la brújula parecían llamados a solucionar la fijación de los rumbos en las grandes travesías de la navegación, aunque solo se tratase de una posibilidad sin soporte matemático alguno. Al formarse los portulanos sin el apoyo de un sistema cartográfico predeterminado, ofrecían una imagen de incuestionable valor estético, pero de



Isógonas en el Atlántico y línea ágon. *A new and correct chart showing the variations of the compass in the western & southern Oceans.* Edmund Halley.1700.



Portulano de Jorge Aguiar (1492). Ofrece la imagen del Mediterráneo, de Europa occidental y del litoral africano. Se ha ampliado la bella representación del último bastión musulmán en la península. *University of Yale* (New Haven, USA).

escasa utilidad geométrica; ha de tenerse en cuenta que sobre ella no se podían evaluar con el mínimo rigor ángulos y distancias. La dificultad al explotar la información geográfica que ofrecían era tal que no se podían dibujar, a ciencia cierta, las imágenes planas de las líneas de igual rumbo (loxodrómicas) ni la de las líneas de mínima distancia (geodésicas u ortodrómicas).

Con la llegada del Renacimiento cobra de nuevo protagonismo la astronomía náutica, al entender que sin el concurso de la cosmografía no serían posibles las grandes expediciones que caracterizaron a la época. La transformación introducida en la navegación alcanzó de lleno a la tripulación de los barcos, requiriendo el empleo de cosmógrafo una cualificación muy por encima de la exigida a otros puestos tan esenciales como el de los pilotos. No obstante, ha de entenderse que en ningún caso se trató de aportaciones sobresalientes en sentido estricto, aunque los resultados conseguidos pudieran hacer creer lo contrario. El gran matemático español Julio Rey Pastor⁶, expresó de manera magistral ese sorprendente suceso: *Ciencia y técnica muy rudimentarias sin duda, desde nuestro actual punto de vista, fueron las utilizadas por los descubridores de nuevas rutas y de mundos nuevos, como parecerán rudimentarias a las venideras generaciones las hipótesis físicas que usan nuestros ingenieros para el cálculo de sus estructuras y nuestras actuales ideas sobre el cáncer. Precisamente esta dramática desproporción entre la insignificancia de los medios y la grandiosidad de los resultados hace resaltar con más impresionante relieve el valor de quienes los lograron.*

Parece ser que el detonante de la expansión marítima de Portugal fue la conquista de Ceuta en el año 1415. En ella cobró especial protagonismo el infante Don Enrique, apodado el Navegante después de que acuñasen tal sobrenombre los alemanes Heinrich Shaefer y Gustav de Veer en el siglo XIX. La iniciativa de los dos historiadores estuvo plenamente justificada, dado el decidido apoyo que prestó a la exploración del litoral africano (con el empeño personal de que se doblase el Cabo Bojador) movido no solo por intereses geopolíticos y comerciales, sino también por otros de índole religiosa, centrados principalmente en contactar con el personaje mitológico del Preste Juan, un supuesto rey sacerdote que también había logrado vencer a los musulmanes. A Enrique el Navegante se le atribuye con frecuencia y con escaso fundamento, la creación de una Escuela de Náutica en la villa de Sagres, aunque lo único realmente cierto es que pasó allí los últimos años de su vida.



Reloj de Sol y rosa de los vientos
en Sagres (Cabo de San Vicente).

⁶ La Ciencia y la Técnica en el Descubrimiento de América. Espasa Calpe Argentina. Buenos Aires.1942.



Mosaicos con la esfera armilar (1508) en el Palacio de Sintra. Esta esfera de los matemáticos llegó a ser el emblema personal del rey Manuel I.

La vocación marinera del infante Enrique fue apoyada en todo momento por su padre, el rey Juan I, por su hermano, el también rey Enrique I (o Duarte I) y por su sobrino, el rey Alfonso V, conocido luego como el Africano por razones obvias. Fue el hijo de este último, el rey Juan II, quien fundó en el año 1480 la Casa de Indias y la *Junta dos Matematicos*, como doble soporte político y técnico que amparase todas las travesías atlánticas, consumándose así la desacreditación de los antiguos: Bartolomé Díaz alcanzó el océano Indico en 1486, al doblar por primera vez el Cabo de Buena Esperanza (antes llamado codo de las tormentas) y Vasco de Gama consiguió llegar hasta la India en su primer viaje (1497-1499). La Junta no tardó en dar sus frutos, tras contratar al alemán Martin Behaim. Este discípulo de Regiomontanus estaba al tanto de las tablas de su maestro, en las que se detallaban los valores de la declinación solar a lo largo del año. Suyo fue el último globo terráqueo en el que no figuró el nuevo continente americano, fechado en el año crucial de 1492. Precisamente, en ese año se incorporó a la Junta otro miembro ilustre, Abraham Zacuto, el cual había sido profesor en la Universidad de Salamanca y era el autor de un calendario perpetuo; en él se basaron tanto portugueses como españoles para confeccionar sus Regimientos de Navegación. Zacuto⁷ fue nombrado astrónomo real por Juan II, continuando en su cargo en el reinado de Manuel I, sucesor y yerno del anterior. Juan II le transmitió a Manuel I el emblema que se convertiría con el tiempo en un símbolo de Portugal: la esfera armilar o esfera de los matemáticos, un homenaje imperecedero a todos aquellos que hicieron posible tan heroicas gestas.

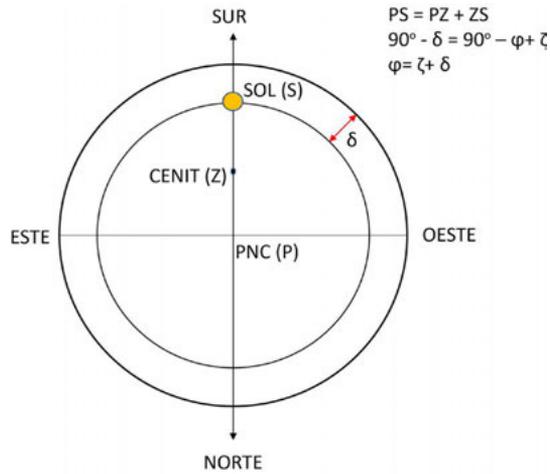
M. Behaim prestó un gran servicio a la corona portuguesa, que vino a solucionar el problema planteado a los marinos portugueses al acercarse al ecuador. En efecto, a medida que lo hacían iba aproximándose la estrella polar a la línea del horizonte y era sumamente complicado hallar su altura y por tanto la latitud del lugar. El inconveniente fue aún mayor una vez que traspasaron la equinoccial, no sabiendo entonces con certeza en que paralelo se encontraban. La solución pro-

⁷ Este astrónomo genial, que ya había huido del reino español a causa de la persecución contra los judíos, se vio obligado a abandonar Portugal, temeroso de las conversiones forzosas. Después de refugiarse en Túnez, pasó a Damasco, permaneciendo allí el resto de sus días.

puesta por el alemán fue una enmienda radical al procedimiento empleado hasta entonces, señalando que se podía obtener la latitud observando al Sol en el instante en que alcanzase su altura máxima, es decir cuando se produjera su culminación superior. La operación resultaba factible, ya que al disponer de los valores que tomaba la declinación del Sol en cada día del año, bastaba con medir su altura y proceder en consecuencia⁸.

A. Zacuto cumplió con sus cometidos de astrónomo real y transformó el astrolabio terrestre, poco práctico en alta mar, por otro más sencillo con el que se pudiesen medir las alturas del Sol sin dificultad. El novedoso instrumento impidió contratiempos como el que le sucedió a Bartolomé Díaz: que hubo de desembarcar en la Bahía de Santa Elena, fundamentalmente, para asegurarse del valor de la latitud con observaciones más fiables. El astrolabio náutico, metálico y no de madera como los previos, fue utilizado sin problemas tanto por Vasco de Gama como por Pedro Álvares Cabral en sus travesías por el océano Indico. Recientemente (2014), se encontró uno de aquellos instrumentos, explorando los restos de la nave Esmeralda, hundida frente a las costas de Omán en el año 1503. La nave formaba parte de la flota de Vasco de Gama, en su segundo viaje a la India (1502-1503).

Casi concluye el siglo xv con la gesta inconmensurable de Cristóbal Colón, quien al descubrir un nuevo mundo cambió la historia de la humanidad, conectándolo al occidente cristiano, con



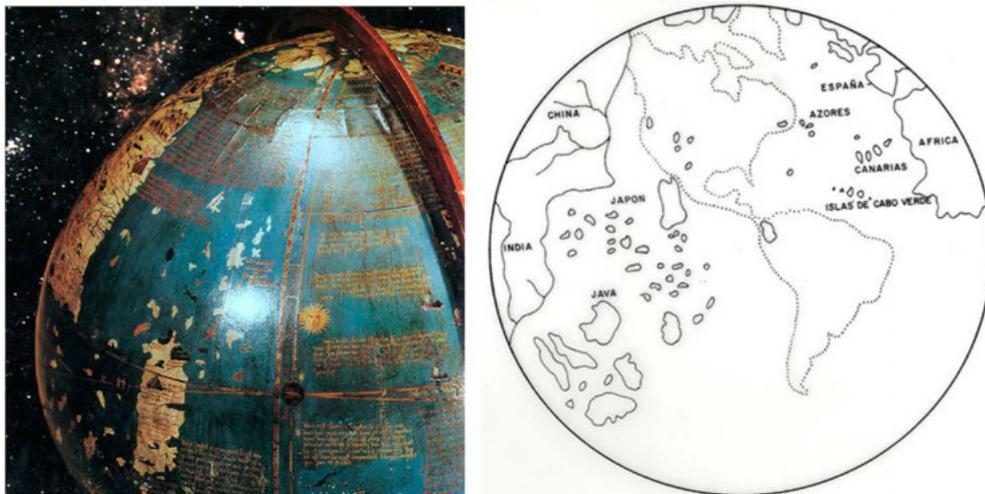
Proyección ortográfica de la esfera celeste sobre el plano del ecuador. Estando el Sol en su culminación superior, se obtendrá la latitud (φ), sumándole a la distancia cenital (ζ) el valor de la declinación (δ). La distancia cenital es el ángulo complementario de la altura.



Astrolabio de 1496 hallado en el pecio de la nave Esmeralda, que navegó en el segundo viaje de Vasco de Gama a la India (1502-1503); se presentan el anverso y el reverso, superponiendo en este la graduación del limbo. Obsérvese el grabado de la esfera armilar en su borde inferior, emblema del rey Manuel I. Se conserva en el Museo Nacional de Omán.

⁸ En términos matemáticos se diría que la declinación del Sol, su altura y la latitud son combinación lineal.

todo lo que ello significó y significa⁹. Es sabido que el error cometido, al identificar el territorio en que acababa de desembarcar, estuvo plenamente justificado; puesto que el modelo esférico de la Tierra en que se apoyó tenía un radio sensiblemente menor del debido¹⁰. Por otro lado, es evidente que sin habérselo propuesto demostró de modo palmario que el problema de las longitudes geográficas distaba mucho de estar resuelto.



Detalle del globo de Martin Behaim y uno de sus hemisferios en el que se ha superpuesto la imagen del continente americano, para evidenciar así la natural equivocación de Cristóbal Colón.

De nuevo hacemos nuestro el juicio emitido al respecto por J. Rey Pastor en la publicación ya citada: *La genial equivocación geográfica de Colón, que hizo posible la epopeya del 1492, y sin la cual se habría retrasado el descubrimiento quién sabe cuánto tiempo, y la terquedad con que persistió en su error hasta el fin de sus días, han dado pie a la creencia de que los descubridores y colonizadores obraron inconscientes de la trascendencia eterna de su empresa; creencia falsa en absoluto, pues los más cultos entre ellos se daban buena cuenta de que estaban actuando en un elevado plano histórico.*

La política exterior de España no supo estar a la altura de las circunstancias, y actuó en este sentido a remolque de la corona portuguesa, probablemente por su falta de experiencia. El caso es que hasta el año 1503, esto es once años después de tan importante acontecimiento, no se creó la Casa de Contratación de Indias; debiendo pasar veintiuno años más para que se fundara el Consejo supremo y Real de las Indias. Uno de los oficiales de la Casa más afamados en su tiempo

⁹ Octavio Paz, escribió en *Vislumbres de las Indias* (1995) lo siguiente: *No todo fue horror, sobre las ruinas del mundo precolombino los españoles y los portugueses levantaron una construcción histórica grandiosa que, en sus grandes trazos, todavía está en pie. Unieron a muchos pueblos que hablaban lenguas diferentes, adoraban dioses distintos, guerreaban entre ellos o se desconocían. Los unieron a través de leyes e instituciones jurídicas y políticas, pero, sobre todo, por la lengua, la cultura y la religión. Si las pérdidas fueron enormes, las ganancias han sido inmensas. Para juzgar con equidad la obra de los españoles en México hay que subrayar que sin ellos –quiere decir: sin la religión católica y la cultura que implantaron en nuestro país– no seríamos lo que somos. Seríamos, probablemente, un conjunto de pueblos divididos por creencias, lenguas y culturas distintas.*

¹⁰ En lugar de 6371 km supuso que sería del orden de los 3820 km. De modo que el perímetro de la Tierra resultaba ser, según Colón, de unos 24.000 km, en lugar de 40.000 km



Estatua de Americo Vesputio en la *Galeria Uffici*. Portada de *Lettera di Amerigo Vespucci Delle Isole Nuovamente Trovate in Quattro Suoi Viaggi* (1506).

fue el cosmógrafo florentino Américo Vesputio, nacionalizado español en 1505, el cual participó en los preparativos del primer viaje colombino. Él también hizo, al parecer, algunos viajes; como el del año 1501, de los que dejó constancia en sus escritos más conocidos: *Mundus Novus*, impresa en París (1501), y su carta a Soderini.

Lo más subrayable de su contenido fue el hecho de que hubiese identificado como continente a los territorios del nuevo mundo; siendo esa la circunstancia que aprovechó el cartógrafo Martin Waldseemüller para bautizar con su nombre el nuevo mundo, el topónimo América figuro por primera vez en su mapamundi del año 1507. Pero lo más relevante que ofrecen las cartas, en este contexto, fue la relación de sus observaciones astronómicas. He aquí una de ellas: «*Tanto navegamos por la zona tórrida hacia la parte del austro, que nos encontramos bajo la línea equinoccial, y teniendo un polo y el otro a final de nuestro horizonte, y la pasamos por seis grados perdiendo totalmente la estrella tramontana*». Es muy llamativa su referencia a la cruz del sur¹¹, realizada en los siguientes términos: «*Y a la derecha vuelto, alcé la mente al otro Polo, y vide cuatro estrellas que solo vio la primitiva gente. ¡Qué alegre el cielo de sus chispas bellas! ¡Oh viudo Septentrión que estás privado eternamente de la vista de ellas!*».

De mayor calado es su afirmación de que había ideado un método para hallar la longitud, concretando incluso el valor de la obtenida con relación al meridiano de Cádiz (82° 30'), siendo probable que le enviara al rey Manuel I una copia del procedimiento que había ideado. Es igualmente destacable la reflexión geodésica de Américo Vesputio, citando tanto a Tolomeo¹² como a Al-Farghani, con la que concluye la reseña que se ofrece a continuación:

¹¹ La escena fue inmortalizada a finales del siglo xvi por el pintor flamenco Jan van der Straet (1600), que representó a Vesputio midiendo la posición de la Cruz del Sur. Figurando igualmente Dante Alighieri, junto a unos versos astronómicos. El grabado se reproduce en el capítulo quinto de este libro.

¹² Tolomeo hizo suya la medida de la Tierra atribuida a Posidonio, el cual asignó al perímetro de la Tierra un valor de 180.000 estadios. Es prácticamente imposible hallar la equivalencia métrica de esa medida, pues se ignora el tipo de estadio que empleó; en el supuesto de que hiciese realmente esa observación geodésica.

*corresponden a cada grado 16 leguas y dos tercios, y esta proporción la comprobé muchas veces con el punto de los pilotos, encontrándola verdadera y buena*¹⁴.

Américo Vespucio fue nombrado piloto mayor en el 22 de marzo de 1508, recayendo en tal puesto las obligaciones de enseñar el manejo de instrumentos tales como astrolabio, cuadrante y todos los que resultasen útiles para la navegación. Los pilotos de su alteza, allí formados tenían la obligación de dar cuenta de sus travesías a dicho piloto mayor, ya que este debería avalar los documentos y padrones confeccionados en el transcurso de las diferentes expediciones:

Mandamos a nuestros oficiales de la Casa de Contratación de Sevilla, que hagan juntar a todos nuestros pilotos, los más hábiles que se hallaren en la Tierra a la sazón, é en presencia de vos el dicho Amerigo Despuchi (sic), nuestro piloto mayor, se ordene é haga un padrón de todas las tierras é islas de las Indias que hasta hoy se han descubiertos pertenecientes a los nuestros reinos é señoríos, é sobre las razones e consulta dellos, é al acuerdo de vos el dicho nuestro piloto mayor, se haga un padrón general, el cual se llame el padrón Real, por el cual todos los pilotos se hayan de regir é gobernar.

Otro funcionario clave para la Casa de Contratación, y para la ciencia española, fue el sevillano Alonso de Santa Cruz. Cosmógrafo de la Casa desde 1535, fue un consumado especialista en la materia, tanto a nivel teórico como práctico; su título así lo aventuraba: cosmógrafo de hacer cartas e instrumentos para la navegación. El profesor Mariano Cuesta Domingo¹⁵, profundo conocedor de la vida y obra de nuestro protagonista, dijo de él que se trataba de un personaje «que fue geógrafo, cronista, cartógrafo y hasta *archic cosmógrafo*, un sabio de la Casa de Contratación... vivió sesenta y dos años... llenos de trabajo y cargados de actividades, también de aventuras, de un hombre lúcido, emprendedor y afortunado por más que no viera publicadas sus obras».



Carlos V y Felipe II, sosteniendo el orbe. Antonio Arias Fernández. Museo del Prado.

¹⁴ Sin embargo, el historiador Felipe Fernández-Armesto ha señalado que el valor dado por Vespucio (82° 30', desde el meridiano de Cádiz) es una mera copia del obtenido por Cristóbal Colón en 1494 al observar un eclipse lunar desde la Isla Española, lo que le hace pensar que Vespucio no realizó ninguna medición de la longitud, sino que se limitó a plagiar al Almirante; afirmación que se compeadece poco con el texto que aquí se reproduce.

¹⁵ Estudio crítico. *Alonso de Santa Cruz*. Fundación Ignacio Larramendi (2016).

Alonso de Santa Cruz intentó en reiteradas ocasiones que le autorizasen a publicar sus trabajos, como prueba el texto que se acompaña y que dirigió al mismo monarca Felipe II:

Y no dexaré asimesmo de suplicar a Vra. Mg. sea servido de me mandar dar previllegio y licencia para poder imprimir algunos libros que tengo hechos y cartas generales y particulares de toda la geographía del mundo y que ningún otro lo pueda hazer sin mi voluntad y licencia, pues no es justo que aviendo pasado tantos y tan continuos trabaxos en lo hazer y con tantos gastos de hazienda aya de llevar otro el premio dello, y otro previllegio como este mandó dar la Mag. del emperador don Carlos a Pedro Apiano alemán por ciertos libros que le dedicó y servicios que le hizo, y no menos lo mereceré yo, pues los que tengo hechos van todos dedicados a Vra. Mg., cuya muy católica y real persona prospere y guarde Nuestro Señor con acrecentamiento de muchos más Reynos y Señoríos, como sus criados deseamos desta corte de vra. Mg. a 5 días de mayo de 1558 años.

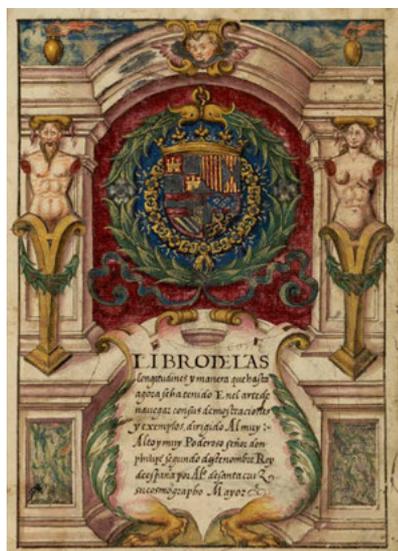
La respuesta implícita del rey no dejaba lugar a dudas acerca de su intención, con la excusa de que las informaciones que pudiese proporcionar el peticionario pudiesen, a la larga, perjudicar los intereses de su reino. Efectivamente, en su carta del 26 de noviembre de 1563, dirigida al presidente y demás miembros del Consejo de Indias, lo hace en los términos siguientes:

Y quanto a lo de los libros que el dicho Alonso de Santa Cruz ha ofrecido que imprimirá tocantes a la declaración de las Indias que dezís serán de provecho para tener noticia más en particular de aquellas partes, aunque esto sea así, havéis de mirar que por esta misma razón podría traer mucho inconveniente en que los dichos libros se imprimiesen por la noticia y claridad que por ellos hallarian extranjeros y otras personas que no fuesen súbditos ni vasallos nuestros de las dichas Indias que es punto de consideración, y por esto os encargo lo miréis y tratéis y me aviséis de vuestro parecer¹⁶.

Aunque no tenga una aparente relación directa con la evidente recomendación del rey, si me ha parecido interesante reproducir en su integridad dos párrafos incluidos en el dossier sobre la expoliación.

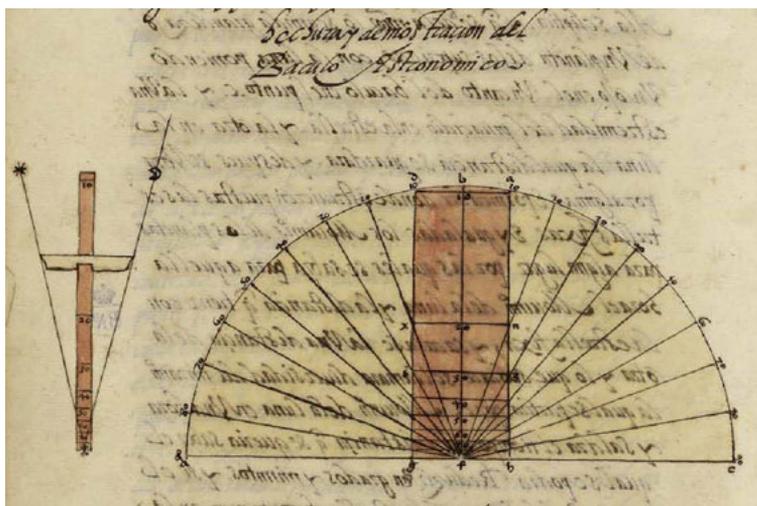
«Es muy curiosa la reflexión que hace el autor sobre el desinterés existente en su siglo por el cultivo de los saberes, y acusa a sus contemporáneos de no querer salir de su ignorancia —viviendo de espaldas tanto a los conocimientos antiguos como a los nuevos que nacen— y no desear más que las riquezas y el poder»:

[...] pero el día de oy todo lo vemos al contrario, porque no se piensa ser otra cosa más suave que el tener y valer y ser honrado de todos, y el saber y virtud no sólo lo menosprecian, más aún tienen en poco a los que a ella se dan. Por manera que ha venido el siglo a tan estrema miseria



Portada del Libro de las Longitudes. Alonso de Santa Cruz. Biblioteca Nacional de España.

¹⁶ Tanto el texto de Alonso de Santa Cruz, como la respuesta del rey Felipe II han sido extraídos del Dossier: Alonso de Santa Cruz, el cosmógrafo real expoliado. Cuadernos Hispanoamericanos (6.02.2020). También se comenta en ellos, que sus trabajos debieron ser aprovechados por su sucesor Juan López de Velasco, para redactar sus conocidas Relaciones Topográficas, y que Andrés García de Céspedes se apropió de dos de ellos, suplantando burdamente al autor de los mismos. Su autora fue María Isabel Vicente Maroto, profesora en la Universidad de Valladolid.



Medida de la distancia angular entre la luna y una estrella, mediante la ballestilla (o vara de Jacob). Libro de las Longitudes. Alonso de Santa Cruz.

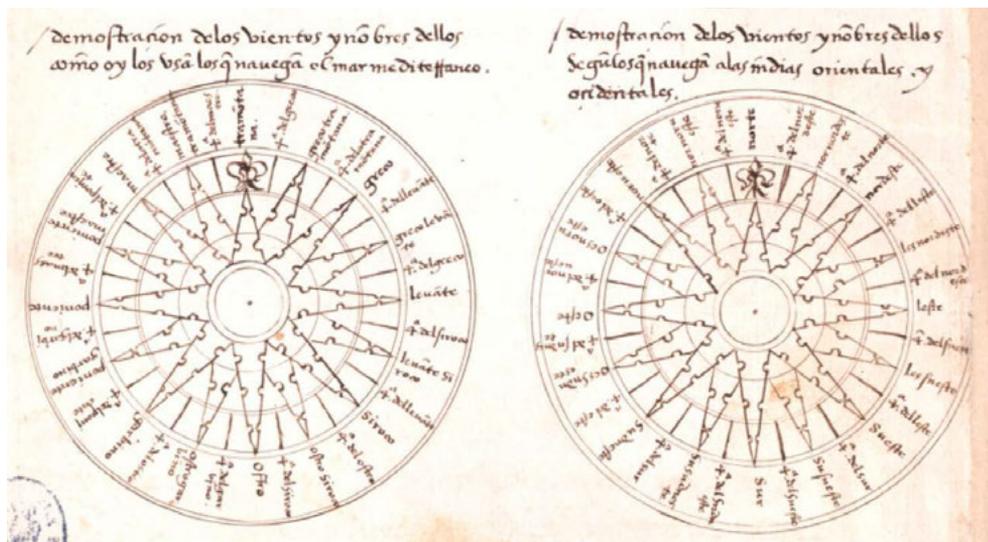
que no sólo no queramos deprender las Artes que cada el día de nuevo se descubren, más antes y es lo peor (como dize Plinio en el segundo libro) que las que otros tiempos fueron halladas con mucho trabajo y curiosidad de los hombres, y para provecho dellos, por necesidad y simpleza las menospreciemos y tengamos puestas en olvido, y esta es la causa como tan pocos sean doctos en esta nuestra edad, y como estén tan echados los estudios de las buenas Artes, que ya de sepultadas no puedan resucitar.

Santa Cruz fue desde luego un autor prolífico, aunque solo se reseñen aquí dos de sus obras: el *Libro de las longitudes* y su celebrado *Islario General*. A él le cupo el honor de haber escrito el primer tratado en el que se abordó de manera sistemática el problema de las longitudes, incluyendo un resumen histórico de su evolución desde tiempos pretéritos. El título completo de la obra fue *Libro de las longitudes y manera que hasta agora se ha tenido en el arte de navegar, con sus demostraciones y ejemplos*, siendo escrita probablemente en la segunda mitad del siglo XVI. La introducción del libro es en realidad una carta de presentación al rey Felipe II, en la que explica el contenido y su estructuración. Aunque con ninguna de sus propuestas se pudiera determinar de manera fiable la diferencia de longitudes, si hay que subrayar la importancia de que asociara esa cuestión al imprescindible conocimiento de la hora. El libro fue, como se dice en la carta, el resultado de las deliberaciones de la junta técnica que examinó algunos instrumentos metálicos fabricados por Peter Apiano.

Doce fueron las maneras de hallar la longitud según el cosmógrafo, remontándose inclusive al Génesis, aunque se detuviese de manera expresa en los cálculos de Tolomeo y Marino de Tiro. Resulta curioso, que apoyándose en ellos y en algunas reflexiones cartográficas propias llegase a la conclusión errónea de que las Islas Molucas pertenecían a España y no a Portugal. Otro de los procedimientos que defendió fue el clásico de las observaciones de los eclipses solares o lunares, «a condición de que quien efectuara los cálculos fuera persona docta, con buenos instrumentos y llevando tablas precisas con los cálculos y predicciones de eclipses en el lugar de origen¹⁷». El procedimiento magnético no pudo faltar en su detallada exposición, anunciando además la construcción de un instrumento específico destinado a ese fin, que llegó a presentar al emperador; el complemento indispensable fue una carta náutica con la imagen de las isógonas, siendo este uno

¹⁷ Mariano Cuesta Domingo. *Alonso de Santa Cruz*. Estudio Crítico.

de los primeros mapas magnéticos, sino el primero, de que se tienen noticias. Fueron muchos más los métodos citados, aunque solo merezca ser reseñado el del transporte horario, con la consabida dificultad de conservar la hora durante el trayecto. Igualmente debe ser ponderado el de las distancias lunares, llegando a ilustrar el libro con el dibujo de una ballestilla; instrumento con el que se podía medir la distancia angular entre la luna y una estrella dada, como bien se muestra en el mismo.



Rosas de los vientos en el Islario de Alonso de Santa Cruz.

*El Islario General de todas las Islas del Mundo*¹⁸ es incuestionablemente la obra más completa y mejor de Alonso de Santa Cruz¹⁹, el cual como cosmógrafo mayor se la dedicó al rey Felipe II. Este trabajo monumental no fue solamente un atlas portulano, con información geográfica puntual en el interior de sus más de cien mapas, sino que proporcionó datos valiosos de tipo descriptivo íntimamente asociados a una abundante y cuidada toponimia. Mención especial merece el tratado de la esfera con que encabeza la obra, relacionando, como es preceptivo, la geometría de la esfera celeste y la terrestre; analizando con detenimiento la duración de los días y las noches, dependiendo de la latitud y de la época del año, e ilustrándolo convenientemente con las figuras oportunas.

Como el trabajo pretendía ser útil a la navegación, se incluyó en esa especie de introducción astronómica un capítulo sobre los vientos, incluyendo el dibujo de dos rosas, con los cuatro principales y todos los secundarios, referidas al Mediterráneo y a las Indias orientales y occidentales. Termina esta parte de su libro relacionando a todos los autores en que se apoyó para su redacción, debien-

¹⁸ Edición, transcripción y estudio de Mariano Cuesta Domingo. Madrid (2003).

¹⁹ Sin embargo, la zafiedad del impostor Andrés García de Céspedes pretendió hacer creer que la obra era suya, llegando al extremo de querer dedicarla al rey Felipe III. El empleo de la palabra zafiedad no es en absoluto gratuito, ya que los nombres originales (Alonso de Santa Cruz y Felipe II) fueron burdamente raspados y en algún caso simplemente tachando segundo y escribiendo tercero encima. Las sustituciones se hicieron sin procurar que coincidiera el tipo de letra empleado, baste decir que en la portada la escritura original era vertical y la que la suplantó oblicua.

do reseñar que Américo Vespucio figura entre ellos, junto a otros tan destacados como Sacrobosco y Oroncio Fineo.

La presentación de cada mapa se efectúa detallando su contenido²⁰, la que se reproduce seguidamente puede servir de ejemplo. TABLA CUARTA : *Esta tabla contiene todas las islas que están en el Mar Mediterráneo y las que están en el Mar septentrional con la península de Scandia e Inglaterra, Irlanda, Islandia y otras junto a estas y las islas de Azores y Canarias, y Cabo Verde y otras junto a las Costas de estos mares.*

La información complementaria que se ofrece en este Islario se aferra generalmente a la tradición impuesta por los supuestos mapas de Tolomeo, como cuando representó las míticas montañas de la Luna (en las que supuestamente nació el río Nilo), aunque de también cuenta de otras leyendas más modernas, como la del Preste Juan; cuya imagen situó junto a dicho río. Aparte de las islas se incorporaron a la obra planos tan singulares como el de la célebre ciudad mejicana de Tenochtitlan o la de la no menos conocida de Venecia²¹, apoyándose con toda probabilidad en representaciones previas²². El Islario de Alonso de Santa Cruz se consideró perdido hasta que en 1909 lo encontró en la Biblioteca Nacional Antonio Paz y Meliá, no sin dificultad puesto que estaba catalogado como de Andrés García de Céspedes. La Real Sociedad Geográfica lo editó por primera vez en el año 1918, gracias al trabajo ímprobo de Ángel Blázquez Jiménez. Recientemente (2003) se ha hecho una edición facsímil de aquella, por iniciativa de Mariano Cuesta Domingo, bibliotecario de esa Sociedad, contando con la colaboración indispensable de la entidad financiera Ibercaja.



Extremo oriental del Mediterráneo, con las islas griegas y el Mar Negro. En el extremo inferior derecha se aprecia la imagen del Preste Juan.

Tanto el Islario de Santa Cruz como los que se hicieron antes y después del suyo contribuyeron a mejorar el conocimiento del litoral marítimo del mundo, y consiguientemente al perfeccio-

²⁰ Se incluyeron no solo las islas, sino también las penínsulas de todo el mundo conocido y los territorios descubiertos hasta mediados del siglo XVI.

²¹ Bajo el epígrafe de VENECIA figura un texto de seis páginas que se ilumina con la detallada imagen aquí reproducida.

²² Luisa Martín-Merás Verdejo vio similitudes entre este islario y el que hizo años antes el cartógrafo italiano Benedetto Bionne: *Liber nel qual si ragiona di tutte l'isole del mondo*. Venecia (1528). Nada más cierto que sus apreciaciones, a las que añado la coincidencia entre los planos de las ciudades de Tenochtitlan y de Venecia, con los que se presentaron en la obra del italiano.

namiento de la navegación costera, las imágenes cartográficas incorporaban cada vez más detalles que hacían posible medir mejor las distancias entre puertos próximos. En cambio, la navegación de altura permanecía a esas alturas del siglo XVI en un callejón sin salida, puesto que los tratados y manuales que fueron apareciendo no produjeron un serio avance en el cálculo y trazado de la derrota, análogo al que fueron adquiriendo sobre el régimen de los vientos. Los primeros antecedentes fueron los conocidos Ruteiros portugueses, con limitaciones tan patentes

como las que implícitamente señalaba Duarte Pacheco Pereira en su obra *Esmeraldo de Situ Orbis* (1505-1508):...*lo que pertenece a la cosmografía y la marinería espero explicar...como se ubica un promontorio o lugar con respecto a otro...y la costa pueda ser navegada con mayor seguridad...y también mediciones de los polos desde los cuales se puede saber cuantos grados están separados los lugares y la latitud relativa del ecuador.*

Es verosímil que Rui de Falero, cosmógrafo significado en la mitad de la segunda década del siglo XVI, escribiera un manual de navegación o al menos una especie de vademecum de astronomía náutica, ya que pensaba acompañar a su amigo Magallanes en su pretendida expedición al archipiélago de las Molucas; yendo siempre hacia el oeste y en busca del paso que suponían existente al sur del continente americano y que habrían de atravesar mucho antes de llegar a su destino. Ni su propuesta ni la de Magallanes pudieron siquiera ser presentadas al rey Manuel I, entendiéndose así su frustración y su consiguiente petición de la nacionalidad española (que les fue concedida a los dos); así como su ofrecimiento al rey Carlos I, que acababa de hacerse cargo de su reino, para que hiciese suya tan ambiciosa empresa. Por variadas razones, Rui de Falero no pudo acompañar a Magallanes, siendo sustituido por Juan de Cartagena, inexperto pero sobrino (o hijo) del influyente obispo Juan Rodríguez de Fonseca. El desenlace es sabido:



Plano en perspectiva de la ciudad de Venecia, en el Islario de Alonso de Santa Cruz.

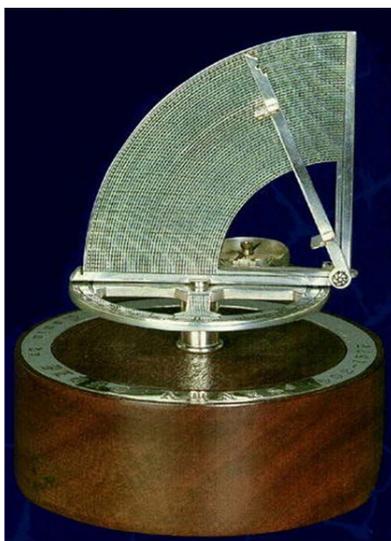
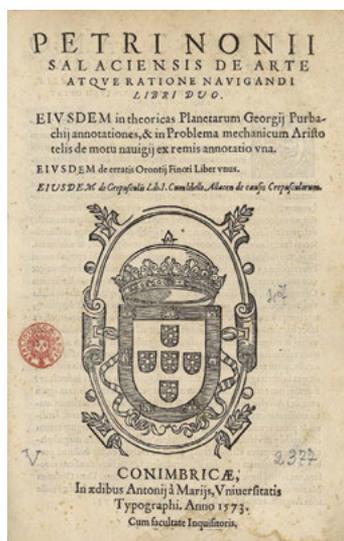


Apuntes cosmográficos en la primera circunnavegación de la Tierra, una publicación del (IGN&CNIG.2020) que pretende homenajear a los protagonistas de tan singular acontecimiento; ahora que se está celebrando el quinientos aniversario de la efeméride.

motín promovido por Cartagena, que fue ampliamente secundado²³, aunque fallido y que supuso el abandono a su suerte en la Bahía de San Julián; descubrimiento, poco después, de lo que sería llamado con el tiempo Estrecho de Magallanes, así como de las Islas Filipinas en donde pereció el comandante de la flota luchando contra los nativos.

La nave capitana Trinidad y la Victoria llegaron por fin a las Molucas, aunque solo la segunda pudo regresar a España comandada por Juan Sebastián Elcano, consumándose así formalmente la primera circunnavegación de la Tierra. Pero volviendo al posible tratado de Rui Falero, no es extraño que Magallanes zarpara con información precisa que aquel le hubiese proporcionado con anterioridad y que este a su vez se la trasladase, de una u otra forma, al cosmógrafo sustituto, Andrés de San Martín, también vilmente asesinado en Filipinas. En cualquier caso, quizás sea esta de las pocas expediciones de la época en la que consten observaciones, prácticamente diarias, al Sol para obtener la latitud. Incluso parece haber certeza de algún que otro intento de San Martín por obtener el valor de la longitud; siguiendo para ello alguno de los procedimientos señalados por Falero, aunque el resultado distara mucho del correcto. Es posible que el diario de las observaciones de San Martín o alguna otra documentación técnica que usara o preparara, se custodie sin ser conscientes de ello en algún archivo del país vecino. Lo que sí parece sorprendente es que Antonio de Pigaffeta, cronista oficial de la epopeya, redactara un manual de navegación, siendo tan profano en la materia, de ahí nuestra sospecha de que el original lo escribiese el cosmógrafo portugués y que él pudiese haberse hecho con el mismo tras el fatal desenlace que acabó con la muerte de su capitán.

