

Historias de Matemáticas

Aspectos científicos del viaje del Descubrimiento

Scientific aspects of the voyage of discovery

Santiago Higuera de Frutos

Revista de Investigación



Volumen IX, Número 2, pp. 063–090, ISSN 2174-0410

Recepción: 10 Feb'19; Aceptación: 15 Sep'19

1 de octubre de 2019

Resumen

El viaje del Descubrimiento de octubre de 1492 fue una de las hazañas históricas más importantes de la humanidad. Se considera que dio inicio al periodo histórico denominado Edad Moderna. No se trató de la aventura individual de un visionario, como algunos pretenden, sino que fueron necesarios hombres capaces, medios, conocimientos y preparación científico-técnica, imprescindibles para hacerlo posible. Se tratan en este artículo algunas consideraciones acerca del estado del conocimiento científico en el que se desarrolló dicho viaje.

Palabras Clave: Navegación, Astronomía, Historia, Cristóbal Colón, Juan de la Cosa, Hermanos Pinzón ...

Abstract

The voyage of discovery of October 1492 was one of the most important historical feats of humanity. It is considered that started the historical period called the Modern Age. It was not the individual adventure of a visionary, as some claim, there were necessary men, media, knowledge and scientific-technical preparation, essential to make it possible. This article deals with some considerations about the state of scientific knowledge in which the trip was developed.

Keywords: Navigation, Astronomy, History, Cristóbal Colón, Juan de la Cosa, Pinzón brothers ...

1. Introducción

Ningún artista es durante las veinticuatro horas de su jornada diaria ininterrumpidamente artista. Todo lo que de esencial, todo lo que de duradero consigue, se da siempre en los pocos y extraordinarios momentos de inspiración. (...) También en ese «misterioso taller de Dios», como respetuosamente llamara Goethe a la Historia, gran parte de lo que ocurre es indiferente y trivial. También aquí, como en todos los ámbitos del arte y de la vida, los momentos sublimes, inolvidables, son raros [Zweig, 1927].

En la madrugada del 12 de octubre del año 1492, tres naves españolas comandadas por el almirante Cristóbal Colón avistaron tierra tras algo más de un mes viajando hacia el Oeste a través del Océano Atlántico, hazaña que hasta entonces no se había realizado o, al menos, no está documentado que se hubiera hecho. Se descubría así un nuevo continente, desconocido hasta entonces.

Es difícil imaginar el contexto en el que se realizó dicho viaje. A finales del siglo XV, Europa estaba conmocionada tras la caída de Constantinopla en 1453. Con Constantinopla, y por ende el Bósforo, bajo dominio musulmán, el comercio entre Europa y Asia declinó súbitamente. No era posible, para los mercaderes cristianos, acceder a las rutas terrestres o marítimas que llevaban a la India y a China, de donde provenían las especias usadas para conservar los alimentos, además de artículos de lujo, y hacia donde se destinaban sus mercancías más valiosas.

De esta manera, las naciones europeas iniciaron proyectos para el establecimiento de rutas comerciales alternativas. Portugueses y castellanos aprovecharon su posición geográfica junto al océano Atlántico para tratar de llegar a la India por mar. Los portugueses, con el impulso que propició Enrique El Navegante, trataron de llegar a Asia circunnavegando África, intento que culminó con el viaje de Vasco da Gama entre 1497-1498. En cuanto a Castilla, los Reyes Católicos financiaron la expedición del navegante Cristóbal Colón, quien veía una posibilidad de llegar a Asia por el oeste, a través del Océano Atlántico, intento que culminó en 1492 con el Descubrimiento de América, dando inicio al proceso de exploración y colonización del Nuevo Mundo. Los dos países, que hasta entonces habían tenido una influencia relativa en el escenario político europeo, ocupados como habían estado en la Reconquista, se convirtieron en el siglo XVI en las naciones más poderosas del mundo, creando el sistema moderno mundial.

Si bien, en el ámbito científico y culto, la Tierra se consideraba esférica desde que Eratóstenes, bibliotecario de Alejandría, fijase una circunferencia de 250.000 estadios (entre 39700 y 46600 km), a nivel popular dicha creencia aun no estaba extendida. A pesar de que en el siglo III a.C, Aristarco de Samos ya había señalado que eran la Tierra y los planetas los que giraban alrededor del Sol, y no al contrario, y a pesar de que Arquímedes se hizo eco de ello, la teoría que prevaleció fue la geocéntrica descrita por Ptolomeo en el siglo II en su libro *Almagesto*. No sería hasta mediados del siglo XVI, unos cincuenta años después del viaje del Descubrimiento, cuando Nicolás Copérnico escribiera *De Revolutionibus*, estableciendo la teoría heliocéntrica, poniendo al Sol en el centro del universo y a los planetas girando alrededor suyo. En matemáticas, la numeración más extendida en Europa era la que utilizaba los números romanos, no habiéndose implantado aun la numeración arábiga. La imprenta de tipos móviles se había inventado apenas treinta años antes y los primeros libros impresos se empezaban a distribuir por aquellas fechas. La primera edición impresa de *Los Elementos* de Euclides es la de Campano y data de 1484, ocho años antes del viaje de Colón. Estudiosos del arte y de las matemáticas empezaban a interesarse por la noción de la perspectiva. El calendario que se utilizaba era el juliano. El telescopio aun no se había inventado.

A día de hoy, muchos de los detalles del viaje del Descubrimiento y de sus protagonistas siguen siendo desconocidos. No se tiene certeza acerca del origen de Cristóbal Colón. No se tiene ninguna imagen de Colón, ni tampoco de los barcos que formaron parte de la expedición. Se sigue especulando acerca de los indicios de que disponían los promotores de la expedición, sobre la cartografía utilizada para planificar el viaje y sobre la instrumentación que se utilizó para pilotar las naves [Chocano, 1991].

Hay quien considera que se trató de la aventura de un visionario, y que el descubrimiento de América se produjo por casualidad, o como genialidad exclusiva de un solo individuo. Este planteamiento no es correcto, el viaje del Descubrimiento fue algo más metódico, todo un proceso que necesitó de hombres capaces, medios, conocimientos y preparación científico-técnica imprescindibles para hacerlo posible [Colón, 1492]. Dicho ambiente científico estuvo propiciado tanto por la corona de Castilla como por la corona de Portugal, que mantuvieron una estrecha pugna por el dominio de los mares conocidos. A este fin, se vieron obligadas a recopilar y desa-

rollar los conocimientos necesarios en matemáticas, astronomía, cartografía, instrumentación, tecnología naval y cuantas otras artes y ciencias eran necesarias para dirigir las naves a su objetivo.

Lo que nadie pone en duda es que el descubrimiento del continente americano supuso un punto singular en la historia de la humanidad. El descubrimiento de nuevas tierras con seres humanos semejantes a los europeos y nuevas especies de plantas y animales en todo semejantes a las ya conocidas, dio pie al *humanismo*, que hizo posible el desarrollo del Renacimiento, quizás la época más prolífica que ha tenido lugar en la Historia en cuanto al desarrollo de las artes y de las ciencias. De hecho, se suele considerar el final de la Edad Media y el inicio de la Edad Moderna en la fecha del Descubrimiento¹.

El descubrimiento de América por las naves castellanas, fue un hallazgo afortunado que recompensó un esfuerzo bien planeado con los insuficientes conocimientos de la ciencia de entonces, aunque dirigido hacia otro fin. Posteriormente otras dos grandes hazañas contribuyeron a resolver incógnitas que se planteaba la ciencia de aquellos tiempos: el descubrimiento del Mar del Sur, o sea, del Océano Pacífico por Vasco Núñez de Balboa en 1513 y el descubrimiento del Estrecho de Magallanes en 1520 y la consiguiente circunnavegación del globo por parte de la expedición Magallanes-Elcano.

Este artículo se plantea con un doble objetivo. Por una parte, resumir y poner en orden el estado del conocimiento en las fechas del Descubrimiento, en lo relativo a las ciencias necesarias para la navegación. Por otra, demostrar que el viaje del Descubrimiento no fue la hazaña individual de un aventurero visionario, sino una proeza científica y técnica que requirió de una gran planificación y despliegue de medios.

Para ello, en el apartado 2 se hará un repaso histórico de las matemáticas desarrolladas hasta la fecha del Descubrimiento; el apartado 3 se dedica a establecer los conocimientos sobre geodesia que había a finales del siglo XV; el apartado 4 se dedica a comentar la situación de la cartografía; a continuación, el apartado 5 hace un pequeño resumen de los conocimientos astronómicos; en el apartado 6 se explica el concepto de «*cosmografía*», y se da detalle de alguno de los tratados que consultó Colón para planificar su viaje; en apartado 7 se detallan los instrumentos de medida utilizados en la época del descubrimiento: la brújula para la orientación, los sistemas de referencia y el problema del cálculo de la longitud, el astrolabio, la ballestilla y el cuadrante para la medición de la altura de los astros, la medición nocturna de las horas mediante las «*Guardas de la Polar*», la medición de la velocidad de los buques y la forma de abordar la medida de pequeños intervalos de tiempo y de estimación de las distancias recorridas por los buques.

No se abordan en este artículo los temas relativos a la tecnología naval y las técnicas de navegación, que por sí mismas darían para la redacción de un estudio específico. Tampoco se abordan otros aspectos importantes, como la personalidad y formación de algunos de los marinos embarcados, las causas que pudieron motivar la elección de las rutas de ida y vuelta ni los conocimientos existentes acerca de los regímenes de vientos y corrientes marinas de que disponían antes del viaje y las aportaciones a dicho conocimientos realizadas por la expedición.

2. Las matemáticas medievales

En la Edad Media, e incluso en el Renacimiento, no eran frecuentes los matemáticos puros. Lo habitual es que los desarrollos matemáticos corrieran de la mano de los astrónomos. De hecho era corriente que se unieran en un mismo científico los conocimientos de astronomía, geografía y matemáticas. A la unión de estos tres campos del conocimiento es a lo que Ptolomeo

¹Otros historiadores fijan el inicio de la Edad Moderna en la caída de Constantinopla, en el año 1453. El final de la Edad Moderna se suele establecer en la Revolución Francesa, en 1789

denominó «Cosmografía».

Algunos matemáticos consideran a la matemática aplicada como una hermana menor de la matemática «pura», que sería la verdadera ciencia. Lo cierto es que, en numerosas ocasiones, la necesidad de resolución de determinados problemas en otros campos del conocimiento, es lo que propicia el desarrollo de distintas ramas de las matemáticas.

Hasta finales del siglo XV, la navegación discurría siempre cercana a la costa. En el Mediterráneo a veces se perdía de vista la tierra firme, pero era por cortos periodos de tiempo y navegando en una dirección conocida, de la que se conocía la distancia que había que recorrer para alcanzar el puerto de destino. Este tipo de navegación requiere pocos conocimientos matemáticos o de cosmografía.

Los viajes de navegación de altura iniciados en el siglo XV por parte de marinos portugueses y españoles, pusieron en evidencia la necesidad de perfeccionar los conocimientos de astronomía, trigonometría esférica y otros. Estas ciencias utilizan las matemáticas como lenguaje de expresión y como herramienta, lo que tuvo como consecuencia que el desarrollo de muchos campos de las matemáticas estuviera íntimamente asociado con la navegación y con los marinos. Desde el inicio de la navegación oceánica, las matemáticas han estado ligadas al arte de navegar, dando lugar a importantes colaboraciones, tanto de matemáticos que han aportado conocimientos al arte de navegar, como de navegantes que han realizado importantes aportaciones a las matemáticas aplicadas². Esta asociación entre matemáticas y navegación se mantuvo durante varios siglos y, de hecho, se sigue manteniendo hoy en día a través de la navegación espacial, que no es sino una prolongación de la navegación a vela de los siglos pasados.

