

La evolución del posicionamiento. Una historia de superación

The evolution of positioning. A history of overcoming

Marcelino Valdés Pérez de Vargas

REVISTA **MAPPING**
Vol. 29, 204, 30-39
2021
ISSN: 1131-9100

Resumen

El ser humano ha necesitado desde hace muchos siglos determinar su posición en la Tierra, en principio para navegar en barco, pero hoy en día para multitud de aplicaciones que utilizan nuestra ubicación precisa, desde los navegadores que nos informan en cada momento del camino óptimo para llegar a nuestro destino, hasta las aplicaciones que nos ofrecen cines, restaurantes y todo tipo de establecimientos y recursos más cercanos a nuestra posición. En este artículo, que es una fiel transcripción de la charla del mismo título impartida por el autor dentro del ciclo de conferencias del 150 aniversario del Instituto Geográfico Nacional, se resume la historia de los procedimientos y técnicas empleados por la humanidad para conocer con precisión su posición sobre la superficie terrestre, una cuestión que no es trivial solucionar satisfactoriamente, máxime si se necesita un resultado de alta precisión.

Abstract

The human being has needed for many centuries to determine its position on Earth, in principle to navigate by boat, but today for many applications that use our precise location, from the browsers that inform us at every moment of the optimal way to reach our destination, to the applications offered by cinemas, restaurants and all kinds of establishments and resources closest to our position. In this article, which is a faithful transcript of the talk of the same title given by the author within the cycle of conferences of the 150th anniversary of the National Geographic Institute, the history of the procedures and techniques used by humanity to accurately know their position on the earth's surface, a question that is not trivial to solve satisfactorily, especially if a result of high precision is needed.

Palabras clave: Posicionamiento, Geodesia, GNSS, GPS, Sistema de Referencia de Coordenadas, *datum*, proyección.

Keywords: Positioning, Geodesy, GNSS, GPS, Coordinates Reference System, datum, projection

Instituto Geográfico Nacional
mvaldes@fomento.es

Recepción 31/01/2021
Aprobación 18/03/2021

1. INTRODUCCIÓN

En primer lugar, tengo que decir que resulta para mí realmente apasionante el tener la oportunidad de participar en este ciclo de conferencias que celebra, nada más y nada menos, que los 150 años de historia del Instituto Geográfico Nacional, una casa en la que llevo trabajando ya 20 años y espero seguir trabajando muchos más.

Para empezar, me gustaría explicarles a qué me dedico. Soy geodesta y trabajo en Geodesia, que se ocupa de estudiar la forma y dimensiones del planeta Tierra, además de sus variaciones en el tiempo. Para ello, se puede decir que lo que hacemos generalmente es calcular posiciones de puntos sobre la superficie terrestre, para lo cual es necesario especializarse tanto en los métodos de posicionamiento como en los instrumentos que se utilizan y en los sistemas de referencia geodésicos en lo que hay que expresar las posiciones mencionadas mediante coordenadas. La Geodesia no es muy conocida, pero sin ella no habría cartografía, ni catastro, ni grandes obras públicas, ni se podrían lanzar cohetes ni tendríamos satélites artificiales, es más tampoco podríamos salir en coche y buscar una gasolinera mediante nuestro navegador.

Una vez explicado qué es la Geodesia y ya que estamos aquí celebrando una efeméride histórica, creo que puede ser adecuado repasar la historia y evolución del posicionamiento es decir, lo que vamos a recorrer brevemente los instrumentos, la metodología empleadas en ello, junto con lo que se sabía en cada momento sobre la forma de la Tierra, para poder realizar así el posicionamiento sobre su superficie. Intentaremos subrayar en esta pequeña historia cuál ha sido la participación de nuestros compatriotas y en especial, cuál ha sido la participación del Instituto Geográfico nacional (IGN).