El primer avance cualitativo en la materia que nos ocupa se produjo gracias a las enseñanzas impartidas por el matemático Pedro Nunes²⁴, el mejor cosmógrafo de la época. A él se debió el primer estudio riguroso de las líneas de rumbo en su *Tratado de la Navegación* (1546), demonstan-



Una de las ediciones del Tratado de Navegación de Pedro Nunes (1573), junto a un modelo de su nonius.

²³ Elcano fue también otro de los amotinados.

²⁴ Aunque quede fuera de este contexto, no puede dejar de citarse que el aditamento mecánico que permitía mejorar la lectura en los limbos de muchos instrumentos topográficos, geodésicos y astronómicos fue diseñado por este sabio portugués y bautizado en su honor con el nombre de *nonius*.

do que no se trataban de arcos de círculo máximo, tal como se venía sosteniendo hasta entonces. Tales líneas, llamadas loxodrómicas por Willebrord Snell van Royen (Snellius) en el año 1624, eran realmente curvas de la familia de las espirales, cuyo recorrido último acabaría envolviendo a cualquiera de los polos del globo terráqueo. No obstante Nunes ya había hecho un reconocimiento expreso de los navegantes portugueses, en su *Tratado de la Esfera* (1537): «*nam se fezeram indo a acertar: mas partiam os nossos mareantes muy ensinados e prouidos de estromentos e regras de astrologia e geometria que sam as cousas que os cosmographos ham dadar apercebidas (...) e leuaua cartas muy antiguas rumadas e na ja as de que os antigos vsuauam*²⁵».

Uno de los más estrechos colaboradores de Nunes fue el navegante Joao de Castro, luego virrey de la India, autor de unas observaciones magnéticas muy singulares en el océano Índico (1538), movido por las sugerencias y enseñanzas de aquel, así como empleando los instrumentos que diseñó a tales efectos. Se presenta a continuación un resumen de la tesis *O magnetismo terrestre no roteiro de Lisboa a Goa: As experiências de D. João de Castro*, defendida con éxito por Artur José Ruando Rangel (2008): «*D. Joao de Castro llevó a cabo una serie de experimentos que lograron detectar fenómenos, en particular relacionados con el magnetismo y la aguja magnética a bordo. Cabe suponer que debía tales conocimientos a Pedro Nunes, inspirador principal de todas las observaciones que realizó durante sus viajes. Cuando el 5 de agosto de 1538, João de Castro decidió determinar la latitud de Mozambique, encontró la causa que ocasionaba «el espantoso desconcerto» de las agujas;*



Pedro Nunes (i) y Joao do Castro. El primero diseñó para el segundo un instrumento, con el que se podía medir la altura del Sol, por la sombra arrojada, y la declinación magnética. Ese fue el utilizado por Joao do Castro en sus observaciones magnéticas.

²⁵ *No se hicieron por casualidad, pero nuestra gente de mar partió bien enseñada y provista de instrumentos y reglas de astrología (astronomía) y geometría que eran asuntos que los cosmógrafos proporcionarían (...) y tomaron cartas con exactitud rutas y ya no las utilizadas por los antiguos.*

constató la desviación de la aguja, descubriéndola 128 años antes que lo hiciese Dennis Guillaume²⁶ (1666); registrándose en la *Historia de la Navegación* como el primero en conocer este fenómeno. En las proximidades de Baçaim (actual Vasai-Virar), descubrió el 22 de diciembre de 1538 un nuevo fenómeno magnético, alteraciones en la aguja causadas por la atracción local de ciertas rocas, que solo sería confirmado cuatrocientos años después. João de Castro refutó la teoría por la que se suponía que las isógonas coincidían con los meridianos geográficos. A él se deben los primeros registros con los valores alcanzados por la declinación magnética en los océanos Atlántico e Índico, durante el siglo XVI, de gran utilidad para el estudio del magnetismo terrestre. Fue en resumen una de las personalidades de la ciencia experimental europea de ese siglo, que vinculó magnetismo y navegación.

Aunque la Casa de Contratación fuese creada mucho después que la *Junta dos Matematicos*, surgió con un empeño tan decidido que no tardó en eclipsar a su homóloga portuguesa. Baste como certificación la enumeración de los títulos ofertados: *Pilotos mayores*, *Pilotos mayores arqueadores y medidores de naos*, *Pilotos Mayores catedráticos de artillería, fortificaciones y escuadrones*, *Catedráticos de Arte de Navegación y Cosmografía*, *Cosmógrafos constructores de instrumentos y cartas de marear*; aparte de otros puestos que fueron surgiendo a medida que lo requería el mejor funcionamiento de la Casa. En lo que se refiere a la náutica propiamente dicha, se publicaron numerosas obras en las que se recogían los principios básicos de esa disciplina. No obstante, la docencia en esa institución no debió ser tarea fácil, a tenor de lo que manifestó en su momento el cosmógrafo Martín Cortés de Albarcá: *pocos o ninguno de los pilotos saben apenas leer y con dificultad quieren aprender y ser enseñados*. Contemporáneo de este fue Pedro de Medina, siendo estos dos autores los seleccionados para hacer una breve reseña de sus publicaciones náuticas. Comenzaremos precisamente con las de este último, remitiendo al lector interesado en el personaje al libro *La Obra Cosmográfica y Náutica de Pedro de Medina*, una obra de referencia de la que fue autor Mariano Cuesta Domingo (1998). En dicho libro nos apoyaremos para comentar sus dos obras más señaladas acerca de la navegación: *Arte de Navegar* (1545) y *Regimiento de Navegación* (1552).

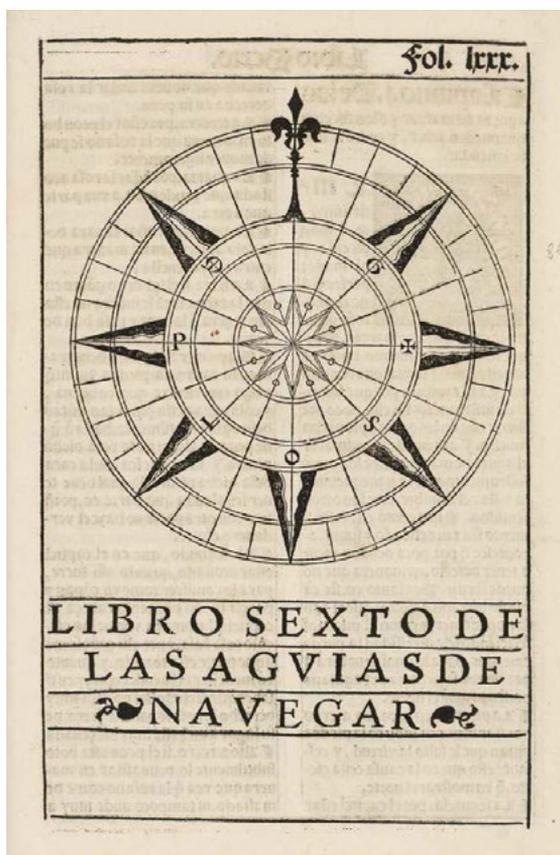


El Arte de Navegar (1545) y una versión francesa (1554).

²⁶ *L'Art de naviger perfectionné par la connoissance de la variation de l'aimant, ou Traité de la variation de l'aiguille aimantée.*

El *Arte de Navegar*, en que se contienen todas las reglas, declaraciones, secretos y avisos que a la buena navegación son necesarios y se deben saber, fue dedicado al príncipe Felipe y constó de ocho libros, todos ellos vistos y aprobados «en la insigne Casa de la Contratación de las Indias por el Piloto Mayor y Cosmógrafos de su Majestad». El primero de sus libros fue una especie de introducción al modelo aristotélico del cosmos, el segundo lo dedicó a la navegación en sí y el tercero a los vientos. Llama poderosamente la atención que en un libro dedicado a los vientos incluya una cuestión tan compleja como el problema de las longitudes, aunque no la mencione como tal; la explicación radica en que se trataba de un asunto intrínsecamente asociado a la medida del tiempo que era irresoluble por aquellas fechas, surgiendo entonces métodos supuestamente ingeniosos, como los magnéticos, pero que partían de premisas tan absurdas como los resultados a los que se creía llegar. Medina lo trató bajo los epígrafes siguientes: IX) *Como sabrá el piloto, navegando por cualquier rumbo el meridiano donde está*, X) *En qué se declara más esta regla suso escrita*, XI) *Cómo el piloto debe elegir el rumbo que conviene según la derrota*, XII) *Cómo se ha de echar punto en la carta para saber el lugar en que la nao está*. La imposibilidad de resolver la cuestión de esa manera estriba en el empleo de una representación gráfica nada fiable desde el punto de vista geométrico, de forma tal que al carecer de una expresión analítica concreta no podría saberse su escala, ni tampoco sería posible medir con el mínimo rigor tanto ángulos como distancias²⁷. El cuarto capítulo se centró en la observación del Sol (analizando sus movimientos y como se podía saber la posición del observador a través de su altura sobre el horizonte). En el quinto se trató de la altura de los polos, como medio para calcular la latitud del lugar, señalando la utilidad de las guardas y la posibilidad de hallar la hora nocturna²⁸, superponiendo una cruz a la estrella del norte: «de la cruz, la parte de encima llamamos cabeza y la de abajo pie, y las otras dos, brazo derecho y brazo izquierdo».

El libro VI lo dedicó a las agujas de marear, mostrando que no estaba al tanto de la materia que pretendía explicar. Basta con leer el contenido de su capítulo III, en el que declaraba su opinión acerca de la oscilación de la aguja en torno al norte magnético, pues de él se infiere que no solo



²⁷ En términos matemáticos se trataría de transformar el par de coordenadas polares planas: módulo y argumento, en el par de coordenadas curvilíneas correspondientes: latitud y longitud.

²⁸ La analogía con el llamado hombre del norte y con el reloj nocturno que idearon los egipcios, al observar la estrella del norte con su merkhet, es del todo evidente.

dudaba de la existencia de la línea ágena sino que tampoco creía en la de la propia declinación magnética: *opinión se tiene entre los que navegan que las agujas de marear nordestean y noroestean, y dicen que en el meridiano de las islas Azores que allí el aguja muestra el polo en su lugar y que de allí pasando al oeste noroeste, esto es, que no enseña el polo en el lugar donde primero sino que se aparta al Noroeste... Por manera que dicen que en solo aquel meridiano el aguja enseña el polo y no en otro lugar ninguno sino a una parte o a otra... sobre esto yo he procurado buscar alguna autoridad o razón o alguna cosa en que esto tenga fundamento y digo que de esta variación que del aguja se dice no hallo cosa escrita ni razón ni experiencia que cierta sea... De donde concluyo que no se puede conocer precisamente en la aguja por la manera que dicha es, si hace el dicho apartamiento del polo ni cuanto es ni yo por esta vía he tal podido alcanzar.* Los dos últimos libros los dedicó al estudio de la Luna (VII), comentando «como los crecientes y menguantes sirven en la navegación» y a la variación de la duración de los días a lo largo del año (VIII).

El Regimiento de Navegación también fue dedicado al futuro rey Felipe II, indicándose en su portada que «contiene las reglas, cosas que los pilotos han de saber para bien navegar, los remedios y avisos que han de tener para los peligros que navegando les pueden suceder». Es destacable el carácter un tanto poético del prólogo de Medina, ensalzando la utilidad de la astronomía para la navegación y subrayando la importancia del instrumental empleado: *Primor y sutileza que la navegación de la mar tiene... que conviene regirse en ella por los cuerpos celestiales, esto es, por el Sol, Luna y estrellas... También que primor y sutileza tan singular es que un hombre con un astrolabio tome la altura del Sol... y sabe lo que el Sol ha subido desde que salió hasta el mediodía.* Luego exagera al afirmar: *... y por esta subida y cuenta que con ella se hace sabe el lugar en que está y cuanto ha navegado por el camino que ha llevado y si ha subido o descendido o si va derecho al lugar donde quiere ir.*

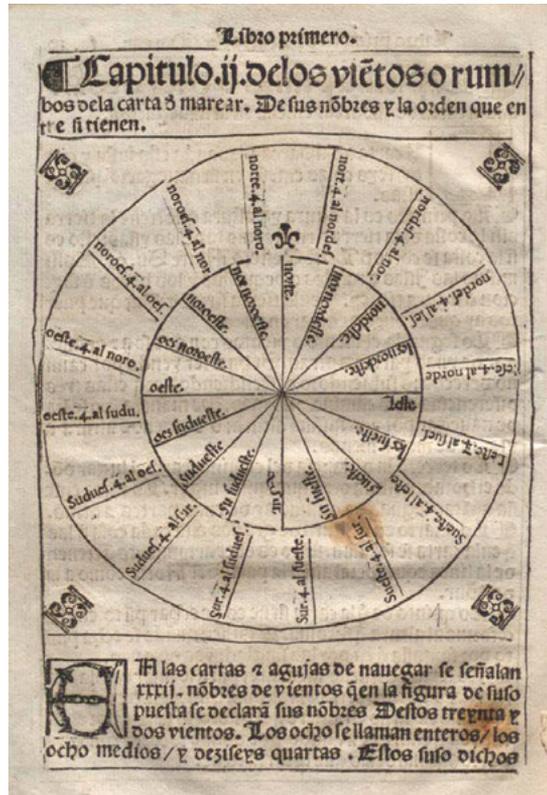
La mención de la vara de Jacob y las medidas que podrían hacerse con ella también merecen ser reproducidas. Medina comentaba, a propósito de las observaciones astronómicas nocturnas y de la imposibilidad de hallar la altura del Sol: *...proveyó Dios porque esto no hiciera falta en la navegación, de un primor muy grande y es que dio entendimiento a los hombres para que con una vara pequeña y una tabla como una mano se haga un instrumento que se llama ballestilla, con la cual se toma la altura del Norte y con esta se sabe de noche lo mismo que de día se sabe con la altura del Sol.*



Esta obra de Medina se dividió en siete libros, dedicándose el primero al tema de los vientos y al de echar el punto, separándose poco de lo que ya se había apuntado en su *Arte de Navegar*. El segundo trató de la altura del Sol, el tercero de la altura del Norte²⁹, el cuarto de las agujas de marear, el quinto de la Luna y las mareas, el sexto del reloj nocturno o del norte, dedicándose el séptimo a los avisos y advertencias que han de saber los pilotos.

A título de curiosidad, señalamos como en el cuarto libro insistía que en la navegación había tres cosas de las que se ven sus efectos sin que se sepan sus causas. La primera se refiere al origen desconocido de los vientos, la segunda a las corrientes marinas y la tercera a la virtud que los aceros de la aguja tienen que la piedra imán les influye...*De dónde le viene la virtud a esta piedra?... Plinio en la Natural Historia dice que la piedra imán atrae el hierro y que por una parte lo atrae y por otra lo aparta... pero no dice esta virtud de mostrar el polo donde le viene; solo Avicena (en el De viribus Cordis) dice que esta virtud le proviene de suprema y plenísima influencia.*

En torno al año 1530 llegó a Andalucía occidental Martín Cortés, un joven aragonés de familia noble, llamado con toda probabilidad por el eco ya lejano de la expedición magallánica y de la consecuente circunnavegación de la Tierra, cuyos supervivientes habían llegado a Sanlúcar de Barrameda ocho años atrás. De inmediato comenzarían sus estudios de náutica y de cosmografía, con tal aprovechamiento que llegaría a enseñar esas materias y a convertirse en un cosmógrafo de vanguardia. Fue en esa época cuando debió escribir su obra maestra: *Breve compendio de la sphaera y del arte de navegar, con nuevos instrumentos y reglas exemplificadas con muy subtiles demostraciones*, publicada³⁰ en Sevilla (1551). No es exagerado añadir que con ella logró situar a España como referente esencial en dichas disciplinas.



La rosa de los vientos en el *Regimiento de Navegación* de Pedro de Medina.

²⁹ En el capítulo VI de este libro: De cuando el piloto toma la altura del Sol y la del Norte en un lugar y las halla diferentes, que es lo que ha de hacer, se evidencia la aventura en que se convertía en tal supuesto la navegación de altura. Así se pronunciaba Medina: *Miradas por el piloto todas las cosas susodichas (si se habían efectuado bien las medidas), torne a hacer su cuenta la más cierta que pudiera hasta venir en conocimiento de que se ha causado es yerro que en su cuenta ha hallado, y conocido, iguale su cuenta y haga su camino como debe.* Téngase además en cuenta que aquellas cartas de marear valían de poco en alta mar.

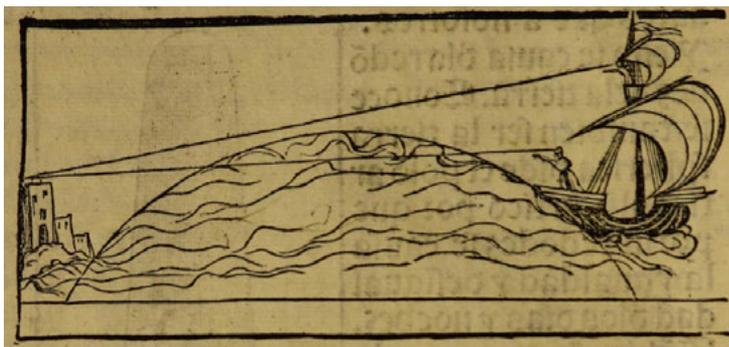
³⁰ Aunque la fecha de la publicación fuese efectivamente en el año 1551, la realidad es que fue escrito en 1545. En el Bloque II, capítulo VI, se dice: *...En el presente año de mil y quinientos y cuarenta y cinco.*

Así se viene a reconocer implícitamente en la excelente, reseña sobre este particular, efectuada por la Real Academia de la Historia: *La obra constituye un auténtico tratado sistemático del arte de navegar que, tanto por la altura científica de su contenido como por su estructura y extensión, ejerció una influencia en Europa que desbordó los límites estrictos del mundo de la navegación. Fue traducida al inglés por Richard Eden y editada en Londres en 1561; la obra alcanzó tal popularidad en Inglaterra que se hicieron nueve ediciones hasta 1630, afirmando en su prólogo el traductor: «porque en Inglaterra no había libro alguno que con un método sencillo contenga tantos y tan raros secretos». De esta versión en inglés se hicieron otras cinco ediciones en el siglo XVI (1572, 1579, 1584, 1589 y 1596) y otras tres en el siglo XVII (1609, 1615 y 1630), lo que da una idea de la importancia que tuvo la obra en Inglaterra, usada, entre otros, por el famoso pirata Francis Drake.*



El frontispicio de la primera edición es el escudo real, con el águila bicéfala, acorde con la dedicación al emperador Carlos que incluyó en forma de carta. No obstante, el autor la complementó con una segunda dedicatoria, dirigida en este caso al granadino Álvarez de Bazán y Guzmán, Capitán General de la Armada de su Majestad. Entre ambas dedicatorias expuso el contenido de la obra, estructurado en tres grandes bloques: I) Sobre la composición del mundo y los principios universales que rigen en la navegación, expuesto en veinte capítulos; II) Sobre los movimientos del Sol y la Luna, y de los efectos causados por los mismos, expuesto en veinte capítulos; III) Sobre la composición y uso de los instrumentos y las reglas del arte de la navegación, expuesto en diecinueve capítulos. La exposición del contenido fue esmerada, al igual que su presentación: como se refleja en las letras capitales con que se inició cada uno de sus capítulos.

En el primer bloque no se hizo mención alguna al modelo heliocéntrico y revolucionario de Copérnico, publicado póstumamente en 1543; ciñéndose por tanto a los geocéntricos previos de Aristóteles y de Tolomeo, acordes con la doctrina de la Iglesia. Así se aprecia en la cuidada ilustración con que concluyó su capítulo quinto, una cualidad que tienen todas las imágenes con que acompañó el resto del libro. En el capítulo VIII se incluyó una breve lección metrológica, recordando medidas antiguas y diferentes como los estadios, las millas, las leguas y las parasangas; aunque todas «confor-



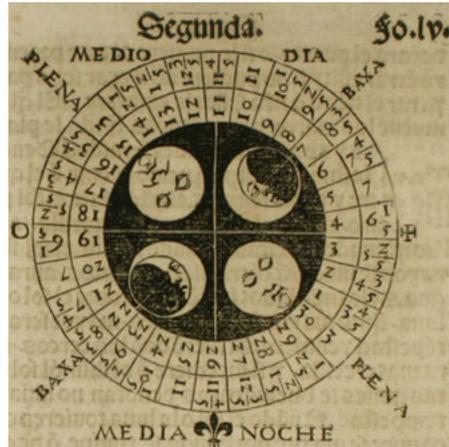
Dibujo para explicar la esfericidad de la Tierra en la obra de M. Cortés: *De la redondez de la Tierra y agua.*

men en que cuatro granos de cebada hacen un dedo, cuatro dedos una mano, cuatro manos un pie, cinco pies un paso geométrico». Acto seguido recuerda que en España hubo dos clases de leguas, proponiendo él una que tuviese tres mil pasos, «y a cada paso cinco pies, y así cada legua quince mil pies»; muy interesante es su aplicación para evaluar el tamaño de la Tierra, partiendo de que cada grado equivalía a 16 leguas y $\frac{2}{3}$, de modo que resultaría un perímetro de seis mil leguas. Termina este bloque con el capítulo *De algunos principios que se suponen saber para esta ciencia*, una especie de glosario, referido a los elementos geométricos de la esfera celeste.

En capítulo IV del bloque II, se permitió Martín Cortés una licencia religiosa muy poco divulgada: llegando a defender que en los días de los equinoccios y los solsticios «acaecieron cuatro cosas admirables». A saber: *el equinoccio (sic) de verano que fue a los veinte y cinco de marzo el hijo de Dios encarnó y después nació de la virgen sin mancilla en el solsticio de invierno que fue a los veinte y cinco de diciembre. En el equinoccio de otoño que fue a los veinte y siete de septiembre fue concebido el bienaventurado San Juan Bautista pregonero y precursor de Cristo y en el solsticio estival que era a los veinte y cuatro de junio nació... Lo cual especifica San Juan Crisóstomo diciendo que San Juan nació cuando los días comenzaban a decrecer y nuestro señor cuando comenzaban a crecer.* Más adelante, y en ese mismo capítulo, establece con toda claridad la equivalencia entre la longitud geográfica y el tiempo astronómico, al señalar que si se avanzaban 15° hacia el oriente se tendría que añadir una hora, justamente lo contrario a lo que sucedería si se retrocede hacia occidente, en cuyo caso habría que disminuir una hora.

En el capítulo VII se describió un instrumento con el que se podía hallar el lugar y la declinación del Sol, además de los días y el lugar ocupado por la luna. En el capítulo siguiente se abordó el estudio de los eclipses solares y lunares³¹, ilustrándolo convenientemente con dos bellos dibujos. Los capítulos IX y X se dedicaron al tiempo astronómico y las diferentes clases de años. Los números XI y XII a los meses y a las semanas. El capítulo XIII lo dedicó al estudio del día y de la noche, distinguiendo entre día natural y día artificial; el primero lo definió como el intervalo de tiempo empleado por el Sol en pasar dos veces consecutivas por un mismo meridiano. Especialmente interesante es la información que proporciona sobre cuando comenzaba el día para romanos, griegos y babilonios. Inmediatamente después definió el día artificial como parte del día natural: *y es el tiempo que tarda el Sol desde que nace en oriente hasta que se pone en el occidente.* Igual de relevante es el capítulo XIV, centrado en las horas y en sus diferentes clases.

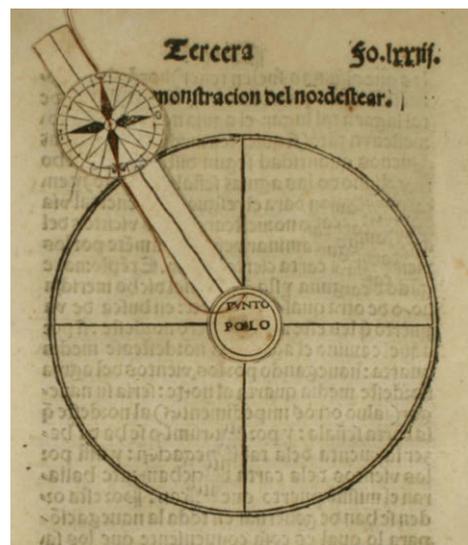
³¹ *Los eclipses de Sol y de Luna son cosa que causa al vulgo gran admiración y espanto, y a los que entienden la causa de ello ninguno, así iniciaba Cortés el capítulo correspondiente.*



Reloj de Sol y Fases de la Luna, dos bellas ilustraciones en la obra de Martín Cortés.

La medida del tiempo también ocupó su espacio en esta obra de Martín Cortés, valiéndose para ello del Sol y de la estrella del norte. En el primer supuesto dio unas clases magistrales de gnomónica en los capítulos XV (*sobre la fábrica y uso de un reloj diurno universal*) y XVI (*sobre los relojes murales y horizontales particulares*). En el capítulo XVII abordó la medida del tiempo durante la noche, bajo el epígrafe siguiente: *sobre la composición y uso de un instrumento horario nocturno general*, apoyándose para ello tanto en las guardas de la estrella polar como en la constelación de la Osa Menor, conocida entonces como bocina o trompetilla; marcando las pautas necesarias para la construcción de un nocturlabio. El capítulo XVIII estuvo especialmente dedicado a los navegantes, como apuntaba su título *del tiempo de las mareas o flujo y reflujio del mar*. En él recuerda el triste episodio histórico que le sucedió al Conde de Niebla, en el año 1436, aunque confundiese al hijo (Juan) con el padre (Enrique) y no se ajustara del todo a lo que realmente sucedió: *que murió abogado estando sobre la ciudad de Gibraltar por no tener los marineros cuenta ni razón con las mareas; y justamente con el dicho conde acabaron buenos caballeros y capitanes valerosos de la nuestra España*. El colofón del capítulo fue el siguiente: *el crecer y decrecer de las mareas no es siempre en igual cantidad. En las conjunciones y oposiciones crecen y decrecen mucho: a que los marineros dicen aguas vivas: y al mayor crecimiento de ellas: cabeza de aguas. En los cuartos de la Luna... crecen y decrecen poco: a que los marineros llaman aguas chifas y aguas muertas*.

Lo que más novedoso y sobresaliente del Breve Compendio de la Esfera, escrito por Martín Cortés, figura en la tercera parte de la obra y más concretamente en su capítulo V: *de un efecto tiene el aguja que es nordestear y noruestear*. Al afirmar allí que existía un punto atractivo estaba postulando sin proponérselo la existencia del polo magnético, una intuición genial que contribuyó a cambiar muy positivamente el

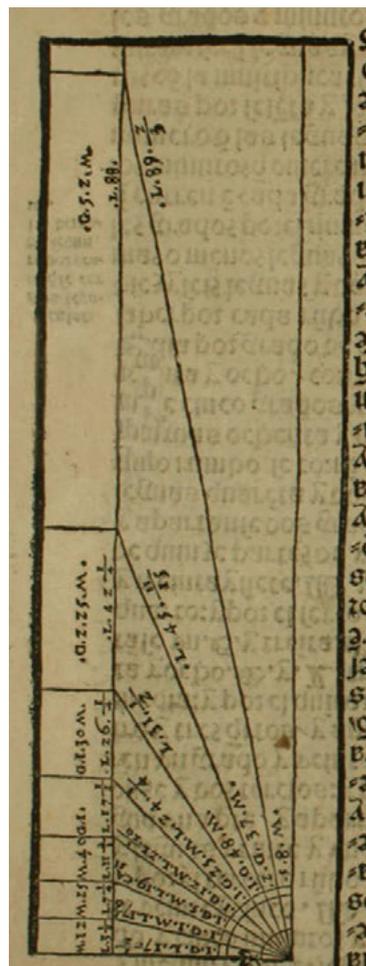


Nomograma con la *Demostración* del nordestear de la aguja magnética, según Martín Cortés.

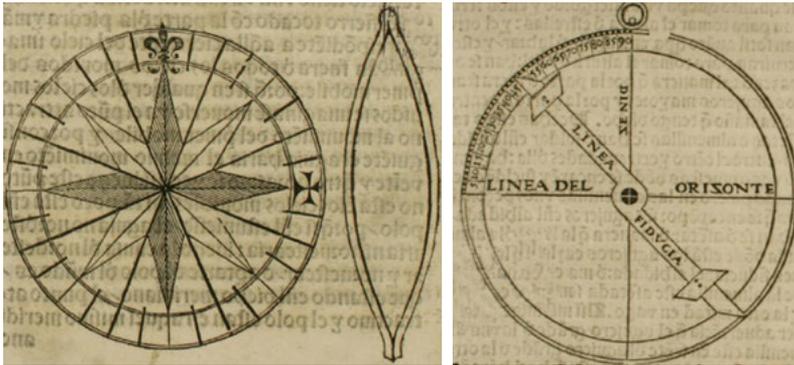
devenir de la navegación de altura. Tan solo fue a partir de entonces cuando se encontró una explicación, alejada de la superstición, de un hecho tan desconcertante como era el que las agujas de las brújulas a veces nordesteaban y otras noroesteaban. Al inicio del capítulo fue decidido, pues afirmó que *había oído muy diversas opiniones y en algunos modernos escritores acerca del nordestear y noroesteear de las agujas y a mi parecer ninguno da en el fiel y pocos en el blanco*. La base de su explicación es la existencia de ese punto atractivo que no se encontraba en *los cielos móviles ni en el polo geográfico, porque si estuviese en él la aguja no iría de un lado a otro del norte*. Más adelante describe implícitamente la existencia de los meridianos magnéticos y la consiguiente declinación magnética, es decir el ángulo que forman en un punto dado del globo el meridiano magnético con el geográfico. Ha de tenerse en cuenta que este trabajo de Cortés se gestó en la misma época en que Mercator era cosmógrafo real (desde el año 1542), pudiendo entender que el holandés tuviera acceso a documentación confidencial tanto de la Casa de Contratación como del entorno próximo al emperador; no parece casual que en uno de los grabados más conocidos de este cartógrafo tan prolífico figurase marcando el polo magnético con una punta de su compás, o que en su celebrado mapamundi de 1569 abriese una ventana con un mapa de la zona polar en la que se representó el *punto atractivo*.

Hubo otra contribución de Cortés de no menos trascendencia que la anterior, la cual podría encuadrarse indistintamente en la náutica o en la cartografía matemática, teniendo en ambas una repercusión evidente. También figuró en la sección más práctica de su obra, esto es en la tercera, y dentro de su capítulo XII: *de las leguas que se corre por grado según ciertas derrotas*. En su exposición resulta un tanto críptico, aunque la posible duda deba disiparse de inmediato una vez examinada con detenimiento la ilustración (*demonstración*) con que acompañó el texto. Ya se había pronunciado antes sobre la inconveniencia de manejar las cartas planas, puesto que en ellas no se tenía en cuenta la curvatura terrestre, y es en esa circunstancia precisamente en la que insistió en esta ocasión, propiciando su modificación para convertirlas en esféricas y conseguir así que las líneas de igual rumbo fuesen rectas en la representación cartográfica.

En la figura referida y aquí reproducida, se constata sin mayor dificultad que pretendió conseguirlo aumentando paulatinamente la separación entre las imágenes de los paralelos y haciendo que la escala se fuese haciendo cada vez menor³², a medida que aumentaba la latitud del lugar. En otras palabras, propuso lo que vino a hacer pocos años después Mercator en su mapamundi del año 1569. Martín Cortés ya había anunciado su intención al principio del capítulo sexto,



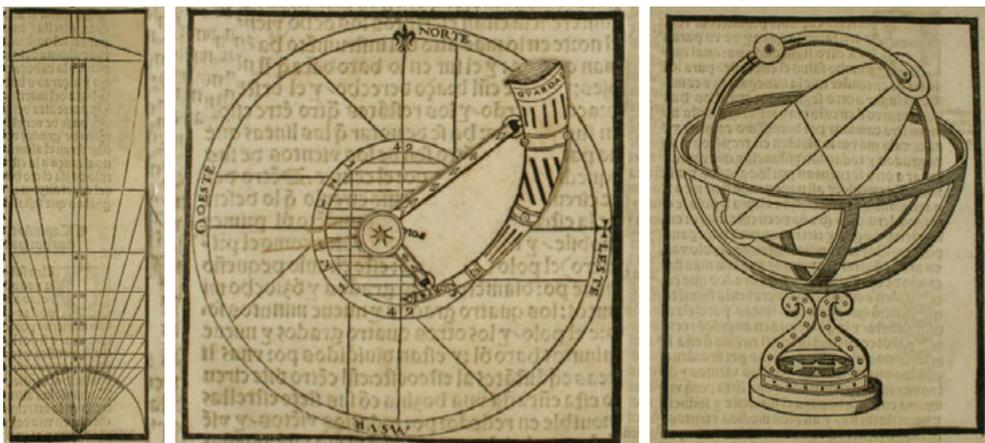
³² Aunque sea una obviedad parece oportuno recordar que la escala es una fracción, y como tal es menor cuando aumenta su denominador.



Brújula y
astrolabio en
la obra de Martín
Cortés.

cuando señaló que había dos maneras de navegar: por vientos y por leguas, en función de la escala o tronco de las leguas, tomando con un compás la distancia entre dos lugares y aplicándolo a la escala. Entre las diferentes posibilidades refería la de navegar entre lugares con latitud y longitud diferentes, conviniendo en que se podía hacer siguiendo un cierto rumbo: *empero corresponden más grados por el camino que hace el navío que los grados que se varían las alturas de la equinoccial al polo*. Ya en el capítulo XIII dejó escrito que según los cosmógrafos las travesías deberían hacerse siguiendo arcos de círculo máximo³³, puesto que de esa forma *será caminar por brevísimo camino*. Del mismo tenor fueron sus comentarios referidos a los otros supuestos, detallando las leguas a que habría que dibujar la imagen del paralelo de una latitud dada; adelantándose así al establecimiento de las latitudes crecientes que hizo Mercator por vía similar a la suya y que expresó analíticamente el matemático inglés Edward Wright (1599), empleando los logaritmos neperianos.

Terminamos los comentarios sobre esta obra magna de Martín Cortés, destacando la minuciosidad con que describió la construcción y uso de los diversos instrumentos que convendría usar en la práctica de la navegación: brújula (capítulo IV), astrolabio (capítulo VII), ballestilla (capítulo



Ballestilla, Constelación de la trompetilla (bocina) y el instrumento para calcular la latitud observando al Sol en su culminación superior. Martín Cortés.

³³ La mínima distancia entre dos puntos de una superficie esférica se mide sobre el arco de círculo máximo que los contiene: intersección de la esfera con el plano central en que se encuentran.

IX) y otros dos instrumentos sin nombre definido: a) para hallar las alturas del polo sabidas por las del norte (capítulo X) y b) otro por el que se averiguaba, en función de la altura del Sol a mediodía, la latitud y la hora. Cada uno de dichos capítulos los acompañó con unas ilustraciones muy cuidadas que enriquecían y aclaraban el texto explicativo; de entre todas ellas merece ser resaltada la trompetilla con que representó a la constelación de la Osa Menor, en el capítulo X de este tercer y último bloque.

Al habernos referido, casi con exclusividad, a las obras publicadas en España y Portugal, hemos mostrado nuestro acuerdo con el astrónomo y matemático portugués Francisco Gomes Teixeira³⁴ cuando afirmaba, a comienzos del pasado siglo XX, que la astronomía náutica era ibérica y que su origen estaba en los regimientos de las navegaciones portuguesas; a la vez que hizo especial mención de la estrecha colaboración de Abraham Zacuto con los náuticos de la *Junta dos Matematicos*, para concluir después que se trataba de una aplicación de las doctrinas, de griegos y árabes, que ya figuraban la gran obra de Alfonso X el Sabio. Sin embargo, conviene hacer justicia a alguna otra obra aparecida fuera de nuestras fronteras. De entre todas ellas nos hemos permitido seleccionar una francesa, publicada en el año 1583, cuyo autor fue Jacques de Vault, cosmógrafo y piloto de altura en el puerto de El Havre. El título no refleja en absoluto el contenido: *Les premieres oeuvres de Jacques Devaulx, Pillote en la Marine*. Realmente se trata de un manuscrito de cuidada caligrafía, que puede ser

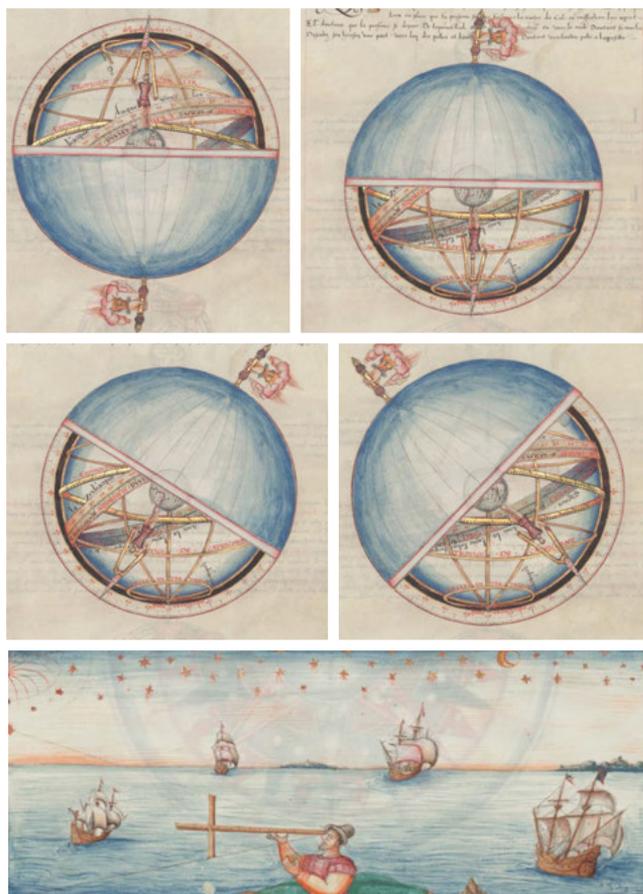
catalogado como un sencillo prontuario de navegación, hidrografía y cartografía; ilustrado con figuras de los instrumentos de navegación, debidamente comentadas. Al año siguiente de haber aparecido se hizo una nueva edición corregida. Lo más sobresaliente de su trabajo es la esmerada escenografía de los observadores manejando el instrumento en cuestión. Recientemente se ha hecho una edición facsímil a cargo de la editorial alemana Taschen.

Las expectativas por disponer de una carta esférica no se vieron satisfechas hasta el año 1569, en que apareció el mapamundi más renombrado de Mercator: *Nova et Aucta Orbis Terrae Descriptio ad Usum Navigantium Emendate Accommodata*³⁵. Ya en su título se anunció su utilidad para



Portada de la obra manuscrita del piloto y cosmógrafo Jacques Devaulx (1583).