La Grecia clásica propició la existencia de grandes matemáticos y pensadores. Grecia vivió su gran esplendor en el siglo III a.C., con las cátedras de Euclides, Arquímedes, Eratóstenes y Apolonio, entre otros muchos. Paralelamente, Alejandría se estableció como el centro cultural del mundo. A ella llegaron filósofos, médicos, matemáticos y toda clase de sabios, para aprender en su famosa biblioteca. La biblioteca de Alejandría llegó a albergar 900.000 volúmenes.

En el siglo II de nuestra era, tras la invasión romana, Grecia vivió un nuevo renacimiento. Ptolomeo dio una explicación del Sistema Solar en el *Almagesto*, Diofanto estableció las bases del álgebra y de la teoría de los números en su *Aritmética*. En el siglo III, Pappus publicó la *Colección matemática*. En el siglo IV, Teón de Alejandría y su hija Hipatia publicaron sus ediciones de los *Elementos* y del *Almagesto* [Dorce, 2016].

El imperio romano aportó poco al conocimiento matemático. El sistema de numeración que utilizaban asignaba valor a ciertas letras y era no posicional. Esto daba lugar a que la representación de números grandes y la realización de las operaciones aritméticas suma, resta y, sobre todo, multiplicación y división, fuera complicada.

Merece aquí destacar la *Historia natural* (en latín *Naturalis historia*), que es una enciclopedia escrita en latín por el procurador imperial romano Plinio el Viejo en el año 77. Esta es una de las mayores obras individuales que sobreviven del Imperio romano en nuestros días, y pretendía abarcar todo el conocimiento que se tenía en ese momento. La obra está dividida en treinta y siete libros, organizados en diez volúmenes y su temática incluye astronomía, matemáticas, geografía, etnografía, antropología, fisiología humana, zoología, botánica, agricultura, horticultura, farmacología, minería, mineralogía, escultura, pintura y piedras preciosas. Se menciona aquí, pues consta que era conocida por Colón, y que realizó anotaciones en los márgenes del ejemplar al que tuvo acceso.

A finales del siglo IV de nuestra era, la biblioteca de Alejandría fue destruida y con ello se perdió una parte importante del conocimiento humano desarrollado hasta la fecha. Comenzó la Edad Media³.

²Piénsese, por ejemplo, en el caso de los españoles Antonio de Ulloa o Jorge Juan [Navarrete, 1846]

³El comienzo de la Edad Media se suele fijar en la caída del Imperio Romano, que sucedió por las mismas fechas

El colapso de la civilización clásica estancó el desarrollo de las matemáticas occidentales durante siglos, pero el progreso continuó en otras culturas. Durante ese periodo se estaban desarrollando conocimientos científicos de relevancia en otras partes del planeta. Es el caso de China o de la India. Los conocimientos chinos no llegaron a occidente hasta mucho después de la época del Descubrimiento. Las matemáticas hindúes lidiaban en la Edad Media con conceptos como los números negativos, el cero y el infinito, que Occidente no dominaría durante siglos. Estos conocimientos llegaron a Europa a través de las traducciones que hicieron los autores árabes y, junto con lo mejor del aprendizaje clásico, se combinaron en el trabajo de los eruditos islámicos medievales. Esto llevó a las matemáticas a un nuevo nivel mediante el desarrollo de la trigonometría y el álgebra, y usando los modelos indios para producir el sistema de números que tenemos hoy [Levy, 2016].

En el siglo V, en la India, destacó la figura de Brahmagupta. Brahmagupta, como es natural, no fue un genio aislado. Vivió en el subcontinente Indio, donde se había desarrollado una de las civilizaciones más antiguas de la historia de la humanidad, la del valle del Indo. Aunque se conoce poco de la vida de Brahmagupta, se sabe que tuvo conocimiento de los trabajos de matemáticos griegos, como Herón de Alejandría, Ptolomeo o Diofanto. Legó dos importantes tratados. En uno de ellos, el *Brahma-sphuta-siddhanta*, escrito cuando tenía 30 años, desarrolló la aritmética de los números positivos, negativos y el cero. Es la primera explicación que ha llegado hasta nuestros días, conservada en un texto, de las reglas operativas entre dichos números. Su segundo tratado, escrito a la edad de 67 años, se titulaba *Khanda-Khandyaka*, y era un manual de astronomía matemática. Como era tradición entre los matemáticos hindúes, los libros estaban escritos en forma poética [Guevara, 2016].

A partir del siglo VII, la cultura islámica comienza una gran expansión que dio lugar a un vasto imperio que, en sus momentos de mayor auge, fue mayor que ninguno de los imperios anteriores, incluido el romano. Las cortes árabes propiciaban el desarrollo de las artes y de las ciencias. Acometieron la tarea de la traducción a su lengua de las obras de los clásicos griegos y las de los hindúes. Las matemáticas, al igual que las otras ciencias, adquirieron nuevo impulso. Adoptaron la numeración de los hindúes, pues facilitaban el manejo de los números grandes e incorporaron el cero.

Destaca en este contexto la figura de Al-Khuwarizmi, en el siglo IX, geógrafo, astrónomo y matemático persa. Al-Khuwarizmi fue una de las figuras más destacadas de la matemática árabe y su obra no puede entenderse sin el contexto en el que se desarrolló su vida. En el siglo IX, Bagdad se convirtió en una de las ciudades más prósperas del mundo y los mecenazgos de los distintos califas propiciaron su supremacía cultural sobre cualquier iniciativa similar desarrollada hasta el momento. Desde la *Casa de la Sabiduría*, la astronomía, las matemáticas y todas las ciencias, vivieron su esplendor gracias a la conjunción de las herencias griegas, india y persa [Dorce, 2016].

En las traducciones que se hicieron de sus libros, su nombre aparecía deformado, y ello dio lugar al nacimiento del término «*Algoritmo*», con su significado actual. Su obra «*Aritmética*» contribuyó en gran manera a la difusión en el mundo árabe de las cifras hindúes, al uso del cero y al conocimiento de las reglas para las cuatro operaciones con números enteros y fraccionarios.

El libro más importante de Al-Khuwarizmi fue *Hisab al-jabar wa-al-muqabala*. Los árabes planteaban las ecuaciones con coeficientes enteros y positivos. Tras plantear el problema, lo primero que hacían era reordenar o restaurar el orden de la ecuación, procedimiento al que se refiere el término «*al-jabar*» y que daría lugar al vocablo «*Álgebra*». En el Quijote, Cervantes se refiere a los algebristas como las personas encargadas de recomponer los huesos descoyuntados [Rey Pastor, 1985-1].

En el siglo XII se dio un renacimiento de la cultura europea, motivado por incremento de las relaciones comerciales de las repúblicas italianas con el Oriente que se dieron a partir del año 1000 y la penetración en territorios de cultura árabe por los normandos de Sicilia, por la

Reconquista española y por los cruzados.

Se desató un entusiasmo por buscar documentos de la antigüedad griega traducidos al árabe y también obras árabes originales. Toledo fue el epicentro de este nuevo movimiento de traducción. Eruditos cristianos, judíos y musulmanes trabajaron juntos para traducir obras del árabe al latín. La matemática recibió un poderoso impulso a partir de la traducción al latín de los *Elementos* de Euclides, de las obras de aritmética y álgebra escritas a comienzos del siglo IX por el persa Al-Khuwarizmi, del *De mensura circuli* de Arquímedes y del libro de geometría *Liber trium fratrum*. De esta forma, a finales del siglo XII, se dio un importante ambiente intelectual en el que destacan figuras como Leonardo de Pisa, Alberto Magno y Rogerio Bacon. El enfoque que se dio a las matemáticas en esta época era fundamentalmente utilitario, para resolver los problemas a que daban lugar el incremento de las transacciones comerciales.

Leonardo de Pisa, también conocido como Fibonacci, fue el matemático más destacado de ese periodo. Nació en el año 1175 y era hijo de Bonaccio, responsable de la oficina de aduanas de Pisa en Argelia. Por indicación de su padre, y con financiación de los mercaderes de Pisa, siguió diversos cursos sobre cálculo posicional hindú y visitó Egipto, Siria, Provenza, Sicilia y Grecia, para conocer a los matemáticos de estos países. Fruto de esa formación fue la publicación de su libro *Liber abaci*, primer e insuperado modelo de «*summa*» medieval, en el que según palabras del propio autor, quiso poner «*a disposición de la gens latina todo cuanto sabía de aritmética y álgebra*». En esta obra se presentan las *novem figurae* de los hindúes y el *signum 0* (*quod arabice zephirum appellatur*), las operaciones con ellos en enteros y en fracciones, las pruebas por 7, 9, 11, 13 y el criterio de divisibilidad por 9, las aplicaciones para determinar el máximo común divisor y el mínimo común múltiplo, reglas sobre compraventas, permutas, sociedades, leyes y cambios con las más diversas monedas entonces en curso, proporciones, regla de tres simple y compuesta, y otras cosas por el estilo. Se dedican capítulos independientes a la regla *elchataym* (o *regula falsi*, de la doble posición para solucionar ecuaciones de primer grado) y a las cuestiones *aliebre et almucabale*, relativas a la solución, discusión y aplicación de las ecuaciones de segundo grado. El *Liber abaci* fue libro de referencia para la formación matemática de numerosos estudiosos durante más de tres siglos [Picutti, 1995].

A pesar del entusiasmo de Leonardo de Pisa por la numeración indo-árabiga, los números romanos no se dejaron de utilizar hasta varios siglos después. Sirva como ejemplo que, en el siglo XVIII, el Tribunal de Cuentas de Francia todavía utilizaba números romanos.

En 1220, Leonardo de Pisa publica *Pratica geometriae*, basada en los *Elementos* de Euclides y con algunas partes tomadas de Arquímedes, de Herón y de Ptolomeo. Este libro también se convirtió en un libro de texto básico para todo tipo de estudiosos de las matemáticas hasta la publicación, en 1494, de la *Summa de Arithmetica geometria Proportioni et proportionalità* de fray Luca Pacioli.

Otra obra destacada de Leonardo de Pisa es *Liber Quadratorum*, (El Libro de los Números Cuadrados). Consta de veinte proposiciones. Estas no consisten en una recopilación sistemática de las propiedades de los números cuadrados, sino una selección de las propiedades que llevan a resolver un problema de análisis indeterminado de segundo grado que le fuera propuesto por Teodoro de Antioquía, astrólogo de la corte de Federico II.

No era una época fácil para las matemáticas y la ciencia en general. Por poner un ejemplo, a principios del siglo XIII en París se prohibió la lectura de los textos de Aristóteles, bajo pena de excomunión.

Alfonso X el Sabio, reinó en Castilla desde 1252 hasta 1284. Estableció en Toledo un equivalente a la *Casa de la Sabiduría* de Bagdag, con la contratación de académicos para traducir las astronomía y la astrología árabe. Patrocinó la creación de las *Tablas alfonsíes*.

Las *Tablas alfonsíes* contienen las observaciones astronómicas efectuadas en el firmamento de Toledo desde el 1 de enero de 1263 hasta 1272. Se consigna el movimiento de los respectivos

cuerpos celestes sobre la eclíptica, con posiciones exactas y precisas. El objetivo de estas tablas era proporcionar un esquema de uso práctico para calcular la posición del Sol, la Luna y los planetas, de acuerdo con el sistema geocéntrico de Ptolomeo. Las observaciones originales provienen de las *Tablas toledanas* del siglo XI, confeccionadas en Toledo por un grupo de astrónomos entre los cuales destacaba el andalusí Azarquiel. La revisión de estas tablas se fundó en las observaciones llevadas a cabo, también en Toledo, por los científicos judíos alfonsíes Yehuda ben Moshe e Isaac ben Sid. La influencia de las Tablas abarcó a toda Europa a través de una revisión francesa de comienzos del siglo XIV, cuya utilización llegó incluso hasta el Renacimiento.