Empecemos imaginando la situación que hemos visto y leído en muchas historias de aventuras, cuando lo protagonistas están perdidos, por ejemplo, en el desierto y no tienen ninguna referencia para orientarse. Esa situación es terrible y realmente hay un problema de supervivencia. En ocasiones, saber la posición sobre la superficie terrestre, al menos la situación relativa, por ejemplo, respecto al oasis más cercano, es una cuestión de vida o muerte. Pero hay también otras aplicaciones muy importantes, como la elaboración de cartografía, los usos militares, el conocimiento del territorio o simplemente la localización del recurso más necesario en cada situación, sea un oasis, una gasolinera, un restaurante o una población. Las aplicaciones de posicionamiento suelen enfocarse en dos di-

recciones muy diferentes: unas necesitan optimizar la rapidez en obtener la respuesta, aunque sea solo aproximada, como ocurre en las aplicaciones de navegación, y hay otras que no necesitan tiempos de respuesta tan cortos, pero requieren que la posición sea lo más precisa posible, en cuyo caso estaríamos hablando de aplicaciones geodésicas.

Antes de continuar, quisiera hacer una aclaración sobre la importancia de los sistemas de referencia en Geodesia y para ello, vamos a utilizar un ejemplo. Imagínense que yo quisiera indicar a una de las personas del público. Podría decir que se trata de la persona que está sentada en la tercera fila y en la cuarta columna, pero ¿qué es exactamente una fila? ¿Cómo se definen las columnas? ¿Desde dónde se empiezan a contar? Es decir, para entendernos sin ambigüedades es necesario establecer un sistema de referencia convenido y aceptado, una referencia que consista básicamente en un origen, un sistema de ejes de coordenadas y unas unidades de medida. Cuanto mejor y con mayor precisión esté definido ese sistema de referencia, mejores serán las posiciones que obtengamos.

Hay varios tipos de sistemas de referencia. En el ejemplo del desierto mencionado, lo que haría falta sería un sistema que nos diera una orientación, es decir hacia dónde andar, y una distancia aproximada. Ese sería un sistema relativo y regional. En esta charla nos vamos a ocupar de los sistemas globales que permiten un posicionamiento global respecto de la Tierra en su conjunto. En ese caso, parece lógico pensar que el origen debe ser el centro, el centro de gravedad de la Tierra y parece también sensato que uno de los ejes sea el eje de rotación de nuestro planeta. A partir de ahí, si se definen planos perpendiculares al eje de rotación, al cortar la superficie de la Tierra tendremos los paralelos si se definen planos que contengan a ese eje, al cortar la superficie terrestre tendremos los meridianos. Así tendríamos ya una red de paralelos y meridianos y podríamos definir coordenadas.



En realidad, hoy en día y dadas las precisiones que se necesitan, el centro de la Tierra y su eje de giro no son suficientemente estables y permanentes, sufren variaciones. Las referencias fijas que se utilizan están muy, muy lejos, son los quásares, referencias extragalácticas que se aprovechan con una tecnología llamada Interferometría de Muy Larga Base (VLBI). Con esa tecnología situamos los sistemas de referencia celestes y con éstos, los sistemas de referencia geodésicos.

2. LOS ORÍGENES DEL POSICIONAMIENTO

Vamos a empezar nuestra historia. Pensemos en las horas de homínidos de la prehistoria que ya entonces necesitarían posicionarse y más si eran nómadas, tendrían que saber dónde estaban las manadas de búfalos, los árboles con fruta, el agua en épocas de sequía, ¿cómo se posicionarían esos primeros homínidos?

Voy a poner otro ejemplo un poco más reciente. Unos 1700 años antes de Cristo, Abraham salió de Ur y llegó a Palestina. ¿Cómo se posicionaría? En este caso podemos suponer que utilizaría un posicionamiento de tipo regional, lo que conocía eran referencias en forma de accidentes geográficos: una montaña, una sierra, un río, un vado y a partir de ellos era capaz de reconstruir una ruta.

Pero como precedentes de posicionamiento global, podemos recordar las ruinas de Stonehenge, en Inglaterra, un círculo de menhires orientados hacia los solsticios. Ese monumento está datado entre 2000 y 3000 años antes de Cristo, y es una prueba de que ya entonces había cierto conocimiento de Astronomía y se observaban los astros. Eso puede muy bien considerarse el principio del posicionamiento global. Otro ejemplo son las pirámides de Egipto, construidas aproximadamente 2500 años antes de Cristo, que como sabréis están asombrosamente bien orientadas

en la dirección Norte-Sur, lo que también requiere un conocimiento de los astros y la capacidad de realizar observaciones meticulosas.