³⁴ *Obras sobre Mathematica. Imprensa da Universidade. 1908*



Sobre la Práctica de la Esfera y medida de la altura de una estrella con la escala de Jacob.

la navegación, pues al tratarse de un sistema cartográfico en que se conserva el valor de los ángulos, al pasar de la esfera al mapa, las imágenes de las travesías con igual acimut (las loxodrómicas³⁶) serían rectas al serlo también la imagen de los meridianos³⁷. El principal inconveniente de este modelo es el hecho de que la escala varía sustancialmente con la latitud, siendo $1/\cos\varphi$ la relación entre un elemento diferencial del mapa y de la esfera; su interpretación geométrica es simple: las deformaciones aumentan al separarse del ecuador, baste decir que un arco de 1 km en el paralelo de 60° , se transformaría en el plano en otro de 2 km. La conclusión en lo referente a

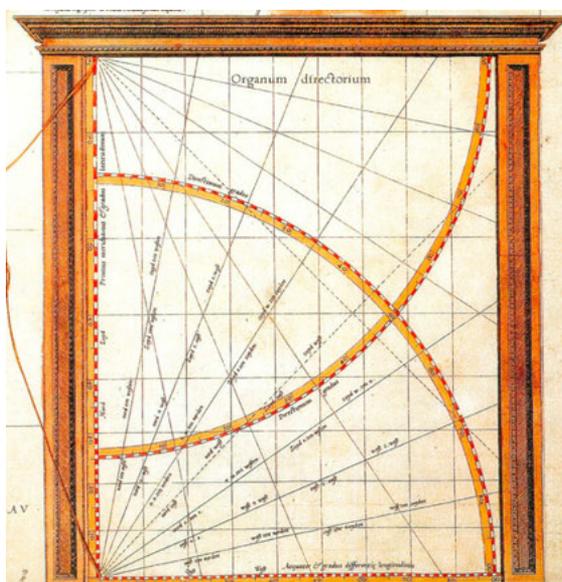
³⁵ Nueva y más completa descripción del globo terráqueo convenientemente adaptada para su uso en la navegación.

³⁶ Se demuestra que el desarrollo de la loxodrómica entre dos puntos dados es igual al producto del arco de meridiano correspondiente y la secante del acimut de esa línea.

³⁷ La carta esférica era la imagen de la Tierra que usaba como superficie auxiliar un cono tangente a lo largo de su circunferencia ecuatorial. Las imágenes de los meridianos serían las intersecciones de sus planos con el cilindro, es decir sus generatrices. El plano del mapa coincidía con la superficie cilíndrica una vez desarrollada, con lo que la circunferencia ecuatorial sería una recta de longitud igual a $2\pi R$, si es R el radio de la esfera. En cuanto a la de los paralelos, serían también rectas perpendiculares a las anteriores y por tanto paralelas a la imagen del ecuador. La principal particularidad de este desarrollo cilíndrico directo es la de su conformidad (pues se conservan los ángulos), que se consigue separando los paralelos cada vez más, a medida que aumenta la latitud. No obstante, se conservaba una cierta dificultad para los navegantes, derivada del hecho de que el rumbo de la nave no coincidía con su acimut; si bien ambos están relacionados a través de la declinación magnética, variable con el espacio y el tiempo.

las superficies es obvia, en las latitudes altas este sistema no es útil para evaluarlas; dado que las imágenes de los polos terrestres quedan fuera del campo del mapa. Otra consideración digna de tener en cuenta es que la imagen de las geodésicas, arcos esféricos de círculo máximo, es una curva trascendente en el mapa, que presenta su concavidad hacia la imagen ecuatorial; presentando allí un punto de inflexión. La expresión matemática de este sistema cartográfico, que no fue deducida por Mercator, liga las coordenadas cartesianas del mapa (X, Y) con las geográficas de la esfera (φ , λ). De manera que establecido una de las imágenes de los meridianos como eje de ordenadas, la imagen del ecuador sería el eje de abscisas y la intersección de ambas el origen del sistema, relacionándose las coordenadas planas y esféricas a través del par de ecuaciones siguiente: $X = R \lambda$ e $Y = Ln \operatorname{tg}(\pi/4 + \varphi/2)$.

El saber enciclopédico de Gerard Kramer (Mercator) fue reconocido enseguida por sus contemporáneos, que no dudaron al considerarlo el Tolomeo de su tiempo. Siguiendo las enseñanzas de su maestro, Gemma Frisius, construyó globos terráqueos y celestes, otros instrumentos complementarios de la navegación. En el ámbito cartográfico introdujo los signos convencionales y la rotulación especializada, logrando, junto a su amigo Abraham Ortelius, colocar a los Países Bajos en el pedestal en que se mantuvieron durante todo el siglo XVII; el siglo de los atlas y la Edad de Oro para la cartografía. Uno de los mayores protagonistas de esa época gloriosa fue Willem Janszoon Blaeu, discípulo de Tycho Brahe en su observatorio de Uraniburgo y principal mentor de Snellius. Además de su vasta producción cartográfica, se especializó en la construcción de globos y otros instrumentos matemáticos, como el gran cuadrante mural con el que Snellius midió el arco de meridiano Alkmaar- Bergen op Zoom, empleando por primera vez el método de la triangulación para calcular el desarrollo del mismo. El éxito de su firma se explica por la novedosa política mercantil seguida en la distribución de sus productos, alcanzando su punto



El Organum Directorium de Mercator, ábaco esencial que acompañó al mapa (Duisbourg. 1569) para ayudar a resolver los problemas geométricos que pudiesen plantearse sobre el mismo. El mapa constó de 24 hojas dibujadas a escala de 1/20.600.000, figurando el ábaco en la número 24. La semejanza entre este gráfico y el propuesto por Martín Cortés es del todo evidente.

álgido hacia el año 1630 siendo entonces cuando proliferaron sus famosos atlas. No se sabe si hubo relación causa efecto, pero el caso es que en 1632 fue nombrado cartógrafo oficial de la Compañía Neerlandesa de las Islas Orientales: VOC (*Vereenigde Oostindische Compagnie*), que había sido creada treinta años antes. Para entonces Blaeu gozaba de un prestigio que solo estaba al alcance de los privilegiados, debiendo haber influido en ello el tratado de navegación tan completo que había publicado en 1617: *Het Licht der Zee-vaert*³⁸ (La Luz de Navegantes); luego traducido al francés (*Le flambeau de la navigation, montrant le la description et delineation de toutes les costes & havres de la mer occidentale, septentrionale, & orientale*.1620) y al inglés (*The Light of Navigation, wherein are declared and lively pourtrayed, all the Coasts and Havens, of the West, North and East Seas...* 1625).

El contenido de la primera edición iba encabezado por los conocimientos propios de la astronomía náutica, incluyendo el manejo del astrolabio, ballestilla y nocturlabio; completado con 41 hojas de mapas³⁹. El frontispicio de este tratado es muy conocido para los amantes de la astronomía náutica y de la navegación, propiamente dicha: en él se ve a un numeroso grupo de marinos acompañados de dos globos (celeste y terrestre), compases, mapas, una ampollita, una brújula, dos astrolabios y una ballestilla. El grabado es de obligada reproducción, presentándolo en dos imágenes (b/n y color), procediendo la segunda de la versión francesa.

En cualquiera de los atlas de la familia Blaeu⁴⁰, e incluso en el previo de Ortelius (*Theatrum Orbis Terrarum*. 1570), se comprueba el éxito de las grandes expediciones marítimas, en tanto

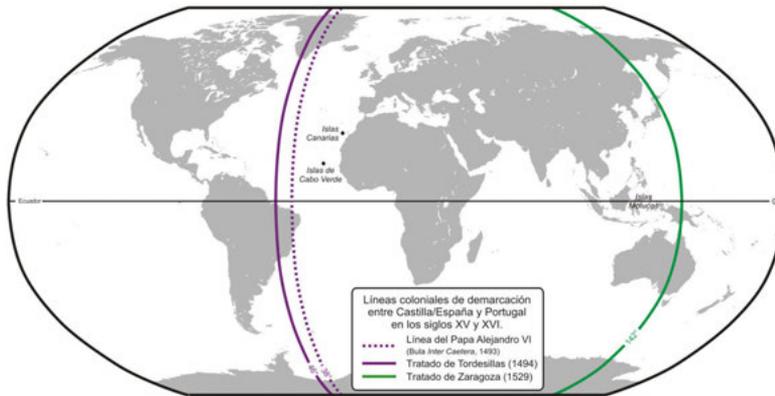


La luz de los Navegantes por Willem Janszoon Blaeu. Obsérvense la Luna y el Sol en su parte superior.

³⁸ *Het licht der Zee vaert daerinne claerlijck beschreven ende afghebeeldet werde[n]n, alle de custen ende havenen van de Westersche, Noordsche, Oostersche ende Middlandsche zee'n, oock van vele landen, eylanden ende plaetsen van Guinea, Brasilien, Oost ende West Indiën... / door Willem Jans Zoon*

³⁹ Todas las costas y puertos de los mares occidental, septentrional, oriental y mediterráneo, también de muchos países, Eylanden y los lugares de Guinea, Brasilien, Oostende Oeste-Si...

⁴⁰ Tanto el Atlas Novus (*Theatrum Orbis Terrarum, sive Atlas Novus in quo Tabulae et Descriptiones Omnium Regionum*. 1635-1638) como el Atlas Maior (1662-1667), basado en él, son dos obras fundamentales en la historia de la cartografía. El segundo, también conocido como Geografía Blaviana, fue confeccionado por el segundo miembro de la dinastía: Joan Blaeu, digno sucesor de su padre Willem Janszoon.



Los meridianos terrestres elegidos como Líneas de Demarcación, en los siglos xv y xvi.

que facilitaron y ampliaron el conocimiento de los territorios que se venían descubriendo desde tanto tiempo atrás. Pero, aunque pueda resultar paradójico, continuaba sin saberse con fiabilidad geométrica la posición de los puertos, extremos de la travesía, sobre la superficie de la Tierra. La causa es conocida y se ha venido repitiendo en diversas ocasiones: la irresolución permanente del problema de las longitudes. Algunas de sus repercusiones históricas, también ha sido citada: el descubrimiento del nuevo mundo. Otras son menos conocidas, pero de gran importancia en su momento: la imposibilidad material de cumplir con lo dispuesto en el Tratado de Tordesillas (1494) y en su homólogo de Zaragoza (1529), a propósito de la Línea de Demarcación que separaba teóricamente las posibles zonas de conquista de España y Portugal⁴¹.

Ciertamente, en el primer tercio del siglo xvii el posicionamiento del observador seguía planteando muchas dificultades, aunque en tierra firme pudiera ya efectuarse con relativa facilidad la diferencia de longitudes observando la ocultación o emersión de los satélites de Júpiter. En cambio en el mar no resultaba un procedimiento tan fiable, siendo más útil recurrir al de las distancias lunares; esto es las distancias angulares entre la luna y el Sol o las estrellas. Las distancias entre los dos cuerpos celestes se obtuvieron en un principio mediante la vara de Jacob o ballestilla, tal como lo reflejaba Petrus Apianus en varias de sus obras. Aunque el método se viniera empleando desde que lo propusiera Regiomontanus en torno al año 1472, no pudo ser operativo hasta que fue conocido con más detalle el movimiento tan complicado de la luna, gracias a las investigaciones de Isaac Newton.

No obstante, tenía que contarse además con unas tablas realmente fiables a las que pudiesen recurrir los marinos cuando pretendieran hallar la longitud geográfica en alta mar. Ha de tenerse presente que la base del método de las distancias lunares residía en la comparación entre la distancia angular observada y la que figuraba en las citadas tablas, obteniéndose así la hora del lugar de observación (el barco) y por tanto la diferencia de longitudes entre este y el meridiano

⁴¹ La expansión de los reinos de España y Portugal, gracias a sus múltiples expediciones geográficas, supuso un serio conflicto que en principio pareció someterse bajo el arbitraje del papa Alejandro VI (1494), al fijar un meridiano como línea de demarcación entre ambos reinos. Sin embargo, el problema era irresoluble, a pesar del posterior acuerdo de Zaragoza (1529). La razón no era otra que la imposibilidad de fijar, con el debido rigor, la longitud geográfica; además de usar como unidad de medida una que dependía del lugar y del tiempo (la legua: distancia que se puede recorrer en una hora, a pie o en cabalgadura). Se entiende así que las desavenencias entre los cosmógrafos de ambos países fuesen permanentes. Se da la circunstancia de que el archipiélago de las Molucas (las islas de las especias), siempre fue motivo de discusión. Finalmente, los portugueses firmaron un acuerdo que las situaba bajo el dominio español, cuando realmente se localizaban dentro de la zona de su influencia.



Midiendo la distancia angular entre una estrella y la luna. *Introductio Geographica Petri Apiani in Doctissimas vernerii...* (Ingolstadt. 1533).

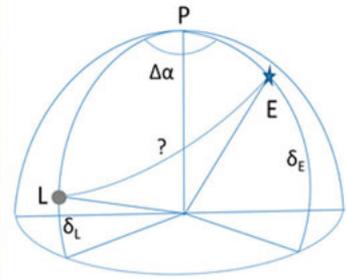
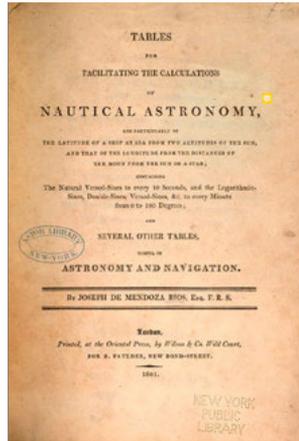
elegido como referencia. Las primeras en ver la luz fueron confeccionadas por Tobías Mayer⁴² en el año 1759. Aunque actuara movido por un interés esencialmente cartográfico, el caso es que coincidiendo con su estancia en la universidad de Göttingen formó sus tablas lunisulares, las cuales permitieron mejorar sustancialmente las prestaciones conseguidas hasta entonces a través del método de las distancias angulares. Las tablas no tardaron en ser demandadas, gracias a la comprobación de las mismas que habían efectuado tanto James Bradley⁴³ (usando ya el octante) como Nevil Maskelyne; este último durante sus travesías a Santa Elena (1761) y a Barbados (1763), al aplicar precisamente el método de las distancias lunares. Hasta tal punto resultaron fiables los resultados obtenidos por Maskelyne, que no dudó en recomendar el uso de las tablas y que se entregasen a los herederos de Mayer la recompensa establecida en el Decreto de la Longitud (*Longitude Act*) fijada en 5000 libras⁴⁴. Las tablas pasaron a formar parte de la celebrada *British Mariners Guide*, editada por el quinto astrónomo real. En el año 1767 se incluyeron en la primera edición del *Nautical Almanac*, en el que figuraba la evaluación de las distancias lunares para el Observatorio de Greenwich. Siete años después serían aceptadas por Lalande, e incluidas en la publicación *Connoissance des Temps*.

El tratamiento analítico de las distancias angulares observadas no era obvio, aunque el conocimiento de su valor verdadero si fuese un sencillo ejercicio de trigonometría esférica, en la que el triángulo a resolver sería el formado por el polo norte celeste, la luna y la estrella. Los datos de partida serían las coordenadas astronómicas, las ecuatoriales (ascensión recta y declinación) por citar una de las posibilidades. Posteriormente se debían efectuar una serie de correcciones debidas a factores tan variables como la refracción atmosférica, la paralaje anular, el semidiámetro de la luna y del Sol (en su caso), la forma elipsoidal de la Tierra y hasta la altura de la estación

⁴² El mejor astrónomo europeo en palabras de Leonhard Euler.

⁴³ Su verificación de las tablas la efectuó para 1730 observaciones, constatando que los resultados obtenidos no diferían de los suyos en más de minuto y medio.

⁴⁴ Aunque su viuda solo recibió 3000.



Grabado de José Mendoza Ríos junto a la portada de sus tablas⁴⁵, adoptadas luego por el almirantazgo inglés. Se acompaña también un gráfico del triángulo esférico usado para calcular la distancia angular verdadera entre la luna y una cierta estrella. Las ascensiones rectas y las declinaciones de la estrella y de la luna verificarían la ecuación $\cos \omega = \sin \delta_L \sin \delta_E + \cos \delta_L \cos \delta_E \cos \Delta\alpha$, siendo ω la distancia angular LE e $\Delta\alpha$ la diferencia entre las ascensiones rectas de la Luna y la estrella.

desde la que se hacía la observación astronómica. Para facilitar el cálculo de las distancias lunares aparecieron después numerosas publicaciones, entre las que destacaron las de Maskelyne, Euler, Jean-Charles de Borda y Jean-Baptiste Joseph Delambre, incluyendo todas ellas fórmulas y tablas que agilizaran el mismo.

Sin embargo es obligado referir que el matemático Jabbo Oltmanns, calculista de las observaciones practicadas por Alexander von Humboldt en centro América, prefirió las que formó el insigne marino sevillano José de Mendoza Ríos. Las tablas eran, según Oltmanns, las más cómodas que se habían construido, y hablaba con conocimiento de causa, al haberlas sometido a un minucioso examen crítico⁴⁶. Es incuestionable que perfeccionaron muchas de las que le precedieron y que las hicieron suyas en Inglaterra, hasta el punto de publicarlas en aquel país, una circunstancia que agradeció el autor dedicándoselas a Maskelyne⁴⁷, a la sazón director del observatorio astronómico de Greenwich. En el año 1796 el Capitán de Fragata Mendoza Ríos solicitó a la Oficina inglesa de las Longitudes (*Board of Longitude*) que recomendasen las tablas que había

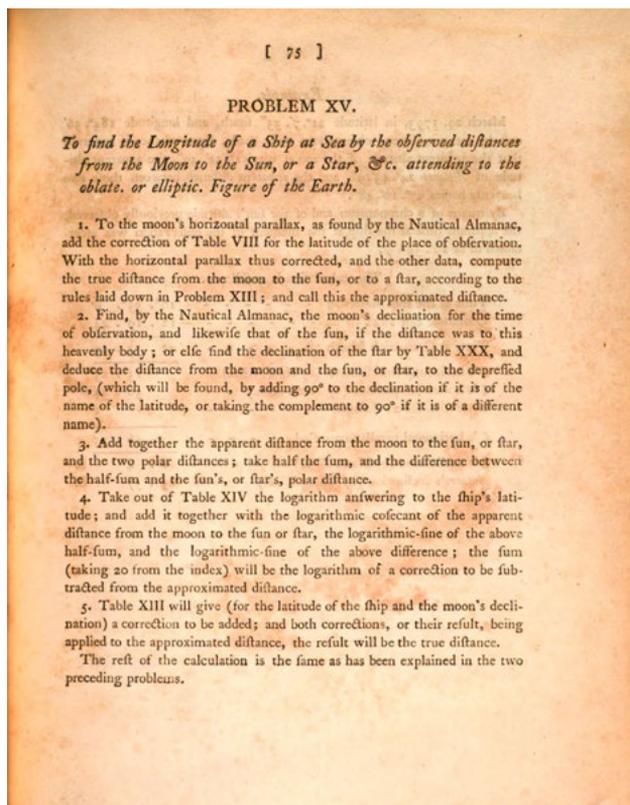
⁴⁵ *Tables for facilitating the calculations of Nautical Astronomy and particularly of the latitude of a ship at sea from two altitudes of the Sun, and that of the longitude from the distances of the moon from the Sun or a star.* Londres (1801).

⁴⁶ Oltmanns comenzó a solucionar analíticamente esta cuestión de las distancias lunares, planteando la relación trigonométrica que figura a continuación, la cual fue deducida también por Delambre: $\cos D = [2 \cos (S/2) \cos (S/2 - d) \cos H_L \cos H_E / \cos h_L \cos h_E] - \cos (H_L + H_E)$. Los pares (h_L, h_E) y (H_L, H_E) son respectivamente las alturas aparentes y verdaderas de la Luna y de la estrella a la que se mide su distancia; d es el valor aparente de esta última y D el verdadero (coincidente con el valor de ω en la figura anterior), finalmente S es la suma $h_L + h_E + d$. No obstante, tuvo que ser transformada para que interviniera el paralaje lunar y la forma elipsoidal de la Tierra, pues esta última afectaba al acimut de la Luna y a su propia paralaje. Pero el achatamiento polar modificaba también el valor teórico de la refracción y por tanto las alturas de las estrellas a las que se refieren las distancias; si bien sus efectos, en este último caso, los consideró despreciables y solo tuvo en cuenta los asociados a la paralaje.

⁴⁷ *To reverend Nevil Maskelyne, ..., whose ingenious labours have greatly advanced the Science of Astronomy, and whose indefatigable exertions, both his public capacity and private studies have contributed in a signal manner to the improvement of navigation, this work is with all deference, dedicated, by his most obliged friend, and, obedient, humble servant, Joseph de Mendoza Ríos.*

preparado, al considerarlas instrumento indispensable para culminar con éxito la determinación de la diferencia de longitudes por medio de las distancias lunares. Aunque fuesen valoradas muy positivamente desde el primer momento⁴⁸, las dificultades administrativas hicieron que no fuesen formalmente reconocidas hasta el año 1814. Fue entonces cuando las editó la anterior Oficina y fueron enviadas al Almirantazgo con una nota en la que se comunicaba que las Tablas de Mendoza se usarían a partir de entonces en la Armada de su Majestad y en la Compañía de las Indias Orientales. Ese hecho fue la prueba más palmaria de la consideración en que lo tenían dentro de la comunidad científica inglesa.

En el prólogo de sus tablas reconoció Mendoza la importancia de las aportaciones previas de John Robertson⁴⁹ (1796) y de Pierre Lévêque⁵⁰ (1779) además de agradecer la lectura de sus manuscritos a Maskelyne y a Henry Cavendish⁵¹. Es destacable asimismo la modestia del marino español, que llegó a disculparse por si su inglés no le parecía adecuado a alguno de los posibles lectores:... *but the candid English Reader will, I hope, readily excuse them in an Author who is a native of another country*. Las tablas son realmente el compendio de 52, sin contar la que incluyó como apéndice, a saber: 8 para corregir las alturas observadas del Sol, la luna y las estrellas, 6 para corregir las distancias observadas de la luna al Sol o a una estrella para determinar la longitud, 5 con los logaritmos de las razones trigonométricas y 33 más para diversos



Incidencia de la forma de la Tierra en el Método de las Distancias Lunares. Problema planteado y resuelto por José Mendoza Ríos en sus Tablas Astronómicas.

⁴⁸ Mendoza ya era miembro de la Academia de Ciencias de París y de la Royal Society (1793).

⁴⁹ *The Elements of Navigation; Containing the Theory and Practice. With the Necessary Tables, and Compendiums for Finding the Latitude and Longitude at Sea. To which is Added, a Treatise of Marine Fortification. Composed for the Use of the Royal Mathematical School at Christ's Hospital, the Royal Academy at Portsmouth, and the Gentlemen of the Navy...*

⁵⁰ *Le Guide du navigateur, ou Traité de la pratique des observations et des calculs nécessaires au navigateur.*

⁵¹ Es poco conocido el hecho de que las Tablas de Mendoza Ríos incluyeron como apéndice otra confeccionada por este sabio inglés: *Tables for clearing the apparent Distances of the Moon from Sun or a Star, from the Effets of Parallax and Refraction.*

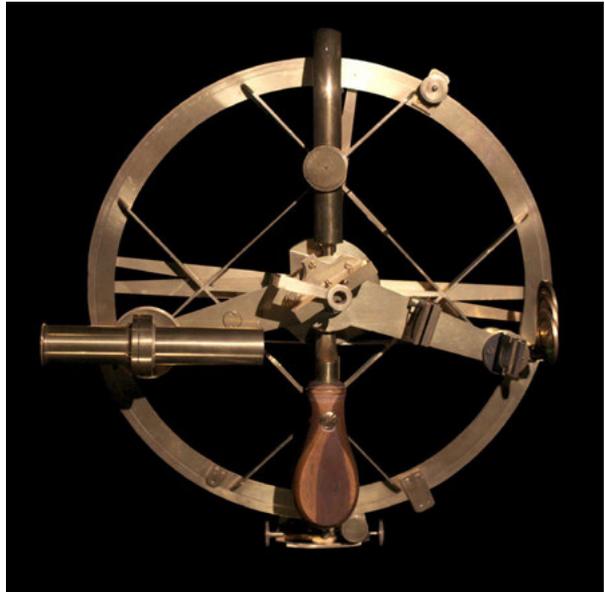
propósitos. El enfoque de las tablas fue eminentemente práctico, conteniendo la resolución de numerosos problemas y ejemplos para familiarizar al usuario medio con el contenido de las mismas; destacando la advertencia previa de que cuando se refiriese a la longitud de un barco presuponía que se estaba contando a partir del meridiano del Real Observatorio de Greenwich.

Es obligado hacer en este momento un paréntesis para señalar que Mendoza contribuyó a difundir las bondades del método de repetición para medir los ángulos de los triángulos, un procedimiento que ya había apuntado en 1752 precisamente Tobías Mayer. Así lo hizo al publicar el artículo titulado *On an improved reflecting circle*, incluido en las *Transactions of the Royal Society* (1801), he aquí un resumen del mismo: «...the celebrate Tobias Mayer contrived, however, a method to determine, at one Reading, instead of the simple angle observed, a multiple of the same angle; and, by this means, the instrument became, in practice, capable of any degree of accuracy, as far as regards the above mentioned errors. His invention is essentially different from the mere repetition of the observations». Mendoza introdujo además sus propias mejoras en el círculo de reflexión, tal como el mismo defendió en la comunicación que presentó ante la *Royal Society* el 4 de junio de 1801.

Aunque la aportación más sustancial de Mendoza Ríos a la Astronomía Náutica fuese indiscutiblemente la formación y explicación de sus tablas para facilitar la determinación de las diferencias de longitudes por medio de las distancias entre la Luna y las estrellas, su producción bibliográfica fue extensa y brillante. La primera obra apareció en el año 1787, esto es cuando solo tenía 26 años. Su Tratado de Navegación, que así se llamaba, es una obra que sorprende por el vasto conocimiento que demuestra el autor. En su tomo I incluyó un prontuario astronómico en que analizó la geometría de la esfera celeste, así como los movimientos de la Tierra y de las estrellas.

De todo su programa astronómico parece obligado seleccionar aquí

lo que comentó al desarrollar el epígrafe *Uso de las observaciones astronómicas para determinar la situación de los lugares*. Partiendo ya de que la latitud y longitud eran las coordenadas geográficas que la harían posible, refiere «como el primer elemento se halla con exactitud mucho más fácilmente que el segundo». Tras referir varios procedimientos para determinar la altitud se centró en la discusión del problema de la longitud. En primer lugar estableció la clara correspondencia entre la diferencia de la hora local de dos lugares dados y la de la diferencia de las longitudes geográficas de los mismos: «no tiene duda, que, si al mismo instante se observan los ángulos horarios de un mismo astro correspondientes a los meridianos de dos lugares, la diferencia de estos ángulos horarios, cuando se

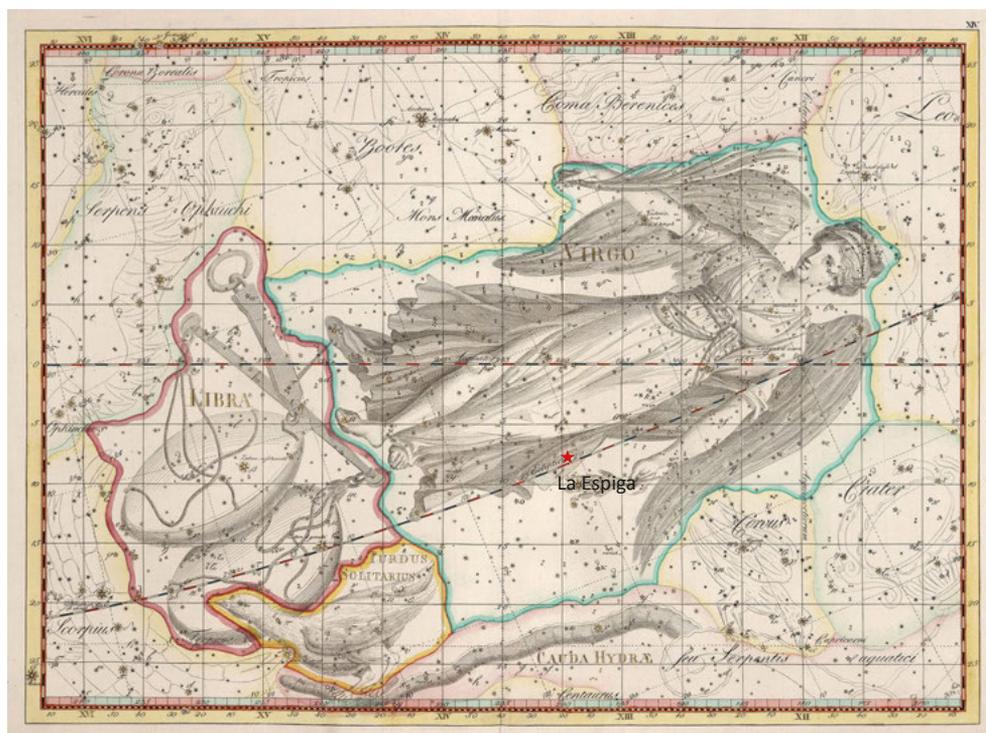


Círculo repetidor de Mendoza Ríos con las mejoras introducidas por él y por el instrumentista Edward Troughton en 1800. Se expone en el *Musée National de la Marine*. París.

hayan tomado hacia la misma parte, esto es, ambos al oriente u occidente de los meridianos, o la suma, cuando los ángulos horarios correspondan a partes opuestas, darán la diferencia de meridianos, o de las longitudes geográficas de dichos lugares».

Acto seguido recuerda la necesidad de que la toma de la hora se haga en el mismo instante en que se realiza la observación astronómica de un cierto fenómeno, una circunstancia que mediatiza el resultado final, así se refería Mendoza a esta última: *«en general, un fenómeno momentáneo, como un relámpago, es preferible a todos los demás, para denotar el mismo instante; porque, durando solo lo necesario para percibirlo, el observador no está expuesto a equivocaciones, ni puede titubear sobre la determinación del preciso tiempo en que sucede».* Finalmente comenta los fenómenos astronómicos que solían ser los más frecuentemente observados a propósito de las longitudes geográficas: *«las señales que los astrónomos emplean comúnmente se reducen, a los eclipses lunares y solares, a los de los satélites de Júpiter, y a las ocultaciones de las estrellas por la Luna».*

Si bien el primer tomo no mencionó expresamente el procedimiento de las distancias lunares en relación con la longitud, si le dedicó en el segundo la sección siguiente: *Del método de las distancias lunares para observar la longitud*. Para Mendoza se trataba *del más directo y el mejor de los que pueden proponerse, porque su exactitud depende poco del conocimiento de la latitud geográfica, y de las observaciones de las alturas, y solo exige esencialmente la medida de la distancia*. Más adelante detalló todas las operaciones de cálculo de las distancias angulares de la luna al Sol o a las estrellas zodiacales, corrigiendo las aparentes, u observadas, hasta llegar a los valores de las verdaderas y



La estrella Espiga en la constelación Virgo. *Uranographia Sive Astrorum* (1801) del astrónomo alemán Johann Elert Bode. Fue elegida por José Mendoza Ríos para determinar la longitud de un barco, midiendo la distancia angular entre ella y la Luna.

la longitud será de 50'. Pero cualquiera que tenga una justa idea de la perfección de los instrumentos modernos, y del modo con que regularmente se combinan las causas de tales errores, conocerá que el observador diestro e inteligente, atendiendo a las circunstancias, podrá sacar mejor partido, y reducir la incertidumbre a menos de medio grado. Este parece también el límite que constantemente indican las experiencias de los buenos observadores, para dirigir la confianza del Piloto. La conclusión de Mendoza fue que la incertidumbre última en la longitud incógnita sería inferior a las 17 millas, dado que la mejoría introducida en las tablas a partir del año 1789 permitía suponer que el mayor error esperado en las mismas sería menor de 30".

Mendoza presentó, en el segundo tomo de su Tratado de Navegación, los estadillos necesarios para efectuar los cálculos de manera rutinaria, rellenando simplemente los datos solicitados en el impreso. De entre los varios ejemplos que incluyó en su tratado, se ha reproducido aquí el cálculo de la longitud correspondiente a la observación que se hizo a bordo de un barco el día 8 de julio de 1786, midiéndose la distancia angular entre la luna y la estrella conocida con el nombre de Espiga de la Virgen (α *Virginus*⁵³). La distancia aparente resultó ser de $57^{\circ}10'24''$, que una vez corregida se transformó en $57^{\circ}12'05''$; resultando una longitud de $9^{\circ}23'31''.8$ al Oeste de Cádiz.

⁵³ Ascensión recta de $13^{\text{h}} 25^{\text{m}} 11^{\text{s}}.58$ y una declinación de $-11^{\circ} 9' 40''.8$.

CAPÍTULO XI | Geografía
Astronómica en
los albores de la
Ilustración

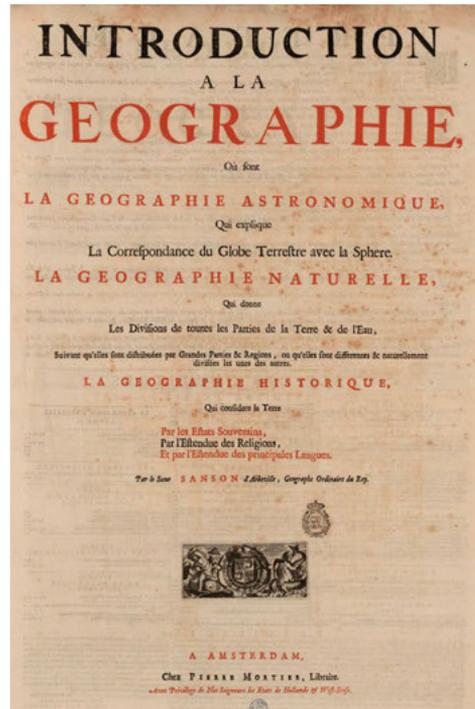


CAPÍTULO XI | Geografía Astronómica en los albores de la Ilustración

Sirva de presentación los comentarios con que encabezó Enrique Vera y González¹ su Libro *Nociones de Geografía Astronómica en las postrimerías del siglo XIX: Pocos estudios hay de tan unívoco interés como el de la geografía astronómica. No solo es una preparación verdaderamente indispensable para las otras secciones de la ciencia geográfica, sino que por sí sola constituye uno de los ramos del saber más dignos de ocupar la atención del hombre. Abarcando el universo infinito, familiariza el alma con las contemplaciones más grandiosas, y despierta ideas elevadas y sublimes. Es indispensable que la juventud sepa apreciar la inmensa importancia de estos estudios, que llevan en sí mismos la mejor de las recompensas, por cuanto permiten formar un concepto amplio y científico del universo.* En la actualidad se encuadra esta disciplina científica en otra más genérica, la geografía matemática, en la que se contemplan estas divisiones: geodesia, geografía astronómica, cartografía, fotogrametría, análisis espacial, topografía y geomática. No obstante, durante el periodo de la Ilustración era una rama más de las matemáticas. Así se constata en el voluminoso (739 pp) *Dictionnaire mathématique ou Idée générale des mathématiques: dans lequel l'on trouve outre les termes de cette science plusieurs termes des Arts et des autres sciences avec des raisonnemens qui conduisent peu à peu l'esprit à une connoissance universelle des mathématiques*, publicado por el profesor de Luis XIV, Jacques Ozanam en 1691, diez años antes de que fuese elegido miembro de la Academia de Ciencias de París. La geografía astronómica es uno de los cuarenta y cuatro epígrafes de que constaba, y aparece desarrollado entre las páginas 331 y 349 del mismo; en él nos apoyaremos para redactar el presente capítulo. En realidad, esta sección geográfica del diccionario se había basado casi por completo en la obra de Nicolas Sanson, excelente y prolífico cartógrafo que fue geógrafo de dos reyes de Francia (Luis XIII y Luis XIV); el cual creía que la geografía era parte de la cosmografía y tributaria de ciencias como la astronomía, la geometría, la aritmética y la óptica². Cincuenta años después la dividieron sus hijos y nieto en astronómica, natural e histórica, considerando que el estudio de la geografía astronómica se debería apoyar en cuestiones propias de la astronomía y en el claro paralelismo existente entre los elementos geométricos de la esfera celeste y los del globo terráqueo³; cobrando un especial protagonismo el Sol y la Luna.

¹ Realmente lo firmó con el pseudónimo de Z. Vélez de Aragón.

² *Introduction à la Géographie: où Sont la Géographie Astronomique, qui Explique la Correspondance du Globe Terrestre Avec la Sphere, La Géographie Naturelle, qui donne les divisions de toutes les parties de la Terre & de l'eau.* 1693. Esta obra póstuma fue prologada por uno de sus hijos, probablemente por Guillaume (1633-1703). Posteriormente fue reeditada y actualizada (*Introduction à la Géographie des S^{es} Sanson, géographes du Roi*), por sus dos hijos (Guillaume y Adrien) y el hijo de uno de estos Robert de Vaugondy, también geógrafo ordinario del rey; alcanzando en el año 1743 su cuarta edición.



Frontispicio de un atlas de Nicolas Sanson y portada de las lecciones de geografía que incluyó en el mismo (1696).
Biblioteca Nacional de España.

Al abordar el estudio de la Tierra como planeta del sistema solar, han de tenerse en cuenta los dos principales movimientos a que está sometida: el de rotación alrededor de su eje y el de traslación alrededor del Sol, centro común de todas las órbitas planetarias. Se comprende pues que en todos los manuales sobre esta cuestión primase la descripción pormenorizada de los elementos geométricos de la esfera celeste, tal como sucede con el texto de referencia, a fin de establecer la correspondencia entre ellos y sus homólogos sobre el globo terráqueo. El conocimiento de la posición aparente de una estrella sobre esa esfera celeste, o si se quiere de sus coordenadas astronómicas, el de la orientación o acimut de una cierta dirección así como el de la situación de un lugar sobre la superficie terrestre, fijada por su longitud y latitud, se basan en el establecimiento de unos ciertos sistemas de referencia cuyos puntos, líneas y planos fundamentales pertenecen a la esfera y están directamente relacionados con el campo gravitatorio terrestre, con el movimiento de rotación de la Tierra y con el de su traslación alrededor del Sol⁴.

En efecto, supongamos un cierto observador sobre la superficie terrestre y la línea de fuerza del campo gravitatorio que lo contiene, es decir la vertical del lugar materializada por la plomada física. Pues bien, esa línea cortaría a la esfera celeste asociada en dos puntos denominados Cenit y Nadir, el primero por encima del observador. El plano que pasa por el centro de la esfera,

³ Según estos autores, las diferentes divisiones del globo terráqueo se explican atendiendo a la correspondencia que tienen todas sus partes con las de los cielos.