En el siglo XIII desarrolló su trabajo Ramon Llull, nacido en Mallorca 1235. Además de su obra evangelizadora, que le llegó a costar la vida, pues murió lapidado en Argel por predicar el cristianismo, escribió sobre matemáticas. Introdujo la lógica simbólica, que tiene un papel muy importante en su obra *Árbol de Ciencia*, y el pensamiento combinatorio, que ejerció una gran influencia sobre matemáticos posteriores, como Leibnitz. En su obra *Ars Combinatoria* aparece por primera vez la denominación de *combinatoria* que hoy se usa. También se atribuye a Ramón Llull la invención del nocturlabio y de la rosa de los vientos.

Después de Fibonacci, el siguiente gran matemático medieval fue el francés Nicole Oresme (1323-1382), que fue el primero en trabajar con exponentes fraccionarios. Publicó trabajos sobre las series infinitas y una versión de la geometría analítica que precedió a Descartes varios siglos [Levy, 2016].

En el siglo XV tuvo lugar una ruptura de prejuicios y supersticiones. Así lo describe Rey Pastor:

«(...) se produjo un tránsito de la Astrología a la Astronomía y de la Alquimia a la Química, que trajo en hechos materiales los gérmenes espirituales del Renacimiento, una de cuyas fuerzas propulsoras más poderosas fue, sin duda, la epopeya escrita por los ibéricos con sus descubrimientos geográficos, que influyó decisivamente en todos los estratos de la cultura. Los movimientos de los astros ya no interesan para trazar el horóscopo de los mortales, sino para navegar con rumbo cierto hacia las tierras de la canela y la pimienta; pero pronto se despierta la curiosidad desinteresada, y al margen de la resolución de tales problemas técnicos, de aplicación útil y perentoria, las mentes especulativas se plantean cuestiones teóricas de ciencia pura. Tal, por ejemplo, la invención de la loxodromia por el genial Pedro Núñez, con la cual enriquece la geometría esférica. Perdida ya la fe en la infalibilidad de los filósofos antiguos, el espíritu vuela libre de trabas, y todos se disponen a leer por su propia cuenta en el gran libro del mundo» [Rey Pastor, 1951].

En 1412 nació en Baza (Granada) Abu'l Hasn Ibn Ali Al-Qualasadi, que fue uno de los más importantes matemáticos de esa época en España. Tuvo numerosos discípulos y escribió 12 obras de aritmética y álgebra. Al-Qualasadi hizo el primer estudio serio de separación de las raíces de las ecuaciones numéricas. Calculó sumas de cubos y cuadrados de números naturales y fue capaz de calcular raíces cuadradas mediante aproximaciones sucesivas.

Otro notable matemático español del siglo XV fue el dominico Juan de Ortega, quien en su libro *Tratado sutilísimo de aritmética y geometría*, expone por primera vez en Europa un nuevo procedimiento para extraer raíces cuadradas.

Luca Pacioli nació en el centro-norte de Italia hacia 1445. Vivió justamente durante la transición entre los periodos medieval y moderno. Pacioli no fue un científico ni un investigador, fue un divulgador de las matemáticas y un docente. Es considerado el padre de la contabilidad moderna. En su afán divulgador, escribía sus obras en italiano, en un tiempo en el que era casi inconcebible que los libros científicos no se escribieran en latín. Sus dos obras más importantes son la *Summa de arithmetica*, que era un compendio de los conocimientos matemáticos hasta la fecha, y *La divina proportione*. Este último estaba ilustrado por su amigo Leonardo Davinci, y trata de las propiedades del «número de oro» o «proporción áurea», número irracional con notables

propiedades algebraicas, geométricas y estéticas [Piñeiro, 2017].

A finales del siglo XV destacó también como astrónomo y matemático el alemán Johann Müller Regiomontano. La obra escrita de Regiomontano engloba tratados de matemática, centrados en lo que hoy se denomina trigonometría (se le considera uno de los fundadores de esta parte de la matemática) y tratados sobre astronomía. Por otra parte describe e inventa varios instrumentos útiles para la observación y la medida del tiempo (relojes solares). Entre sus obras están *De Triangulis Omnimodis*, estructurada de manera similar a los *Elementos* de Euclides. *De Triangulis* se compone de cinco libros. En el primero da las definiciones básicas: cantidad, ratio, igualdad, círculos, arcos, cuerdas y la función seno. Proporciona algunos axiomas que serán el sustento de los 56 teoremas que enunciará. En el segundo de los libros establece la ley del seno y la emplea en la resolución de algunos problemas con triángulos. Determina el área de un triángulo mediante el conocimiento de dos lados y el ángulo que los sustenta. Los libros III, IV y V tratan de trigonometría esférica centrandó el tema para las posteriores obras de astronomía. También publicó varias tablas de senos empleando divisiones sexagesimales y decimales.

En el terreno de la astronomía publicó el trabajo *Epitome in Almagestum*, en el que expone el sistema de Ptolomeo. Regiomontano publicó también tablas de efemérides astronómicas, que fueron las utilizadas por Colón para sus cálculos de longitud a partir de los eclipses de Luna.

3. Geodesia y física del globo

Suele afirmarse, sin razón, que las expediciones de Colón y Magallanes derrocaron la concepción del mundo como disco plano, demostrando la esfericidad del planeta. No es correcto; la idea de la tierra esférica estaba extendida entre las personas cultas. Ya los griegos habían abandonado esa idea. La observación de la sombra arrojada sobre nuestro satélite en los eclipses lunares confirmaba visiblemente esta verdad. Ahora bien, una cosa es el globo y otra el *ecúmene* o mundo habitable, que en los primeros siglos medievales se suponía que era un disco flotante sobre las aguas; pero a fines de la Edad Media se impuso definitivamente la tesis aristotélica, que consideraba la tierra como esfera sólida, cubierta de aguas, excepto en la porción que constituye los continentes.

El término geodesia lo usó inicialmente Aristóteles (384-322 a. C.) y trata de la representación de la forma y de la superficie de la Tierra. La geodesia también se emplea en matemáticas para la medida y el cálculo en superficies curvas. Se utilizan métodos semejantes a los utilizados en la superficie curva de la Tierra.

Existe mucha incertidumbre acerca de las mediciones geodésicas realizadas por los griegos y que tanto influyeron en el pensamiento de Colón. En la tabla 1, se pueden ver las medidas que se atribuyen a algunos de los sabios griegos. Dichas medidas están expresadas en *estadios*.

El estadio era una unidad de longitud de la Antigüedad, utilizada principalmente en Grecia y Egipto, cuya medida exacta era variable dependiendo de la época y del lugar. En Grecia un estadio siempre tenía 600 pies, pero la medida del pie no era la misma en todas las *polis*. El más usado era el estadio Olímpico, que tendría 185 m. Por otro lado, el estadio ático medía 177,6 m. También existía el estadio egipcio, que en el siglo III a. C., tenía 157,5 m.

Se suele considerar el cálculo de Eratóstenes como el más ajustado. Eratóstenes sabía que en Siena (hoy Asuan), el día del equinoccio, a mediodía, los objetos no arrojaban sombra, lo que equivale a decir que Siena estaba situada en el Trópico. Consideró que Alejandría estaba en el mismo meridiano que Siena y obtuvo la distancia entre ambas ciudades a partir de los datos de las caravanas que hacían dicho trayecto. A partir de la medida angular de la sombra arrojada en Alejandría en el mediodía del equinoccio, calculó los grados de meridiano que había entre ambas ciudades y, con ello, la medida de la longitud del círculo máximo (ver figura 1).

Cuadro 1. Madiciones geodésicas de la circunferencia ecuatorial de la Tierra realizadas por los griegos

	Fecha	Estadios	m (1 e = 185 m)	m (1 e = 157.5 m)
Eudoxio	s. V a.C.	400.000	74.000	63.000
Dicearco	s. III a.C.	300.000	55.500	47.250
Eratóstenes	s. III a.C.	252.000	46.620	39.690
Posidonio	s. I a.C.	180.000	33.300	28.350



Figura 1. Esquema del cálculo realizado por Eratóstenes (fuente de la imagen [Wikipedia Eratóstenes, 2018])

Actualmente se asigna una medida de 6356.8 m al radio polar de la Tierra, lo que da lugar a una medida de la circunferencia del meridiano de 39.941 km.

No es descabellado pensar que Eratóstenes utilizase el estadio egipcio de 157.5 m, dada su procedencia y el lugar en el que se realizaron las mediciones. Si se rehace el cálculo de Eratóstenes con la distancia y medida angular exacta desde Alejandría hasta el lugar geográfico situado justo en la intersección del meridiano que pasa por Alejandría con el paralelo del trópico de cáncer, se obtiene un valor de 40074 km para la circunferencia terrestre, con un error inferior al 1 %.

Posidonio rehizo el cálculo de Eratóstenes 150 años más tarde y obtuvo una circunferencia sensiblemente menor. Este valor fue adoptado por Ptolomeo y fue en el que probablemente se basó Cristóbal Colón para justificar la viabilidad del viaje a las Indias por occidente. Con las mediciones de Eratóstenes, el viaje no se habría llegado a realizar, al menos en aquella época y con aquellos medios, aceptando solo las certezas científicas. La *Xunta dos Mathematicos*, que asesoraba al monarca, que utilizaba la medición de Eratóstenes, desaconsejó el viaje. En su informe, realizado a petición real, determinaron que el objetivo principal, –llegar a China y Japón–, era imposible dada la distancia [Comellas, 2012]. Finalmente, la empresa fue aprobada por la reina por las ventajas estratégicas y comerciales que preveía el proyecto y sobre objetivos secundarios, como la condición de Colón de obtener prebendas y porcentajes sobre las tierras que descubriera en camino.

Paolo dal Pozzo Toscanelli (Florencia, 1397-1482) fue un matemático, astrólogo y cosmógrafo italiano. En junio de 1474 envió una carta, con un mapa adjunto, a su antiguo amigo el médico portugués Fernando Martíns de Roriz, al cual el rey Alfonso V de Portugal le había pedido un parecer geográfico sobre las rutas a las Indias. Toscanelli expuso una idea para llegar a las islas de las Especies navegando hacia el oeste.

Los cálculos de Toscanelli, que nunca había salido de Italia, daban a la tierra una circunferencia de unos 29.000 km, según cálculos de historiadores modernos, en lugar de los 40.000 km reales. Este error se habría producido al basarse en datos de la Geografía de Ptolomeo. Esta confusión habría tenido dos efectos de calado: en primer lugar, animó a Colón a emprender la ruta hacia occidente, en segundo lugar, propició la identificación por el Almirante de las tierras del Caribe con la isla mítica de Antilla y con el oriente del continente asiático [Comellas, 2012].