No se sabe si fueron primero los egipcios o los babilonios, pero 1000 años antes de Cristo ya se conocía el primer instrumento de posicionamiento de la historia y además el más sencillo, el gnomon. Ha sido extremadamente muy útil a lo largo de la historia y ha tenido tres aplicaciones principales: puede servir de reloj de sol, porque consiste en un mástil y un plano, en el que se ve cómo se mueve la sombra del Sol; otra utilidad es que si se observa la sombra durante todo el día, la dirección de la sombra más corta marca la dirección Norte-Sur, la línea meridiana, con lo que sirve para orientar, y además, si se observa el mismo gnomon en puntos de diferente latitud, la relación entre la sombra al mediodía y la altura del mástil nos da la diferencia de latitud entre dos puntos. Esta última aplicación como veremos tendrá una extraordinaria relevancia en la historia del posicionamiento global.

3. EL POSICIONAMIENTO EN LA NAVEGACIÓN MARÍTIMA DE LA ANTIGÜEDAD

Históricamente, las primeras aplicaciones avanzadas de las técnicas de posicionamiento aparecen en la navegación, sobre todo en la navegación marítima de altura, existe una navegación de cabotaje, que sigue la línea de costa y se orienta en función de sus accidentes, en la que se emplea un posicionamiento relativo regional. El problema de difícil solución aparece cuando uno se aleja de la costa y solo tiene el firmamento y la lámina del mar como referencia visual. Los primeros pueblos que conocemos que ya navegaban por los mares grandes distancias fueron los antiguos pueblos polinesios, entre 3000 y 1000 años antes de Cristo. En esa época habitaron las islas de la Polinesia y

se movían de unas islas a otras. Suponemos que ya conocían el comportamiento de los astros, también podían utilizar las corrientes marinas, los vientos, incluso los patrones de interferencia de las olas de los diferentes islas y atolones que se encontraban. Lo que sí es cierto es que transmitían sus conocimientos de una generación a otra oralmente, contando historias y mediante canciones. Una importante novedad es que tenían una primera cartografía rudimentaria, los llamados mapas de palos, en los que representaban con palos atados, como el de la figura, las posiciones de las islas y la dirección de las corrientes.





El primer precedente de navegación marítima de altura con técnicas de posicionamiento y orientación en nuestro entorno geográfico y cultural más cercano, en el Mediterráneo, aparece con los pueblos fenicios, entre 1200 y 500 años antes de Cristo. Los fenicios ya navegaban de noche, conocían la Estrella Polar y la Osa Menor, y llegaron navegando hasta las llamadas columnas de Hércules, es decir hasta el Estrecho de Gibraltar y comenzaron incluso a internarse en el Océano Atlántico. Para orientarse adicionalmente utilizaban las corrientes marinas y también usaban las aves que avistaban en sus travesías e incluso, llevaban sus propias aves para soltarlas en un momento dado y ver qué dirección tomaban para volver a casa.

Los griegos sucedieron a los fenicios en el dominio del posicionamiento en el mar Mediterráneo para la navegación marítima. Los pueblos griegos desarrollaron notablemente la navegación, mejoraron las embarcaciones y, lo que es más importante, tenían un conocimiento mucho más profundo de los astros y sus movimientos. Como novedad, utilizaban cartas para recordar las rutas que habían seguido. En un pecio griego, debido a un naufragio producido al lado de la isla de Antikythera, se encontró una máquina, el llamado mecanismo de Antikythera. Se trata de un mecanismo de engranajes que parece ser que podía predecir las posiciones de los astros, los eclipses o las diferentes épocas griegas, como la época de las Olimpiadas. Podemos preguntarnos si se podría tratar de la primera máquina de posicionamiento. Ya que al haberse encontrado en un naufragio yo me pregunté si bien podría ser por su posible uso para el posicionamiento pero,

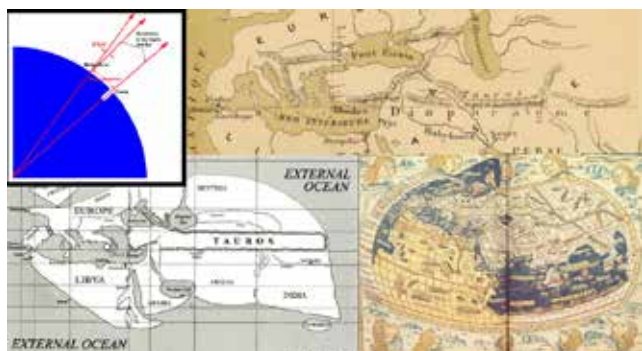


aunque no lo fuera, demuestra en cualquier caso que los griegos tenían un profundo conocimiento de los fenómenos astronómicos lo que supone un claro avance para las posibilidades del posicionamiento.