⁴ Para facilitar la comprensión del texto, se recordará a continuación lo ya manifestado, a este respecto, en los capítulos III y IV.

el lugar, y es perpendicular a la vertical recibe el nombre de plano del horizonte, el cual divide a la esfera celeste en dos hemisferios, visible e invisible, perteneciendo el Cenit al primero de ellos. Todos los planos que contienen a la línea vertical cortan a la esfera según circunferencias máximas denominadas verticales, por el contrario, todos aquellos planos que son paralelos al horizonte cortan a la esfera según circunferencias menores llamadas almicerantares. El eje de rotación terrestre corta a la esfera en los llamados polos celestes: polo norte y polo sur. El plano perpendicular al eje de rotación y que pasa por el centro de la esfera es el ecuador celeste. Un círculo máximo que contenga a dicho eje es normal al ecuador y recibe el nombre de círculo horario, o meridiano celeste. Las circunferencias menores, intersecciones de la esfera con planos paralelos al ecuador, se denominan círculos de igual declinación o simplemente paralelos. La esfera celeste queda así dividida por el plano del ecuador en el hemisferio septentrional o boreal y en el meridional o austral.



Frontispicio del Diccionario matemático de Jacques Ozanam.

Existen también otros elementos relacionados con la traslación terrestre o con el movimiento aparente del Sol alrededor de la Tierra, sin duda el más importante es la eclíptica, que se define como el plano que contiene al centro del Sol, al baricentro del sistema Tierra-Luna y a su vector velocidad heliocéntrica. La línea normal a ese plano y que pasa por el centro de la esfera cortaría a esta en los polos eclípticos, mientras que los perpendiculares a ella cortan a la esfera según circunferencias máximas, los meridianos eclípticos. La intersección del ecuador y del plano de la eclíptica es la línea equinoccial, que corta a la esfera en los puntos equinociales, el Punto Aries (comienzo de la primavera) y el Punto Libra (comienzo del otoño). Se define la línea de los solsticios como una recta perpendicular a la anterior y contenida en el plano de la eclíptica, esta línea corta a la esfera celeste en los solsticios de verano e invierno, según se encuentre el Sol por encima o por debajo del ecuador. El plano de este y el de la eclíptica forman un ángulo llamado oblicuidad de la eclíptica, cuyo valor actual es próximo a los $23^{\circ} 26'$. Los círculos horarios que contienen a los solsticios o a los equinoccios se llaman coluros solsticiales o equinociales.

Los elementos geométricos de la Tierra se pueden definir en función de sus homólogos celestes. Efectivamente, comenzando con su eje de rotación que coincide en los dos casos y corta a la

superficie terrestre en los polos: septentrional y austral. El plano del ecuador sería pues perpendicular al eje anterior y contendría al centro de la Tierra, su intersección con su superficie sería por tanto la línea ecuatorial, también conocida en su tiempo como la equinoccial. Todos los planos paralelos al del ecuador, semejantes a los paralelos celestes, cortan al globo terráqueo según círculos menores, conocidos igualmente con el nombre de paralelos (al fin y al cabo, el ecuador es un paralelo singular). El meridiano del lugar estudiado en la astronomía esférica, o de posición, corta a la esfera terrestre según un círculo máximo, denominado asimismo meridiano; otra manera de identificarlo sería como intersección del horario de una hipotética estrella, de manera que su relación con la hora local es obvia.

Hay también otra serie de elementos relacionados con el movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol. Sabido ya que el plano de la eclíptica forma un ángulo próximo a los $23^{\circ} 26'$ con el plano del ecuador, puede entenderse su intersección con la superficie terrestre: otro círculo máximo también conocido como la eclíptica. Dicho círculo está limitado, a ambos lados del ecuador, por dos paralelos llamados trópicos de Cáncer y de Capricornio, en atención a los signos del zodiaco que ocupa el Sol en tales posiciones extremas; esto es, cuando su declinación es de $23^{\circ} 26'$ (solsticio de verano) o de $-23^{\circ} 26'$ (solsticio de invierno)⁵. Hay otros dos paralelos terrestres igualmente relacionados con la traslación, aquellos cuya distancia angular a los polos es asimismo de $23^{\circ} 26'$, son los llamados círculos polares: ártico, en el hemisferio norte, y antártico, en el hemisferio sur. Esos cinco paralelos dividen a la esfera terrestre en otras tantas zonas esféricas, ya identificadas por Aristóteles, que son conocidas en la actualidad como zonas geoastronómicas. La línea ecuatorial divide a la zona tórrida en dos partes iguales, siendo su principal particularidad que el Sol se encuentra sobre la cabeza del observador dos veces al año; aumentando sobremanera la sensación de calor, hasta el extremo de que hubo un tiempo en que se consideró inhabitable. Las zonas limitadas inferiormente por los trópicos y superiormente por los círculos polares, son las llamadas zonas templadas, dado que las temperaturas imperantes no son extremas. Esa última propiedad es precisamente la característica principal de los dos casquetes polares, cuya base es el círculo polar correspondiente; es destacable que en ellos el Sol puede llegar a permanecer más de 24^{h} por encima del horizonte, dejando de tener sentido conceptos tan cotidianos como el día y la noche.

Una vez entendido el significado de los meridianos y de los paralelos terrestres, es inmediato que cualquier punto de la superficie terrestre puede considerarse intersección de dichos círculos; en función de ellos se define un sistema de coordenadas curvilíneas y el par de coordenadas geográficas que localizan a dicho punto. La latitud es la distancia angular del punto al ecuador, medida sobre su meridiano. La diferencia de longitudes entre dos puntos dados es la medida del diedro formado por los meridianos que los contienen, o bien la distancia angular entre tales meridianos medida sobre la línea ecuatorial. Si uno de esos meridianos es elegido origen, la longitud de un punto dado sería la distancia angular entre ambos meridianos. Los últimos elementos geométricos que se van a considerar tienen que ver con el campo gravitatorio terrestre, cuya línea de fuerza coincide con la vertical física; que en el caso esférico es idéntica a la del radio considerado y perpendicular al plano tangente a la esfera en ese mismo punto. La intersección del meridiano del lugar con ese plano, llamado del horizonte u horizontal, es la línea meridiana o línea norte sur; una perpendicular a la misma (en ese mismo plano) es la línea este oeste. Esas dos direcciones son las cardinales principales y localizan a los cuatro puntos básicos: norte, este, sur y oeste.

⁵ Realmente, el retroceso equinoccial inducido por la precesión anual hace que los signos asociados a los solsticios hayan cambiado con el tiempo, al igual que ha sucedido con los de los equinoccios. De manera que la correspondencia actual sería: Primavera (Piscis), Otoño (Virgo), Verano (Geminis), Invierno (Sagitario).



Las cinco zonas geo astronómicas en *Hemisphaerium Orbis Antiqui*. Uno de los grabados incluidos en la obra de Andreas Cellarius: *Harmonia Macrocosmica* (1660).

El paralelismo entre cielo y Tierra que acaba de comentarse se extrapoló al campo de la aeronomía, para tratar así de explicar el origen de los vientos; una manifestación meteorológica que fue el centro de mitos y leyendas⁶. Buena prueba de ello es el apartado dedicado a «los doce vientos y sus portales» en el capítulo 76 del libro acrófico de Enol⁷ (Sección de Astronomía). Comienza el capítulo señalando que «en los límites de la Tierra he visto doce puertas abiertas para todas las regiones, por ellas salen los vientos y desde ellas soplan sobre la Tierra». La ubicación de las puertas no se presta a confusión pues se colocaron tres en cada uno de los cuatro puntos cardinales: «Por cuatro de ellas salen los vientos que son para la curación de la Tierra y para su vivicación, y por ocho salen los vientos perjudiciales que cuando son enviados destruyen toda la Tierra, las aguas y todo lo que hay en ellas, lo que crece, florece o repta, tanto en las aguas como en la Tierra seca y todo lo que vive en ella».

⁶ De hecho, se habla en la actualidad de energía eólica, recuerdo implícito de Eolo, el dios griego de los vientos.

⁷ Enol es un personaje antediluviano sin adscripción clara: hijo de Caín, bisabuelo de Noé, padre de Matusalén, etc. Yavé se llevó a Enol y lo transformó en el ángel Melatón. Se cree que los autores del libro fueron judíos, datándose entre el siglo III a.C. y el I de nuestra era. La primera descripción científica del viento fue debida a Evangelista Torricelli: *...los vientos son producidos por diferencias en la temperatura del aire, y por tanto de la densidad, entre dos regiones de la Tierra.*

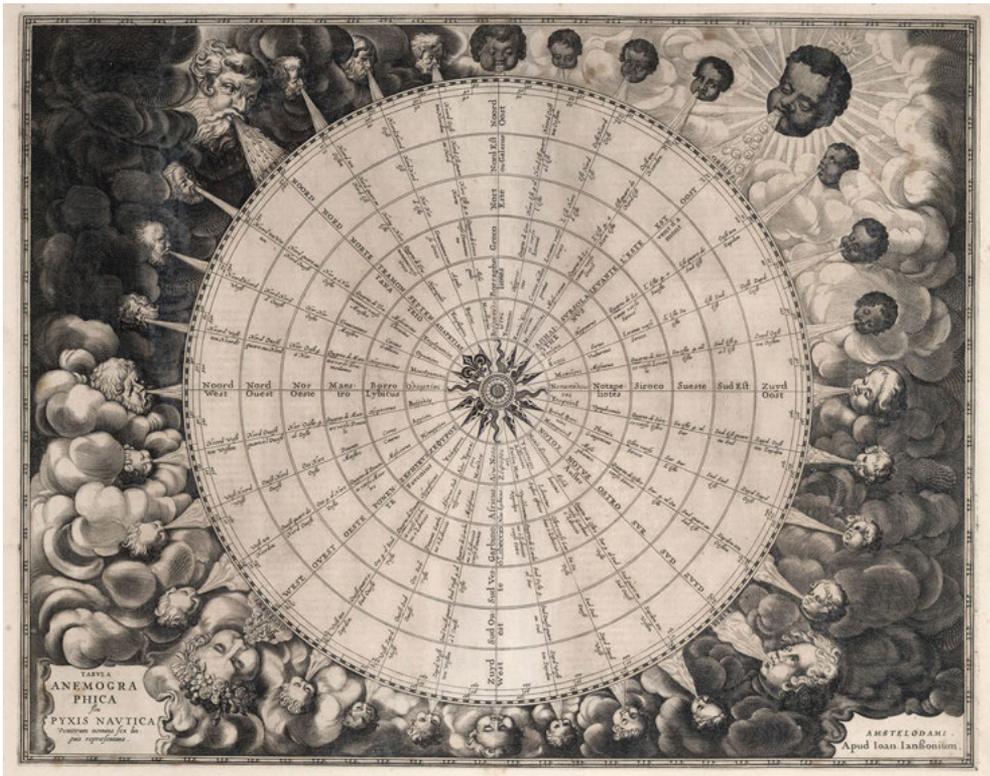
Esos vientos cardinales, tan básicos para la navegación a vela, fueron plasmados en las cartas náuticas mediante las vistosas y conocidas rosas de los vientos que fueron parte consustancial de los portulanos y de las cartas náuticas, que hicieron posible el descubrimiento de tantos territorios ignotos para el viejo mundo. En todos los tratados de navegación se dedicaba un capítulo importante a esa cuestión, indicando que aparte de los cuatro vientos principales, asociados a las direcciones cardinales, se consideran otros que resultan de subdividir cada cuadrante en ocho partes; resultando así los treinta y dos vientos con los que están tan familiarizados los marinos. Su denominación varía de un país a otro, aunque siempre se hiciera mención, de una u otra forma, a los vientos cardinales que definían cada sector del horizonte⁸.



Allegorías de los cuatro puntos cardinales. Norte y Sur, en la parte superior; Este y Oeste en la inferior. Publicadas por Robert Bonnart entre 1670 y 1718.

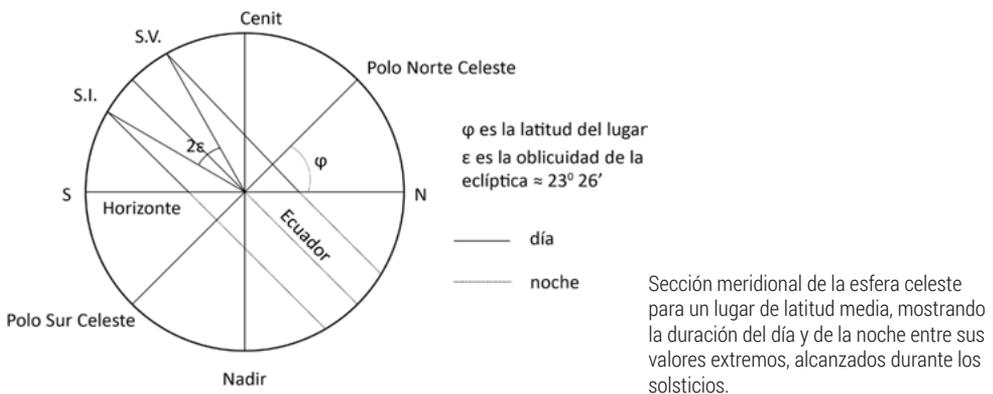
Un capítulo especialmente interesante de la geografía astronómica es el dedicado a la duración de los días y de las noches en diferentes lugares de la Tierra, así como a su variación a lo largo del año. Empezando su análisis en el ecuador, esto es, en la línea central de la zona tórrida, se constata que allí es igual la duración del día y la de la noche. La explicación astronómica es evidente: desde allí se ven todas las estrellas de la bóveda celeste, con la particularidad de que están por encima del horizonte el mismo tiempo que permanecen ocultas bajo él; el Sol tendrá pues idéntico comportamiento, de ahí que el día dure igual que la noche durante todo el año. A modo de resumen: en el ecuador, su plano y el del horizonte son perpendiculares, conteniendo el segundo a los dos polos celestes.

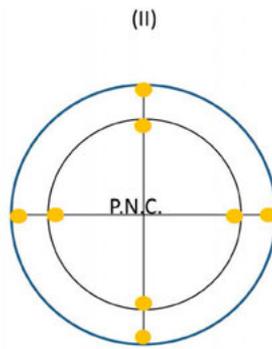
⁸ Aunque la cuestión de los vientos no sea competencia de la geografía astronómica, parece obligado referir en este contexto que los cinco paralelos principales de la Tierra delimitan otras tantas zonas esféricas sobre las que circulan los llamados vientos planetarios (con la importante salvedad de sustituir las latitudes 23° 26' norte y sur, por las de 30° norte y sur). Estos vientos de carácter global se dividen en alisios del noreste, en el hemisferio norte, los alisios del sureste, en el hemisferio sur; circulando los primeros entre el ecuador y el paralelo de 30° de latitud norte y los segundos entre el ecuador y el paralelo de 30° de latitud sur. Otro grupo importante es el de los vientos circumpolares, que actúan en cada uno de los casquetes correspondientes. Entre los vientos planetarios se encuentran también los llamados del oeste, por circular de occidente a oriente, por las zonas esféricas comprendidas entre las latitudes 30° y 60° de ambos hemisferios.



Tabula Anemographica, con 32 soplores (uno para cada viento). Sobresalen los de los cuatro cardinales y del color negro para identificar el procedente de oriente. Johannes Janssonius (1650).

Refiriéndonos seguidamente al hemisferio norte, se comprueba que al aumentar la latitud se va incrementando la duración del día, entre la primavera y el solsticio de verano, alcanzando entonces su máximo valor. La duración de la noche sería naturalmente 24^{h} menos la que tuviese el día. Pasado el solsticio comenzaría a disminuir la duración del día, al contrario que la de la noche; hasta llegar al equinoccio de otoño en que vuelven a ser iguales el día y la noche. Así ocurriría por la variación diaria de la declinación del Sol, nula en los dos equinoccios y máxima ($23^{\circ} 26'$) en el solsticio de verano.





Hemisferio septentrional: (I) Sección meridiana de la esfera celeste en el solsticio de verano, para un punto del Círculo Polar Ártico. (II) Proyección ortográfica de la esfera celeste sobre el plano del ecuador, indicando la trayectoria del Sol durante la primavera y el verano en el polo norte.

Igual panorama se presentaría en la zona templada, donde iría aumentando la duración del día, llegando hasta el punto en que alcanzaría las 24^h en el solsticio de verano, justamente en el paralelo que comparte con el círculo polar; cuando la declinación solar coincide con el de la oblicuidad de la eclíptica. Dentro ya del casquete polar, dejan de tener sentido los conceptos de día y noche, tal como se entienden en latitudes inferiores. Ha de tenerse en cuenta que en el mismo polo el Sol siempre está por encima del horizonte, girando 360°, durante los seis meses transcurridos desde que inició su desplazamiento aparente en el equinoccio de primavera hasta llegar al de otoño, pasando por el solsticio de verano.

El plano del horizonte en el polo es el mismo que el del ecuador, de ahí que el Sol se vea siempre que su declinación sea positiva. En el hemisferio sur se produce el fenómeno inverso, aumento de los días mientras que la declinación del Sol sea negativa, es decir durante el tiempo que invierta en pasar desde el equinoccio de otoño al de primavera, pasando por el solsticio de invierno⁹.



El Sol de medianoche en el planeta Marte. La imagen es un mosaico de las obtenidas por la nave de la NASA: Phoenix Mars Lander, durante su misión del 20 de julio del año 2008.

Aparte de las cinco zonas geoastronómicas, se establecieron en la antigüedad otras, por parte de los filósofos griegos, con la intención de conocer la duración del día más largo del año en diferentes latitudes, sin necesidad de hacer cálculo alguno¹⁰. Como sucedería con tantos otros

⁹ El verano e invierno del hemisferio norte se corresponden con el invierno y el verano del hemisferio sur.

¹⁰ Para calcular la duración del día se resuelve el triángulo esférico formado por el polo, el cenit y el Sol en el instante del orto o del ocaso, con lo que se trata de un triángulo rectilátero. Como el ángulo en el Polo es el ángulo horario (h), se cumpliría que $\cos h = -\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta$, siendo φ y δ , la latitud del lugar y la declinación del Sol en la época de que se trate. La duración del día se demuestra que es dos veces el ángulo horario del ocaso. En el ecuador sería de 12^h, pues al ser φ cero también lo sería el coseno del ángulo horario, de forma que h valdría 90° o 6 horas.

comentarios de Tolomeo, no se conocen las fuentes en que se apoyó; solo hay constancia de lo que dijo al respecto en el *Almagesto* (2.12). Retomamos aquí lo tratado en el capítulo VII, a propósito de los climas, aunque solo sea para añadir que el sistema de esas zonas esféricas fue adoptado igualmente por los astrónomos y geógrafos musulmanes, como al Biruni y al Idrisi, al contrario de lo sucedido en el mundo cristiano, en donde se adoptaron los cinco propugnados por Aristóteles. Etimológicamente la palabra clima, procede del griego κλίμα (plural κλίματα, climata), significa pendiente o inclinación y hace referencia al ángulo formado por el plano del horizonte y el del ecuador: máximo (90°) en el ecuador y mínimo (0°) en el polo, pasando por los 45° en el paralelo medio. La consecuencia es inmediata: variación de la altura del Sol con la latitud. La división de la Tierra en climas no fue única: se consideraron 24 cuando el intervalo entre la duración del día era de media hora, o 33 cuando era de tan solo un cuarto de hora. En el *Diccionario matemático* se decantó por la primera posibilidad, concretando incluso la definición de los cuatro primeros.

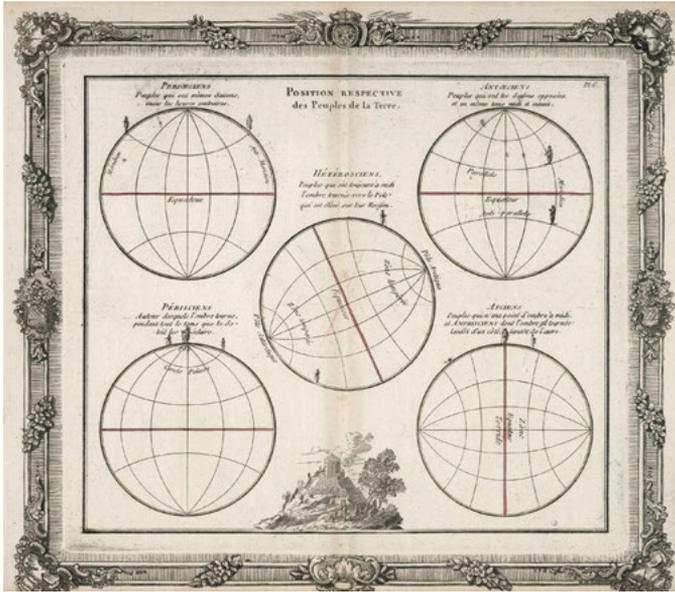
La curiosidad que sentían los sabios de la antigüedad por los movimientos aparentes del Sol, diurno y anual, explica que llegasen a clasificar a los habitantes de la Tierra atendiendo a la dirección cardinal de su sombra. En primer lugar, se referían a los ascianos o ascios, como aquellos localizados en la zona tropical que no arrojaban sombra dos veces al año, justamente cuando el Sol estaba sobre sus cabezas (en el cenit). Los anfiscios eran los habitantes de la misma región, que en unas ocasiones proyectaban su sombra hacia el norte y en otras hacia el sur, dependiendo de que la declinación del Sol fuese negativa o positiva. Los heteroscios habitan las zonas templadas y su sombra se proyecta siempre hacia el polo de su hemisferio, es decir, unos la tienen hacia el norte y otros hacia el sur. Finalmente se considera que los periscianos o periscios son los habitantes de las zonas polares, en las que pueden observar que el Sol gira por la línea del horizonte, con lo que sus sombras pueden ir en todas direcciones. La cuestión de las sombras quedó inmortalizada en la *Farsalia*, el poema épico del cordobés Marco Anneo Lucano (sobrino de Séneca), que narra la guerra entre Julio Cesar y Pompeyo, concretamente en los versos siguientes:

*Ignotum vobis, Arabes, venistis en orbem
 Umbras mirati nemorum non ire sinistras,*

en ellos se venía a comentar como los árabes, acostumbrados a vivir en la zona tórrida, se extrañaron al ver como cambiaban las sombras en la zona templada.

Además de las divisiones anteriores, relacionadas con las zonas esféricas y con las sombras arrojadas por el Sol, hubo otras directamente asociadas a los meridianos y a los paralelos: antecos, periecos y antípodas. Los antecos son aquellos que habitan en el mismo meridiano, pero en latitudes opuestas esto es equidistantes del ecuador. De modo que, si unos se encuentran en la zona templada septentrional, los otros están situados en la zona templada meridional, si los unos habitan en una zona polar los otros estarían también en la zona polar del hemisferio contrario; algo análogo podría referirse a propósito de la zona tórrida, a un lado y a otro del ecuador¹¹. Los periecos habitan en el mismo paralelo, y en el mismo plano del meridiano, pero con una diferencia de longitud de 180°, con lo que el polo ocuparía el punto medio del arco de meridiano que los une. Todos esos habitantes tendrían la misma temperatura y estaciones, con idéntica duración de los días y de las noches. La diferencia estriba evidentemente en la hora: cuando para unos es mediodía para otros es medianoche. Es sabido que los antípodas habitan en lugares diametralmente opuestos, con lo que los paralelos respectivos serán equidistantes del ecuador.

¹¹ Teniendo latitudes opuestas, se verificará que si para unos es invierno, para los otros sería verano y recíprocamente.



Position respective des peuples de la Terre, por el ingeniero geógrafo Louis Charles Desnos. Atlas escolar de 1786.

Con relación a las estaciones del año se cumple lo ya comentado a propósito de los periecos. Ha de recordarse el debate suscitado en la antigüedad y en la Edad Media sobre la existencia de los antípodas, y como intentó zanjarlo San Agustín de Hipona (*De Civitate Dei*. Libro XVI. Capítulo IX. Sobre si debemos creer en los antípodas): *Pero sobre la fábula de que existen los Antípodas, es decir, hombres que viven en el lado opuesto de la Tierra, donde el Sol se levanta cuando para nosotros se pone, hombres que caminan con sus pies opuestos a los nuestros, eso no es creíble en modo alguno. Y, ciertamente, no se afirma que se haya aprendido tal cosa por conocimiento histórico, sino por conjetura científica.*

La interconexión cielo Tierra tuvo una de sus aplicaciones más señaladas en la determinación del tamaño de la Tierra, una preocupación muy natural a la que dedicaron su tiempo, numerosos filósofos y matemáticos a lo largo de la historia. Aunque la mayoría de las referencias científicas sobre la historia de la geodesia (la disciplina matemática que estudia la forma y dimensiones de la Tierra, así como el campo gravitatorio engendrado por la misma) comienzan con la supuesta medición de Eratóstenes entre Siena y Alejandría, durante el solsticio de verano; hoy día ha quedado superada esa posibilidad a la vista de estudios más rigurosos sobre ese particular. A pesar de que ya se tengan más noticias sobre la medición de la Tierra, es conveniente insistir en este momento sobre el protagonismo que debió tener esta disciplina en el antiguo Egipto.

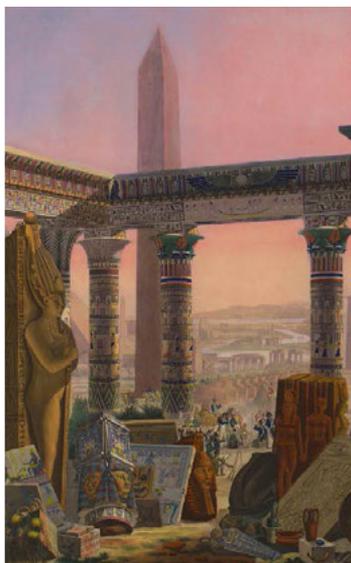


Los antípodas en la obra del clérigo Gautier : *L'Image du monde* (c. 1246).

El testimonio más elocuente es la gran pirámide de Giza, cuya apotema tiene una longitud equivalente a la décima parte del desarrollo de un minuto de meridiano, ese hecho tan singular fue recogido por cronistas como Diodoro de Sicilia, o Estrabón, y comprobado por los sabios franceses que acompañaron al ejército de Napoleón cuando invadió aquel país. E. F. Jomard, editor científico de la Descripción de Egipto definió ese valor, próximo a los 184.75 m, como el estadio egipcio. Otra prueba es menos contundente a pesar de su calado, tanto Pitágoras como Platón adquirieron muchos de sus conocimientos durante su prolongada estancia en Egipto, defendiendo respectivamente que el modelo matemático de la Tierra debía ser esférico y que el perímetro de una de sus circunferencias máximas era del orden de los 64.412 km (una equivalencia métrica nada fiable, al no serlo la unidad elegida por el filósofo).

No hay constancia documental de los cálculos en que se basó Platón para pronunciarse de forma tan taxativa, pero lo cierto es que así continuaron haciéndolo los que le sucedieron; Arquímedes, por ejemplo fijó el perímetro de la Tierra en unos 48.309 km, sin que tampoco se sepa cómo pudo obtener esa cifra. Se llegó así al sorprendente valor atribuido a Eratóstenes, muy próximo al real, aunque fuese erróneo el supuesto de que partió; Siena y Alejandría no tenían la misma longitud geográfica. También es incierta la medida que efectuó al parecer Posidonio, fijando el perímetro terrestre en 38643 km aproximadamente. El último cálculo de la serie fue el debido a Tolomeo, el cual aseguró que debería ser próximo a los 28.985 km, tras haber revisado los inciertos registros previos de Posidonio. Tan considerable error ($\approx 28\%$) tuvo repercusiones históricas tan relevantes como el descubrimiento del nuevo mundo.

Así se reconocía en el Diccionario Matemático¹² de Jacques Ozanam (1691), aunque la despa-
 chara con una simple referencia en su capítulo dedicado a la geografía astronómica. Básicamente se limitó a decir que para hallar el perímetro de la circunferencia terrestre no era necesario hacer



Edme François Jomard junto a una de las bellas ilustraciones de la Descripción de Egipto (facsimile des Monumens coloriés de l'Egypte d'après le tableau de Charles-Louis-Fleury Panckoucke. 1825)

¹² *Dictionnaire mathématique ou idée générale des mathématiques: dans lequel l'on trouve, outre les termes de cette science, plusieurs termes des arts & des autres sciences, avec des raisonnemens qui conduisent peu à peu l'esprit à une connoissance universelle des mathématiques*

todo el recorrido circular, sino limitarse a medir el desarrollo de un grado¹³, para deducir, en función de él los valores del perímetro, diámetro, superficie y volumen de la Tierra. El problema así planteado es doble y requiere dos operaciones complementarias: una astronómica y otra topográfica. Mediante la primera se calcularía la amplitud angular del arco y mediante la segunda el desarrollo lineal del mismo. El problema se simplificó notablemente cuando se decidió elegir un arco de meridiano, ya que la amplitud angular coincidiría con la diferencia de latitudes entre sus extremos. En cuanto al desarrollo lineal, se obtuvo al principio de manera muy poco aproximada, al no contar con el instrumental y la metodología que permitiera la medida directa de las distancias.

Análoga falta se observa en la obra geográfica de Nicolas Sanson, en la de sus hijos y en la de su nieto, aunque pueda atribuirse atendiendo a las múltiples investigaciones posteriores a su época, que tanta luz arrojaron sobre ese particular. Acogiéndose a esa misma circunstancia se comprende que el repetido Diccionario se pronunciase en estos términos: «*C'est ainsi que Ptolomée a trouvé qu'un degré d'un grand cercle de la Terre, contenoit 500 stades, ou 62 Milles & demi: ce qui fait que l'on donne à une minute de la Terre une Mille, c'est à dire mille pas geometriques*».

La equivalencia dada entre el estadio y la milla es completamente gratuita¹⁴ y revela el maremagnum metrológico existente antes de que se implantara el Sistema Métrico Decimal en la mayoría de los países civilizados, con las excepciones ya sabidas del mundo anglosajón, que permanecen anclados al pasado tan remoto¹⁵ de las medidas antropométricas. Las más usuales fueron el pie, el codo y el paso. En el imperio romano dividieron el paso en otras dos: *gradus* y *passus*, la primera era el paso pequeño y la segunda el mayor, también llamado paso geométrico o de cinco pies; cuya longitud equivalía a la distancia existente entre dos posiciones consecutivas de un mismo pie cuando se estaba andando, de ahí que se llamase también paso doble. Se comprende así, que



Alegoría de la interconexión del Cielo y la Tierra. Le Nouveau & Grand Illuminant Flambeau de la Mer, de tout le monde... par Nicolas Jansz Vooght, & Gerard van Keulen, Geomètre, & Maistre en Mathematiques (1723).

¹³ Si g es el desarrollo de un grado, el perímetro sería $360g$, expresado en la misma unidad que g . El valor del diámetro sería por tanto $360g/\pi$ y el del radio $180g/\pi$. La superficie vendría dada por $41252.865g^2$ aproximadamente, resultando un volumen cercano a $787869.839g^3$.

¹⁴ De hecho, en las diferentes ediciones de la Geografía de Sanson, al menos en la de 1693 y en la de 1743, se apuntó que el grado tenía 60 millas o 480 estadios.

¹⁵ Baste recordar el codo de Nippur con una antigüedad de cinco milenios, datado en el año 3000 a.C. y que se conserva en el Museo Arqueológico de Estambul.

la medida romana por excelencia, esto es la milla¹⁶ de mil pasos geométricos pudiera alcanzar los 1481 metros aproximadamente. Los múltiplos mayores de las medidas antropométricas son las llamadas itinerarias, puesto que eran las usadas para evaluar grandes trayectos terrestres o marítimos. El estadio y la milla han sido las más conocidas, la primera era más antigua pues fue usada en Egipto y después en Grecia, aunque la milla acabó imponiéndose definitivamente durante el imperio romano¹⁷. La relación entre ambas no es nada trivial, en tanto que fueron muchos los tipos de estadios y las clases de millas, casi diferentes en cada país, sin que los cronistas especificasen a cuál se estaban refiriendo.

La complejidad del análisis de esas medidas itinerarias quedó reflejada en los tratados de geografía de la época, Sanson así lo hizo, figurando en todas las reediciones de su obra, incluso en la que se publicó en el año 1743; comprobándose la dificultad de fijar las equivalencias entre las empleadas en diferentes países. A ella me remito al reproducir la advertencia que se hace en la misma: *Avis sur les mesures itineraires que les Historiens & les Voyageurs donnent dans leurs relations*. Bajo ese epígrafe recordaba que aquellos que expresaban las distancias en leguas o en millas, no tenían en cuenta que había leguas de 2000, 2500 y 3000 pasos geométricos, si son leguas de Francia; que también había millas de 4000, 5000 y 6000 pasos geométricos, si son millas de Alemania; para terminar, afirmando que en Inglaterra usaban asimismo millas de 1000, 1500 y 3000 pasos geométricos, y que esa misma tónica era la seguida en otros países.



Leguario en el núcleo urbano de Bailén (Jaén) y otro a la salida de Cuevas del Valle (Ávila).

Previamente se había hecho un listado de países con las medidas itinerarias más frecuentemente usadas en ellos: millas, leguas, verstas, parasangas, estaciones, jornadas o dietas y horas de camino. He aquí sendos resúmenes:

- MILLAS) Alemania, Hungría, Islas Británicas, Italia y Polonia
- LEGUAS) España, Francia, Suecia y Suiza
- PARASANGAS) Persia
- VERSTAS) Moscovia
- ESTACIONES Y JORNADAS) Arabia, Tartaria y la mayor parte de África
- HORAS) Europa y otros lugares del mundo.

¹⁶ La longitud de la milla se fue transformando con el tiempo, dependiendo su longitud del país en que se usara. En el ámbito anglosajón se considera una milla terrestre próxima a los 1609.3 m, para distinguirla de la milla náutica, equivalente al desarrollo de un minuto de la esfera terrestre, alrededor de 1852 m. Como la Tierra es realmente un elipsoide, se define la milla náutica como el desarrollo de un minuto a 45° de latitud, de manera que su valor dependerá del modelo elipsoidal elegido.

¹⁷ Máxime cuando señalizaban los caminos con los miliarios correspondientes: *ad primum lapidem* (primera milla), *ad tertium lapidem* (la tercera), y así sucesivamente.

Para aumentar la confusión se añadía que cada país tenía no solo sus medidas particulares, sino que estas podían ser de magnitud diferente; y dentro de cada clase cabía la posibilidad de que fuesen grandes, medianas y pequeñas. En las obras referenciadas, tanto en la Geografía de Sanson como en el Diccionario matemático de Ozanam, se incluyeron solo las medidas de uso más común:

MILLA en pasos geométricos) Italia, 1.000; Inglaterra, 1.250; Escocia e Irlanda, 1.500; Alemania, 4.000; Polonia, 3.000; Hungría, 6.000.

LEGUA en pasos geométricos) Francia, 2.400; España, próxima a los 3.428; Suecia y Suiza, 5.000.

Las VERSTAS solo tenían 750 pasos geométricos, las PARASANGAS 3.000, la ESTACIÓN 20.000, la JORNADA 30.000, teniendo el camino de una HORA 3.000 pasos geométricos.

No es seguro que sucediese de esta forma, pero parece como si tal dispersión de las medidas itinerarias hubiera influido para que geógrafos, geodestas y metrólogos, decidieran alejarse de los patrones antropométricos clásicos, en favor de un referente independiente del lugar y del tiempo, apostando de manera decidida por el grado terrestre¹⁸. Se exponen a continuación algunas de las equivalencias:

MILLAS por grado) Italia, 60; Inglaterra, 48; Alemania, 15; Escocia e Irlanda, 40; Polonia, 20; Hungría, 10.

LEGUAS por grado) Francia, 30 pequeñas y 20 grandes; Dinamarca, Suecia y Suiza, 12; España, 17.5.

El grado tenía 80 VERSTAS, 20 PARASANGAS, 3 ESTACIONES, 2 JORNADAS o 20 HORAS de camino.

Sin embargo, la relación de tales medidas con el grado terrestre no era nada fiable, dado que el tamaño de la Tierra solo era conocido en primera aproximación. De ello ya fueron conscientes en el califato de Bagdad, llegando a determinar su perímetro, de acuerdo con la metodología



La Escuela de la Sabiduría en Bagdad, en donde brilló con luz propia Abu Abdallah Muhammad ibn Mūsā al-Jwārizmī, más conocido como Al-. Él y los hermanos Musa fueron los artífices de los intentos de la Escuela por determinar el perímetro de la Tierra.

¹⁸ La novedad de esa posible elección solo es relativa, basta recordar que el valor de la altura oblicua de la gran pirámide de Keops coincidía con la décima parte del desarrollo de un minuto del meridiano; por consiguiente, ese estadio egipcio, estaría comprendido 600 veces en el grado (el estadio de 600 en el grado, según la terminología metrológica al uso).

seguida por los filósofos griegos, aunque no llegasen a resultados fidedignos. Así se alcanzó el Renacimiento sin haber avanzado un ápice en el conocimiento de tan importante cuestión, siendo muy loables los intentos de enciclopedistas como Elio Antonio de Nebrija, y otros, por solventar el asunto; si bien, de nuevo se trató de un intento condenado al fracaso, fundamentalmente por dos motivos: dificultad para localizar los extremos del arco en el mismo meridiano y la práctica imposibilidad de medir el desarrollo del arco con suficiente certidumbre.

Todas las medidas de la Tierra, o las medidas de grado, efectuadas hasta la segunda mitad del siglo XVII obtenían valores contradictorios para el perímetro terrestre. Tal era la perplejidad entre los interesados en la cuestión, que Jean Baptiste Colbert, ministro del rey Luis XIV, decidió convocar a un grupo eminente de sabios para crear la Academia de Ciencias de París (1666) y acabar de una vez por todas con una preocupación secular. El Diccionario matemático recoge las medidas más señaladas del siglo XVI y XVII, subrayando la importancia que tuvo la de Jean Picard, uno de los miembros fundadores de la Academia, y obviando la relevancia que tuvo la previa del holandés Willebrord Snel van Royen (Snellius); no por la exactitud del resultado obtenido, al medir el arco de meridiano comprendido entre las ciudades de Alkmaar y Bergen op Zoom, sino por la metodología empleada para medir el desarrollo del arco: la triangulación a lo largo del mismo y la proyección posterior de sus lados sobre la línea meridiana para evaluarlo con el rigor debido¹⁹. También sorprende que no recogiera la medida que había efectuado en el Reino Unido el matemático y topógrafo Richard Norwood, máxime cuando fue referido por Isaac Newton en sus *Principia Mathematica*.