Hernando Colón, hijo de Cristóbal Colón, en su *Historia del Almirante*, transcribe una carta enviada por Toscanelli a Cristóbal Colón en la que se afirma que le envía copia de la carta de Fernando Martín y del famoso mapa:

«Como respuesta a tu carta, te remito copia de otra carta que hace tiempo escribí a un amigo mío, servidor de su majestad el rey de Portugal, antes de las guerras de Castilla ... Te mando también una carta de marear igual que la que le envié a él... En ella está delineado todo el extremo de occidente, abarcando desde Irlanda hasta el sur, llegando a Guinea, con todas las islas que en este trayecto se encuentran. Justo frente a ellas, en poniente, está dibujado el comienzo de las Indias con las islas y los territorios a los que os podéis dirigir. Consta también cuánto os podéis alejar del polo ártico por la línea equinocial, y durante cuánto tiempo, es decir, cuántas leguas hay que hacer para llegar a aquellas tierras... Las líneas rectas que surcan a lo largo de dicha carta muestran la distancia que hay de poniente a levante; las otras, verticales, marcan la distancia que hay de norte a sur... Desde la ciudad de Lisboa, yendo derechos hacia poniente, figuran en dicha carta veintiséis espacios, cada uno de los cuales abarca doscientas cincuenta millas, hasta llegar a la muy noble ciudad de Quinsai, que tiene un perímetro de cien millas, es decir, treinta y cinco leguas... Dicha ciudad se encuentra en la provincia de Mangi, cerca de la provincia de Catay⁴. Desde la isla de la Antilla⁵, a la que vosotros conocéis y llamáis de las Siete Ciudades, hasta la muy noble isla de Cipango⁶, hay diez espacios, correspondientes a dos mil quinientas millas, es decir, doscientas veinticinco leguas. (Florencia, a 25 de junio de 1474)» [Hernando Colón, 1571]

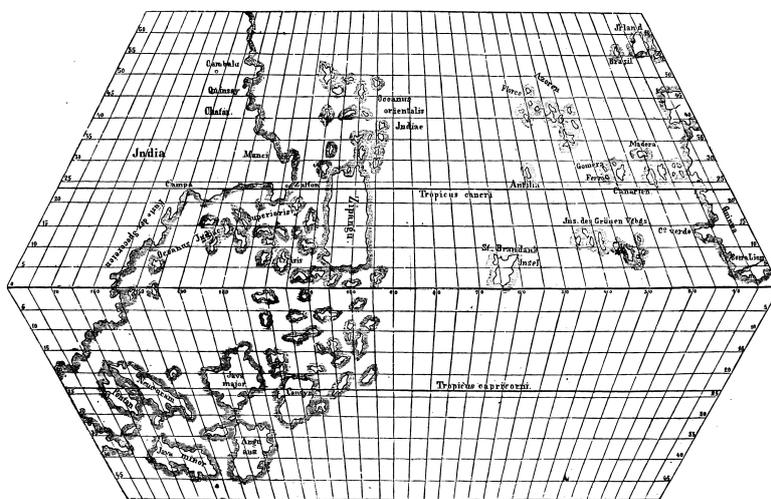


Figura 2. Reconstrucción hipotética del mapa de Toscanelli realizada en 1898 Fuente: Wikipedia).

El mapa de Toscanelli no se ha conservado. Varios historiadores modernos han propuesto reconstrucciones hipotéticas basadas en la descripción que da el propio Toscanelli en su carta. Era una «carta de navegar», en la cual estaban dibujadas líneas rectas longitudinales que indicaban la distancia este-oeste y líneas rectas transversales para las distancias norte-sur (ver figura 2).

⁴Quinsay es la actual Ching-chiang-hsien. Catay es hoy Hang-chou

⁵Era una isla fantástica supuestamente situada en el océano hacia los 40° de latitud norte

⁶Japón

4. Cartografía

Los primeros mapas medievales eran circulares, de acuerdo con la forma supuesta para el mundo habitado, aunque también los había de forma ovalada o, incluso, en forma de corazón. Además de colocar el Paraíso en uno u otro lugar del Oriente, solían estar ilustrados con numerosas figuras de geografía física o política, especialmente con representaciones de hombres y animales monstruosos (figura 3). Lo cierto es que los mapas evolucionaron poco en la Edad Media [Comellas, 2015].

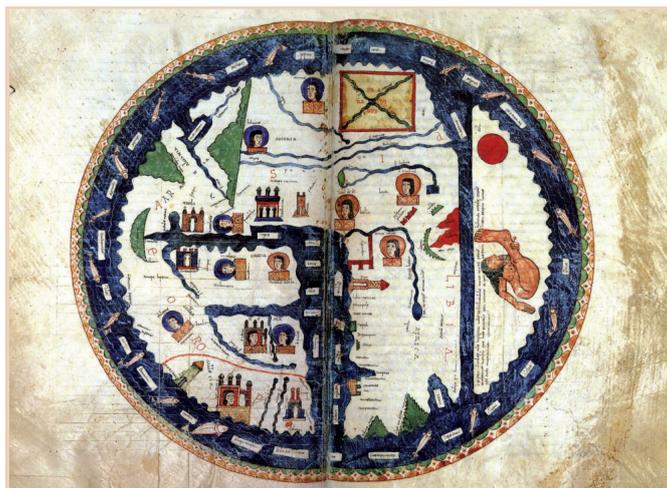


Figura 3. Mapamundi del Beato de Burgo de Osma contenido en la obra *Apocalipsis*, Beato de Liébana, monjes Pedro y Martino, 1086 [Calendario IGN, 2018]

Ya en el siglo XIII se había iniciado un nuevo tipo de mapa más científico para representar las costas, con menos fantasías y figuras abigarradas. Son los mal llamados *portulanos*, *cartas de compás* o *loxodrómicas*, caracterizados por la encrucijada de líneas que los atraviesan, radios de rosas náuticas con sus centros dispuestos en circunferencia, mediante los cuales podían orientar su rumbo los navegantes. Se trata de las primeras cartas náuticas. No se sabe a ciencia cierta quién inventó la carta portulana o de compás, precursora de la moderna carta náutica. A veces se denominan incorrectamente portulanos a determinadas cartas planas. Otro punto en controversia es la existencia de un supuesto modelo, no se sabe si italiano o mallorquín, del que derivarían los portulanos conocidos, muy semejantes entre sí [Comellas, 2015].

No estaban sujetas a ningún método de proyección, antes de que se inventara el sistema de proyección que, gracias a Mercator, resolvió el problema de trazar el rumbo exactamente entre puntos cualesquiera. La deformidad salta a la vista, apareciendo contraídas las dimensiones norte-sur, al contrario de lo que sucede en las cartas de Mercator (figura 4). Esto podría deberse a haber utilizado datos españoles o portugueses para las costas del Atlántico, expresados en leguas, que al ser erróneamente reducidas a millas de portulano produjeron esa deformación [Comellas, 2015].

Entre las aportaciones más importantes de los pueblos ibéricos a las ciencias positivas, destacan sus aportaciones a la Geografía. En el primer tercio del siglo XIV, navegantes mallorquines se arriesgaron a llegar al «*Mar Tenebroso*». De estas expediciones no quedan documentos fidedignos, pero sí queda el fruto de sus descubrimientos, en los primeros portulanos mallorquines. Por ejemplo, el de Dulceti o Dulcert, fechado en Mallorca en 1339, traza la costa africana en mayor trecho que los portulanos italianos, los cuales llegan sólo hasta el cabo Bojador, considerado como límite meridional del mundo. El mallorquín Guillermo Soleri (¿Soler?), que trabajó a fines del siglo, publicó una carta en 1385 que se conserva en Florencia y otra que se conserva en París.



Figura 4. Mapa del mundo incluido en la «Cosmographia» de Ptolomeo, realizada en Florencia entre 1460 y 1477, conocida como *Codex valentinus* [Calendario IGN, 2018]

Además del de Duceti, algunos de los portulanos más antiguos conocidos son: la carta pisaná del Mediterráneo, que se supone de fines del siglo XIII (alguien asegura que es de 1270); el atlas de Luxoro en Génova, de la misma época; la de Petrus Vesconte dibujada en Génova en 1311; la de Angelino Dalorto, en 1325; la de Giovanni Carignano, que se supone también de comienzos del siglo XIV. Entre los italianos del mismo siglo XIV merece citarse Francesco Pizigano (1367-1373);

En el siglo XIV, los mapas evolucionan rápidamente, al compás de las exploraciones de mallorquines, catalanes e italianos. Son famosos el de Visconti, o de Sanudo (1320), el Atlas de los Médici (1351) y la carta catalana de 1375.

Ya en el siglo XV surgieron muchos trazadores de portulanos: el mallorquín Viladestes, que tiene un portulano (algunos escritores españoles llegan a atribuirle la invención de la proyección de Mercator) fechado en 1413; los italianos Jacobo de Giroladis, Pietro delli Versi, Battista Becharius, Andrea Bianco, que trabajaron de 1422 a 1448; el mallorquín Gabriel de Valseca, de quien se conserva un portulano de 1439; Petrus Roselli (1447-65), Bartolomé Pareto (1455), Gratius Benicasa (1461-82), Andrea Benicasa (1476-90), Conte Freducci (1497), y otros.



Figura 5. Carta Universal, Juan de la Cosa, 1500. Primer Mapa en el que se representa América. Museo Naval. Madrid. [Calendario IGN, 2018]

Juan de la Cosa fue el cartógrafo que acompañó a Colón en sus primeros dos viajes al conti-

nente americano. El mismo era navegante y residía en el Puerto de Santa María, donde poseía una nave llamada *Mariegalante*, en honor de una mujer de la que estuvo enamorado, que fue la que se renombró como Santa María para el primer viaje de Colón. Participó en los primeros siete viajes que se hicieron a América, tanto con Colón, como con Alfonso de Ojeda e incluso al mando de alguna expedición. Era «el cartógrafo de la reina», como lo denomina Javier Tazón en su excelente novela [Tazón, 2010]. Al regreso de estos viajes dibujó su mapamundi, la «*Carta de Juan de la Cosa*», publicada en el año 1500 y que se conserva en el Museo Naval de Madrid (figura 5).

Se trata del mapa más antiguo conservado en el que aparece el continente americano.

Está dibujado sobre pergamino, en dos pieles que, unidas por el eje menor, forman un rectángulo de 1,83 m de longitud por 0,96m de altura, á no haberse redondeado la parte superior, con objeto, sin duda, de embellecer la forma del conjunto y suprimir el espacio que habían de ocupar regiones desconocidas del recién descubierto continente americano. Sirve como eje mayor de semejante rectángulo, el trópico de Cáncer, siendo el punto cardinal Oeste el extremo superior, en el cual, tocando el arco de círculo que remata la figura del documento, hay otro rectángulo pequeño, á manera de cuadrado con marco, que contiene una efigie de San Cristóbal (...) alusión evidente y clara á Cristóbal Colón. Varios han sido los que han supuesto que la cara del Santo es el verdadero retrato del Almirante, y en realidad, tantas razones hay para afirmarlo como para negarlo [Dascano, 1892].

Dicho mapa refleja los resultados de los descubrimientos realizados en América durante el siglo XV, con información procedente de los viajes realizados por Colón (viajes de 1492, 1493 y 1498), Alonso de Ojeda, Vicente Yáñez Pinzón, Juan Caboto, Pedro Álvares Cabral y diversos exploradores portugueses que recorrieron África, como Bartolomeu Dias y Vasco da Gama.



Figura 6. Mapa del mundo de Henricus Martellus, 1489, primer mapa en el que aparece delineada África [Calendario IGN, 2018].

La Cosa sugirió que, las tierras descubiertas en el norte y el sur de América, podían estar unidas formando un solo continente, aunque con la efigie superior hizo un truco para permitir la posibilidad de que existiera un paso marítimo entre ambas en Centroamérica, cosa que Colón

creía. Cuba aparece ya identificada como una isla, en contra de la opinión de Colón. En general las Antillas aparecen de manera completa y en América del Sur se muestra la costa desde el cabo de la Vela hasta el cabo de San Agustín, mostrando una parte del norte del Brasil. Por el contrario, en América del Norte no se muestran la península de Florida, el golfo de México ni la península de Yucatán. América Central está tapada por la efigie del santo.

El contorno de las costas de África aparece dibujado por primera vez de manera correcta, gracias a los últimos viajes de exploración realizados por los portugueses, en contra de lo que ocurría con el mapa de Martellus (figura 6). La región de Europa y el Mediterráneo aparece bien detallada, mientras que amplias zonas de Asia se muestran vacías e imprecisas.

El mapa está decorado con rosas de los vientos, banderas, barcos, ciudades, reyes, personajes de la Biblia y figuras mitológicas. Se representan algunos ríos y la mayoría de los topónimos están escritos en castellano antiguo.