VALORES DEL DESARROLLO LINEAL DEL GRADO, PREVIOS A LA CREACIÓN DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE PARÍS			
AUTOR	AÑOS	UNIDAD	TOESAS
Fernel	≈ 1525	68.096 pasos geométricos	56746
Snellius	1615-1617	28.500 perchas del Rin	55021
Norwood	1635	365.167 pies ingleses	57300
Riccioli	1644-1656	64.363 pasos de Bolonia	62900

La Academia vio cumplido uno de sus objetivos con la medida del arco de meridiano, efectuada por el abate Jean Picard, la más rigurosa y exacta hasta entonces. El valor que dedujo para el desarrollo del arco de meridiano fue de 57.060 toesas²⁰, resultando así un perímetro de 20.541.600 toesas y un diámetro de alrededor de 6.541.910 toesas; muy próximos a los de la

¹⁹ Así debió entenderlo Picard cuando decidió hacer algo análogo en el llamado meridiano de Francia, definido por las ciudades de Amiens y Malvoisine, localizada esta última en las proximidades de París.

²⁰ La toesa, o braza francesa, fue una de las unidades antropométricas más ampliamente usadas en la historia de la geodesia moderna. Su patrón físico se localizó durante siglos en un escalón de la entrada principal del Châtelet de París, hoy desaparecido. En toesas se expresaron las medidas de arcos de meridiano o de paralelo practicadas durante todo el siglo XVIII y parte del XIX, hasta que fue sustituida por el metro; la relación entre ambas unidades lineales es $1 \text{ t} \approx 1.949 \text{ m}$.



Grabado de la Academia de Ciencias y de Bellas Artes, dedicado al Rey. Sebastien Leclerc, su muy humilde y fiel servidor. 1698.

circunferencia máxima de la esfera media de la Tierra. El abate francés marcó el colofón de la era esférica de nuestro planeta y paradójicamente el inicio de la era elipsoidal, puesto que en cuanto se revisaron sus cálculos y se prolongó el arco de meridiano que midió, se constató que la curvatura de la Tierra variaba con la latitud. Sorprende que en la geografía de Sanson ni se mencionase esa medida de Picard y aún más que tampoco apareciese referencia alguna a la controversia científica que se desató a propósito del modelo elipsoidal de la Tierra, en la edición que contó con la colaboración del prestigioso cartógrafo y geógrafo real Gilles Robert de Vaugondy y que apareció en el año 1743, tres años después de que Pierre de Maupertuis hubiera publicado sus *Éléments de Géographie*, en los que anunció formalmente el achatamiento elipsoidal de la Tierra.

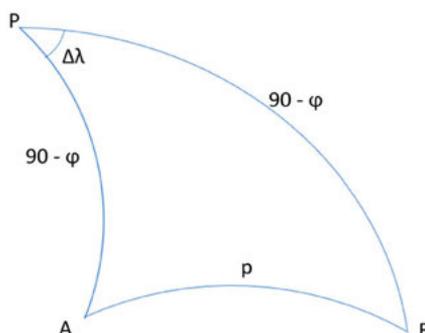
Conocido el desarrollo del grado de meridiano, procedía hallar su valor en un paralelo genérico; aunque en la actualidad se trate de una cuestión trivial, pues bastaría multiplicarlo por el coseno de la latitud correspondiente, en la época que nos ocupa era una tarea tediosa por la dificultad inherente a la falta de medios de cálculo. Se comprende así qué en el Diccionario matemático, a que nos venimos refiriendo, se propusieran sendas construcciones gráficas muy ingeniosas para lograrlo: a través de un cuarto de círculo o de un semicírculo divididos en noventa partes, habida cuenta que la diferencia entre la latitud del polo y del ecuador es de 90° . Ambas figuras, y sobre todo la del cuarto de círculo, recuerdan a la construcción elemental que se efectúa hoy día cuando se quiere ver la representación gráfica de las razones trigonométricas de un ángulo.

Al contrario de lo expuesto sobre el cálculo del desarrollo del grado de paralelo, en el supuesto de un círculo máximo arbitrario solo se limitó a plantearlo; añadiendo que se resolvería cada caso haciendo uso de la trigonometría esférica, a partir de las coordenadas geográficas de sus dos extremos. Evidentemente se mencionó la simplificación que se produciría cuando los dos puntos perteneciesen a un mismo meridiano, ya que la amplitud angular del arco se hallaría entonces como diferencia entre las latitudes de ambos (para puntos de un mismo hemisferio), o como suma en el caso en que los hemisferios fuesen distintos. La determinación del arco genérico de un círculo máximo es típica de la geodesia y puede resolverse aplicando una de las fórmulas de Bessel, o teorema del coseno, al triángulo esférico formado por el polo y los dos segmentos de meridiano que lo unen con los dos puntos dados. Los datos son evidentes: los dos lados que acaban de ser citados y el ángulo formado por los dos meridianos, la incógnita será por tanto el

lado opuesto al polo. Si las coordenadas de los dos puntos son A (φ_A, λ_A) y B (φ_B, λ_B), y el ángulo en P es $\Delta\lambda_{A^B}$, aplicando la fórmula referida se obtendría la ecuación siguiente:

$$\cos p = \sin \varphi_A \sin \varphi_B + \cos \varphi_A \cos \varphi_B \cos \Delta\lambda_{A^B}.$$

Una vez hallado el valor de p, se transformaría en radianes y se multiplicaría por el radio de la esfera para obtener el desarrollo deseado.



Termina este capítulo, como lo hacía el homólogo incluido en el repetido diccionario que nos ha servido de apoyo, esto es con unos breves comentarios acerca de las dos coordenadas geográficas: latitud y longitud. Le resultaba chocante a J. Ozanam que siendo la Tierra esférica se hablase en ella de largo y de ancho, cuando no tenía ninguna de esas características. No parece muy aventurado suponer, aunque él no lo hiciese, que las dos dimensiones predominantes en las primeras representaciones cartográficas planas del ecúmene, fuesen extrapoladas al globo terráqueo. Así debió establecerse para el ecuador de la Tierra una longitud de 360° y una latitud de 90° para el cuarto de sus meridianos, que van desde él hasta cualesquiera de sus polos. Se explica así que a los paralelos terrestres se les llamase también círculos de latitud y a los meridianos círculos de longitud. Así como la latitud puede ser boreal, o norte, y austral, o sur, la longitud puede ser oriental u occidental; pues se creyó que de esa forma resultaba más inteligible su comprensión que variando solo de 0° a 360°. Para la correcta evaluación de las longitudes se hubo de fijar un meridiano origen, el cual fue localizado por Tolomeo en las Islas Canarias, concretamente en la Isla de Hierro. En Francia se optó, con buen criterio, por seguir las directrices marcadas por el sabio cartógrafo. He aquí la reseña incluida en la Geografía de Sanson (1743): *En effet elle à été préférée en France, & il y a même eu un Arrêt du Conseil rendu sur ce sujet à S. Germain en Laye le premier Juillet 1634. Sous Louis le Juste de triomphante mémoire. C'est pourquoi nous plaçons la premiere longitude ou premier méridien à l'isle de Fer, la plus occidentale des Canaries.*



PUNTA DE ORCHILLA – EL HIERRO. LA MAS OCCIDENTAL TIERRA ESPAÑOLA. Se levantó este monumento en recuerdo del Meridiano del Hierro, origen de longitudes en la cartografía de diversos países europeos hasta mediados del siglo XIX. CAPITANIA GENERAL DE CANARIAS. 27 de mayo de 1989. El diseño lo realizó el Ingeniero Geógrafo y General Miguel Fe Serra.

Al coincidir la latitud con la altura del polo sobre el horizonte, su determinación no ofreció mayores dificultades, a lo largo de la historia, a los operadores que usaron cualquiera de los instrumentos matemáticos destinados a tal fin. Con la longitud sucedió todo lo contrario, su cálculo entrañó numerosas complicaciones, que no pudieron ser superadas hasta la segunda mitad del siglo XIX. Su correcta determinación se basó en la observación simultánea de un mismo fenómeno astronómico desde los dos lugares implicados, de manera que anotadas en ambos las horas locales del instante de la observación, su diferencia coincidiría con la diferencia de longitudes que se pretendía obtener (recuérdese la equivalencia $15^\circ \equiv 1^h$). Los fenómenos astronómicos fueron variados, aunque la observación de los eclipses de Luna, la medida de las distancias lunares y las emersiones o inmersiones de los satélites de Júpiter figuren entre los más señalados, tal como se ha indicado en los capítulos VIII y X de este mismo libro.

CAPÍTULO XII | El astrolabio estereográfico, de Tolomeo al rey Alfonso X el sabio



CAPÍTULO XII | El astrolabio estereográfico, de Tolomeo al rey Alfonso X el sabio

El astrolabio¹ es un instrumento matemático multifuncional y doblemente milenario con el que podían resolverse problemas de astronomía o de trigonometría esférica y abordar cuestiones astrológicas. Gracias a sus aditamentos pudieron realizarse variadas observaciones astronómicas del Sol y de las estrellas, las cuales condujeron al conocimiento de la hora de la observación y de las coordenadas geográficas del lugar desde el que se hicieron; con el astrolabio se efectuaron además toda clase de mediciones topográficas, destacando la medida de la altura de edificios singulares o la materialización de la línea meridiana, la primera dirección cardinal (norte-sur). La mayoría de las fuentes que abordan esta materia sitúan el origen del astrolabio en la última época de la Grecia clásica, aunque no sean unánimes al fijar el nombre de su inventor. Tal circunstancia queda reflejada en muchas obras, cristianas y musulmanas, figurando tanto Euclides como Aristóteles manejando un astrolabio, cuando todavía ni siquiera se vislumbraba la conveniencia de obtener una representación plana de la esfera.

Sí suele mencionarse con más sentido al gran geómetra Apolonio de Perга e incluso



Claudio Tolomeo sujetando un astrolabio. Alegoría de la navegación pintada por Paolo Gallari Veronese. *Los Angeles County Museum of Art.*

¹ Del griego antiguo ἀστρολάβος, *astrolabium*, en el latín medieval. Etimológicamente significa el que localiza estrellas.

al eminente Arquímedes, entendiendo que el primero de ellos podría haber pensado en la imagen plana de la esfera celeste como extensión de sus brillantes descubrimientos sobre las secciones cónicas y que el segundo habría necesitado tenerlas presente cuando formó los globos que se le suponen. Otras de las referencias apuntan en cambio a Hiparco de Nicea, en el segundo siglo a.C., en tanto que parece haber descubierto la proyección estereográfica, como medio ideal para lograr una representación plana y conforme de la esfera. Los defensores de esta otra posibilidad apoyan sus argumentos en que una de las partes consustanciales del astrolabio es precisamente una representación estereográfica de la esfera celeste, de ahí el nombre con el que a veces es referido el nomograma que nos ocupa.

Lo que sí parece incuestionable es que los primeros estudios sobre el astrolabio debieron concluirse en las postrimerías de la civilización griega, dando paso a la construcción de los primeros prototipos en los albores de nuestra era. De hecho se cree que el astrolabio como tal instrumento de observación y cálculo ya debió ser conocido por Claudio Tolomeo, hacia el año 150, y probablemente usado como tal para medir las alturas del Sol y de las estrellas sobre el plano del horizonte.

Las referencias relativas al astrónomo y cartógrafo egipcio son mucho más concretas. Ciertamente, ya en su celebrado *Almagesto* analizó el instrumento llamado indebidamente² astrolabio esférico o armilar, valiéndose de él para exponer su visión del universo. Más significativa fue la mención que hizo de la proyección estereográfica, usando el sur como vértice proyectivo, en su obra *Planisphaerium*³; refiriéndose en su capítulo XIV un instrumento horoscópico del que formaba parte un accesorio que recordaba a la araña, una de las piezas de que consta el astrolabio. Así lo recogía el matemático y astrónomo Otto Eduard Neugebauer en su artículo *The Early History of the Astrolabe*⁴, añadiendo que la construcción del astrolabio era un simple problema de geometría descriptiva derivado de la proyección



Planisphaerium Ptolemaicum sive machina orbium mundi ex hypothesi Ptolemaica in plano disposita. Andreas Cellarius. 1661.

² El astrolabio es un instrumento esencialmente plano. El llamado astrolabio esférico no es más que una versión de la esfera armilar.

³ Aunque el texto original fuese escrito en griego, luego fue traducido al árabe. Posteriormente fue estudiado y comentado por el sabio andalusí Maslamah ibn Ahmad al-Majriti. Terminó siendo traducido al latín en el siglo XII (Toulouse 1143) por Herman de Carinthia (*Hermannus Dalmata*), incluyendo los comentarios de al-Majriti.

⁴ *Studies in Ancient Astronomy*. JSTOR. Vol 40, Nº 3 (1949, pp. 240-256). Un epígrafe con igual denominación fue incluido por Emilie Savage-Smith en su escrito *Celestial Mapping*, segundo capítulo del libro *Cartography in the Traditional Islamic and South Asian Societies. Volume two. Book one. History of Cartography. The University of Chicago Press. 1992*. Su consulta ha permitido, en gran parte, la confección de este artículo.



Componentes de un
Astrolabio del siglo XVIII.

de la esfera sobre su plano ecuatorial, el cual coincidiría con el plano del instrumento; según él todos los detalles de su construcción fueron explicados por Tolomeo en la obra citada, incluyendo los valores numéricos relativos al paralelo de Rodas ($\varphi = 36^\circ$). Para él no cabía duda de que Tolomeo estaba al tanto del instrumento que más tarde recibiría el nombre de astrolabio, añadiendo que así lo confirmaba tanto Synesius⁵ como el filólogo bizantino Philoponus.

Antes de proseguir con la exposición cronológica, procede hacer un paréntesis para describir brevemente el astrolabio y tener así más elementos de juicio. Vistas las posibles y variadas prestaciones que tuvo, es obvio que ha de tratarse de un instrumento que encierra una cierta complejidad, como ponen de manifiesto sus principales componentes: madre, tímpano, araña, alidada, limbo y trono. La mayoría de los modelos fueron de latón y de bronce, aunque también se fabricasen modelos aislados de cartón o madera.

La madre no es más que la placa base que sirve de sostén a las otras partes del astrolabio, las cuales se empotraban mediante un perno en la perforación central de la misma. El borde de la madre era graduado, formando el limbo, para leer sobre él los valores de las distancias angulares observadas. En la parte superior de la madre se incorporaba el trono y el anillo de suspensión. Sobre el reverso de la madre se incorporaba información gráfica susceptible de ser empleada en diferentes observaciones: Escalas circulares graduadas, con subdivisiones para indicar los cuadrantes, señalando las posibles distancias cenitales que podrían ser medidas gracias a la alidada; Calendarios divididos en meses y días, concatenados con otro zodiacal, subdividido en los doce signos de 30° de amplitud, de manera que se pudiese posicionar el Sol sobre la eclíptica el día seleccionado; Escalas horarias divididas en 24 partes (horas equinocciales); Información gnomónica que podría facilitar la práctica de operaciones topográficas.

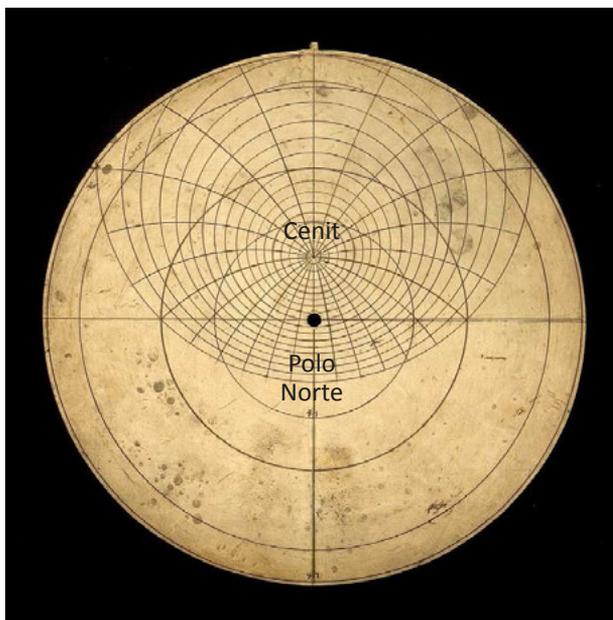
⁵ Sinesio de Cirene, obispo griego y discípulo de Hypatia (hija de Teón de Alejandría).



Anverso y reverso de un astrolabio persa del siglo XVII (Muhammad Muqin al-Yazdi). *History of Science Museum, Oxford.*

El tímpano es la parte fundamental del astrolabio, en tanto que se grababa sobre ella un planisferio celeste, es decir una representación plana de los elementos geométricos propios de la esfera armilar. Los más frecuentes fueron los círculos horarios, los paralelos, los almicantarades y los círculos verticales; para localizar sin ambigüedad a cualquier estrella, bien por medio de sus coordenadas ecuatoriales (ascensión recta y declinación) o de las horizontales (altura y acimut). Ha de tenerse presente que entre los círculos horarios y los verticales hay uno que juega un papel decisivo en la astronomía esférica, se trata del meridiano del lugar; definido como el círculo horario del cenit o como el vertical del polo. También debe recordarse que la imagen de una estrella sobre la esfera celeste se encuentra en la intersección del círculo horario y de un paralelo (o círculo de igual declinación), o bien en la de un vertical (o círculo de igual acimut) con un almicantarat (o círculo de igual altura sobre el horizonte). La representación plana de la esfera se obtenía proyectándola desde el polo sur sobre el plano tangente trazado en el otro polo, transformado así en el plano del cuadro.

Con semejante disposición se comprende que la imagen de los círculos horarios, que pasan por ambos polos, serán rectas radiales y concurrentes en el punto de tangencia. Las de los paralelos serán la intersección del cono que los proyecta con el plano tangente ya citado, de forma tal que, al tratarse de secciones rectas, serán circunferencias centradas en el



Tímpano diseñado para observar desde un lugar con una latitud de 45°.



Arañas pertenecientes a dos astrolabios del siglo XIV. Obsérvese que la corona exterior simula el cuerpo de un dragón, aunque sea la imagen del trópico de Capricornio. Generalmente la cabeza del dragón se situaba en el lado derecho.

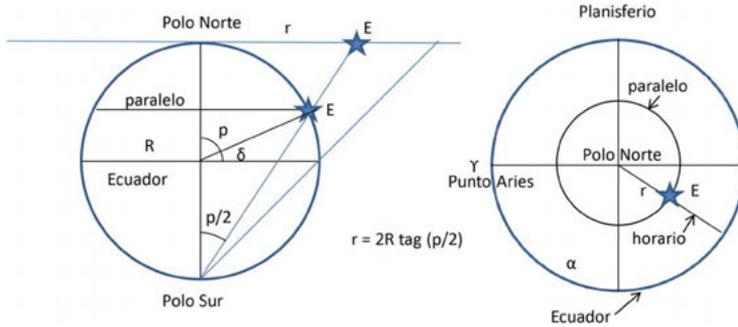
polo norte; debiendo destacar tanto el ecuador como los dos trópicos: Cáncer y Capricornio. Las imágenes de los verticales y de los almicantrades serán las secciones oblicuas del plano del cuadro con los conos que los proyectan sobre el mismo, consiguientemente serán una familia de cónicas ortogonales⁶; las de los primeros convergerán en el cenit y las de los segundos lo envuelven. Dicho punto y el polo definen, sobre el tímpano, la imagen del meridiano del lugar, coincidiendo la separación entre ambos con la colatitud del observador; tal hecho obliga a que la placa del tímpano variara de un lugar a otro, de ahí que ocasionalmente dispusiera el astrolabio de tantas placas como ciudades en las que cabría efectuar alguna observación astronómica.

La araña, también llamada red, es una de las componentes más llamativa del astrolabio, se empuja en la madre de modo que pueda girar libremente sobre la placa fija del tímpano. Gracias a ella se puede materializar la posición de varias estrellas notables⁷, entre 20 o 30, de la esfera celeste, por medio de punteros flamígeros muy característicos. Son elementos esenciales de las arañas los siguientes: un círculo graduado que representa a la eclíptica y facilita la localización del Sol; un segmento circular del ecuador celeste, próximo al solsticio de verano; el coluro equinoccial y una corona circular exterior interrumpida que simboliza al trópico de Capricornio⁸. La construcción de la araña se efectuaba teniendo la precaución de que la distancia entre su centro (el polo norte de la eclíptica) y el de la madre coincidiera con la oblicuidad de la eclíptica. La araña se completaba con una regla que permitía marcar sobre la eclíptica la época del año.

⁶ La proyección estereográfica es conforme y por tanto se conservan los ángulos entre curvas, al pasar de la esfera al plano

⁷ Vega, Arturo, la Espiga, Antares, Sirio, etc.

⁸ En ocasiones se materializaba con el cuerpo de un dragón, con la cabeza en el lado derecho; sirviendo esta y la cola como punteros estelares. Azucena Hernández Pérez hizo en el año 2015 un interesante trabajo sobre este particular. *El dragón en el astrolabio* (Universidad Complutense Madrid). Dicho artículo fue alabado por John Davis en otro más reciente *¿Why are there dragons on medieval astrolabes?* (Boletín de la Scientific Instruments Society. N.º 143. 2019). En él se amplió y actualizó la información correspondiente, recordando la leyenda del dragón que se tragaba al Sol en el momento de los eclipses; la cual podría haber influido en la costumbre de incorporar la figura del dragón en la araña del astrolabio. Curiosamente la leyenda se sigue recordando indirectamente al definir como mes draconítico el periodo de tiempo invertido por la luna en pasar dos veces por el mismo nodo, el lugar en que se situaba el dragón mitológico.



Transformación de la esfera celeste en planisferio. Localización de la estrella sobre el planisferio de la araña. Las coordenadas ecuatoriales de la estrella son α (ascensión recta) y δ (declinación).

La fijación de la proyección de la estrella sobre la araña no ofrecía dificultad alguna, ya que el valor del radio de la imagen del paralelo estelar resulta evidente cuando la proyección empleada es la estereográfica polar. Efectivamente, en la figura anterior se comprueba que la distancia de la estrella al centro del astrolabio depende naturalmente de su declinación, o de la distancia polar, obteniéndose sin dificultad el valor $2R \operatorname{tg}(p/2)$ o bien $\operatorname{tg}(p/2)$ en el supuesto de elegir $2R$ como unidad de medida.

La alidada era otra de las componentes móviles del astrolabio. Básicamente era una banda estrecha y sensiblemente rectangular fijada al centro de la madre. En sus dos extremos llevaba incorporados elementos de puntería con los que se conseguía visar la estrella deseada y leer sobre el limbo la distancia angular correspondiente, pues generalmente servía de índice el propio borde de la alidada.



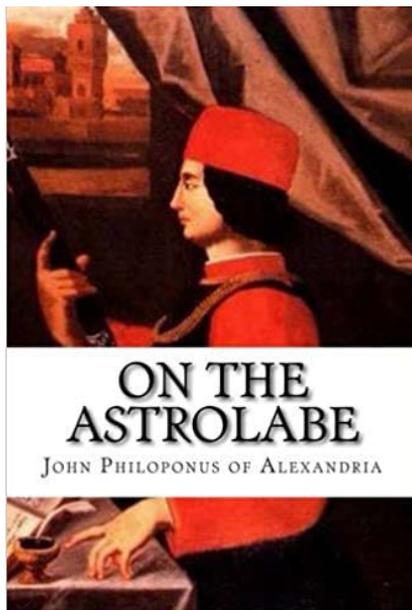
Alidada de un astrolabio flamenco (siglo xvi).



El trono de la izquierda es de un astrolabio sirio del siglo xiii. El de la derecha es de un astrolabio flamenco construido a mediados del siglo xvi por Gualterus Arsenius.

El trono era el aditamento situado en la parte superior del astrolabio que incorporaba el asa, o colgadero, con la que el operador sujetaba el instrumento en posición vertical, mientras que efectuaba la puntería a la estrella. Ocasionalmente eran muy elaborados y sumamente decorativos.

Cerrado el paréntesis, continuamos en este punto con el relato cronológico señalando que los manuales más antiguos dedicados a los astrolabios se publicaron en los primeros siglos de la era cristiana. Al parecer fue Teón de Alejandría quien lo hizo en primer lugar durante el siglo IV, cuando escribió acerca del pequeño astrolabio para explicar su construcción y manejo. La influencia de este astrónomo se dejó sentir en todos los trabajos que fueron apareciendo poco después. Así sucedió con la aportación de Sinesio de Cirene, que se refirió no solo al astrolabio en sí mismo sino que también lo hizo para referirse al de plata que regaló a Paeonius, un personaje influyente de Constantinopla. El filósofo alejandrino Amonio de Hermia también escribió un opúsculo sobre la construcción y uso del astrolabio, destinado a sus alumnos. De entre todos ellos destacó el ya citado Philoponus⁹, el cual escribió en el año 530 una obra centrada especialmente en la descripción de los elementos geométricos del astrolabio. Ese tratado fue traducido al inglés por Herbert Wilson Greene en el primer tercio del pasado siglo XX y ha sido puesto a la venta muy recientemente.



Beloved Publishing. 2015. Pickerington. Ohio (USA).

A mediados del siglo VII apareció la obra de Severo Sebokht, el obispo nestoriano de Quenneshri¹⁰, una publicación sobre el astrolabio plano escrita en siríaco e influenciada por las fuentes griegas; al igual que en los casos previos obvió las discusiones teóricas¹¹ y se concentró más en las cuestiones prácticas, detallando las posibles aplicaciones del instrumento en sus veinticinco capítulos. El interés despertado por el astrolabio llegó a extenderse por todo el imperio bizantino, alcanzando especialmente a la ciudad estratégica de Harrán y luego a Persia. Dicha ciudad se convirtió en un centro de obligada referencia donde proliferaban las traducciones al árabe de textos relacionados con la ciencia y la tecnología griega, auspiciadas por el califato abasí. Ello trajo consigo la congregación de astrónomos y matemáticos, animados por los proyectos de califas como al Ma'mum. Desde un principio sobresalió el astrolabio como instrumento indispensable para saber las horas de los rezos y la quibla, esto es la dirección de la Meca.

De acuerdo con el bibliógrafo Ibn al-Nadim uno de los pioneros en la construcción del astrolabio fue Abywn al-Batriq, al que situó en la frontera de la llegada del Islam; aunque acto seguido afirmara que el primero en hacerlo había sido el astrónomo al-Fazari, contemporáneo del califa

⁹ Juan Filópono, teólogo cristiano con un saber enciclopédico. Se enfrentó a los sectores más intransigentes del cristianismo que se oponían a la esfericidad de la Tierra.

¹⁰ Una ciudad a unos 40 km al sur de la ciudad de Alepo.

¹¹ No obstante ha de recordarse que también escribió un tratado sobre las constelaciones.



Astrónomos y matemáticos árabes en un taller matemático. En la esquina derecha de la mesa se representa un astrolabio.

al- Mansur en la segunda mitad del siglo VIII. Esa aplicación religiosa del astrolabio convirtió a este en un instrumento valioso e inseparable de las personas cultivadas, entendiéndose así el espectacular desarrollo posterior, proliferando en los siglos siguientes manuales preparados por especialistas árabes, persas y judíos. El más remoto de todos ellos¹² (La construcción y el uso de los astrolabios) fue debido a Mā Shā' Allāh ibn Atharī¹³ en torno al año 815, según escribió el ya citado Ibn al-Nadīm. El autor fue un astrónomo persa que profesaba el judaísmo, no se conserva el texto árabe original pero si muchas de sus versiones latinas, que influyeron en la obra de autores tan reconocidos como Johannes de Sacrobosco.

A todo lo largo del siglo IX se escribieron numerosas obras, destacando la del gran matemático Muhammad ibn Musa al-Khwarizmi (fl.825), al que se debieron dos textos referidos al astrolabio, uno detallando su construcción y otro su empleo. Otras obras relevantes fueron las escritas por ibn Isā¹⁴ (fl.830) y por al Fargani (fl.837). Se conserva en Berlín el manuscrito que este segundo hizo sobre el manejo del astrolabio (*kitāb al-'amal bi'l-asturlab*), habiéndose traducido al latín (*Sententie Astrolabii*¹⁵) y al alemán. Otra figura relevante de la astronomía musulmana fue al-Battani, nacido en Harrán a mediados del siglo IX, el cual manejó toda clase de instrumentos y explicó el fundamento matemático del astrolabio. Conocido también con el nombre latino de Albateniū, ejerció una poderosa influencia sobre los astrónomos que le sucedieron, incluidos los europeos de los tiempos modernos. De su prestigio entre la comunidad astronómica da idea el hecho de que llegase a ser considerado como el Tolomeo de los árabes. En el siglo siguiente destacó el astrónomo de origen persa Abd al Rahman al-Sufi, universalmente considerado por su Libro de las estrellas fijas (*Kitāb suwar al-kawākib*), bellamente ilustrado con las imágenes de todas las constelaciones de su tiempo. También colaboró decisivamente para que la traducción

¹² Según al Biruni, Abywn al- Batriq escribió también un tratado sobre el astrolabio..

¹³ También conocido como Messahala por los traductores latinos.

¹⁴ Realizó diversas observaciones astronómicas en Bagdad y Damasco, subvencionadas también por el califa al Ma' mūm.

¹⁵ Incluida por Josep M.ª Millàs Vallicrosa en su conocida obra: *Assaig d'història de les idees físiques i matemàtiques a la Catalunya medieval*, Barcelona, Estudis Universitaris Catalans, 1931.



Dos ilustraciones en el tratado del astrolabio de al Biruni. En la de la izquierda figura la madre y la alidada, mientras que la derecha presenta la araña. *British Library.*

al árabe de las fuentes astronómicas griegas fuese una realidad. Fue el autor de un extenso texto sobre el astrolabio, en cuyos 386 capítulos se fueron detallando mil de sus posibles aplicaciones.

En el año 973 nació uno de los mayores eruditos islámicos de todos los tiempos, además de haber de haber sobresalido entre los sabios medievales más creativos y profundos, el astrónomo, cartógrafo y geodesta persa al Biruni. En varias de sus obras abordó el problema genérico de la representación plana de la esfera celeste, usando para ello diferentes sistemas proyectivos. Escribió expresamente un tratado sobre la construcción del astrolabio (Libro de perlas relativo a la proyección de las esferas). Por otro lado, en su Libro de instrucciones sobre el arte de la Astrología, mencionó un tipo peculiar de astrolabio al que llamó *mubattakh* (con forma de melón¹⁶), describiendo igualmente sus componentes y la práctica de sus posibles aplicaciones. Concluimos esta



Dos astrolabios del siglo XIII, el de la izquierda es hispánico y el de la derecha persa. *Museum of History of Science. Oxford.*

¹⁶ Porque los almicantarades y la eclíptica figuraban aplastados y con la forma elíptica del melón.

reseña sobre al Biruni recordando su opúsculo sobre el astrolabio, titulado *Kitāb isti‘āb al-wujūh al-mumkinah fī ṣaṣn’at al-aṣṭurlāb*, una de cuyas copias se conserva en la sección de manuscritos medievales de la *British Library*.

El incuestionable interés despertado por el cultivo de la astronomía en el mundo musulmán¹⁷ explica por sí mismo el imparable desarrollo instrumental y la creación de florecientes talleres científicos, sin parangón en su tiempo, con una producción vasta y cuidada como atestiguan los múltiples ejemplos que se conservan repartidos por los diferentes museos de ciencia. El ejemplo dado por Siria durante los siglos VIII, IX y X cundió rápidamente por los otros territorios dominados por el Islam, desde el sur de la Península Ibérica hasta la región más occidental de la India. Seguidamente, las diversas factorías fueron adquiriendo su propio estilo, dependiendo de la región en las que se crearon: desde los utilitarios del oeste a los más ornamentales de las zonas orientales localizadas tanto en Persia como en la India.

La presencia de los árabes en al-Andalus fue valorada positivamente por los soberanos del resto de Europa, a tenor del envío de embajadores a Córdoba, a finales del siglo IX, por parte de Carlos II de Francia y Otón I de Alemania. La influencia musulmana se dejó sentir en los territorios cristianos del Noreste y más concretamente en monasterios como el benedictino de Ripoll, debiéndose al astrónomo Lupitus Barchinonensis (Seniofred Llobet)¹⁸ el primer tratado latino sobre el astrolabio, apoyado en fuentes árabes no identificadas. Al parecer fue el tutor de Gerbert d’Aurillac¹⁹ durante su estancia en Ripoll (967-970) para estudiar ciencias árabes, aunque se asegura que también lo hizo en Sevilla y Córdoba. Años más tarde, siendo ya obispo de Reims, escribió a Lupitus solicitándole una traducción de un manuscrito árabe (*Sententiae Astrolabii*) en la que apoyarse, para poder realizar el suyo (*Liber de utilitatibus astrolabii*), contribuyendo así a la difusión de este instrumento por toda Europa²⁰ y de otros instrumentos matemáticos también contruidos por él. Gerbert d’Aurillac fue además de sabio un actor político de primer orden, con aportaciones tan singulares como el descubrimiento del *quadrivium*, las cuatro ciencias de su tiempo: aritmética, geometría, música y astronomía.

De esa misma época data el llamado astrolabio carolingio o de Barcelona, descubierto por Marcel Destombes y cedido en 1983 al Instituto del Mundo Árabe (París); aunque se conserve una copia en la ciudad condal. El astrolabio parece que fue construido en el occidente cristiano, a tenor

¹⁷ Sirva de botón de muestra la referencia al astrolabio incluida en las memorias de Abd Allah, el último rey zirí de Granada: «en el Alcorán recito las palabras de Dios y en el astrolabio reflexioné sobre la creación de Dios, porque la astronomía es una manera de adorarlo».

¹⁸ Fue además archidiácono de la catedral de Barcelona entre 975 y 995. Gozó de la protección de Borrell II, conde de Barcelona, Girona, Osona y Urgel. No está del todo clara la identidad de este astrónomo, para el francés François Picavet podría tratarse de Abdallah Mahomet Ibn Lupi, tutor árabe del rey de León y Asturias Ordoño II.

¹⁹ El interés por la ciencia en el califato cordobés propició que esta pudiera influir en occidente, gracias a las múltiples traducciones realizadas por personajes tan señalados como el monje Gerbert d’Aurillac, futuro papa Silvestre II.

²⁰ A mediados del siglo X ya se tenían noticias del astrolabio al norte de los Pirineos, así se desprende de la documentación científica compilada en el Monasterio de Santa María (Ripoll, Girona). En el siglo siguiente llegó incluso a emplearse en Inglaterra durante el año 1092, a propósito de un eclipse de luna que fue visible desde la Península Ibérica; siendo el observador Walcher of Malvern, prior de la abadía de igual nombre (Reino Unido), el cual usó su propio astrolabio para fijar la hora del mismo. Se cree que la verdadera difusión del astrolabio en las sociedades cristianas vino de la mano del mismo instrumento y de su uso, más que de los complicados y densos Tratados del Astrolabio que también nos han llegado, tanto en árabe como en sus traducciones al latín y a las lenguas vernáculas. No es aventurado asegurar que en los siglos venideros continuaron empleándose los astrolabios hispánicos, buena muestra de ello es que el astrónomo polaco Marcin Bylica todavía usaba un astrolabio cordobés a finales del siglo XV.



Frente y espalda del
astrolabio carolingio.
Año 980.

de las inscripciones latinas que contiene. Por la posición que tienen las estrellas de su araña se dedujo que debió de haber sido construido en torno al año 980. Por los caracteres de las palabras FRANCIA y ROMA que figuran en el mismo pudiera concluirse que su origen es catalán, máxime cuando se indica muy aproximadamente la latitud de Barcelona ($41^{\circ}30'$). No obstante parece poco probable que fuese construido en Cataluña, dado el escaso bagaje astronómico del occidente cristiano; es más verosímil pensar que fuese construido en al Andalus por encargo expreso de algunos de sus monasterios: Ripoll, Sant Gugat del Vallès o Vic, que mantenían relaciones con los sabios andaluces. Tanto la fecha de su posible construcción como el valor de la latitud permiten sospechar que el astrolabio pudiera haber sido usado por el astrónomo Lupitus (Llobet).

Durante el periodo califal (929-976) no dejaron de construirse astrolabios en al Andalus, continuando así en el primer tercio del siglo XI. Fue entonces cuando aparecieron los del astrónomo Muḥammad ibn al-Şaffār; uno de ellos parece ser de los más antiguos datados en Europa, constando su tímpano de las siete placas o climas siguientes: La Meca, Medina, Zaragoza, Samarra, El Cairo, Toledo y Constantinopla; de manera que debió de construirse probablemente en Toledo o en Zaragoza. Abū al-Qāsim Aşbaugh ben Muḥammad ben al-Samḥ al-Gharnāṭī, más conocido como Ibn al-Samḥ, fue según el historiador almeriense Sa'd al-Andalusí autor de dos libros sobre el instrumento llamado astrolabio: uno de ellos, dispuesto en dos capítulos, daba a conocer como fue fabricado y el otro, relativo al uso del astrolabio, explicó todas sus utilidades, estando dividido en 130 capítulos.



Anverso y reverso del
astrolabio de Muhammad
ibn al-Saffār, construido
entre 1026 y 1027. Tiene
un diámetro de 15.5 cm y
se conserva en el *National
Museum of Scotland*.
Edinburgh.



Euclides, sosteniendo lo que parece un nocturlabio y un tubo para visar las estrellas, y Herman con un astrolabio en el que se aprecia la alidada.

En aquella misma época desarrolló su labor de traducción otro monje benedictino, Herman von Reicheneau²¹, al que se debieron dos obras sobre el astrolabio: *De mensura astrolabi liber* y *De utilitatibus astrolabii*, incorporando en la segunda la resolución de 21 ejercicios y un anexo con un texto escrito por Gebert sobre la misma materia. Las traducciones del árabe al latín no fueron un hecho aislado, llegando a convertirse en la tónica dominante durante todo el siglo XII, cuando la patria de Averroes y Maimónides, y fundamentalmente Toledo, era considerada como el centro cultural por excelencia, al que obligatoriamente había que acudir para poder tener acceso a las fuentes árabes y por ende a las clásicas griegas²².

Contemporáneo de Herman es el llamado astrolabio de Regensburg (Ratisbona), construido probablemente en atención a las inquietudes astronómicas de Wilhelm von Hirsau prior de la abadía benedictina St. Emmeram. Una escultura, sustentada por una columna, en la se representa a un personaje acompañado por un disco de piedra sobre el que se proyectó la esfera celeste; figurando graduada la corona circular que lo bordea y lo que parece ser un calendario zodiacal. La altura de la columna es de 2.5 m, siendo 60 cm el diámetro del disco. En una de sus caras figuran las líneas que representan a los trópicos y a los círculos polares, además del ecuador y la eclíptica. Al parecer fue construido expreso para esa localidad, ya que la inclinación de su eje norte sur es de 48°, un valor próximo a la latitud de la misma ($\approx 49^\circ$). Actualmente se expone en *Museen der Stadt Regensburg*.