5. Astronomía

Durante la Edad Media, la Astronomía era cultivada casi exclusivamente como ciencia auxiliar de la Astrología. El trazado de horóscopos así lo exigía.

En la antigua Grecia, el astrónomo y matemático Eudoxo estableció el conjunto completo de constelaciones clásicas alrededor del 370 a.C. En el siglo II, Ptolomeo publicó un catálogo con 1022 estrellas visibles desde Alejandría, como parte de su libro *Almagesto*. El catálogo de Ptolomeo se basó casi por completo en uno anterior de Hiparco. Se mantuvo como el catálogo estándar de estrellas en el mundo occidental y entre los árabes durante más de ocho siglos⁷.

Durante la época de esplendor del islam, los astrónomos árabes publicaron diversos catálogos de estrellas, incluyendo el *Compendio de la ciencia de las estrellas* de Alfraganus (850), que corregía el *Almagesto* de Ptolomeo, las *Tablas toledanas* de Azarquiel (1087), las *Tablas iljaníes* del Observatorio de Maraghe (1272) y las *Tablas sultanianas* de Ulugh Beg (1437). Como herencia de ese trabajo llevado a cabo por los astrónomos árabes, todavía se siguen utilizando muchos nombres árabes para muchas estrellas.

La concepción del universo que imperaba en la época de Colón era la concepción geocéntrica de Ptolomeo. Existían, no obstante, compendios de efemérides que permitían predecir las posiciones de los principales planetas y de los eclipses del Sol y de la Luna. Ya se han mencionado, en ese sentido, las tablas de efemérides astronómicas de Regiomontano, que son las que utilizaba Colón en sus viajes.

6. La cosmografía y la náutica

El término «*cosmografía*» aparece en la obra de Claudio Ptolomeo (siglo II d. C.), y se refiere a la ciencia que describe las características del universo en forma de mapas, combinando elementos de la geografía y la astronomía. En la España del siglo XVI se utilizó este concepto por parte de la escuela creada por la Casa de Contratación de Sevilla, para englobar todas las materias relacionadas con la navegación transatlántica, en la que era imprescindible la preparación matemática y los conocimientos de Astronomía.

La acumulación de conocimientos de cosmografía en el suroeste de Europa fue muy importante desde los siglos finales de la Edad Media, fundamentalmente en los reinos cristianos

⁷El astrónomo islámico Abd Al-Raman Al Sufi lo actualizó en el año 964 y en el año 1437 Ulugh Beg recalculó la posición de las estrellas, pero no fue completamente reemplazado hasta la aparición del catálogo de mil estrellas de Tycho Brahe en 1598

peninsulares que experimentaron la navegación atlántica. Mientras que la navegación costera podía realizarse con muy escasos conocimientos de cosmografía. En la navegación de altura, cuando se pierde de vista la tierra firme, el horizonte no aporta ninguna indicación que permita orientarse. La única manera de obtener referencias es a partir de la posición de los astros en el cielo: el Sol, la Luna, los planetas y las estrellas.

Imago Mundi es el título original y en latín de un texto de cosmografía escrito en 1410 por el teólogo francés Pierre d'Ailly. D'Ailly escribió su obra basándose en autores antiguos como Aristóteles, Claudio Ptolomeo, Plinio el Viejo, en los padres de la Iglesia, como San Agustín y en escritores árabes, como Averroes o Avicena. Una de sus fuentes preferidas fue el *Opus Maius* ("gran obra" en latín) de Roger Bacon y no dudó en señalar las contradicciones entre los diferentes autores. El libro está ilustrado con un mapa del mundo, todavía influido por los mapas *Orbis Terrarum*) de la Edad Media. A diferencia de la mayoría de los mapas medievales tiene el norte en la parte superior de la página. En él, la tierra aparece como un mundo dividido en zonas climáticas, y las superficies terrestres se recogen en el hemisferio norte. Cuando se embarcó en su primer viaje a América, Cristóbal Colón poseía una copia de la obra de Pierre d'Ailly editada en Lovaina, que dataría aproximadamente de 1483. Este ejemplar, anotado de su mano, se conserva en la Biblioteca de la Institución Colombina de Sevilla. Fue uno de sus libros de referencia en su Empresa de Indias.

7. Instrumentos de medida

Se van a resumir en este apartado los procedimientos y las características de los instrumentos que se utilizaban a finales del siglo XV en astronomía de posición, que es como se denomina la ciencia de calcular la posición sobre la esfera terrestre a partir de la medida de las posiciones de los astros.

Hasta la invención del telescopio y su utilización por parte de Galileo, a principios del siglo XVII, toda la astronomía se realizaba de manera visual, sin instrumentos que proporcionaran aumentos. Sí que se utilizaban diversos instrumentos para la medida de ángulos que permitieran situar a los astros en la bóveda celeste. Los mismos instrumentos eran los que se utilizaban en el mar para la realización de medidas que permitieran calcular la posición del buque. La diferencia estaba en el tamaño, pues en los barcos no era posible utilizar instrumentos de gran tamaño que exigieran una fijación anclada al terreno.

En el siglo XIII, el sabio rey Alfonso X de Castilla, en las *Partidas*, dio el nombre de «*náucheres*» a «*aquellos por cuyo seso se guían los navíos*». Se habla de la aguja náutica, por la que *los marineros se guían en la noche oscura*, y se explican minuciosamente los *relogios, astrolabios y cuadrantes* [García Franco, 1959].

En la época de Colón, los instrumentos astronómicos que se utilizaban en navegación eran la brújula, el astrolabio, el cuadrante y la ballestilla.

7.1. Orientación: la brújula

Los términos «*orientación*» u «*orientarse*» tienen que ver con tomar como dirección de referencia *Oriente*, el Este, la dirección por donde sale el Sol. Todas las culturas antiguas toman el Este como la dirección a la que se refieren todas las demás. Los altares mayores de los templos cristianos se dirigen al Este, con lo que la fachada principal queda dirigida a Poniente. A partir de la Baja Edad Media, con la irrupción de las brújulas, se sustituye Oriente por el Norte como dirección de referencia [Comellas, 2015].

La brújula era conocida en Europa desde el siglo XII de nuestra era y, en China, desde el

siglo III. No está claro si el conocimiento de la brújula llegó a Europa desde China a través del mundo islámico, o si se trató de un descubrimiento hecho en Europa de manera independiente.

Al principio estaban constituidas por una aguja magnética, embebida en una pajita y flotando en agua. En el siglo XV la aguja se fijó a una cartulina que podía girar sobre un soporte y que llevaba marcados 32 rumbos. Las brújulas de la época de Colón llevaban una Rosa de los Vientos dibujada en la cartulina, con una flor de lis en el Norte y una cruz en el Este. La brújula es uno de los grandes inventos de la humanidad. La introducción de la brújula y de las cartas náuticas revolucionó la navegación [Dunn, 2016].

En náutica se utiliza la denominación «*compás*», en lugar de brújula. El motivo proviene de que se suelen utilizar para tomar la medida de los ángulos que forman las visuales dirigidas a dos puntos diferentes de la costa.

La brújula permite establecer la dirección de los puntos cardinales. Pero la brújula apunta al Norte magnético, no al Polo Norte geográfico. El Polo Norte magnético y el geográfico no coinciden⁸. A la desviación entre la dirección a la que apunta la brújula y la dirección del Norte verdadero se le denomina «*declinación magnética*».

Esta desviación de la aguja magnética ya era conocida en tiempos de Colón, y los marinos «*cebaban*» la aguja, esto es, desviaban un poco el cartón para que apuntase al Norte verdadero. Colón conocía la declinación y reconoce, en una carta a los Reyes Católicos, haber cebado la brújula en sus navegaciones por el Mediterráneo. Lo que no se conocía es que la declinación magnética variaba con arreglo a la latitud y la longitud geográfica, con lo que hay que cebar de distinta manera la aguja según la zona por la que se navega.

Hoy sabemos que la declinación no solo varía con la posición en la esfera terrestre, sino que también varía con el tiempo. A día de hoy, todo el trayecto realizado por Colón tiene declinación Oeste, o sea, la brújula señala más al Oeste que la dirección exacta del Norte. Hoy, en el Oeste de España, la declinación es de -1.5° , a la altura de las Azores la declinación es de -14° y, a medio camino con América llega a -18° . Luego comienza a disminuir y, en las Bahamas, donde llegó Colón, es de -3° .

En la época de Colón no era igual que ahora. Del portulano de Valseca de 1439 se podría deducir que la declinación en España era de 10° Este. Georg Hartman, vicario de Núremberg y constructor de relojes de Sol, halló, en 1510, que la declinación era de 6° Este en Roma y de 10° Este en Núremberg. En París, en 1550, Oroncio Fineo midió 8° Este. En 1658 la declinación en Londres era 0° . En el siglo XVIII la declinación marcaba ya Oeste y, en 1811, alcanzó -24° . Desde entonces ha ido disminuyendo hasta los bajos valores de hoy. A día de hoy en España las agujas señalan casi al Norte y, durante el siglo XXI, se irá desviando al este, como en tiempos de Colón.

En tiempos de Colón, en Europa, la brújula se desviaba al Este e iba disminuyendo la desviación al ir hacia América. Tomaba la máxima declinación Oeste a dos tercios del camino hacia América. Este fue un cambio que sorprendió a Colón, siendo el la primera fuente histórica de semejante variación. Se podría considerar que este fue el mayor descubrimiento de carácter científico de Colón durante sus viajes a América.

7.2. Sistemas de referencia: el problema de la longitud

Para ir de un sitio a otro es necesario conocer la posición del segundo punto respecto del primero. Por ejemplo, para ir de Canarias a las Azores hay que saber que las Azores están al Nornoroeste de Canarias. Tomar una dirección es tomar un rumbo. Es lo que hacían los marinos en los tiempos de Colón y lo que se sigue haciendo hoy en día.

⁸A día de hoy, el Polo Norte magnético se sitúa en la latitud 83.7°

Los portulanos son mapas de rumbos, que permiten a un piloto saber qué rumbos tienen que dar al navío para llegar de un puerto a otro.

El problema para establecer un sistema de referencia más preciso tiene que ver con la dificultades que había para conocer la longitud. Todo sería más sencillo si la Tierra fuera plana, como pretenden algunos, pues bastaría trazar una cuadrícula. El problema de la esfera es que no se puede transformar en un plano, y cualquier representación plana de la misma tiene deformaciones.

Para fijar la longitud se necesita establecer un meridiano cero. Los clásicos propusieron *Ponto Euxino.*, en el Mar Negro. En los tiempos modernos se adoptó la isla de Hierro, a la que siempre se refería Colón. Cada estado adoptó su meridiano de referencia. En 1882 se adoptó, por acuerdo internacional, el meridiano de Greenwich (Londres). Esta elección fue debida al prestigio de Inglaterra, pero también, por el hecho de que es uno de los meridianos que atraviesa más tierras habitadas.

El cálculo de la longitud a la que se encuentra un navío se puede hacer comparando la hora exacta a la que culmina⁹ un astro con la hora conocida a la que dicho astro culmina en el meridiano de referencia. Los instantes de culminación de los astros en los meridianos de referencia se obtienen de los prontuarios astronómicos, de las tablas de efemérides. El problema en aquellos tiempos era que no se conocía la hora exacta. Hay que tener en cuenta que una diferencia de unos pocos segundos en la medida del tiempo o de décimas de minuto en la altura del astro, produce un error de varias millas en el cálculo de la posición final [Mederos, 2007]. De hecho, el problema del cálculo de la longitud en el mar, no se pudo resolver hasta el siglo XVIII, gracias al trabajo del relojero británico John Harrison, que inventó el primer cronómetro marino.

La imposibilidad de medir la longitud con precisión forzó, por ejemplo, que en la firma del *Tratado de Tordesillas* del año 1494 que establecía el límite de las zonas de navegación de Portugal y España, se fijara la línea de demarcación a 370 leguas desde la isla de Cabo Verde, en lugar de poder indicar un meridiano concreto. De hecho, en aquel tiempo, se fijó como meridiano de referencia el que pasaba por Cabo Verde. [Armada Española, 2012].

Los mejores cálculos de longitud de Colón los hizo por estima de la distancia navegada. En agosto de 1498, en el tercer viaje, al llegar al golfo de Paria, en la desembocadura del río Orinoco, juzga haber recorrido «casi setenta grados equinociales». Acierta Colón, pues se encuentra prácticamente en la línea del equinocio y a 62° Oeste. Un error despreciable para un cálculo de estima con los medios de la época.

Una manera de estimar la longitud era sincronizar a partir de un eclipse, sabido de antemano en qué momento se iba a producir. Los cálculos por eclipse de Luna, que no son fenómenos instantáneos, siempre son imprecisos. A lo largo de sus cuatro viajes, Colón pudo observar dos eclipses de Luna: uno desde Saona, al sur de La Española el 14 de septiembre de 1494; el otro, el 29 de febrero de 1504, en el curso de su cuarto viaje. Hay que tener en cuenta que el reloj de que disponía Colón era una ampolleta (reloj de arena), lo que dificulta enormemente la medición del tiempo.

En el primer caso, el del eclipse de 1494, la isla de Saona está a 69° oeste, por lo que la diferencia real de longitud con el cabo de San Vicente es de cuatro horas. Colón asignó 5 h 23 m. El error puede deberse a haber interpretado mal las efemérides del libro de Regiomontano, que son las que utilizaba, pues estas están referidas a Núremberg. La diferencia horaria entre Núremberg y Saona es de 4h 20 m., con lo que la medida de Colón sería excelente.

El segundo caso, el del eclipse de 1504 es el más conocido por la leyenda que se ha transmitido acerca de él. Su hijo Hernando, en la biografía del almirante, escribe que Colón estaba

⁹Se dice que un astro *culmina*, cuando está en la posición más alta sobre el horizonte, lo que sucede, en el hemisferio Norte, cuando pasa por el meridiano Sur del observador

en un momento dramático. Naufragó en Jamaica y las naves quedaron destrozadas. Llevaban meses sin recibir ayuda y los indios, que al principio habían sido amistosos, empezaban a ser cada vez más hostiles. Colón transmitió a los indios que su Dios les iba a enviar una señal del cielo para mostrarles lo enfadado que estaba de que no les proporcionasen alimentos; que tenían que estar atentos esa noche a la salida de la luna. Cuenta Hernando que los indios, al ver la Luna enrojecida, se atemorizaron y dieron a Colón y sus hombres todo lo que pidieron [Hernando Colón, 1571]. No está claro que las cosas sucedieran de verdad como narra el hijo de Colón.

En cuanto a la medición de longitud en el eclipse, hay bastante imprecisión en determinar a qué llama Colón «*final del eclipse*». En la interpretación más generosa para Colón, el error de estimación estaría en unos 15 minutos de longitud, si bien Colón volvió a interpretar mal las efemérides de Regiomontano [Comellas, 2015].

7.3. El astrolabio

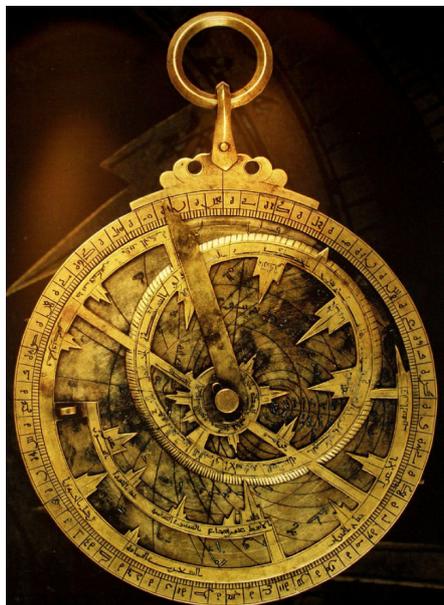


Figura 7. Astrolabio.

El astrolabio plano era un disco circular graduado, con alidada giratoria, que permitía tomar alturas y medir azimutes. En tierra se montaba sobre un trípode, pero en el mar era más difícil su manejo. Tan inseguras eran sus determinaciones que el piloto Bartolomé Díaz, que dobló por primera vez el Cabo de Buena Esperanza, se vio obligado a desembarcar en la bahía de Santa Elena, principalmente para asegurarse de la latitud con observaciones más fidedignas.

El astrolabio náutico era un instrumento mucho más simple que el astrolabio astronómico, ya que su objetivo queda reducido a tomar alturas de los astros, habiendo sido utilizados exclusivamente por los navegantes. Fundamentalmente es un círculo de bronce o latón (también los hubo de madera) atravesado por cuatro radios, situados a 90° uno del otro. La intersección con el círculo del radio situado en los 180 grados, tiene una mayor masa del material en el que se ha construido el astrolabio, para que haga el efecto plomada y disminuir la oscilación que el viento o el movimiento del buque puedan imprimirle. El diámetro vertical representa la línea zénit-nádir y el horizontal la línea del horizonte. En esta línea está situado el grado cero, correspondiendo el grado 90 al zénit. Los portugueses prefirieron situar el grado 90 en la línea del horizonte, con lo que la cifra señalada por la alidada o «*medeclina*» indicaba distancias cenitales

en lugar de alturas; de este modo se ahorra la operación de la resta. Dispone además de una anilla o «*colgadero*» para introducir por ella un dedo y sustentar el astrolabio (ver figura 7).

Así explica Diego García Palacio, en su *Instrucción Náutica para navegar* de 1587, la forma de utilizar el astrolabio:

«El que quiera tomar el sol con el astrolabio en la mar, se asentará y pondrá cerca del mástil mayor, que es donde la nave da menos vaivenes y está más quieta, y colgando el dedo segundo de la mano derecha de su anillo, pondrá el rostro y el astrolabio frontero del sol derechamente y conocerá que está por la sombra que el sol, y alzará o bajará el penicid (alidada) hasta que entre el sol por los dos agujeros de las pínulas y estando así tomará del astrolabio los grados que muestre la punta del penicid, y hará por ellos las cuentas según las reglas» [García de Palacio, 1587].

Los astrolabios se usaban para situar la posición de los astros, para saber la hora solar y para determinar la latitud a partir de la posición de las estrellas. Los marineros musulmanes a menudo los usaban también para calcular el horario de oración y encontrar la dirección hacia la Meca. El astrolabio servía también para ubicar las distintas posiciones de los astros y era utilizado también para resolver problemas astronómicos más complejos.

7.4. La ballestilla y el cuadrante

Mientras el astrolabio puede considerarse como el teodolito primitivo, el precursor del sextante es el rudimentario bastón de Jacob o ballestilla (ver figura 8), de más fácil manejo y de gran utilidad en manos expertas. Rey Pastor afirma que «*Con uno u otro, el error cometido en la medición de alturas y azimutes era del orden del medio grado*» [Rey Pastor, 1951]. Parece difícil de admitir esta afirmación. Quizás en tierra y con astrolabios de mayor diámetro que los utilizados en los barcos pudiera llegarse a alcanzar esa precisión. Pero cualquiera que haya tomado alturas con un sextante moderno en un barco batido por las olas sabe lo difícil que resulta. Mucho más con aquellos instrumentos primitivos.

El astrolabio llegó a Europa en el siglo XII a través de la España musulmana. En el caso de la ballestilla, no está claro a quién corresponde su invención. La introducción de la ballestilla se consideró un progreso trascendental en la navegación. En la figura 8 se pueden ver las dos formas de utilización de la ballestilla: hacia adelante y hacia atrás. La utilización «*hacia atrás*» sugiere que pudiera haber un pequeño espejo montado en la base de la ballestilla, que permitiera ver el Sol, pues se antoja difícil hacerlo a partir de su sombra. Si fuera así, queda aun más claro que la ballestilla sería el antecesor de los sextantes.

Por su parte, el cuadrante marino (ver figura 9) se compone de un cuarto de círculo graduado sobre el limbo. Uno de los radios estaba provisto de dos pínulas perforadas que permitían enmarcar al astro. Una plomada indicaba la vertical, y así se podía leer la altura [Reymond-Goñi, 2012].

Colón hace mención en su diario a tomas de altura de la polar con el cuadrante, durante sus navegaciones hacia América, en varias ocasiones, como se mencionará en el siguiente apartado.

7.5. La estrella del Norte

Las estrellas se han utilizado para guiar la navegación desde tiempos remotos. Homero cuenta que Ulises conducía su nave observando el cielo estrellado. Plinio dice que los primeros nautas se guiaron por la estrella polar, a la que llamaba *Estrella fenicia*. Esta estrella tuvo que ser nuestra β *Ursae Minoris*, que en aquellos tiempos lejanos de cartagineses, fenicios y griegos, estaba más cerca del Polo que nuestra α de la Osa Menor, que es la que hoy nos sirve de guía para la orientación del norte.

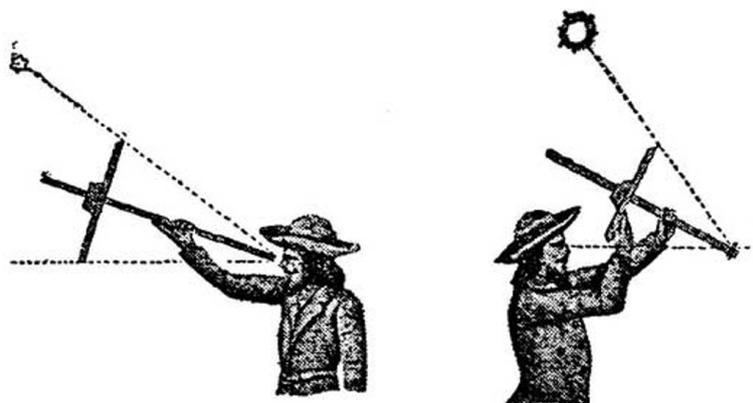


Figura 8. Utilización de la ballestilla, hacia adelante y hacia atrás [Rey Pastor, 1951].



Figura 9. Cuadrante marino.

La esfera celeste gira sobre un eje, y los extremos de ese eje son los polos celestes Norte y Sur, que coinciden de manera muy sensible con la estrella Polar y la Sigma del Octante. Estas estrellas se encuentran siempre en el mismo punto del cielo, y las demás estrellas –también el Sol y la Luna–, y en definitiva toda la campana del cielo en su conjunto, parece girar en sentido antihorario a su alrededor.

Ahora bien, la posición de la estrella Polar no es la misma para todas las latitudes de la Tierra. En el polo Norte brilla justo en el cenit. En latitudes medias, como las de Europa, a media altura entre el cenit y el horizonte. En el ecuador, la estrella Polar está exactamente en el horizonte Norte. Algo similar sucede en el hemisferio Sur con la débil Sigma del Octante [Comellas, 2015].

En el hemisferio Norte, si se mide la altura angular de la estrella Polar sobre el horizonte, con un astrolabio o con un sextante, nos da la latitud del lugar. Este fue el recurso utilizado en tiempos de Colón. Hay que indicar aquí que, en la época de Colón, la estrella Polar estaba situada 2° y $40'$ por debajo del Polo (hoy en día la distancia de la Polar al Polo es de menos de 1°).

Del diario de a bordo de Colón, se deduce que, en el viaje del Descubrimiento tomó altura de la Polar en cuatro ocasiones, en Cuba y en la Española, y en una quinta ocasión que no lo consiguió. Son las veces que reseña en el diario, aunque bien podrían haber sido más.