En el año 1067 nació en Denia, Abusalt Omeya ben Abdelaziz ben Abisalt, un maestro enciclopédico al que se le atribuye la autoría de un tratado sobre la construcción del astrolabio, mientras estuvo preso en Egipto²³. En la segunda mitad de ese mismo siglo XI sobresalió la figura de

²¹ También conocido con el nombre latino de Hermannus Contractus, en alusión a un defecto físico que lo postró en una silla de ruedas.

²² Las traducciones de aquella época requerían la colaboración de dos traductores: uno judío que lo hacía del árabe a la lengua vulgar y otro cristiano que traducía al latín los textos así obtenidos.

²³ *Biografía de Abusalt de Denia* (pág. 26) escrita por el arabista ángel González Palencia. En el año 1915 leyó su tesis doctoral: *Rectificación de la mente. Tratado de lógica por Abusalt de Denia*. Texto árabe, traducción y estudio previo.



El astrolabio Regensburg (1052-1065) que perteneció a la abadía benedictina de San Emerano. Ratisbona. Baviera. Alemania.

Ibrahim ibn Said al-Sahli, destacado constructor de astrolabios, entre los años 1067 y 1086. La mayoría de ellos fueron presentados en Valencia y Toledo, signándose en esta última el conservado en el Museo Arqueológico Nacional, teniendo además constancia de que colaboró con su hijo en la fabricación de un globo celeste. El astrolabio de ibn Said es una de las joyas astronómicas que custodia el museo madrileño, no en vano fue calificado por la profesora Azucena Hernández Pérez como «una de las mejores piezas de la producción medieval peninsular y confirma el esplendor que vivió la astronomía y la ciencia en general en el reino taifa de Toledo durante²⁴ la segunda mitad del siglo XI».



Frente, dorso y araña del astrolabio de Ibrāhīm ibn Saʿīd al-Sahlī. Toledo, 1067. Museo Arqueológico Nacional (nº inv. 50762). Fotografía de A. Hernández Pérez²⁵.

²⁴ El periodo califal transcurrió entre los años 1031 y 1090.

²⁵ *Astrolabios en al-Andalus: una historia de éxito*. Azucena Hernández Pérez. Universidad Complutense de Madrid. 2019.



Astrolabio universal del siglo XIII confeccionado de acuerdo con la doctrina de Azarquiel. Procede del norte de África. Las estrellas de la araña se fijan a través de sus coordenadas eclípticas: latitud y longitud. *Museum Science History, Oxford.*

En este siglo XI tuvo lugar en Toledo un acontecimiento científico que modificó la propia concepción del astrolabio y consiguió eliminar uno de sus principales inconvenientes: la necesidad de sustituir la placa del tímpano cuando variaba la latitud del observador. Dos fueron los astrónomos responsables de tan novedoso instrumento, que más tarde sería conocido como astrolabio universal, habida cuenta de que podía utilizarse en cualquier lugar, con independencia de su latitud geográfica. La innovación principal consistió en sustituir el plano del ecuador en la proyección estereográfica por el del coluro solsticial. El primero en tomar esa iniciativa fue Ali ibn Khalaf con su tratado sobre el empleo de la lámina universal, cuya versión al castellano fue incorporada dos siglos después en los Libros del Saber de Astronomía, por indicación de Alfonso X el Sabio²⁶. También se debió a él la construcción, en 1071, de un astrolabio universal (*al-asturlāb al-ma'mūnī*) dedicado al gobernador de Toledo al-Ma'mūn. El soporte geométrico de la lámina universal se basaba en una doble proyección estereográfica de la esfera celeste. En efecto, uno de sus hemisferios se proyectaba desde el punto Aries (equinoccio de primavera) y a la imagen así obtenida se le superponía la proyección homóloga del otro hemisferio, obtenida a partir del equinoccio opuesto, es decir el punto Libra. Seguidamente se grabaron sobre la madre los lugares geométricos asociados a las longitudes y latitudes eclípticas, en las que la eclíptica es el plano fundamental. El diámetro horizontal representaba justamente a esa línea, figurando además los nombres de los signos zodiacales. Tales curvas también podían ser consideradas, en caso necesario, como imágenes de los almicantrades y verticales que son propios de las coordenadas horizontales. A la placa universal se le superpuso una araña que disponía de dos índices. Una de sus mitades representaba la red ortogonal de curvas asociadas a los paralelos celestes y a los horarios, propios de las coordenadas ecuatoriales, mostrando la otra una selección de estrellas localizadas en ambos hemisferios²⁷.

Sin embargo, el protagonista más señalado de tan novedosa modificación instrumental fue el toledano Abū Ishāq Ibrāhīm Ibn Yahyā al-Naqqāsh al-Qurtubī al-Zarqālluh, más conocido en

²⁶ Coronado como rey de Castilla en el año 1251.

²⁷ Puig R. (2007) *çAli ibn Khalaf: Abū al-Ḥasan ibn Aḥmar al-ṣaydalānī*. In: Hockey T. et al. (eds) *The Biographical Encyclopedia of Astronomers*. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30400-7_36.

occidente como Azarquiel, el mejor astrónomo español de todos los tiempos²⁸. Tres fueron los tratados que escribió sobre el astrolabio universal que había diseñado, uno de los cuales dedicó al mismo gobernador de Toledo, siguiendo así la pauta de su tiempo. La innovación de Azarquiel consistió en introducir una placa con las coordenadas eclípticas, una vez proyectadas estereográficamente sobre el plano del coluro solsticial. Tanto los meridianos como los paralelos eclípticos figuraban graduados a intervalos de cinco grados, superponiendo la proyección obtenida a partir del punto Aries con la obtenida tomando el punto Libra como vértice de la proyección. Teniendo en cuenta el valor que tenía, en su época, la oblicuidad de la eclíptica, superpuso a la retícula de tales coordenadas la homóloga asociada a las ecuatoriales, graduando los paralelos celestes y los horarios con la misma equidistancia de cinco grados. Con semejante disposición se facilitó sobremanera la colocación de las estrellas elegidas.

El nuevo instrumento fue conocido con el nombre de al-Safihah al-Zarqalliyah, atendiendo al de su inventor; aunque en Europa se eligiese el de azafea, o *saphea Azarchelis*. No obstante, el propio Azarquiel la llamó placa de al Ma'mun en el astrolabio que dedicó al gobernador de Toledo²⁹, antes de trasladarse definitivamente a Córdoba. En los otros dos borradores del tratado la llamó *safibah Abbadiyah*³⁰, o placa de Abbadid, reconociendo así el mecenazgo de Muhammad II al-Mu'tamid, gobernador en Sevilla de la dinastía Abasí y rival de su homólogo toledano Yahya al Ma'mun. La versión más extensa de su tratado sobre la azafea fue traducida al castellano³¹ por indicación del rey Alfonso X el Sabio, figurando como tal en los *Libros del Saber de Astronomía*. El astrolabio universal de Azarquiel fue mejorado



Azafea andalusí conservada en la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona. Fue construida en 1252 por Muhammadq ibn Muhammad ibn Hudhayl en la ciudad de Murcia.

²⁸ Entre sus obras astronómicas más conocidas sobresalen las famosas Tablas toledanas, transformadas luego en alfonsies. Tales tablas se basaron en un almanaque previo que fue traducido al latín décadas después de su muerte (Córdoba 1100) por Gerardo de Cremona. De esa forma la astronomía pudo renacer en el mundo cristiano occidental tras siglos de oscuridad. *Azarquiel, el astrolabio y la azafea: su aportación a la ciencia astronómica y a la navegación del renacimiento*. Alfredo Suroca Carrascosa. Boletín de la Real Sociedad Geográfica. CLIV, 2019 (115-138).

²⁹ La profesora Azucena Hernández Pérez, defiende con toda razón que *no fue sólo el reino taifa de Toledo el que contribuyó al esplendor de la ciencia y la manufactura de instrumentos científicos como los astrolabios en al-Andalus durante el siglo XI. Nos han llegado muy buenos ejemplares diseñados y manufacturados en los reinos taifas de Zaragoza, Valencia, Denia y Córdoba.*

³⁰ Alhabedia sevillana.

³¹ José María Millás y Vallicrosa, dejó escrito en su obra sobre la azafea (Barcelona. Artes Gráficas.1933) que se hicieron versiones más cortas del tratado, las cuales fueron transmitidas a occidente a través de las traducciones del marsellés Jacob ben Machir ibn Tibbon y de William el inglés; siendo palpable su influencia sobre el constructor de instrumentos holandés Gemma Frisius, en el siglo XVI.

muchos años después, llegando a reinventarse en la ciudad siria de Alepo por parte del astrónomo Ibn al Sarraj en el año 729 de la hégira (1328-1329). Su diseño fue más complicado y elaborado que el de la azafea, hasta el extremo de ser considerado en la actualidad como el instrumento astronómico más sofisticado tanto de la Edad Media como del Renacimiento. El astrolabio fue construido por encargo de Muhammad al-Tanukhi, llevando grabado en sus bordes los nombres de cuatro de sus propietarios, dos de los cuales ejercían el oficio de muwaqqit.

Llegados al siglo XII, ha de reseñarse la aparición de numerosas traducciones de obras árabes y de los tratados originales reeditados en latín. Entre sus autores cabe recordar a Adelardo de Bath, Juan el Sevillano³², Platón de Tívoli, Gerardo de Cremona y Raymond de Marsella. A este último se debió un tratado sobre el empleo del astrolabio (1141), junto a una tabla con las coordenadas estelares, que no fue más que una adaptación de las tablas confeccionadas por Azarquiel, señalando asimismo el modo de corregir el astrolabio por los efectos de la precesión. En esa época el astrolabio se había convertido ya en el instrumento astronómico por excelencia y en el verdadero símbolo de esa disciplina científica. Aunque solo sea a título anecdótico, no me resisto a recordar que los célebres amantes Abelardo y Eloísa le pusieron a su hijo el nombre de Astrolabio, el cual acabaría siendo canónigo en la diócesis de Nantes. De aquel entonces se conservan numerosas muestras iconográficas en las que la representación del astrolabio siempre solía ocupar un lugar destacado³³. Solo a título de ejemplo se citan las existentes en las catedrales francesas de Sens y de Laon. En el primer caso, se representa al operador visando el cielo a través de la alidada³⁴, lo que permite sospechar que se quiso simular una observación nocturna; en cambio en el segundo ejemplo parece representar una observación diurna por la posición relativa del instrumento y del observador.



Dos observaciones con el astrolabio. La de la izquierda se encuentra en la entrada principal de la Catedral de Sens y la de la derecha en el rosetón norte de la Catedral Notre-Dame de Laon.

³² Tradujo varias obras de Messahala sobre el astrolabio: Usos y composición del mismo, aunque el más conocido fuese el titulado *Scito quod astrolabium...*. Quizás sea esta traducción el tratado sobre el astrolabio más reproducido, figurando todavía en manuscritos hechos a comienzos del siglo XVI.

³³ La aparición del astrolabio en la iconografía religiosa siguió siendo habitual en los siglos venideros, un buen ejemplo de ello es el magnífico óleo sobre tabla de San Agustín que hizo el pintor flamenco Jan van Eyck entre 1440 y 1442, figurando el instrumento colgado del estante de la librería que figura al fondo de la imagen. Con esta representación vino a recordar el interés por la astronomía de este padre de la iglesia, el cual le llevó a abandonar el maniqueísmo al que estuvo tan atado.

³⁴ Es muy lamentable la desaparición de la cabeza del astrónomo y de la mitad del astrolabio, posiblemente debida al furor iconoclasta que caracterizó a la revolución francesa.

En el primer tercio del siglo XIII, justamente entre 1221 y 1222, se construyó en la ciudad persa de Isfahán un astrolabio muy peculiar, puesto que además de sus prestaciones habituales permitía ser usado como calendario; posibilitando igualmente la reproducción de los movimientos del Sol y de la Luna. Tales movimientos se mostraban a través de sendas ventanas circulares abiertas en el dorso del instrumento. El constructor fue Muhammad ibn Abi Bakr al-Rashidi, el cual incluyó dos pequeñas anillas en la araña con las que se podía materializar una cierta visual, independientemente de la alidada existente en la otra cara del astrolabio. El instrumento contaba además con dos placas circulares móviles, que giraban dentro de la escala ligada al calendario zodiacal. Asimismo incluía junto a una de ellas un pequeño hueco sensiblemente rectangular por el que se podía leer, en caracteres alfa numéricos, la edad de la luna³⁵.

En ese mismo año 618 de la hégira, Muḥammad ibn Fattūḥ al-Jamā'irī hizo lo propio con el que se presenta a continuación. La fecha y el lugar en que se fabricó están grabados en el propio instrumento: «*en el nombre de Dios. Hecho por... en la ciudad de Sevilla en el año 618 de la Hégira (٦١٨ هـ)*». Su araña constó de 29 estrellas, si bien cuatro de sus punteros han desaparecido, al igual que la alidada; presenta la particularidad de que las divisiones del limbo son perceptibles al tacto, facilitando así su empleo en horas con poca luz. Su tímpano disponía de diez climas.

Se tiene constancia de que a mediados de este siglo XIII el astrónomo accitano Ibn Arquam al Numayri reivindicó en al Andalus la utilidad del astrolabio lineal diseñado por el iraní Nasir al Dim al Tusi³⁶, de ahí que el instrumento fuese también conocido con el nombre de bastón de al Tusi. Se trataba de una especie de goniómetro indirecto que permitía determinar la altura del



Las dos caras del astrolabio de al Rashidi, llamado también al-Ibari al-Isfahani. *Museum of the History of Science. Oxford.*



Cara frontal del astrolabio de al-Jamā'irī y araña del mismo. *History of Science Museum. Oxford.*

³⁵ La edad de la luna es una medida de sus fases, contando el número de días desde la última luna nueva.

³⁶ Fue considerado como el operador astronómico más eminente entre Tolomeo y Copérnico. También escribió trabajos sobre instrumentos, especialmente sobre la construcción y uso del astrolabio.



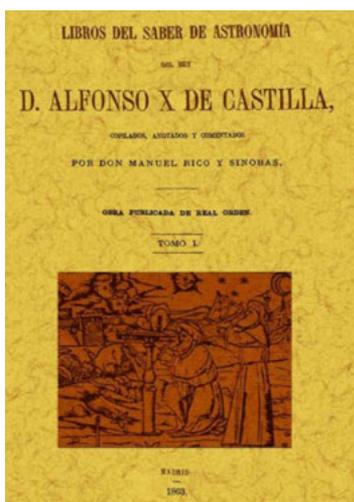
Alfonso X el Sabio. Óleo sobre lienzo de Eduardo Gimeno y Canencia (c.1857). El rey posa su mano sobre un pergamino de *Las Siete Partidas*, el cual se encuentra en una mesa sobre la que se apoyan *Las Tablas Astronómicas o Alfonsíes*. La obra pertenece al Museo del Prado aunque esté depositada en el Ministerio de Justicia.

astro sobre el horizonte en función de las longitudes de tres cuerdas que pendían del instrumento. De la misma época fue el matemático y astrónomo magrebí al Marrakushi ibn al Banna, hijo de un arquitecto granadino, el cual escribió el libro titulado *La vía del que busca la ecuación de los Planetas*; compuesta por tablas astronómicas y un calendario, además de dos resúmenes sobre el uso de la azafra de Azarquiel. Gran admirador de este último, escribió un manual de astronomía en el que incluyó unas tablas derivadas de las que había escrito Azarquiel: *Minhāj al-tālib fi ta'dīl al-kawākib*³⁷ (El método de los estudiantes para el cálculo de las posiciones planetarias). La mayoría de sus escritos fueron dirigidos a sus alumnos, de ahí que fuesen breves, claros y concisos.

El rey toledano Alfonso X de Castilla fue contemporáneo de esos últimos astrónomos, ya que su reinado tuvo lugar durante el periodo comprendido entre los años 1252 y 1284. Su interés por el conocimiento, heredado de su madre Beatriz de Suabia, le hizo crear en torno a su propio palacio un *scriptorium*, al que convocó a los traductores más reconocidos de su tiempo y de las tres religiones dominantes: cristiana, judía y musulmana. El encargo que recibieron fue ambicioso: la recopilación enciclopédica de todo el saber antiguo y de la época, «para que cuando lle cataren los omes en sus libros, que fallasen en ellos las cosas que quisieran saber, et para que aquellos non se perdiesen». El resultado obtenido fue exitoso, aunque su redacción en castellano dificultara su pronta difusión; no obstante se dejó sentir sobre el mismo nombre del rey, que pasó a la posteridad como el astrónomo Alfonso X el Sabio³⁸. De entre toda su producción científica solo se referirán muy

³⁷ Fue extremadamente popular en el Magreb. Una de sus obras más conocida fue *Qānūn fī ma'rīfat al-awqāt bi'l-hisāb* (Reglas para calcular la hora), especialmente dirigida a los muecines e imanes responsables de fijar las horas de la oración y el comienzo de los meses lunares.

³⁸ El pintor italiano Gaetano Palmaroli hizo un retrato de Alfonso X, en su taller madrileño, cuya litografía (conservada en la Biblioteca Nacional) tiene un pie que reza así: *nació en Toledo en 1221, hijo de D. Fernando 3º Rey de Castilla y de Beatriz de Alemania. Subió al trono en el año 1252 y elegido Emperador de Alemania el de 1256. En todo fue superior a su siglo, sus profundos conocimientos en astronomía, matemáticas, historia y jurisprudencia, justifican el título de Sabio con que la posteridad le conoce. Creó la grandeza de la Lengua Castellana, redactándose en ella los documentos públicos, y escribiéndose la primera historia y general de España. Formó el fuero real y el célebre código de las partidas, con lo que metodizó la legislación castellana. Este monarca fue el genio de su siglo, si bien murió lleno de disgustos domésticos en Abril de 1284.*



El Catedrático de Ampliación de Física de la Universidad Central de Madrid, Don Manuel Rico y Sinobas, junto a la portada de su monumental trabajo sobre el Libro del Saber de Astronomía. La imagen es una reproducción del cuadro conservado en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid.

brevemente sus celebradas tablas alfonsíes y con algo más de extensión los no menos relevantes Libros del Saber de Astronomía.

Las tablas tuvieron una fuerte componente innovadora, aunque se apoyasen en las previas de Azarquiel. Redactadas también en castellano, fueron usadas como manuscrito durante tres siglos hasta que se editaron por primera vez en Venecia (1483). Se detallaron en ellas los cursos del Sol, la Luna y las estrellas, las declinaciones solares, la situación de los Planetas, las oposiciones y conjunciones del Sol y de la Luna, la visibilidad de esta y la de sus eclipses, la teoría trigonométrica del seno y de las cuerdas, las latitudes geográficas, las declinaciones de las estrellas, el cálculo de la hora según los astros, la conversión de horas, la revolución de los años, la determinación de las sombras y cuestiones astrológicas. Estas tablas, al contrario que los Libros del Saber, alcanzaron rápida difusión por Europa a través de numerosas ediciones. Su empleo fue generalizado hasta que aparecieron las tablas rudolfinas preparadas por Tycho Brahe y su alumno Johannes Kepler.

El título de *Los Libros del Saber de Astronomía* fue acuñado por el profesor Manuel Rico y Sinobas cuando realizó su estudio previo y correspondiente transcripción entre los años 1863 y 1867, en cambio hoy día está tomando carta de naturaleza el de Libros del Saber de Astrología³⁹. El manuscrito original se encuentra depositado en la biblioteca de la Universidad Complutense de Madrid⁴⁰, durante la guerra civil sufrió desperfectos importantes, al haber quedado la Ciudad Universitaria en el frente y haberse destruido la Facultad en que se custodiaba; más considerables e inexplicables son los recortes de las imágenes de la mayoría de las constelaciones, fruto del coleccionismo salvaje o de posibles censuras asociadas a un puritanismo enfermizo.

³⁹ A esa obra del profesor Rico han de añadirse dos más aparecidas un siglo después, concretamente en el año 1984. La primera fue publicada por el Instituto de Astronomía y Geodesia, con motivo de la celebración del Centenario de Alfonso X el Sabio, siendo su autor el Catedrático de Astronomía y Geodesia de la Universidad Complutense de Madrid José María Torroja Menéndez; su título fue *La Obra Astronómica de Alfonso X el Sabio* (Publicación nº 134. pp. 33-47). La segunda se incluyó en el Boletín de la Real Academia de la Historia (Tomo 181. Cuaderno III, pp. 349-369), siendo su título *Alfonso X y la Astronomía*, y su autor Juan Vernet Ginés, Catedrático de Lengua y Literatura árabe en la Universidad de Barcelona.

⁴⁰ El manuscrito estuvo en Sevilla, después en Alcalá de Henares y luego en Madrid.



Dos muestras de los destrozos ocasionados en el *Libro de las Estrellas del Mediodía* (i) y en el *Adendo de las Estrellas del Ochoavo Cielo* (d). Manuscrito original del Libro del Saber de Astronomía (Ed. Facsímil. EBRISA. 1999).

Rico y Sinobas estructuró su trabajo en cinco tomos, a saber: I) *Libros de las estrellas de la Ochava Esfera, Libro de la fayçon dell espera, Capitulo para facer armellas en la espera*; II) *Libros de las armellas y Libros de los astrolabios*; III) *Libros de los estrumentos, Lámina Universal, de la Açafeha, de las Láminas de los VII Planetas y del Quadrante para rectificar*; IV) *Los cinco Libros de los relojos*; y V) *Códices astronómicos verdaderos y espurios de Don Alfonso el Sabio, Las mansiones o antiguas casas lunares según los libros Alfonsies*. En cambio en los Libros del Saber de Astrología se contemplaron las dieciséis partes que se indican a continuación⁴¹: 1) *Las XLVIII figuras de la octava esfera*, 2) *Como se debe hacer la esfera redonda y obrar con ella*, 3) *Como se deben hacer las armellas del atacir⁴² en la alcora⁴³ y como se debe obrar con ellas*, 4) *Como se debe hacer el astrolabio redondo y obrar con él*, 5) *Como se debe hacer el astrolabio plano y obrar con él*, 6) *Como se debe hacer la lámina universal y obrar con ella*, 7) *Como se debe hacer la azafea y obrar con ella*, 8) *Como se deben hacer las armellas y obrar con ellas*, 9) *Como se deben hacer las láminas de los Planetas y obrar con ellas*, 10) *Como se debe hacer el cuadrante y obrar con él*, 11) *Como se debe hacer la piedra de sombra y obrar con ella*, 12) *Como se debe hacer el reloj de agua y obrar con él*, 13) *Como se debe hacer el reloj del argent uiuo y obrar con él*, 14) *Como se debe hacer el reloj de la candela y obrar con él*, 15) *Como se deben hacer las dos maneras del palacio de las horas*, 16) *Como se debe hacer un instrumento llano para hacer el atacir y como obrar con él*.

⁴¹ *El Códice Alfonsí*. Manuel Sánchez Mariana. Ed. Facsímil Libros del saber de Astronomía del Rey Alfonso X. Estudios y Transcripción. EBRISA. 1999..

⁴² Distancia angular entre los círculos horarios de dos astros, medida sobre el ecuador celeste.

⁴³ Globo terráqueo.

⁴⁴ El pintor burgalés se documentó a conciencia para efectuar su obra, cuyo centro lo ocupa una copia fiel de la esfera armilar que ilustra el libro primero de las armellas. No obstante, el cuadro lo preside el rey sentado en su trono, situado en el lado derecho de la escena, y sosteniendo uno de los cuatro astrolabios representados: tras su pie derecho se presenta un bello astrolabio esférico de color azul, localizándose los dos restantes a la izquierda de la imagen y en manos de los figurantes correspondientes. En la mesa que figura en ese mismo lado sobresale un globo celeste sobre el que parecen dialogar otros dos personajes. No ha de pasar desapercibida la meridiana anual con los signos del zodiaco y la mancha elíptica del Sol proyectada sobre el signo Piscis, junto al de Aries, lo que permite pensar que el pintor quiso datar esta reunión de sabios en la primavera. También cabe subrayar el cuidadoso dibujo arquitectónico de los arcos mudéjares del fondo, que recuerdan a los que sustentan la sinagoga de Santa María la Blanca, reconstruida precisamente gracias al permiso extraordinario de este mismo rey Alfonso, otorgado en el año 1260.



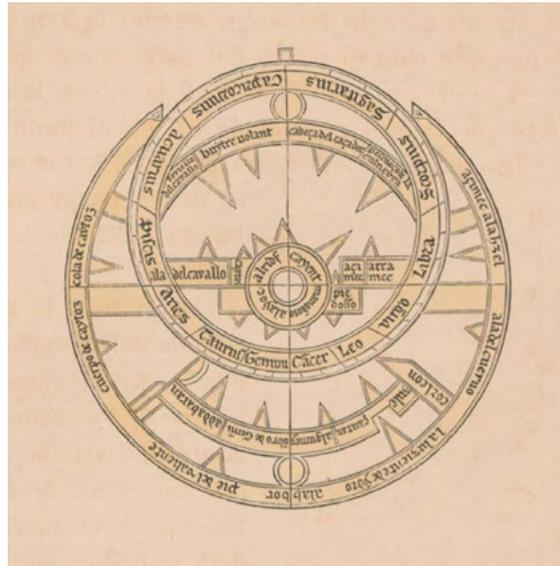
Don Alfonso el Sabio, y los libros del saber de astronomía, óleo sobre lienzo monumental, 165x260 cm, pintado en el año 1881 por Dióscoro Teófilo Puebla y Tolín. Museo del Prado. Depositado en el Museo Municipal de Bellas Artes de Santa Cruz de Tenerife⁴⁴.

A pesar de que en el programa anterior parece que se dedican al astrolabio los apartados 4, 5, 6 y 7, realmente no ocurre así con el primero. La razón es obvia, ya que el astrolabio redondo no es planisférico sino una modificación de la esfera celeste, como bien apuntó en su momento el arabista Julio Samsó Moya⁴⁵: «...Sigue el Libro del astrolabio redondo, una esfera celeste sobre la que se ha superpuesto una araña giratoria que lleva la proyección de unas cuantas estrellas, su giro representa la rotación aparente del firmamento en torno a la Tierra». La exposición sobre los astrolabios, contenida en el tomo II de la obra de Rico y Sinobas, comenzó con una *Introducción a los libros Alfonsies en que se trata de los astrolabios*, relatando el autor la historia del astrolabio, con una maestría difícil de igualar. Continuó con los dos libros del Astrolabio redondo, o esférico, y otros dos en los que se abordó el estudio del astrolabio plano. El tratado referido al astrolabio universal lo incluyó en el tomo III: dos libros dedicados a la lámina universal y otro, dividido en dos partes, centrado exclusivamente en la azafea.

El prólogo del primer libro del astrolabio llano establecía claramente las diferencias entre él y el esférico del que procedía: «*Mas agora queremos dezir dell astrolábio, que fué primeramiente redondo cuerno la espera. Et porque ouo Ptolomeo que era estrumente muy grieue de traer de un logar á otro por la grandez dell. et otrosí de fazer. de redondo que era tornóle llano en el logar o eran los signos, et las otras estrellas que eran cerca dellos*». Acto seguido detalla los títulos de los veinticuatro capítulos de que consta el libro, el cual pudo haber sido escrito por el propio rey a tenor de lo que se comenta en el prólogo, aunque no se dijera de manera expresa. En los primeros se detalla la construcción del instrumento, comenzando con la de la araña (*De cuerno se deue fazer la red. et primeramiente de cuerno deuen sennalar en ella el círculo de capricornio, et el de aries. et libra, et el círculo de cancro*).

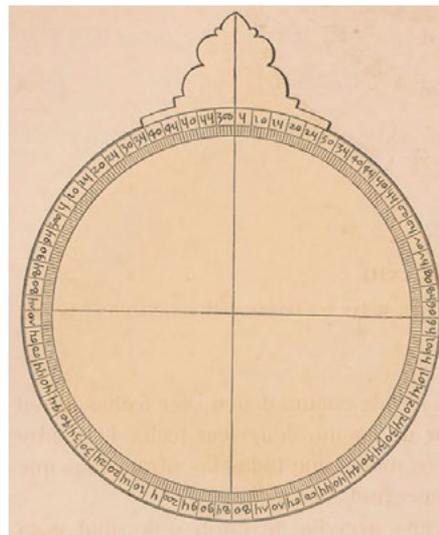
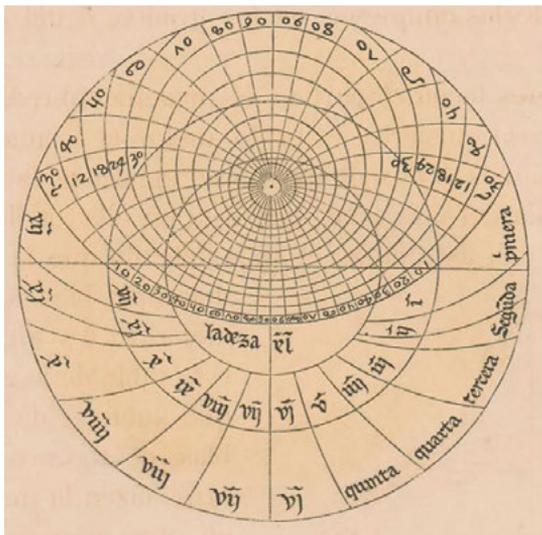
⁴⁵ *La Astronomía en los Libros del Saber de Astronomía de Alfonso X*. EBRISA. 1999.

Al abordar la construcción de las diferentes placas de que podía constar el tímpano del astrolabio, se indicaba que la configuración de cada una dependería de la latitud del lugar, si bien concretaba que la figura presentada se referiría a la ciudad de Toledo: «Sepas que todas las láminas que quisieres fazer en ell astrolabio. se fazen assí cuemo te mostramos fazer en esta de que auemos hablado fãta aquí, ni mas ni menos, et non se departen las unas de las otras sinon en la ladeza. Et mandámoste figurar aquí de cuemo están todas las sennales sobredichas en una de las láminas dell astroláblio. et mandamos la fazer á la ladeza de Toledo».



En el capítulo siguiente (XIII) se explicó la manera de fabricar la madre: «en la que yacen todas las tablas del astrolabio y la red». Llama la atención el detalle con que se relata la graduación de la corona circular que la rodea (el limbo):» *Et faz otrossí acerca del menor dellos un cerco, et nóbralo mediano, et parte estos dos cercos que son el menor et el mediano por .CCC. et L.X. partes iguales começando de la linna sobredicha que feziste en medio del colgadero, et parte otrossí el cerco mayor á çinco çinco grados, et ó á qual quento quisieres, de guissa que aya en él .CCC. et .LX. grados, et escriue en ell espacio que es entre este cerco mayor et el mediano el quento de las cinquenas de los grados, ó del quento que y possieres».*

Ilustración del capítulo VII: De cómo ha de ser entallada la red del astrolabio.



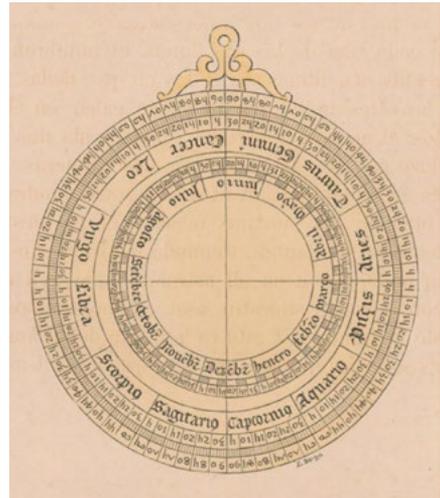
Placa del tímpano y limbo del astrolabio.

La información incorporada a la espalda del instrumento también estaba presente en este libro del astrolabio plano, detallándose en sus capítulos XV y XVI como se tendrían que hacer los diferentes círculos del Sol y como se debería proceder para graduarlos en las doce partes iguales que corresponden a los signos del zodiaco. Análogo proceder se siguió al tratar de los varios círculos concéntricos e interiores, referidos a los doce meses del año.

Tanto los nombres de los signos zodiacales como los de los meses del año figurarían también en esa cara del astrolabio, tal como se pueden observar en la figura anterior.

En los capítulos restantes del libro se aporta con todo lujo de detalles la información concerniente a los aditamentos del instrumento, refiriéndose por ejemplo al cuadrante de sombra que figuraría en su espalda, el modo en que convendría hacer su alidada, la manera de perforar las placas y el proceder para colocarlas debidamente sobre la madre e incluso como tendría que hacerse la cuerda que sería metida en la segunda armella del colgadero. Terminaba el último capítulo con estas palabras: *«Fata aquí auemos mostrado de cuemo se fazen cada una de las partes dell astrolábio sobre sí. et de cuemo se ayuntan las unas con las otras. Agora mandamos aquí figurar la cuerda et las cosas que son en la faz dell ayuntadas en uno»*

El libro segundo del astrolabio llano consta de cincuenta y ocho capítulos, dedicándose los cinco primeros a la descripción del instrumento, aclarando la denominación de todas sus componentes, y los restantes al listado exhaustivo de sus posibles aplicaciones. En el capítulo primero se menciona el colgadero y la madre, *«...la tabla mayor en que está ficada esta armella sobre dicha. Et están sobrella las otras tablas y la red»*. Otros de los elementos secundarios son minuciosamente identificados, sirvan de ejemplo los referidos en el capítulo quinto: *«Al forado que está en medio dell alhidada. et de la madre, et de las otras tablas, et de la red. llaman polo. Et nombran almehuar al clauo que entra en estos forados sobredichos, et traspásalas. Et dizen cauallet al pedazo que entra en almehuar para afirmar las partes dell astrolabio que dichas*



La espalda del astrolabio. Aparece la firma del autor del grabado: L. Burgos.



Esta es la figura de la faz del astrolabio cumplido con su red.

son. Et llaman alhidada á la regla que anda en derredor de las espaldas dell astrolabio quando la mueuen. Axatabas dizen á los dos pedaços que están fincados uno en drecho dotro en la alhidada. Al que traspasa la armella segunda del colgadero, et la siella. Nómbrante clauo. Et los moros fazen en sos astrolábios pora saber las oras de sus oraciones cinco linnas. et ponenlas do están las .XII. oras, et llaman á la linna que está dellas en la parte de ponent hcat toloh alfegr. que quier dezir la linna del subimiento de la claridat del Sol. Et llaman á la otra que está en la parte de ponent hcat maguip axafac. que quier dezir la linna del ponimiento de la claridat del Sol.

En lo que se refiere a sus múltiples aplicaciones, he aquí algunas de las astronómicas más señaladas: saber en qué día comenzaban los meses moriscos, en que signo del zodiaco se encontraba el Sol y en cuantos grados dentro del mismo, medir las alturas sobre el horizonte del Sol y demás estrellas, saber la duración del día y de la noche, hallar la altura del Sol a mediodía, obtener la latitud de un lugar determinado (*De saber la ladeza de qual villa quisiere*), saber el tiempo que está una estrella sobre o bajo el horizonte, saber la altura del Sol, de la Luna y de los cinco Planetas, hallar la duración del crepúsculo, obtener la longitud de la sombra sabiendo la altura del Sol. La descripción del método a seguir no dejaba lugar a dudas, como se desprende de la que se hizo a propósito de la medida de la altura del Sol y las estrellas: «*Si esto quisieres saber, cuelga ell astrolábio de la tu mano diestra, et endereza la cara contra la estrella que quisieres tomar su altura, et mueue ell alhidada con la tu mano siniestra. et cata á la estrella con ell un oío cerrando ell otro fata que la ueas de los dos forados de las axatabas. Et desende cata al cabo sobredicho dell alhidada sobre cuántos grados cayó en el quarto de la altura, et tanto será ell altura de la estrella en la parte en que fuer, en oriente ó en occidente. Et en esta guissa misma catarás al Sol quando fizier nublado, et que parescier el cuerpo del Sol et non parescen sus rayos*».

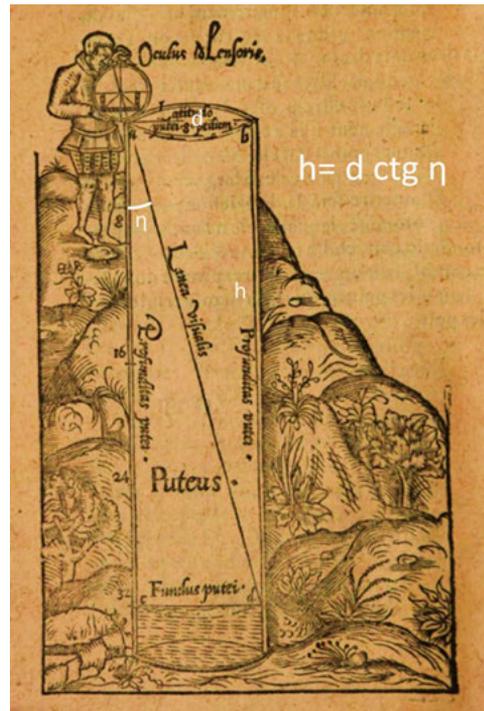
Además de esas aplicaciones, esencialmente astronómicas, se incluyeron otras de índole topográfica, que se van detallando en los correspondientes capítulos. He aquí una selección de las mismas: I) *De saber la altura de alguna cosa enfiesta. assi cuemo torre. ó campanario. ó palma. ó otra cosa qualquier de las que están altas sobre la faz de la Tierra*, II) *de saber la anchez del rio por ell astrolabio*, III) *de saber cuánto a del logar en que estás á otro logar qualquier de los que tú puedes ueer*, IV) *de saber cuánto es fondo un poso qual quisieres*, V) *de saber el medio de las quatro partes, que son el medio de orient. et el de ponent. et el de septentrion, et el de mediodía*, VI) *de saber en qual drecho está qual uilla tú quisieres de la uilla on que estás, sabiendo las ladesas et las longueas de amas las uillas*, VII) *de saber ell astrolábio prouar si es cierto ó non*.