En las cuatro ocasiones, los errores de la medición son groseros. Toma alturas (latitudes) de en torno a 40 grados, cuando andaba por tierras que están a unos veinte grados de latitud. Es un error demasiado grosero. Menciona que utilizaba un cuadrante. En una ocasión, dándose cuenta del error, anota que tiene que bajar a tierra para reparar el instrumento. Lo cierto es que cualquiera que haya localizado en el cielo la Polar, a latitudes cercanas a 40 grados, como sucede

en el Mediterraneo o la península Ibérica, sabe que la Polar se encuentra a media distancia entre el horizonte y el cenit, siendo difícil que pasase desapercibido una estrella Polar a tan solo veinte grados sobre el horizonte.

El error pudo deberse a que Colón confundiera la estrella Polar con otra estrella, aunque es difícil de creer. Pero, en palabras del almirante, «parecía el Norte tan alto como en Castilla», lo que podría abonar la hipótesis de la confusión en la estrella. Esas noches de la toma de altura había Luna Llena, lo que hace que la identificación de las estrellas sea más complicada. Algún autor ha calculado que, en la fecha de las mediciones, la estrella Alfirk, la Beta de Perseo, daría las medidas tomadas por Colón. Pero también podría ser que Colón anotase mal las cifras, a propósito, con el fin de despistar a otros, los portugueses, por ejemplo.

Otra posible explicación es que Colón emplease, para tomar alturas, una ballestilla. La ballestilla, según de que forma se utilice, mide el doble del ángulo, al igual que sucede hoy en día con los sextantes cuando se utiliza un horizonte artificial. Es cierto que el denomina *cuadrante* al instrumento, pero no sería raro que se tratara realmente de una ballestilla.

Lo cierto es que Colón, en el primer viaje no era aun ducho en la toma de alturas. Con el tiempo fue cogiendo destreza, y en los siguientes viajes aparecen mediciones muy precisas. En el tercer viaje de Colón sí que aparece mención expresa al cuadrante de plomada: «En esto de la estrella del Norte... muchas noches tomaba yo a repricar la vista de ella en el cuadrante, y siempre hallé que caía el plomo e hilo a un punto». En otra ocasión, en 1498 junto a la Boca de la Sierpe, hizo unas medidas casi perfectas: «Hallé que, en anocheciendo, tenía yo la estrella del Norte alta cinco grados, y entonces las Guardas¹⁰ estaban encima de la cabeza; y después a la media noche hallaba la estrella alta de diez grados, y, en amaneciendo, que las Guardas estaban a los pies, quince» [Varela, 1986]. En efecto, la Boca de la Sierpe se encuentra a 10° de latitud. La máxima altura de la Polar se registra con las Guardas en «las siete», y la mínima con las Guardas en «la una».

Colón había aprendido el método de promediar la altura de la Polar a partir de las dos observaciones extremas con las Guardas en lados opuestos. En la tabla 2 se muestra la comparación de algunas medidas tomadas en su último viaje con la latitud real.

Cuadro 2. Comparación entre algunas medidas de latitud hechas por Colón en su último viaje de 1498 con las latitudes reales (fuente [Comellas, 2015])

Lugar	Latitud tomada por Colón	Latitud real
La Isabela	22°	18°30'
Entre Margarita y la Española	14°	15°
Puerto de Santa Gloria (Jamaica)	18°	18°27'

7.6. Las Guardas de la Polar

La estrella Polar es la estrella más brillante de la constelación Osa Menor. Dentro de esta constelación, las estrellas Beta y Gamma son las que Colón denomina «las Guardas». Durante muchos siglos, los marinos se sirvieron de ellas para calcular la hora. Se pueden interpretar, y así se hacía, como un reloj de aguja única, que da una vuelta completa cada veinticuatro horas.

La interpretación de la posición de las Guardas ha variado respecto de la época de Colón, debido a la precesión de los equinoccios y al cambio del calendario Juliano al Gregoriano. El día 3 de agosto de 1492, fecha de partida de las tres carabelas, las Guardas marcaban a media noche «las siete y media». A las once de la noche marcaban «las ocho», y las nueve, justamente esa hora, «las nueve» [Comellas, 2015].

Los marinos no empleaban tanta precisión ni proyectaban en el cielo las agujas de un reloj,

¹⁰En el siguiente apartado se explica qué son las Guardas de la Polar

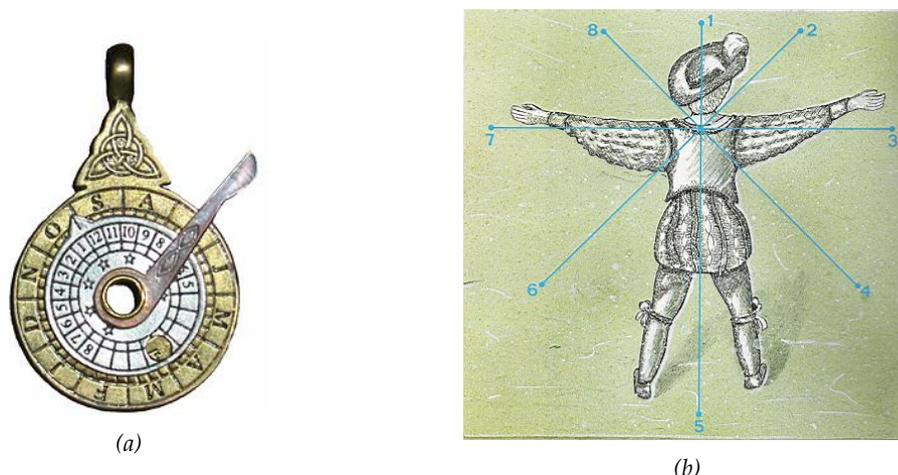


Figura 10. (a) Nocturlabio. (b) Hombre del Norte.

pues la esfera de los relojes no se generalizó hasta el siglo XVII. Sí que existía un instrumento denominado *nocturlabio* (ver figura 10a), cuyo invento se atribuye al mallorquín Ramón Llull, que vivió en el siglo XIII. También se le atribuye a él la invención de la *Rosa de los Vientos*.

Los marinos solían usar una figura simbólica, «*el hombre del Norte*», que los marinos imaginaban proyectado en el cielo, con el corazón en la Polar. La expresiones utilizadas eran *las guardas en la cabeza, en el hombro izquierdo, en el brazo izquierdo, debajo del brazo izquierdo, a los pies, debajo del brazo derecho, en el brazo derecho y en el hombro derecho* (ver figura 10b). Estas expresiones aparecen frecuentemente en el diario de Colón [Colón, 1492] y se adaptaban muy bien a la distribución de las guardias nocturnas de los los pilotos y grumetes.

7.7. Medida de la velocidad

La velocidad a la que se desplaza un buque se obtiene dividiendo la distancia recorrida por el tiempo que se tarda en recorrerla. Se trata, no obstante, de una magnitud vectorial, esto es, la distancia recorrida lo es en la dirección del vector velocidad.

La *estima* de la velocidad era, en tiempo de Colón y un siglo después de sus históricos viajes de descubrimientos, una solución de bulto dada por un experto *ojo marinero*. La experiencia de los pilotos permitía a estos fijar una presunta velocidad sabiendo la capacidad de marcha de un determinado tipo de nave. En el cálculo mental entraban como elementos determinativos el conocimiento práctico de la acción del viento sobre el aparejo; el aspecto del mar, unas veces suave y otras agitado; el influjo de las corrientes; la marcha cerca de la costa; el ensebado del casco, la carga y estiba de la misma. Una serie de circunstancias que solo podía apreciarlas un piloto a fuerza de tiempo y de repetidas navegaciones [García Franco, 1959]

A partir de finales del siglo XV se comenzó a utilizar en los barcos la «*corredera*» como aparato de medida de la velocidad (ver figura 11). Constaba de un flotador de madera, lastrado con plomo en su parte inferior para que se mantuviera vertical en el agua, unido a un cabo en el que se hacían nudos a distancia de 1/120 millas (15,43 m). Para la medida del tiempo se utilizaba una ampollita específica de treinta segundos, que también son 1/120 de una hora, con lo que la cuenta de los nudos que pasaban en treinta segundos era la velocidad en millas por hora. El procedimiento era el que sigue:

Un hombre manejaba la corredera y otro la ampollita. El de la corredera la echaba por la popa y dejaba correr la primera parte para que se estabilizara en el agua. El hombre iba dejando



Figura 11. Corredera para medida de la velocidad del barco

correr el cordel de la corredera libremente pasando por su mano y al sentir el primer nudo cantaba "¡marca!." lo que el de la ampollita la invertía y el tiempo empezaba a correr mientras el del cordel iba contando los nudos según iban pasando hasta que el de la ampollita, en el momento que acababa de bajar toda la arena, cantaba "¡marca!z el del cordel lo agarraba fuertemente y medía la fracción de nudo que había pasado desde el último y cantaba "¡cinco nudos y un cuarto!" [Batlló, 2002].

En la actualidad, los barcos vienen provistos de un mecanismo de corredera para establecer la velocidad. Consiste en un molinete giratorio que se acopla bajo el casco y mide, por la velocidad de giro de las aspas del molinete, la velocidad de desplazamiento del barco con respecto al agua. Dicha velocidad se lee en el instrumental de cabina.

Todas las correderas adolecen de un defecto: la velocidad que miden es la del desplazamiento del agua con respecto al casco del barco. De esta manera, si el barco está fondeado en el lecho de un río, la corredera marcará la velocidad de la corriente de agua, aunque el barco esté inmóvil con respecto al fondo del cauce. En el mar, aun con el barco en movimiento, hay corrientes que hacen que la lectura de la corredera no mida nunca la velocidad del barco respecto del fondo.

Otra causa de error al estimar las velocidades con una corredera es que la dirección de desplazamiento real del barco no es la dirección hacia la que apunta la proa del mismo. Los barcos tienen un desplazamiento lateral, que se denomina «*deriva*», motivado por el viento y las corrientes. De esta forma, si la distancia recorrida se estima multiplicando la velocidad que da la corredera por la dirección del compás a la que apunta la proa del navío, se estará cometiendo un error.

A día de hoy todos los barcos van provistos de sistemas de navegación por satélite, los comúnmente denominados GPS (Global Positioning System) y cuya denominación más correcta es GNSS (*Global Navigation Satellite System*). En este caso, la velocidad y el rumbo que se obtienen sí que se corresponden con el desplazamiento del barco respecto del fondo marino.

En la época de Colón se comenzaba a utilizar la corredera, pero no consta que en los barcos de la expedición del Descubrimiento se llegara a utilizar. Calculaban la velocidad por estima, por indicios visuales, como la ola que se formaba en la proa o la cantidad de viento que recibían las velas. De esta forma se hicieron los cálculos de estima de distancias recorridas que anotaba Colón en su diario.

7.8. Medida del tiempo

Medir el tiempo era el gran problema no resuelto de aquellos tiempos. La forma más antigua que se conoce de medir el tiempo es la «*clepsidra*» egipcia, que consistía en un recipiente lleno de agua que se iba vaciando a través de un orificio. Hacia el año mil se empezaron a fabricar relojes de Sol. En la época del descubrimiento, la hora del día se establecía por la posición del Sol y la de la noche, como ya se ha indicado, mediante la posición de las Guardas de la Polar.

En los barcos, para la medida continua del tiempo, dividida en intervalos pequeños, se utilizaba la «*ampolleta*», o reloj de arena, como se los conoce habitualmente. Al contrario que su predecesor, la clepsidra o reloj de agua, el origen del reloj de arena no está claro, se cree que su invención pudo tener lugar en el antiguo Egipto.