Los ejercicios topográficos se resolvieron de forma similar a los astronómicos, predominando las cuestiones prácticas sobre las teóricas. Así procedió por ejemplo al explicar el procedimiento a



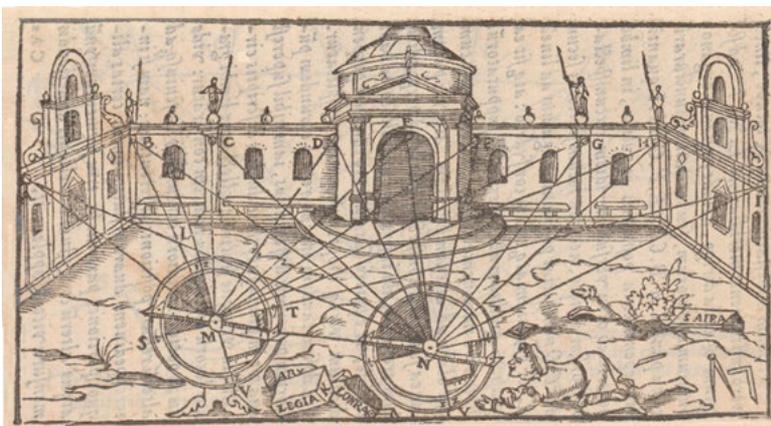
Monje astrónomo midiendo la altura del Sol con un astrolabio. Obsérvese que le acompaña el libretista que anotaba las lecturas obtenidas por aquel. *Veneranda Biblioteca Ambrosiana*. Milán.

seguir para hallar la profundidad de un pozo, basada en la medida previa de su diámetro y de la distancia nadiral de la visual materializada, a través de la alidada, por el ojo del observador y un punto del fondo: «...et mide en ella cuántos cobdos a en la anchura del medio de la boca dél. et tanto es el so diámetro. Et dessí párate en la una oriella desse poço. et toma ell altura dell agoa del que es en fondon de la otra oriella que está en drecho de ti». Llama poderosamente la atención que se contemplase en este libro la necesidad de contrastar la bondad del astrolabio, entre las diferentes posibilidades se han seleccionado las dos siguientes: «*Pon el cabo drecho dell alhidada sobre la linna que passa por medio del colgadero, que es la linna de mediodía, et si cayer ell otro cabo drecho sobre la linna que passa por medio de septentrion sabrás que es cierto, et si non. sabrás que es errado. Et trossí que pongas el cabo sobredicho dell alhidada sobre la linna que passa por el començamiento del quarto de la altura, que es la linna de orient. et si cayer ell otro cabo della sobre la linna que passa por medio del de ponent. sabrás que es cierto, et si non passare por ella, sabrás que es errado*»



L'usage de l'astrolabe avec un petit traite de la sphere.
Dominique Jacquinet Champenois.1607.

Antes de referirnos a los libros que tratan del astrolabio universal, ideado por Ali ibn Khalaf y perfeccionado por Azarquiel, parece oportuno recordar alguno de los comentarios, sobre ese particular, incluidos por el profesor Rico y Sinobas en su discurso preliminar. Recordaba, en primer lugar, que el rey consideraba al instrumento de Alí poco conocido e incompleto «por faltarle el



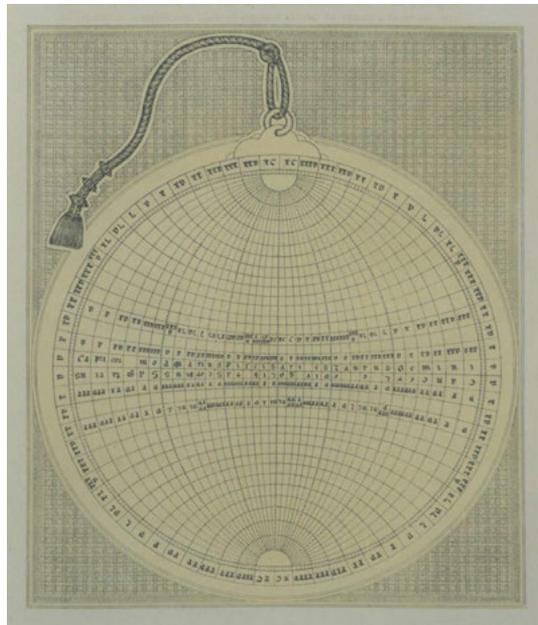
Levantamiento arquitectónico con el astrolabio⁴⁶. *De astrolabio catholico liber quo latissime patentis instrumenti multiplex versus explicatur, & Quicquid uspiam rerum mathematicaru tradi possit continetur.* Obra póstuma de Rainer Gemma Frisius.1556.

⁴⁶ Aunque está aplicación no estaba contemplada como tal en el Libro II del astrolabio plano, puede considerarse derivada de las que allí se contemplan.

libro de como se debía hacer de nuevo, sin lo cual aquella lámina para la astronomía práctica sería muy minguada». Siendo ese el motivo por el que mandó a su sabio Rabiçaq⁴⁷ que lo hiciera bien cumplido con sus pruebas y figuras, sobre las cuales escribió Alfonso X el notabilísimo capítulo que precede a la segunda parte del astrolabio universal o Açafeha de Azarquiel, que principia: «Ueyendo nos D. Alfonso el sobre dicho, la bondad de esta Açafeha que es generalmiente para todas ladezas, et de cómo es estrumento muy complido et mucho acabado, et cómo es caro de sennalar, et que muchos omes non podrien entender complidamiente la manera de cómo se faz...». Concluía la reseña del profesor subrayando el interés del rey por que se cumpliesen los preceptos geométricos y de dibujo en la construcción del aparato: *siguiéndose las reglas de dibujo lineal y descriptivo que D. Alfonso deseaba se tuviesen presentes para el trazado de los astrolabios universales, hallándose que si son notables aquellas reglas son todavía mas las que escribió el astrolomiano Azarquiel, y constan en el códice, referentes á las proyecciones de los arcos trazados en una esfera para trasladarlas con todas sus relaciones á una superficie plana.*

Consta el primer libro sobre el astrolabio universal de dos capítulos. En el primero (*De cuemo deuen sennalar la lámina uniuersal pora obrar con ella en todas las ladezas*) se especifica el procedimiento a seguir en su construcción geométrica, ilustrando la explicación con una figura; sin olvidar la inclusión, con sus nombres, de los doce signos del zodiaco. Concluida la primera cara se abordó el diseño de la segunda, prestando especial atención a las divisiones del limbo que rodearía a la madre.

Comienza el segundo capítulo (*De cuemo se deue fazer la red*) detallando el grabado de las coronas circulares propias del limbo: «*Si esto quisieres fazer. faz otra lámina llana assí cuemo la primera, et faz en ella un çerco que sea tamanno cuemo el çerco de dentro de los tres çercos primeros que ouiste sennalados en la primera faz de la lámina sobredicha, et lima quanto fuer fuera deste çerco. fuera ende quatro cabos que an de sobrar en quatro logares que te yo diré adelante. et saca en ella dos diámetros que se taíen sobre ángulos drechos en el centro*». Presta después especial atención a la localización de las estrellas, tanto septentrionales como meridionales: «*cada una en su signo por su longura et por su ladeza... et después torna et abre la dell astrolabio et pon el cabo de la estrella cuemo un punto agudo*». Remata el texto con la construcción de la alidada, la perforación en el centro de la placa base de la madre y la colocación del resto de elementos: «*Et después que esto ouieres hecho. faz alhidada con dos axatabas atal cuemo la dell astrolábío. et llaue. et cauallo. assí cuemo lo dell astrolabio. et*



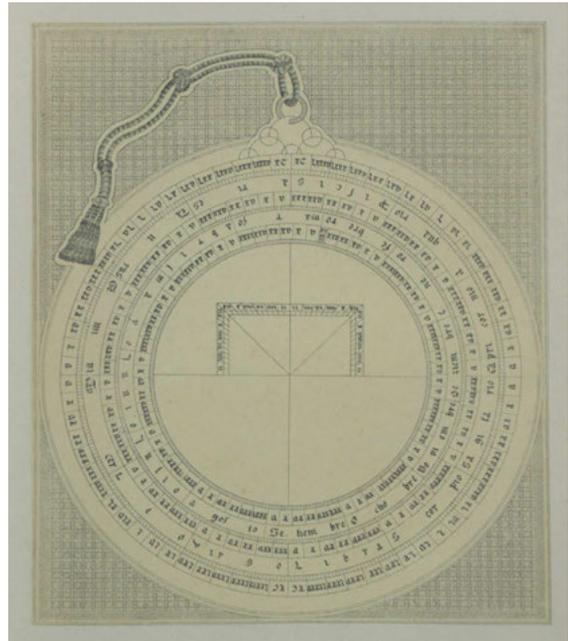
Frente del astrolabio. Libro de la lámina universal.

⁴⁷ Se refiere al astrónomo judeotoledano Isaac ben Said, conocido en las fuentes cristianas como Rabiçaq.

faz un forado en el centro de la lámina á que llaman madre. et en el centro de la red. et el centro dell alhidada. et sean todos de una grandura. Et mete la llaue primeramiente en ell alhidada. et después en la madre, et dessí en la red. et pon el cauallo en el forado que es en la llaue con que se ayunte todo, et desta guissa será acabado este estrumente».

El segundo libro sobre el astrolabio universal⁴⁸ se dividió en siete apartados⁴⁹, contando el primero⁵⁰ de ellos con doce capítulos. El encabezamiento de este tiene un marcado interés para los estudiosos de la historia de la astronomía y de la geografía matemática, en tanto que se explica de primera mano el origen del instrumento. Efectivamente, fue el propio Azarquiel el que escribió el prólogo, recordando desde el principio a su antecesor Ali ibn Khalaf, según el cual Dios había dado al hombre su entendimiento y «*lo apartó de todas animalias en saber las sciencias et las sutilezas...Et Dios dé ondra al mio señor el Rey Meymun. pora que fue fecho este libro*».

De inmediato reconoció el saber de Tolomeo, del que dijo haber leído su Geografía, asignándole el mérito de haber sabido obtener la representación plana de la esfera por medio del astrolabio; consiguiendo que las líneas representadas en ambas superficies fuesen semejantes, conservando también los valores angulares al pasar de una a otra: «*Et sepa el que quisiere aprender algo del. que después que yo ui el libro de Ptolomeo. el que fizo*



Espalda del astrolabio. Libro de la lámina universal.

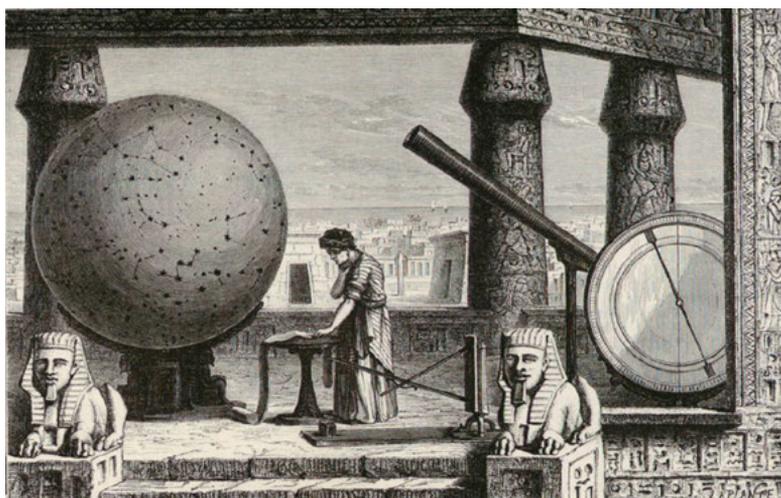


Araña del astrolabio. Libro de la lámina universal.

⁴⁸ La lámina universal en los Libros del saber de Astronomía.

⁴⁹ El profesor Rico y Sinobas señaló que tanto en el código original de la Biblioteca de la Universidad Complutense (Madrid) como en la Biblioteca Nacional y en la del Escorial, solo figuran cinco apartados y no los siete que se citan en el prólogo.

⁵⁰ *De cuemo se deve obrar con la lámina universal.*



Claudio Tolomeo
en el Observatorio
de Alejandría.
*Vies des savans
illustres depuis
l'antiquité jusqu'au
dix-neuvième siècle.*
Louis Figuier. 1870.

de cuemo se deue allanar la espera, et de cuemo se pueden sennalar linnas en cosa llana que sean semeiantes á las linnas que son sennaladas en la sobrefaz de la espera, et que recudan las linnas que son sennaladas en el llano á lo que recuden las linnas que son sennaladas en la sobrefaz de la espera, en todas maneras de sos mouimientos. Et este estrumete es al que dizen astrolabio».

Azarquiel recordó después la dificultad que suponía el tener que cambiar la placa del tímpano al efectuar observaciones con el astrolabio en lugares con latitud diferente, siendo esa circunstancia la que le hizo pensar en transformarlo en otro universal. Completó su exposición con el anuncio de haberlo conseguido y de haberlo explicado en un libro cuyo contenido se centraba en los diferentes procedimientos a seguir para obtener la imagen plana de la esfera: «*Mays sabida cosa es que este estrumete a mester una lámina á cada ladeza. et yo pensé de cuemo se puede fazer un estrumete que cumple á todas las ladezas. por toller la lazeria de fazer á cada ladeza una lámina. Et tanto pensé en ello, fata que entendí cuemo se puede fazer un estrumete pora toda la Tierra, que non aya en él mas de una lámina et de una red. et púsele nombre ell orizon uniuniversal... et fiz este libro en que fabla de cuemo se deue fazer de nueuo. men la prueua de su fecho fata que ouiesse uagar de fazer un libro en que fable de cuántas maneras se puede allanar la espera, con prueuas de geometría sobre cada uno. assí cuemo a mester. et en aquel libro hablaré de qué manera fué allanada la espera en este estrumete. et de cuemo son las prueuas sobrèb».*

El capítulo con que se inicia el primer apartado de este segundo libro de la lámina universal, reza así: «*de lo que a mester ell ome saber que quiere estudiar en este libro. et obrar con este estrumeto».* De su lectura se desprende que el manejo de este nuevo astrolabio universal solo estaba al alcance de algunos privilegiados, ya que los posibles operadores debían contar con unos conocimientos astronómicos y matemáticos propios de los elegidos. Sirva de muestra una selección de los recomendados: «*Sepas que el que quiere obrar con este estrumete a mester de saber los nombres de los meses aráuigos. et la quantía de los dias de cada mes dellos. Et cuántos dias son passados del. et la quantía de los dias del anno aráuigo... et que sepa el nombre de los meses latinos, et cuemo uan por orden de yenero fata decembre. et que sepa otrossí ell alquarismo et sus figuras, et el multiplicar, et cuemo parte una cuenta con otra, et cuemo la ayuntan, et cuemo mingua una dotra. et cuemo toman su rayz... et que sepa los nombres de las .XXVIII. mansiones de la luna, et que las connosca en el cielo, et que connosca las estrellas de la ossa mayor, porque sepa connoscer los dos polos del cielo, et que sepa los nombres de las*



El Saber Astronómico en un tapiz renacentista, en el que destaca el cielo estrellado junto a la luna humanizada. Además de la musa de la astronomía figura posiblemente el matemático Johannes Müller von Königsberg (Regiomontanus) con una esfera armilar, asistido por un libretista sentado frente a un astrolabio. Röhsska Museet. Göteborg. Suecia.

estrellas que son puestas en la red. et que las conosca en el cielo... et que sepa otrosí los nombres de los cinco Planetas, que son saturno. iúpiter. mars. venus et mercurio, et que las conosca en el cielo».

La segunda parte se subdividió en sesenta y tres capítulos, habiendo seleccionado únicamente el décimo tercero⁵¹ por la novedad de incluir un listado con las latitudes de las ciudades más conocidas de al Andalus, al que se añadieron dos columnas para recoger las duraciones de los días más largo y más corto del año. En realidad dicho listado no figuraba en el manuscrito original, tal como explica el profesor Rico y Sinobas en una extensa y bien documentada nota. No obstante si se dibujó una tabla con filas y columnas en blanco, para vaciar en ellas los nombres de aquellas villas y ciudades, con los números correspondientes a los grados, minutos de latitud y tal vez las duraciones extremas de los días del año en dichas ciudades. El citado profesor decidió presentar en su trabajo las latitudes que halló en el astrolabio árabe⁵² construido por Ibrahim-ben-Said-Almawacini-As-Sahali en la ciudad de Toledo (1067), un personaje contemporáneo de Azarquiel. Según él *los nombres de 21 ciudades de España, á los cuales si se añaden los de Medina y la Meca, lugares demasiado Importantes para los árabes, que también se hallan en el mismo astrolabio, son los 23 lugares que probablemente se propusieron trasladar los astrónomos del Rey D. Alfonso al capítulo XIII de la versión castellana del libro de la lámina que Azarquiel habia llamado su Almemonia.*

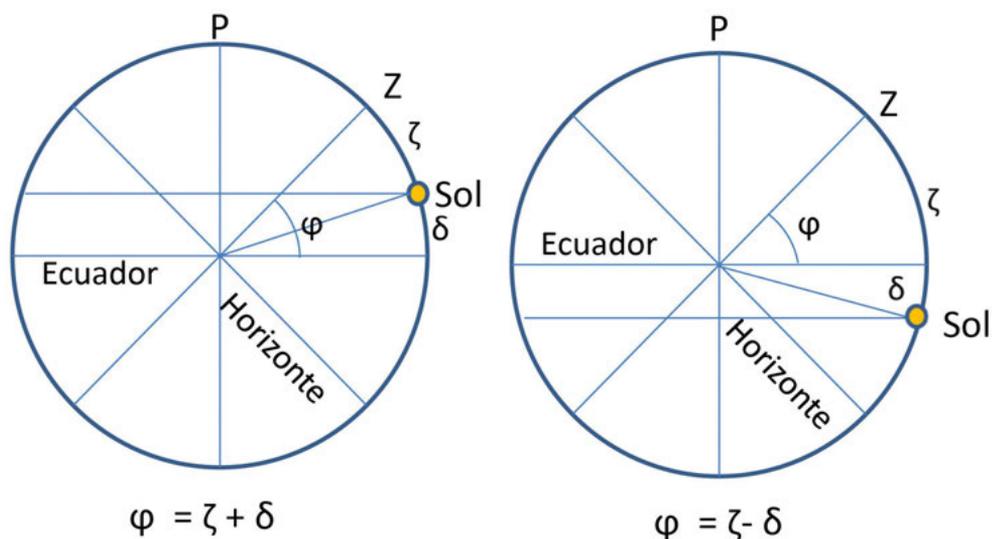
⁵¹ De nombrar las ladezas de las cipdades que son sabudas en Espanna et allend el mar.

⁵² Se custodia en la Biblioteca Nacional de Madrid.

NOMBRES DE LAS CIUDADES.	LATITUD BOREAL.	HORAS DEL MAYOR DIA DEL AÑO.	HORAS DEL MENOR DIA DEL AÑO.
1 Toledo.....			
2 Talavera.....			
3 Madrid.....	39° 32'	14 ^a 54 ^a	9 ^a 6 ^a
4 Calatrava.....			
5 Euclés.....			
6 Zaragoza.....			
7 Calatayud.....			
8 Daroca.....			
9 Lérida.....	41° 30'	15 ^a 5 ^a	8 ^a 55 ^a
10 Huesca.....			
11 Barbastro.....			
12 Córdoba.....			
13 Baeza.....			
14 Murcia.....	38° 20'	14 ^a 45 ^a	9 ^a 15 ^a
15 Jaen.....			
16 Sevilla.....			
17 Málaga.....			
18 Granada.....	37° 30'	14 ^a 39 ^a	9 ^a 21 ^a
19 Todmir (Orihuela).....			
20 Almería.....			
21 Algeciras.....	36° 30'	14 ^a 33 ^a	9 ^a 27 ^a
22 Yatreb (Medina), guárdela Dios, que es la ciudad del Profeta; la paz sea con él.....	25° 00'	13 ^a 35 ^a	10 ^a 25 ^a
23 La Meca, guárdela Dios.....	22° 0'	13 ^a 21 ^a	10 ^a 39 ^a

Latitudes de las principales ciudades de al Andalus, junto a las de la Meca y Medina. Toledo. 1067.

Los cincuenta y ocho capítulos de la tercera parte de este libro se centraron principalmente en el estudio del Sol, interviniendo tanto su declinación, como su altura sobre el horizonte y su recorrido aparente por la banda zodiacal a lo largo del año. Se explica también la metodología para hallar la duración de los días y las noches, y de manera expresa la de los dos días extremos asociados a los dos solsticios. Las clases de horas y el análisis de las sombras estuvieron igualmente



Dos secciones meridionales de la esfera celeste, en las que se muestra la culminación superior del Sol en diferentes épocas del año: una con declinación positiva y otra con declinación negativa. En ambos casos se obtiene fácilmente la latitud, como suma o diferencia de la distancia cenital del Sol y de la declinación. La distancia cenital del Sol es el complemento a 90° de la altura sobre el horizonte.

presentes. La determinación de la latitud del lugar se abordó en varios de los capítulos, aunque solo se refiera aquí el contemplado en el XXXII: *de saber la ladeza de la uilla por la altura del Sol en el medio dia.*

Así se explicaba en este capítulo la obtención de la latitud: «*Si esto quisieres saber, pon el demostrador dell alhidada sobre la altura del Sol en el medio dia en el quarto que es en la parte del sol del zont de la cabeça. Et dessí pon el demostrador del medio de las piértegas sobre la linna del comedio de orient. et dessí cata la declinación del Sol en el cabeçon de la red en la su parte dell yguador del dia. et faz sobré l sennal. Et después mueue el demostrador del medio de las piértegas en el quarto que es en la parte de la ladeza de la uilla. et que sea el demostrador dell alhidada ficable en so logar, de guissa que caya la sennal so la cuesta dell alhidada. et quando cayer so ella, cata sobre cuántos grados dell alhogera cae el demostrador de la red. et lo que fuer míngualo de .XC. et lo que fincar, esso será la ladeza de la uilla.*».

El objetivo fundamental de los sesenta y cuatro capítulos de que consta la cuarta parte fueron las estrellas y su observación. Entre los numerosos ejercicios que se plantearon cabe señalar la determinación de las coordenadas eclípticas de las mismas y la fijación de las elegidas para localizarlas en la madre, sin olvidar el detalle de la medida de la altura estelar, como bien se explica en el capítulo cuarto: «*Quando esto quisieres saber, cuelga ell estrumete de la tu diestra mano, assí cuemo es dicho en tomar la altura del Sol. et pon el demostrador dell alhidada en el quarto de la altura. et cata la estrella de que tú quieres saber su altura. por el forado yusano de la axataba fata que la ueas de la otra axataba de suso, et cata sobre cuántos grados cae el demostrador dell alhidada en el quarto de la altura. et lo que fuer. esso será la altura daquella estrella que quesiste saber.*».

Se estudiaron asimismo algunas de las posiciones singulares de las trayectorias estelares: ortos y ocasos, posicionamiento de las estrellas circumpolares y de aquellas otras que nunca aparecen



Fresco de la Biblioteca del Escorial que muestra a Dionisio Aeropagita⁵³ observando con un astrolabio el eclipse que supuestamente se produjo coincidiendo con la crucifixión de Nuestro Señor Jesucristo. El lugar de observación fue la antigua ciudad egipcia de Heiopolis.

sobre el horizonte del observador. La determinación de la latitud y de la longitud del lugar fueron cuestiones igualmente tratadas en esta parte del libro. Es sobresaliente para la historia de la astronomía geodésica el tratamiento del problema de la longitud en los capítulos 49, 50 y 51, recurriendo de nuevo a la observación de los eclipses lunares. El epígrafe desarrollado en el primero de ellos fue el siguiente: «*De saber la diferencia que es en la longura entre quales dos cipdades quier. por reotifioar un eclipsi lunar en amas*». He aquí el contenido íntegro de dicho capítulo: «*Si esto quisieres saber, pon dos rectificadores en amas las cipdades á la ora del començamiento dell eclipsi ó de su claridat. et que sea ell un rectificador en la una cipdat et ell otro en la otra, et sepa cada uno dellos qué tanto a entrel començamiento daquell eclipsi ó de su claridat. et entre la media noche, en aquella cipdat do es de oras yguales. Et si salier la cuenta una en amas las cipdades. et fuer la ora del començamiento dell eclipsi ó de su claridat en amas las cipdades ante de la media noche ó depuesla longura dellas es una. et non a entrellas diferencia. Et si fuer en la una uilla ante de media noche et en la otra después, dobla aquellas oras yguales. et lo que fue. essa será la ladeza que es entre las dos longuras daquellas dos cipdades. Et si fueren daquellas oras yguales las que son entre la ora del rectificar en la media noche diuersas en amas las cipdades. cata si fuer el començamiento dell eclipsi ó de su claridat en amas las cipdades ante de media noche ó después, mingua las menos oras dellas. et lo que fincar, essa será la diferencia que a entre amas las longuras. Et si fuer la una dellas ante de media noche et en la otra después ayúntalas amas. et lo que fuer. essa será la diferencia que es entre amas las longuras*».⁵³

En el capítulo siguiente se presenta una tabla especialmente interesante, bajo el siguiente título *Tabla de las longitudes y latitudes de los lugares de la Península Ibérica conocidos en la época del Rey D. Alfonso, según Ibrahim-ben Said-Almawazini-As-Sahali (año de 1067). según Aboul Hassan Ali de Marruecos, que floreció en el siglo XIII. y según un manuscrito anónimo en portugués de la Biblioteca nacional de Madrid, redactado á principios del siglo XIV.* Aunque no se sepa a ciencia cierta el meridiano origen de las longitudes, es probable que fuese el de la Isla del Pico (Archipiélago de las Azores):

⁵³ Dionisio fue convertido al cristianismo por Pablo de Tarso durante uno de sus viajes a la ciudad de Atenas, llegando a ser obispo de la misma; vivió nuestro protagonista en el barrio de Areópago, de ahí su sobrenombre. En el fresco que lo representa se aprecian tras él a dos grupos de gente asustada por el eclipse solar y en primer plano a dos personajes que sostienen sendos instrumentos matemáticos: un sector circular y un cuadrante.

NOMBRES DE LOS LUGARES.	LONGITUDES.		LATITUDES.	
	GRADOS.	MINUTOS.	GRADOS.	MINUTOS.
1 Sebta (Ceuta).....	25	40	35	30
2 Cadis (Cadiz).....	24	00	36	00
3 Al-Cherizat-al-Jadra (Algezíras).	25	40	36	30
4 Malaca (Málaga).....	26	20	37	00
5 Almunecab (Almuñecar).....	27	00	37	00
6 Almeria (Almería).....	28	00	36	30
7 Xatiba (Játiva).....	31	20	39	30
8 Balensia (Valencia).....	30	50	39	30
9 Denia (Denia).....	30	00	39	10
10 Maiorca (Palma de Mallorca)....	37	50	37	30
11 Ixbilia (Sevilla).....	25	40	37	30
12 Garnatha (Granada).....	27	30	37	30
13 Jaihene (Jaen).....	27	30	38	20
14 Mursia (Murcia).....	29	30	38	20
15 Corthoba (Córdoba).....	27	00	38	20
16 Bathalios (Badajoz).....	24	32	39	30
17 Toleitola (Toledo).....	28	00	39	52
18 Saracorta (Zaragoza).....	29	55	42	00
19 Medina-Celim (Medinaceli).....	»	»	42	00
20 Xantaren (Santaren).....	23	40	39	30
21 Colimbria (Cohimbra).....	23	6	39	50
22 Alisbone (Lisboa).....	23	10	40	00

Finalizan los capítulos de esta cuarta parte dando cuenta del procedimiento a seguir para orientarse⁵⁴, del cómputo de los crepúsculos y de la aurora, así como de la cuestión siempre interesante de la retrogradación de los Planetas.

La quinta y última parte del libro que se viene comentando se subdividió en doce capítulos, resolviéndose en ellos diferentes supuestos prácticos relacionados con la luna. Los principales objetivos pretendidos fueron: hallar su longitud y latitud, analizar su posición relativa y la de los signos del zodiaco, estudiar sus ortos y ocasos, para terminar con la explicación de su conjunción y oposición.

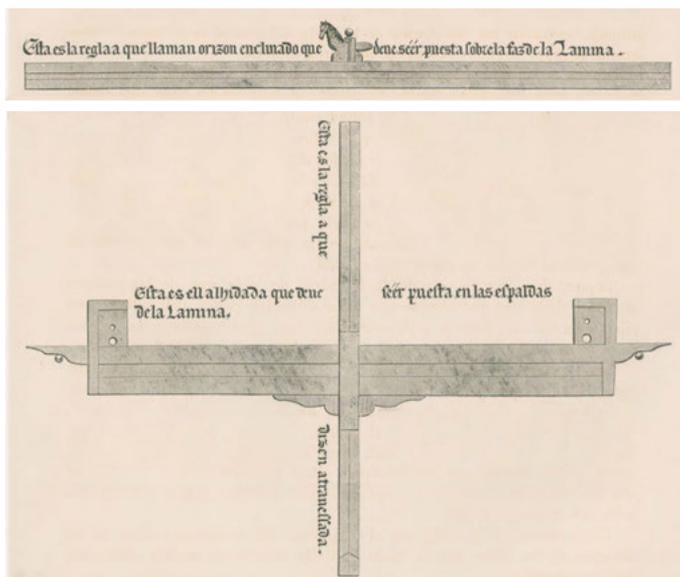
⁵⁴ Capítulo 56: «De saber cuemo se deue poner este estrumente en Tierra, de guissa que se puedan auer por él las quatro partes del mundo. et el zont de qual estrella quier de la noche en qual cipdat quier».

El último tratado sobre el astrolabio en esta obra astronómica del rey Alfonso fue el ya citado Libro de la Azafea, una traducción del trabajo de Azarquiel efectuada en un principio por el maestre Fernando de Toledo y perfeccionada después por Bernardo el Arábigo y por Abraham ibn Waqar, médico del rey; tal como se apunta en el prólogo del mismo. Asimismo se indica en él que realmente fueron dos los trabajos del astrónomo toledano: uno referido a la *almemonía* (*ma'mūniyya*) y otro a la *alhabedía* (*abba-diyya*), dos denominaciones del instrumento para honra de los soberanos de Toledo y de Sevilla. Tal como se recoge también el prólogo: *este libro se parte en dos partes. La primera dellas es de cuemo deue seer fecha la lámina, et la figura della. La segunda de cuemo deuen obrar por ella.* Consta la primera de cuatro capítulos y la segunda de cien.

Se detallan en la primera parte las precauciones que han de observarse para el correcto dibujo y grabado de la información que ha de figurar en el astrolabio, de manera similar a la ya comentada en los libros del astrolabio plano; aunque aquí se detalle más lo relativo a las reglas y a la



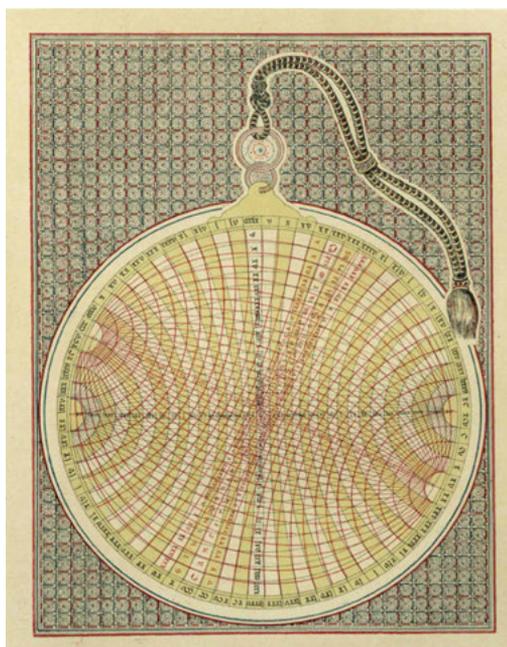
Las fases de la luna en un manuscrito del Libro de las Maravillas (*Kitab al Bulhan*) compilado en Bagdad a finales del siglo XIV por Abd al Hasan al Isfahani.



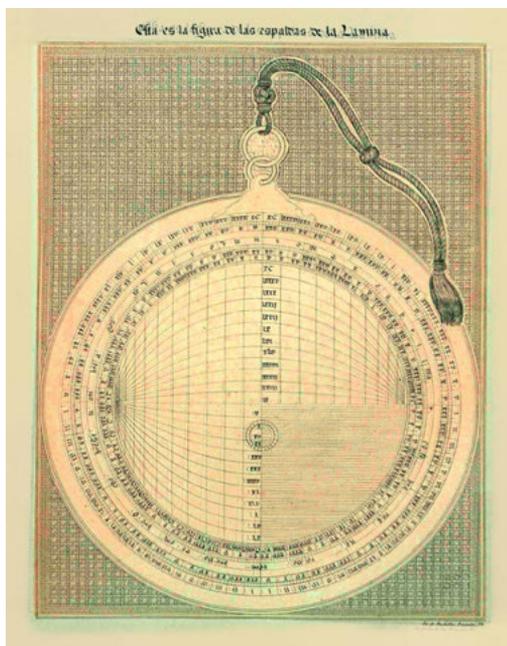
Regla y Alidada de la Azafea.

alidada, incluyendo incluso un cuidadoso dibujo de la misma. En cualquier caso, merece traer a colación el hecho de que la azafea no era un instrumento al uso sino que entrañaba una cierta dificultad, no en vano era un nomograma con prestaciones cuya comprensión no estaba al alcance del observador medio. Así se reconocía expresamente al final de esta primera parte, en una clara advertencia: *Nos rey don Alphonso el sobredicho ueyendo la bondad desta açafeba.que es generalmiente pora todas ladezas. et de cuerno es estrumente muy complido et mucho acabado, et de cuerno es caro de sennalar. et que muchos omes non podrien entender complidamiente la manera de cuerno se faz por las parabras que dixo este sábio que la compuso, mandamos figurar la figura della en este libro.*

El prólogo de la segunda parte de este Libro de la Azafea resulta especialmente interesante por sus consideraciones acerca de los instrumentos matemáticos que se venían empleando desde la antigüedad, a los cuales clasifica en sombríos y rayosos; siendo estos últimos «*aquellos los quales en ellos ó en alguno de sus miembros a dos forados por do entra el rayo, ó por do se cata al cuerpo de la estrella*». Aunque se citaran a continuación los más comunes⁵⁵, no dudó en resaltar la importancia del astrolabio como instrumento científico por antonomasia: «*Mas ell astrolábio es el meior de los estrumentes que son usados, et las obras que se fazen con él son ligeras, et otrosí fázenlo. mas non es común, á todas las ladezas de los .VII. climas. Et quando fuer la ladeza en que quisier obrar entre dos climas de los .VII. capítulo ay en que es dicha la manera de cuerno obran en aquella ladeza por razón de la diferencia. et esta obra non es muy cierta*». Tras señalar el inconveniente que suponía en los astrolabios al uso la necesidad de contar con varias placas para el tímpano, resumió como se transformó en universal



Faz de la Azafea



Espalda de la Azafea

⁵⁵ Cuadrantes, globo, astrolabio, anillos, esferas armilares y reglas.

para que pudiese ser usado en cualquier paralelo de latitud: *«Et pues esto assí es segund yo he dicho, ui por bien de sennalar en una lámina sennales comunes pora saber todas estas obras en cada un orizon de los orizontes. por tal que quando fuer perdida ó muy grieue de sacar alguna daquellas demandas por aquellos estrumentes. que sea sabuda aquella demanda por esta lámina, et lo que con ella fuer sacado en fecho, que sea cierto. Et por razón que sus sennales son apareiadas pora obrar en qual ladeza quier que acaezca, síguese de necessitat que non pueda ome llegar a saber la demanda daquello pora que ella es puesta ó apareiada. sinon depues que fuer sabudo aquello que ante fue ordenado en ella, quier por ella quier por otra».*

El contenido de esta segunda parte es en esencia una especie de manual práctico de astronomía esférica o de posición⁵⁶, en el que se exponen los principales elementos geométricos de la esfera celeste, se analiza el movimiento diurno del Sol y de las estrellas, así como los diversos sistemas de coordenadas curvilíneas que permiten localizar sobre la citada esfera a la proyección de cualquier estrella; mención especial merece la inclusión de la difícil cuestión relacionada con la medida del tiempo, sin olvidar sus comentarios sobre la astronomía judiciaria, de tanta consideración en aquella época. Sus capítulos dedicados a las aplicaciones topográficas más cotidianas son igualmente reseñables.

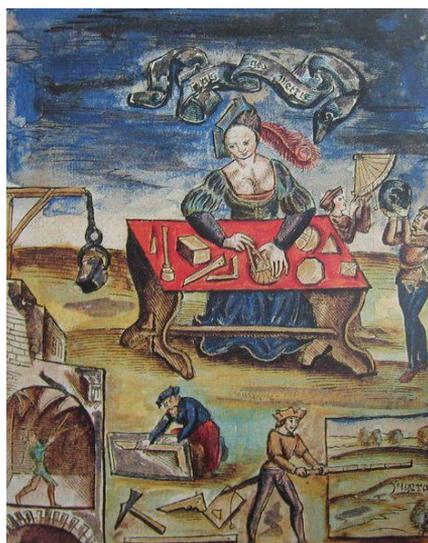
De entre todos los capítulos se han seleccionado tres relacionados con la determinación de las coordenadas geográficas: latitud y longitud; contemplándose diversas posibilidades para el cálculo de la primera. En el capítulo II se explicó el procedimiento para obtenerla midiendo la altura de la estrella sobre el horizonte en posiciones correspondientes, esto es simétricas con relación al meridiano del lugar; el método presentaba la ventaja de no precisar el conocimiento de la declinación de la estrella elegida. Un segundo procedimiento para hallar la latitud se basaba en la medida de la altura del Sol en su culminación superior, tal como se detalla en el capítulo IX; el cálculo se facilitaba porque en tal instante la declinación solar, la altura del Sol sobre el horizonte y la propia latitud son combinación lineal. Es muy sobresaliente el contenido del capítulo XLI, pues en él se aborda el problema secular de la longitud, tratando de resolverlo por el mismo método usado en la Grecia clásica, esto es el de los eclipses lunares; tal como señalaba el epígrafe correspondiente: *«de saber tomar las longuezas de las uillas por los eclipsis lunares».* La solución es sabida, puesto que la diferencia de longitudes entre dos lugares dados coincide con la existente entre las dos horas locales en que tuvo lugar la observación simultánea del fenómeno astronómico, así se explicaba en el libro que nos ocupa: *«Si esto quisieres saber, farás esto desta guissa. Catarás el comienço de los eclipses et la fin de sos sobimientos en dos uillas. Dessí sabrás en cada una damas las uillas cuánto a entre aquella ora fata medio de la noche del mouimiento del firmamiento. et si la ora fuer en amas las uillas ante de media noche, toma la diferencia que a entre amas, et aquella es la diferencia de la longueza. et si la ora fuer en tu uilla mas cerca de media noche, annade la diferencia de la longueza sobre la longueza de la otra uilla».*

ADDENDA

En varias ocasiones se ha indicado que el astrolabio, antes de ser universal, presentaba la dificultad de que la información gráfica contenida en la placa de su tímpano dependía de la latitud del lugar en que se efectuara la observación astronómica; un inconveniente que se solventaba en

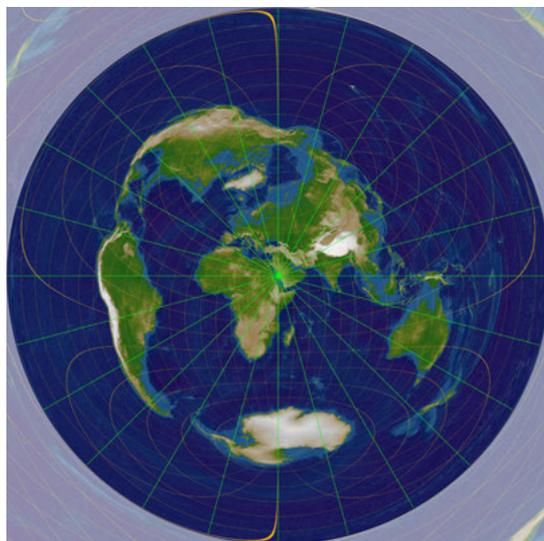
⁵⁶ Así se puede constatar también en el magnífico trabajo de la profesora Roser Puig Aguilar: *Los tratados de construcción y uso de la Azafea de Azarquiel*. Tesis Doctoral leída en la Universidad de Barcelona (1985).

parte dotando al instrumento de tantas placas como ciudades en las que se previera utilizar en un futuro. De esa forma se convirtió el aparato en un nomograma portátil que acompañaría al operador viajero interesado en sus diversas aplicaciones astronómicas, astrológicas, geográficas y topográficas. Los astrolabios se convirtieron indudablemente en los instrumentos matemáticos más característicos del medievo, a pesar de que su empleo no resultase obvio y de que su precio solo estuviese al alcance de la minoría privilegiada. Los posibles usuarios serían pues los componentes de un grupo selecto interesado en la astronomía, que poseyeran al mismo tiempo los correspondientes conocimientos geométricos. Esa interdependencia entre la astronomía y la geometría quedó fielmente representada en una alegoría, incluida por el monje cartujo Gregor Reisch en su obra enciclopédica *Margarita Philosophica* (1504), que representaba a la musa de la geometría construyendo un astrolabio.