Figura 12. Ampolleta o reloj de arena, utilizada para la medida del tiempo

La ampolleta no era un elemento muy preciso para medir de forma fiable el paso del tiempo, había varios factores que podían afectar la duración del flujo de arena: la humedad dentro de la ampolleta, la homogeneidad en la finura de la arena, el diámetro interior del tubo de interconexión, desgastado por el flujo de arena, la posición más o menos horizontal, el efecto de los movimientos de aceleración o deceleración del barco. Todos ellos podían influir en el flujo de la arena, y por lo tanto en el tiempo medido.

Las ampolletas eran muy populares en los buques, ya que eran la medición de tiempo más fiable en el mar. A diferencia de la clepsidra, el movimiento de la nave durante la navegación no afecta a la ampolleta. El hecho de que la ampolleta utiliza materiales granulares, en lugar de líquidos, permitía mediciones más precisas, ya que el agua de la clepsidra era propensa a condensarse en su interior durante los cambios de temperatura. Los marinos utilizaban la ampolleta para determinar la distancia navegada por estima y la longitud, (en grados al este o al oeste a partir de cierto punto). En la navegación de larga distancia a través del océano abierto, la ampolleta para medir lapsos de tiempo era un instrumento tan importante como la brújula para conocer la dirección.

Solían utilizarse ampolletas de 30 minutos. A cada vaciado de toda la arena se le llamaba una ampolleta y ocho ampolletas (cuatro horas), definían una guardia. La brújula y la ampolleta junto con el registro en el diario de a bordo, de la velocidad medida con la corredera, permitía al navegante trazar la posición de su barco sobre una carta de navegar. Multiplicando la velocidad por el tiempo que se había mantenido el rumbo, daba la distancia navegada, y la brújula mostraba la dirección del rumbo a que se navegaba. Este es el método simple que se llama «*navegación*»

por estima» y que, con instrumentos más modernos, se sigue utilizando hoy en día.

Para poderlo anotar con precisión, salvo en una emergencia, los cambios de rumbo (cambio de bordo en ceñida, orzada, caída navegando al través o trasluchada yendo con el viento de popa), se hacían en el momento de completar una ampolleta, así el piloto podía calcular con más precisión la distancia navegada en ese rumbo.

Hasta principios del s. XIX, en que se pudo navegar con las distancias lunares, la navegación por estima, contrastada de vez en cuando con la medida de la latitud con el cuadrante (bastón de Jacob, astrolabio, octante) fue el único sistema al alcance de los navegantes para navegar el globo, de ahí que la ampolleta fuera tan importante para los navegantes, aunque en tierra firme para saber la hora, ya hacía más de cuatrocientos años que se usaban relojes mecánicos (aparte de los de sol y las clepsidras).

Como y se ha comentado, no fue sino hasta el siglo XVIII que los hermanos Harrison llegaron a construir un cronómetro marino que mejoraba significativamente la precisión de la ampolleta, permitiendo el cálculo preciso de la longitud.

7.9. Medida de distancias

Asragano fue uno de los más famosos astrónomos persas del siglo IX. Realizó investigaciones para el cálculo del diámetro de la Tierra mediante la medición del arco de meridiano. En el año 833 escribió *Elementos de Astronomía*, inspirado en el *Almagesto* de Ptolomeo, y en el que trataba el movimiento de los objetos celestes. Asragano asignaba a un grado terrestre la longitud de 56 millas y $\frac{2}{3}$, con lo que el ecuador tendría 20400 millas. A la milla le asignaba una longitud de 1973,50 m, con lo que el ecuador terrestre mediría aproximadamente 40260 km, distancia muy parecida a la real.

Cristóbal Colón seguía las enseñanzas de Astragano en cuanto a que la medida de un grado eran 56 millas y $\frac{2}{3}$, pero en cambio asignaba a la milla la longitud que tenía la milla itálica, que eran 1477,50 m. Esto hizo que, según sus cálculos, el ecuador midiera 30000 km, un 25 % menos que la realidad [Colón, 1492].

A quien pueda pensar que el fallo cometido por Colón es un error demasiado grosero para un científico, baste recordarle que los fallos en la navegación debido a la mala interpretación de las unidades de medida se han cometido más veces a lo largo de la historia. Sin ir más lejos, el 23 de septiembre de 1999 la nave *Mars Climate* de la NASA se estrelló sobre la superficie de Marte por un error en el software que interpretó en unidades anglosajonas (millas, pies, yardas para distancias y onzas y libras para pesos) determinadas magnitudes expresadas en el Sistema Internacional (metros y kilogramos). La nave había costado 125 millones de dólares.

En el diario de a bordo de Cristóbal Colón, se anotan las distancias recorridas cada día por el barco, expresadas en leguas, a las que el propio Colón asigna una medida de 4 millas.

Para poder trazar en la carta náutica la trayectoria del buque es necesario conocer la velocidad del mismo y su rumbo de navegación. El rumbo se medía con el compás, pero la medida de la velocidad, en la época del descubrimiento, se realizaba a ojo.

Es sabido que Colón anotaba en el diario cada día la distancia navegada. Pero la distancia que anotaba era menor que la que realmente calculaba, quizás con el fin de no asustar a las tripulaciones por lo lejos que andaban de las costas españolas. Lo curioso es que el resultado final de su cuenta real estaba más equivocado que el cálculo ficticio que hacía público.

No es posible conocer con exactitud el total de la cuenta, pues se han perdido las anotaciones de algunos días. El total de leguas que creyó haber recorrido Colón desde Gomera hasta Guaraní es entre 1080 y 1140, mientras que las cifras que dio a los tripulantes fue de unas 920 leguas. La legua equivalía a cuatro millas y Colón utilizaba la milla latina de 1477,3 m. De ser bueno el

cálculo de Colón, habrían llegado a las costas de México. En realidad la cuenta falsa estaba más cercana a la realidad.

8. Conclusiones

Colón no era un científico. Tampoco había recibido una formación reglada, fue un autodidacta. Como navegante se había formado con la fuerza de la experiencia. Lo que sí tenía era la curiosidad de un hombre de ciencia y anotaba todo lo que le llamaba la atención, eso sí, cometiendo a veces importantes errores.

Es curioso observar en ese sentido, como va perfeccionando la técnica de tomas de posición con el cuadrante o astrolabio, de forma que en los últimos viajes llega a hacer mediciones muy precisas de las posiciones calculadas.

No es posible, en un artículo de extensión reducida como este, analizar en detalle la multitud de temas científicos que tienen relación con la expedición del Descubrimiento de América. Algunos se han mencionado, aunque se podría hablar mucho más sobre ellos. Otros, ni siquiera se han mencionado, como las técnicas navales, los estudios de corrientes y mareas, los detalles relativos a las rutas escogidas para la ida y para la vuelta o los indicios de los que se disponía antes del viaje.

A pesar de los muchos misterios que envuelven todavía algunos aspectos del viaje, hay, no obstante, un importante número de publicaciones que pueden ampliar muchos de los temas aquí tratados. En la bibliografía que se cita en el artículo se puede encontrar una buena muestra de ello.

El autor espera haber conseguido, al menos, el principal objetivo del artículo, que no es otro que transmitir al lector la idea de que el viaje del Descubrimiento no fue la aventura de un visionario sin conocimientos, sino el resultado de una concienzuda expedición científica, con los medios más avanzados de los que se disponía en la época, aunque el resultado que se obtuvo no era el que inicialmente se pretendía.

Referencias

- [Armada Española, 2012] INSTITUTO DE HISTORIA Y CULTURA NAVAL, *Revista de historia naval. Suplemento num. 17*, Instituto de historia y cultura naval. Armada española. Año XXX, Núm. 118, 2012.
- [Batlló, 2002] BATLLÓ ORTIZ, J., Bernat López, P., Puig Aguilar, R., *VI Trobada d'història de la ciència i de la tècnica*, Societat catalana d'història de la ciència y de la tècnica. Barcelona 2002.
- [Calendario IGN, 2018] INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL, *Calendario del Instituto Geográfico Nacional, 2018*, Instituto Geográfico Nacional, 2018
- [Chocano, 1991] CHOCANO HIGUERAS, G., *Naves del Descubrimiento, la 'Santa María', la 'Pinta' y la 'Niña'*, Museo Naval, 1991.
- [Colón, 1492] COLÓN, C., *Diario de a bordo. Edición de Luis Arranz*, Historia16, 1991.
- [Comellas, 2012] COMELLAS, J. L., *La primera vuelta al mundo*, Ediciones Rialp, 2012.
- [Comellas, 2015] COMELLAS, J. L., *El cielo de Colón. Técnicas navales y astronómicas en el viaje del Descubrimiento*, Athenaica. Ediciones Universitas, 2015.

- [Dascano, 1892] DASCANO, A., *Ensayo biográfico del célebre navegante y consumado cosmógrafo Juan de la Cosa y descripción e historia de su famosa Carta Geográfica*, Conmemoración del cuarto centenario del descubrimiento de América, 1892.
- [Dorce, 2016] DORCE POLO, C., *El nacimiento del álgebra. Al-Juarismi*, EDITEC, RBA Coleccionables, 2017.
- [Dunn, 2016] DUNN, R., *Navigational Instruments*, Shire Publications Ltd., 2016.
- [García Franco, 1959] GARCÍA FRANCO, S., *Instrumentos náuticos en el Museo Naval*, Imprenta del Ministerio de Marina, Madrid, 1959
- [Guevara, 2016] GUEVARA CASANOVA, I., PUIG PLA, C., *El álgebra de las estrellas. Brahmagupta*, EDITEC, RBA Coleccionables, 2017.
- [Hernando Colón, 1571] COLÓN, H., *Historia del almirante*, Editorial Planeta, 2006.
- [Levy, 2016] LEVY, J., *La curiosa historia de las matemáticas. Las grandes ideas desde los primeros conceptos a la teoría del caos*, Editorial LIBSA, 2016.
- [Mederos, 2007] MEDEROS, L., *Navegación astronómica*, Ediciones Tutor, 2007.
- [Navarrete, 1846] NAVARRETE, M. F., *Disertación sobre la historia de la náutica y de las ciencias matemáticas que han contribuido a sus progresos entre los españoles*, Real Academia de la Historia, 1846.
- [García de Palacio, 1587] GARCÍA DE PALACIO, J., *Instrucción náutica para navegar*, Ed. Cultura Hispánica., 1944
- [Picutti, 1995] PICUTTI, E., *Leonardo de Pisa*, Investigación y Ciencia. Temas IyC, Julio-Septiembre 1995.
- [Piñeiro, 2017] PIÑEIRO, G., *El divulgador de las matemáticas. Pacioli*, EDITEC, RBA Coleccionables, 2018.
- [Reymond-Goñi, 2012] REYMOND-GOÑI, J.P. *Évolution de la Navigation Astronomique au cours des siècles*, Aldebarán Ediciones 2012.
- [Rey Pastor, 1985-1] REY PASTOR, J. BABINI, J., *Historia de la Matemática. Vol. 1*, Gedisa, 1985.
- [Rey Pastor, 1951] REY PASTOR, J., *La ciencia y la técnica en el descubrimiento de América*, Espasa Calpe, 1951.
- [Tazón, 2010] TAZÓN RUESCAS, J., *El cartógrafo de la reina*, Editorial Kattigara. Colección Galerna, 2010.
- [Varela, 1986] VARELA, C., *Los cuatro viajes. El testamento*, Alianza editorial, 1986.
- [Wikipedia Eratóstenes, 2018] WIKIPEDIA, *Eratóstenes* <https://es.wikipedia.org/wiki/Eratóstenes>, Wikipedia, 2018
- [Zweig, 1927] MOMENTOS ESTELARES DE LA HUMANIDAD, *Stefan Zweig*, 1927, Acantilado, 2002

Sobre el autor:

Nombre: Santiago Higuera de Frutos

Correo electrónico: santiago.higuera@upm.es

Institución: Universidad Politécnica de Madrid.