Construcción de un astrolabio (1504).
Gregor Reisch.

Los primeros usuarios de tal instrumento fueron naturalmente los astrónomos⁵⁷, no en vano les permitía observar las estrellas, el Sol, la Luna y los Planetas; con la consiguiente determinación de las horas de sus ortos y ocasos, y una medida más genérica del tiempo. Otras de sus aplicaciones fueron la determinación de las coordenadas astronómicas y geográficas, así como las distancias angulares entre estrellas o medir la longitud de la cola de los Planetas, amén de la paralaje lunar y fijar la fecha en que se produciría un eclipse, sin olvidar la duración del fenómeno. No obstante, el astrolabio tuvo también una considerable componente religiosa en el mundo islámico, ya que tanto en madrazas como en mezquitas se contaba con el correspondiente muwaqqit (تقويم) encargado de regular y fijar las cinco oraciones diarias⁵⁸. Es sabida que otra de sus aplicaciones consistía en la determinación de la quibla, o dirección de la Meca, siendo esta de tal relevancia que en la mayoría de los astrolabios



Mapamundi en proyección acimutal equidistante en la que se muestran las diferentes quiblas que convergen en la Meca.

⁵⁷ Como quedó reflejado en la extensa iconografía en que aparecen estos junto al instrumento.

⁵⁸ Alba, mediodía, tarde, ocaso y noche.

árabes figuraba representada la curva que indicaba el acimut de dicho lugar. Sin embargo, el astrolabio no era esencial para la medida del tiempo entre los viajeros que se desplazaban entre los países y ciudades de Europa, igual sucedía con las comunidades religiosas; santo Tomás de Aquino dejó dicho que nadie necesitaba el astrolabio para saber cuándo era la hora de comer.

La astrología era otra de las múltiples prestaciones del astrolabio, grabándose en muchos de ellos información relevante a esos efectos, tal como la relativa a las mansiones lunares. Ha de tenerse presente que con su concurso se pretendían fijar las fechas más propicias para casamientos, nacimientos, éxito o fracaso de expediciones militares o largos viajes, e incluso trabajos tan prosaicos como los amojonamientos y otras tareas propias de la agrimensura. Como bien apuntaba la historiadora de la Ciencia Sara Schechner⁵⁹, el astrolabio ofrecía al viajero ventajas tales como hallar la hora y la duración del día, las horas de la oración, la dirección de la Meca, la distancia recorrida, las latitudes de los extremos del itinerario efectuado, aparte de la posibilidad de hacer el horóscopo que le permitiera señalar en el calendario el día más adecuado para viajar, la duración del mismo y el momento en que le convendría suspenderlo; si el viajero era médico podría averiguar igualmente el mejor momento para administrar el medicamento, y en caso de ser astrónomo podría usar el instrumento para observar el cielo y efectuar los cálculos matemáticos necesarios para proyectar la mejor trayectoria entre las ciudades que quisiera visitar.

Aquellos viajeros del medievo estaban al tanto del astrolabio por la proliferación de textos latinos, sobre su construcción y empleo, que venían circulando desde finales del siglo XIII y que llegaron a ser explicados en el ámbito universitario. Puede que el más sobresaliente fuese el titulado *Nova Compositio Astrolabii Particularis*, del que fue autor Pierre Pèlerin de Maricourt⁶⁰, aunque no lograra la difusión que alcanzó su obra más señalada: *Epistola de Magnete*, una referencia habitual en la historia del magnetismo. El astrolabio universal propuesto en ese trabajo fue relevante, siendo evidentes las influencias de Azarquiel, que es nombrado en el prólogo del mismo; para la historiadora de la astronomía Emmanuel Poulle⁶¹ se trató de una exposición clara, precisa y con el deseo de ser completa, debiendo de ser considerada como una de las mejores publicaciones de este tipo que aparecieron en la Edad Media, siendo por ello precursora



Musa de la astronomía con astrolabio. Una de las siete artes liberales situadas en la base de la columna central del púlpito. Catedral de Pisa.

⁵⁹ *Astrolabes and Medieval Travel. Cp.XIII. The Medieval Art, Science, and Technology of Medieval Travel. Edited by Robert Bork and Andrea Kann. Ashgate.2008.*

⁶⁰ Roger Bacon, su alumno más distinguido, creía que era el único matemático de su tiempo.

⁶¹ *L'Astrolabe Médiéval, d'après les manuscrits de la Bibliothèque Nationale. Bibliothèque de l'École des chartes. Année 1954 112 pp. 81-10.*

de las brillantes aportaciones que realizaría dos siglos y medio después el alemán Johannes Köbel Stöffler: matemático y constructor de instrumentos matemáticos, así como autor del libro *Elucidatio fabricae ususque astrolabii* (Oppenheim, 1513).

Con semejantes antecedentes se entiende que las imágenes del astrolabio fuesen cada vez más numerosas tanto en las miniaturas de los códices como en esculturas. Una de las muestras más características puede contemplarse en el interior de la Catedral de Pisa, concretamente en una de las siete caras de que consta la base de la columna central que sustenta a su famoso púlpito; una obra maestra de Giovanni Pisano, construida entre 1301 y 1310. Aunque sea muy escasa la documentación medieval que liga al astrolabio con el viajero, ha de traerse a colación la obra que fue escrita en el año 1357 con el título *The Travels of Sir John Mandeville*; señalando el autor que había usado el astrolabio para probar la esfericidad de la Tierra y que había medido con él la altura de la estrella polar y la de su homóloga del hemisferio meridional. Copias de tan curioso manuscrito contienen preciosas ilustraciones que presentan al supuesto autor con un astrolabio en Bélgica, Libia y otros lugares en los que aseguraba haberlo usado. De entre todas ellas llama la atención la que muestra a cuatro monjes astrónomos observando el cielo, desde la cumbre del Monte Athos, usando para ello dos astrolabios y dos cuadrantes.



Monjes astrónomos observando el firmamento, con astrolabios y cuadrantes, desde la cumbre del Monte Athos. *The Travels of Sir John Mandeville* (c.1410-c.1420). British Library.

A finales del siglo xv Jean Fusoris fundó en París una de las primeras factorías de astrolabios y otros instrumentos científicos, contando con clientes tan celebrados como el rey de Aragón Juan I, Carlos III rey de Navarra, Henry V rey de Inglaterra y el antipapa Juan XXIII. El astro-



Frente y espalda del astrolabio granadino construido por M. Ibn Zawal (1481), el último de al Andalus.

labio llegó a convertirse con el tiempo en un instrumento de gobierno, cuya posesión denotaba más prestigio que conocimiento, aunque sea evidente que sus poderosos propietarios contribuyeron decisivamente a fomentar el cultivo de la astronomía. En ese tiempo ya se había constatado que el astrolabio no era lo bastante exacto como para efectuar con él observaciones astronómicas, aunque sí astrológicas. Su empleo en los países musulmanes siguió estando vigente hasta nuestros días, baste decir que cuando se construyó a comienzos de este siglo la mezquita mayor de Granada, localizada junto al mirador de San Nicolás en el típico barrio granadino del Albaicín⁶², se desplazó desde Marruecos un muwaqqit con su astrolabio, tal como quedó reflejado en la imagen publicada por la prensa local con motivo de su inauguración (2003).

⁶² No puede dejar de citarse un hecho histórico sobresaliente. Fue en ese barrio donde se encontró casualmente el que pudo haber sido el último astrolabio construido en al Andalus (1481), el cual se custodia en el Museo Arqueológico de esta Ciudad. El constructor fue Muhammad Ibn Zawal, apareciendo su firma en el propio instrumento.

CURIOSIDADES COSMOGRÁFICAS | Índice Onomástico

- Abd Allah (pág. 262).
- Abelardo (pág. 268).
- Abisalt A (ben) (pág. 264).
- Adelardo de Bath (pág. 268).
- Aguiar J. (pág. 195, 195, 230).
- Albatenius (pág. 260).
- Alcántara de la Llave P. (pág. 140).
- Alejandro Magno (pág. 32).
- Alejandro VI (pág. 223, 223, 230).
- Alembert J (de) (pág. 75, 147, 178, 183).
- Alfonso V (pág. 197).
- Alfonso X (pág. 2, 219, 266, 267, 270, 271, 272).
- Alfragano (pág. 201).
- Alighieri D (pág. 67, 81, 200).
- Ali Pasha M. (pág. 52).
- Álvares Cabral P. (pág. 198).
- Álvarez de Bazán y Guzmán (pág. 214).
- Amonio de Hermia (pág. 259).
- Anaximandro (pág. 17).
- Andalusí (al) (pág. 254, 263, 267).
- Angelo G (d'). (pág. 102).
- Angelus J. (pág. 23, 113, 115, 118).
- Ángelico B. (pág. 74).
- Antoniadi E. (pág. 189).
- Apiano P. (pág. 18, 90, 203, 204).
- Apolonio de Pérgamo (pág. 78, 101).
- Apolonio de Rodas (pág. 188, 190, 192).
- Arago J. (pág. 138).
- Aratos de Soles (pág. 18).
- Argenson (pág. 183).
- Arias Fernández A. (pág. 202).
- Aristarco de Samos (pág. 18).

- Aristóteles
(pág. 16, 17, 18, 22, 23, 24, 32, 124, 156, 158, 214, 236, 241, 253).
- Arquímedes
(pág. 101, 153, 243, 254).
- Arriaga y Ribera J (de).
(pág. 134).
- Athari (ibn).
(pág. 260).
- Atlas
(pág. 24, 32, 102, 108, 131, 192, 205, 221, 222).
- Augusto
(pág. 19).
- Avieno R.
(pág. 192).
- Azarquiel
(pág. 2, 266, 267, 268, 270, 271, 277, 278, 279, 280, 281, 286, 288, 290).
- Bacon R.
(pág. 290).
- Bagrow L.
(pág. 119).
- Bailly J.
(pág. 32, 33, 46).
- Banna (al).
(pág. 270).
- Barraquer J.
(pág. 70, 140, 141).
- Barsotti de Lucca N.
(pág. 75).
- Batriq A (al).
(pág. 259, 260).
- Battani (al).
(pág. 125, 260).
- Bautista J.
(pág. 215).
- Bazán y Guzmán A.
(pág. 214).
- Beatriz de Suabia
(pág. 270).
- Behaim M.
(pág. 126, 197, 199).
- Belzoni G.
(pág. 54).
- Benson B.
(pág. 70).
- Berlinghieri F.
(pág. 116, 117).
- Bernardo el Arábigo
(pág. 286).
- Bert P (van)
(pág. 193).
- Bes
(pág. 89).
- Bessel F.
(pág. 25, 248).
- Biot J.
(pág. 137, 138, 140).
- Bird J.
(pág. 83).
- Biruni (al).
(pág. 124, 125, 241, 260, 261, 262).
- Blaeu J.
(pág. 130, 221, 222).
- Blaeu W.
(pág. 221, 222).
- Blázquez Jiménez A.
(pág. 206).
- Bode J.
(pág. 228).
- Bonasone G.
(pág. 30).
- Bond W.
(pág. 142).
- Bonnart R.
(pág. 238).
- Borda J.
(pág. 137, 224).
- Bornone B.
(pág. 206).
- Borrell II.
(pág. 262).
- Bouguer P.
(pág. 149, 171, 179).
- Bradley J.
(pág. 25, 75, 157, 172, 173, 224).
- Brahe T.
(pág. 24, 130, 132, 221, 271).
- Brudzewski A.
(pág. 157).
- Bylical M.
(pág. 262).
- Cadamosto A.
(pág. 68).
- Caín
(pág. 237).

- Camus C.
(pág. 169, 179, 181).
- Carlos I
(pág. 91, 207).
- Carlos II
(pág. 132, 262).
- Carlos III
(pág. 291).
- Carlos V
(pág. 118, 202).
- Cartagena J. (de)
(pág. 207).
- Cartan E.
(pág. 147).
- Cassini
(pág. 147, 148, 152, 156, 162, 167, 168, 170, 175, 176, 177, 179, 180).
- Cassini de Thury
(pág. 137).
- Cassini I
(pág. 32).
- Cassini II
(pág. 148, 155).
- Cassini J.
(pág. 167).
- Castor
(pág. 49).
- Castro J. (do).
(pág. 209, 210).
- Cauchy A.
(pág. 147).
- Cavendish H.
(pág. 226).
- Cayo Valerio Flaco
(pág. 188).
- Cellarius A.
(pág. 24, 237, 254).
- Celsius A.
(pág. 149, 169).
- Cervantes M. (de).
(pág. 66).
- Chaix J.
(pág. 137).
- Chandrasekhar S.
(pág. 147).
- Chierico F.A. (del)
(pág. 118).
- Cimerlinus J.
(pág. 93).
- Clairaut A.
(pág. 147, 149, 151, 153, 154, 169).
- Colbert J.
(pág. 247).
- Collaert A.
(pág. 47, 48).
- Colón C.
(pág. 65, 110, 126, 127, 194, 198, 199, 202).
- Columela L.
(pág. 192).
- Comellas García-Llera J. L.
(pág. 65).
- Condamine C. (de la)
(pág. 171, 179).
- Conde de Argenson
(pág. 183).
- Conde de Niebla
(pág. 216).
- Cook J.
(pág. 135).
- Copérnico N.
(pág. 18, 24, 36, 44, 156, 214, 269).
- Corsali A.
(pág. 69).
- Cortés de Albarcar M.
(pág. 91, 210).
- Cresques A.
(pág. 194).
- Cresques J.
(pág. 194).
- Cristo
(pág. 20, 23, 39, 46, 75, 215, 284).
- Crivelli
(pág. 111).
- Cuesta Domingo M.
(pág. 202, 204, 205, 206, 210).
- Czau-Kong
(pág. 157).
- Darwin G.
(pág. 147).
- Davis J.
(pág. 135, 257).
- Dedekind J.
(pág. 147).

- Delambre J.
(pág. 137).
- Demóstenes
(pág. 192).
- Denon D.
(pág. 53).
- Deparis V.
(pág. 171).
- Descartes R.
(pág. 97).
- Destombes M.
(pág. 262).
- Devaulx J.
(pág. 92, 93, 219).
- Díaz B.
(pág. 197).
- Dicearco de Mesina
(pág. 1).
- Digges D.
(pág. 135).
- Dinteville J (de).
(pág. 95).
- Diodoro de Sicilia
(pág. 243).
- Diógenes Laercio
(pág. 74).
- Dionisio Aeropagita
(pág. 284).
- Dirichlet P.
(pág. 147).
- Drake F.
(pág. 214).
- Dryander J.
(pág. 90).
- Duque de Joyeuse
(pág. 92).
- Dürer A.
(pág. 112).
- Eden R.
(pág. 213).
- Edgerton S.
(pág. 117).
- Eloísa
(pág. 268).
- Enol
(pág. 237).
- Enrique el Navegante
(pág. 196).
- Enrique I
(pág. 125, 197).
- Enrique II
(pág. 109).
- Enrique VIII
(pág. 95).
- Eratóstenes
(pág. 1, 2, 242, 243).
- Ercilla A (de).
(pág. 67).
- Esteban A.
(pág. 142).
- Estobeo J.
(pág. 74).
- Estrabón
(pág. 18, 104, 188, 243).
- Etable Lepaute N.
(pág. 153).
- Euclides
(pág. 22, 101, 253, 264).
- Eudoxio
(pág. 153).
- Eudoxo de Cnido
(pág. 18).
- Eugenio E (de).
(pág. 142).
- Euler L.
(pág. 147, 151, 153, 183,
223, 224).
- Falero R (de)
(pág. 207, 208).
- Fale T.
(pág. 90).
- Faras J.
(pág. 68).
- Farghani (al).
(pág. 200).
- Fazari (al).
(pág. 259).
- Federico el Grande
(pág. 150).
- Felipe II
(pág. 16, 127, 203, 204,
205, 212).
- Felipe III
(pág. 130, 205).
- Fernández-Armesto F.
(pág. 202).
- Fernando de Toledo
(pág. 286).

- | | | |
|--|---|---|
| — Fernel J.
(pág. 247). | — Gauss C.
(pág. 147, 174). | — Gualterus Arsenius
(pág. 258). |
| — Fe Serra M.
(pág. 249). | — Gent J. (van).
(pág. 37). | — Guillaume D.
(pág. 210, 233). |
| — Figuier L.
(pág. 280). | — Gerardo de Cremona
(pág. 102, 267, 268). | — Guillaume de Conches
(pág. 23). |
| — Filópono J.
(pág. 259). | — Gerberto de Aurillac
(pág. 22, 90). | — Hadley J.
(pág. 82, 135). |
| — Fineo O.
(pág. 206). | — Gershon L. (ben).
(pág. 78). | — Halley E.
(pág. 25, 82, 153, 173,
195). |
| — Flammarion C.
(pág. 189). | — Gharnāī (al).
(pág. 263). | — Hammer H.
(pág. 116). |
| — Flamsteed J.
(pág. 132). | — Gimeno y Canencia E.
(pág. 270). | — Harley J.
(pág. 113). |
| — Fohi
(pág. 32). | — Godfrey T.
(pág. 82). | — Harrison J.
(pág. 129, 133, 134, 135). |
| — Fournier G.
(pág. 93). | — Godin L.
(pág. 3, 149, 179). | — Hellant A.
(pág. 169). |
| — Fraunhofer J (von).
(pág. 25). | — Gogh V. (van).
(pág. 16). | — Henri Michel
(pág. 88). |
| — Frisius G.
(pág. 75, 90, 221, 267,
277). | — Gomes Teixeira F.
(pág. 219). | — Henry V
(pág. 291). |
| — Fusoris J.
(pág. 291). | — González Palencia A.
(pág. 264). | — Heráclides Póntico
(pág. 18). |
| — Galileo Galilei
(pág. 29, 129, 130). | — Gorocica F.
(pág. 107). | — Hércules
(pág. 32, 49, 51, 52). |
| — García de Céspedes A.
(pág. 203, 205, 206). | — Gossellin P.
(pág. 104). | — Heredia Girard J. M. (de).
(pág. 80). |
| — Gaubil A.
(pág. 32). | — Goussin de Metz
(pág. 23). | — Herman de Carinthia
(pág. 254). |
| — Gaultier B.
(pág. 49, 50). | — Goya F. (de).
(pág. 137). | — Hermannus Contractus
(pág. 264). |

- Hernández Pérez A.
(pág. 257, 265, 267).
- Herodoto
(pág. 53, 101, 102).
- Herón de Alejandría
(pág. 101).
- Herschell W.
(pág. 31).
- Hesiodo
(pág. 192).
- Hevelius J.
(pág. 89).
- Hiparco de Nicea
(pág. 75, 78, 124, 192, 254).
- Hipp M.
(pág. 139).
- Hire P. (de la).
(pág. 148).
- Hirsau W (von).
(pág. 264).
- Hoang-ti
(pág. 32).
- Hoffmann S.
(pág. 106).
- Holbein H.
(pág. 95).
- Holewiński J.
(pág. 157).
- Homann J.
(pág. 125).
- Homero
(pág. 101, 102).
- Hondius J.
(pág. 69).
- Honorio de Autun
(pág. 23).
- Houtman F (de).
(pág. 69).
- Hudhayl M (ibn).
(pág. 267).
- Hughes W.
(pág. 102, 135).
- Humboldt A (von).
(pág. 225).
- Huygens C.
(pág. 132, 147, 148, 151, 158, 160, 161, 167).
- Hypatia
(pág. 255).
- Ibáñez C.
(pág. 137, 138, 140, 141, 142, 147).
- Idrisi (al).
(pág. 241).
- Isa (ibn).
(pág. 260).
- Isfahani (al).
(pág. 269, 286).
- Isidoro de Sevilla
(pág. 20).
- Jacobi C.
(pág. 147).
- Jacobus Angelus
(pág. 23, 113, 115, 118).
- Jacquinet Champenois D.
(pág. 277).
- Jamā'irī (al).
(pág. 269).
- Janssonius J.
(pág. 239).
- Jasón
(pág. 190).
- Jeans J.
(pág. 147).
- Jofre de Loaisa G.
(pág. 190).
- John de Hollywood
(pág. 23).
- Jollois P.
(pág. 52).
- Jomard E.
(pág. 243).
- Juan el sevillano
(pág. 268).
- Juan I
(pág. 197, 291).
- Juan II
(pág. 197).
- Juan J.
(pág. 3, 134, 147).
- Juarismi (al).
(pág. 246).
- Julio Cesar
(pág. 55, 241).
- Jwarizmi (al).
(pág. 125).
- Kepler J.
(pág. 24, 44, 55, 130, 156, 157, 172, 271).

- | | | |
|--|--|--|
| — Keuning J.
(pág. 113). | — Leibniz G.
(pág. 183). | — Lupi (ibn).
(pág. 262). |
| — Khalaf A. (ibn)
(pág. 266, 277, 279). | — Levallois J.
(pág. 140). | — Lupitus Barchinonensis
(pág. 262). |
| — Khonsirtis
(pág. 89). | — Lévêque P.
(pág. 226). | — Lytelton W.
(pág. 135). |
| — Kircher A.
(pág. 32). | — Levi ben Gerson
(pág. 135). | — Mac Laurin C.
(pág. 147). |
| — Köbel Stöffler J.
(pág. 290). | — Licinio
(pág. 19, 20). | — Macrobio J.
(pág. 18, 46). |
| — König J.
(pág. 183). | — Liechtenstein P.
(pág. 105). | — Magallanes F.
(pág. 2, 68, 69, 80, 128,
129, 190, 207, 208). |
| — Kratzer N.
(pág. 95). | — Listing J.
(pág. 174). | — Mairan D (de).
(pág. 154). |
| — Lacaille N.L. (de).
(pág. 67, 68, 190). | — Liter Mayayo C.
(pág. 23). | — Majriti M (al).
(pág. 254). |
| — Ladenspelder H (von).
(pág. 31). | — Litrow J.
(pág. 142). | — Malaspina A.
(pág. 129). |
| — Lagrange J.
(pág. 147). | — López Arroyo M.
(pág. 137). | — Malville
(pág. 35). |
| — Lalande J.
(pág. 153, 224). | — López de Velasco J.
(pág. 203). | — Ma'mun (al).
(pág. 2, 267). |
| — Lambert de Saint-Omer.
(pág. 23). | — Louis XIII
(pág. 93). | — Manuel I
(pág. 69, 197, 198, 200,
207). |
| — Laplace P.
(pág. 138, 147, 157). | — Lucano M.
(pág. 241). | — Maricourt P (de).
(pág. 290). |
| — Larramendi I.
(pág. 202). | — Luis XIII
(pág. 233). | — Marino de Tiro
(pág. 102, 103, 110, 111,
113, 118, 192, 193, 204). |
| — Leclerc S.
(pág. 175, 248). | — Luis XIV
(pág. 130, 132, 155, 159,
160, 175, 183, 233, 247). | — Marshall J.
(pág. 190). |
| — Legendre A.
(pág. 147). | — Lulio R.
(pág. 90). | |

- Martín-Merás Verdejo L. (pág. 206).
- Maskelyne N. (pág. 133, 224, 225, 226, 228, 229).
- Matusalén (pág. 237).
- Maupertuis P. (pág. 5, 147, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183).
- Maurepas (pág. 149).
- Mayer T. (pág. 125, 223, 224, 227).
- Médici L. (de). (pág. 81).
- Medina P. (de). (pág. 9, 12, 66, 210, 211, 212, 213).
- Melatón (pág. 237).
- Mendoza y Ríos J. (de) (pág. 129).
- Mercator G. (pág. 75, 118, 128, 193, 217, 218, 219, 221).
- Merino M. (pág. 137, 138, 140, 147).
- Messahala (pág. 260, 268).
- Metz G. (de). (pág. 23, 242).
- Millàs Vallicrosa J. (pág. 260).
- Moisés (pág. 125).
- Molyneux E. (pág. 69).
- Monge G. (pág. 147).
- Monnier P. (le). (pág. 169, 179, 181).
- Morgado Rodríguez A. (pág. 187).
- Morse S. (pág. 3, 139, 141, 143).
- Muleri N. (pág. 124).
- Müller J. (pág. 95, 201, 281).
- Münster S. (pág. 90, 91).
- Musa (pág. 2, 246, 260).
- Mu'tamid (al). (pág. 267).
- Nadim I (al). (pág. 259, 260).
- Napoleón (pág. 1, 131, 243).
- Nebrija E. (pág. 2, 147, 247).
- Nepomuk Geiger J. (pág. 127).
- Neugebauer O. (pág. 107, 254).
- Newton I. (pág. 2, 9, 55, 82, 133, 147, 148, 149, 150, 151, 160, 161, 167, 171, 183).
- Nicolás de Myra (pág. 79).
- Noé (pág. 237).
- Norwood J. (pág. 247).
- Nouet N. (pág. 131, 132).
- Numayri (al). (pág. 269).
- Nunes P. (pág. 208, 209).
- Oestmann G. (pág. 92).
- Oltmanns J. (pág. 225).
- Ortelius A. (pág. 190, 222).
- Otón I (pág. 262).
- Outhier R. (pág. 168, 169).
- Ovidio (pág. 188, 192).

- Ozanam J.
(pág. 233, 235, 243, 246, 249).
- Pacheco Pereira D.
(pág. 207).
- Pacificus
(pág. 89).
- Paeonius
(pág. 259).
- Palmaroli G.
(pág. 270).
- Panza S.
(pág. 66).
- Paz y Meliá A.
(pág. 206).
- Pedro Alfonso
(pág. 125, 126).
- Perrier F.
(pág. 138, 140).
- Philoponus
(pág. 255, 259).
- Picard J.
(pág. 2, 81, 82, 130, 159, 164, 165, 167, 181, 247, 248).
- Picavet F.
(pág. 262).
- Pigafetta A.
(pág. 68).
- Piri Reis
(pág. 195).
- Pitágoras
(pág. 17, 188, 243).
- Piteas
(pág. 76).
- Plancius P.
(pág. 69).
- Platón
(pág. 17, 18, 188, 243).
- Platón de Tívoli
(pág. 268).
- Plinio el Viejo
(pág. 158, 188, 191).
- Plutarco
(pág. 190).
- Poincaré H.
(pág. 147).
- Poisson S.
(pág. 147).
- Polibio
(pág. 192).
- Polux
(pág. 49).
- Pompeyo
(pág. 241).
- Porfirio
(pág. 188).
- Posidonio
(pág. 2, 103, 111, 158, 200, 243).
- Poulle E.
(pág. 290).
- Preste Juan
(pág. 196, 206).
- Puebla y Tolín D.
(pág. 273).
- Puig Aguilar R.
(pág. 288).
- Putnam C.
(pág. 35).
- Rabiçaq
(pág. 278).
- Radbertus P.
(pág. 75).
- Ramsdem J.
(pág. 135, 136).
- Rashidi (al)
(pág. 269).
- Raymond de Marsella
(pág. 268).
- Regiomontanus
(pág. 90, 95, 96, 128, 197, 201, 223, 281).
- Reicheneau H (von).
(pág. 264).
- Rey Pastor J.
(pág. 147, 196, 199).
- Riccioli G.
(pág. 159).
- Richer J.
(pág. 2, 147, 148, 159, 160, 183).
- Rico y Sinobas M.
(pág. 126, 271, 272, 273, 277, 279, 281).
- Riemann B.
(pág. 147).
- Roberts D.
(pág. 53).

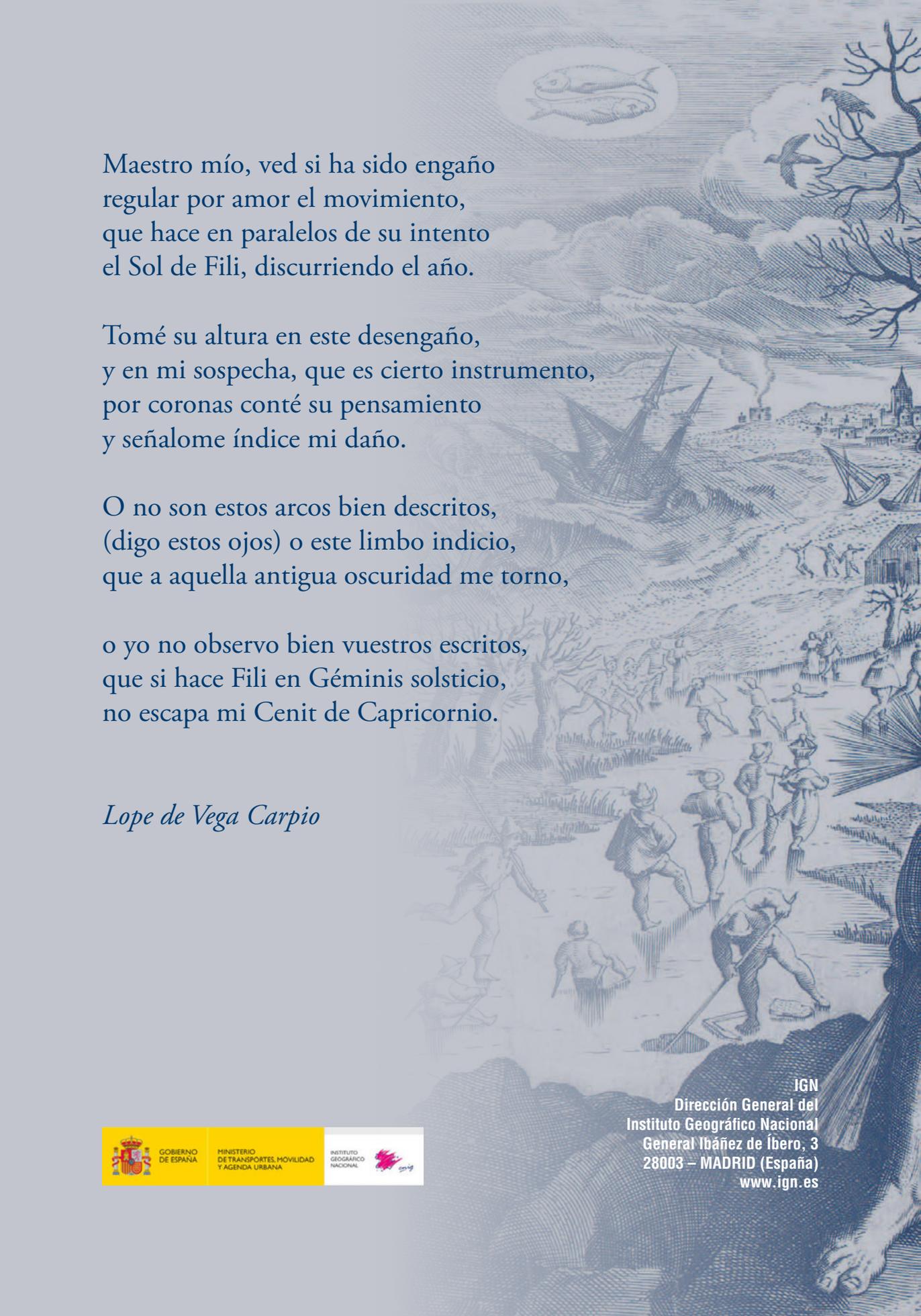
- Robertson J.
(pág. 135, 226).
- Robinson J.
(pág. 135).
- Rodríguez de Fonseca J.
(pág. 207).
- Rodríguez J.
(pág. 137, 147).
- Rolas van Vries J.
(pág. 97).
- Ruando Rangel A.
(pág. 209).
- Saavedra F.
(pág. 147).
- Sacrobosco J.
(pág. 23, 206, 260).
- Şaffār M. (al)
(pág. 263).
- Sahli I. (al)
(pág. 265).
- Said I. (ben)
(pág. 21, 265, 278, 281, 284).
- Salazar A. (de)
(pág. 190).
- Samḥ (al)
(pág. 263).
- Samsó Moya J.
(pág. 273).
- San Agustín de Hipona
(pág. 242).
- Sánchez Mariana M.
(pág. 272).
- San Juan
(pág. 215).
- San Juan Bautista
(pág. 215).
- San Juan Crisóstomo
(pág. 215).
- San Martín A. (de)
(pág. 208).
- Sanson
(pág. 244, 245, 246, 248, 249).
- Sanson N.
(pág. 233, 234, 244).
- Santa Cruz A. (de)
(pág. 128, 202, 203, 204, 205, 206, 207).
- Sarmiento de Gamboa P.
(pág. 129).
- Savage-Smith E.
(pág. 254).
- Schechner S.
(pág. 290).
- Sebokht S.
(pág. 259).
- Selve G. (de)
(pág. 95).
- Shaefer H.
(pág. 196).
- Silvestre II
(pág. 22, 90, 262).
- Sinesio de Cirene
(pág. 255, 259).
- Snell W.
(pág. 130, 165, 209).
- Sniadecki G.
(pág. 157).
- Soderini P.
(pág. 200).
- Sosígenes
(pág. 55).
- Stevenson E.
(pág. 110).
- Stimmer T.
(pág. 105).
- Stokes G.
(pág. 147).
- Straet J. (van der)
(pág. 81, 200).
- Sufi (al)
(pág. 21, 22, 260).
- Suroca Carrascosa A.
(pág. 267).
- Tafreshi B.
(pág. 69).
- Tales de Mileto
(pág. 17, 74).
- Tanukhi M. (al)
(pág. 268).
- Tchong-Kang
(pág. 32).
- Teón de Alejandría
(pág. 192, 255, 259).
- Thomas P.
(pág. 171).
- Tibbon (ibn)
(pág. 267).

- | | | |
|---|---|--|
| — Tietmaro
(pág. 90). | — Vaugondy R. (de)
(pág. 233, 248). | — Waldseemüller M.
(pág. 200, 201). |
| — Tofiño V.
(pág. 131). | — Veer G. (de)
(pág. 196). | — Waqar A. (ibn)
(pág. 286). |
| — Tolomeo C.
(pág. 1, 5, 15, 18, 22, 23,
24, 32, 36, 37, 51, 52, 55,
73, 77, 80, 99, 101, 102,
103, 104, 105, 106, 107,
108, 109, 110, 111, 112,
113, 114, 115, 116, 117,
118, 119). | — Vega L. (de)
(pág. 306). | — Wedder E.
(pág. 192). |
| — Tomás de Aquino
(pág. 290). | — Vélez de Aragón Z.
(pág. 233). | — Wentworth Dilke O.
(pág. 113). |
| — Toomer G.
(pág. 110). | — Vera y González E.
(pág. 233). | — Werner J.
(pág. 92, 116, 128). |
| — Torricelli E.
(pág. 237). | — Vespuccio A.
(pág. 69, 80, 81, 200, 201,
202, 206). | — Wilkes C.
(pág. 141). |
| — Torroja Menéndez J.
(pág. 271). | — Vicente Maroto M.
(pág. 203). | — Woodward D.
(pág. 113). |
| — Troughton E.
(pág. 227). | — Villiers du Terrage E. (de)
(pág. 52). | — Wright E.
(pág. 218). |
| — Tusi (al)
(pág. 269). | — Virgilio
(pág. 152, 192). | — Yavé
(pág. 237). |
| — Ulises
(pág. 189). | — Viviani V.
(pág. 130). | — Yazdi M. (al)
(pág. 256). |
| — Ulloa A.
(pág. 3, 83, 147). | — Voltaire
(pág. 150, 162). | — Yü-chi
(pág. 32). |
| — Unamuno M.
(pág. 15). | — Vooght N.
(pág. 244). | — Zacuto A.
(pág. 197, 198, 219). |
| — Vasco de Gama
(pág. 79, 197, 198). | — Vopel C.
(pág. 95, 96). | — Zarqālluh (al)
(pág. 266). |
| | — Vrac de Tournières R. (le)
(pág. 151). | — Zawal M. (ibn)
(pág. 291, 292). |
| | — Walcher de Malvern
(pág. 125, 262). | |

AGRADECIMIENTOS

Mi sincero agradecimiento a Lorenzo García Asensio, Director General del Instituto Geográfico Nacional, por su amable presentación. Un agradecimiento que hago extensivo a Tomás Soler Martínez por su brillante prólogo y a María del Carmen Álvarez- Amandi por su desinteresada lectura de las pruebas de maquetación, así como por sus valiosas sugerencias.

MARIO RUIZ MORALES



Maestro mío, ved si ha sido engaño
regular por amor el movimiento,
que hace en paralelos de su intento
el Sol de Fili, discurriendo el año.

Tomé su altura en este desengaño,
y en mi sospecha, que es cierto instrumento,
por coronas conté su pensamiento
y señalome índice mi daño.

O no son estos arcos bien descritos,
(digo estos ojos) o este limbo indicio,
que a aquella antigua oscuridad me torno,

o yo no observo bien vuestros escritos,
que si hace Fili en Géminis solsticio,
no escapa mi Cenit de Capricornio.

Lope de Vega Carpio