4. EL POSICIONAMIENTO EN LA GEODESIA DE LA ANTIGÜEDAD

La civilización griega brilló en la navegación, sobre todo porque fueron los primeros que tuvieron un enfoque, digamos científico, en cuanto que trataban de entender el porqué de las cosas de forma racional y ordenada: la forma de la Tierra, sus dimensiones, las distancias a otros cuerpos celestes, etcétera. Es la primera vez en la historia de la humanidad que se generaliza la idea de que la Tierra es redonda, desde el siglo VI antes de C., y se abandona el modelo anterior de tierra plana, probablemente como resultado de la observación de los eclipses lunares, en los que se ve la sombra curva de la Tierra sobre la Luna.

En cualquier caso, no solo creían que la Tierra es esférica, sino que además se atrevieron a calcular su radio, mediante un método muy curioso, que empezó a aplicarse en el siglo III antes de Cristo y se repite con los mismos fundamentos hasta el siglo XVIII: el método de la medición de un arco de meridiano. La primera medición de arco de meridiano de la historia corrió a cargo de Eratóstenes de Cyrene, aproximadamente 250 años antes de Cristo. El procedimiento consiste en que si en un círculo conocemos la longitud de un arco y el ángulo que lo subtiende, es inmediato calcular el radio a partir de esos valores. Para medir la distancia del arco se pueden utilizar diferentes métodos, incluso a falta de otro mejor, se puede estimar la distancia andando. En cuanto a la media del ángulo, se puede hacer con un gnomon, que ya hemos dicho que sirve para medir diferencias de latitud entre dos puntos, si las dos ubicaciones están en el mismo meridiano. Eratóstenes aplicó el método, tal y como se ve en la figura midiendo la distancia entre la ciudad de Alejandría, en la desembocadura del Nilo, y la ciudad de Siena, situada al Sur. Determinó la distancia aproximada entre ambos lugares por el tiempo que tardaban las caravanas en hacer ese recorrido y midió el ángulo, mediante una genialidad: aprovechar el que Siena se encuentra en el Trópico de Cáncer y por ello, hay un día al año en el que el Sol culmina exactamente en el cenit y su luz llega hasta el fondo de los pozos. Ese mismo día colocó un gnomon en Alejandría y calculó la relación entre su altura y la longitud de la sombra, y esa diferencia es exactamente la diferencia de longitudes entre ambas ciudades. Fue afortunado porque halló un valor muy cercano al real y se equivocó tan solo en unos 200 km, es decir un 3 % aproximadamente. Los



griegos realizaron más mediciones de arcos de meridiano, por ejemplo Poseidonio en el año 100 antes de C. realizó otra determinación del radio terrestre con mucha menos fortuna, ya que obtuvo un valor mucho menor. Esta falta de fortuna de Poseidonio tendría importantes repercusiones históricas, como veremos más adelante.

Los griegos, además de intentar medir el tamaño de la Tierra, trataron de representarla, para lo que crearon los primeros sistemas de referencia geodésicos. El primero de ellos que se atrevió a representar el mundo conocido, llamado Ecúmene, fue Dicearco de Mesina, en el año 300 antes de Cristo. Trazó el mapa de color crema que puede verse en la figura en el que trazó el primer meridiano de referencia, el de Rodas, y el primer paralelo, también el de Rodas. Otro mapa muy relevante es el de Eratóstenes, mucho más riguroso, basado en mediciones de gnomon y en los informes de todas las expediciones griegas que se conocían, como las de Alejandro Magno. Introdujo además una novedad importante al dibujar una cuadrícula completa de meridianos y paralelos tal como se aprecia en la Figura

El siguiente precedente importante aparece ya en la época romana, aproximadamente hacia el año 200 después de Cristo y se trata de la «Geografía» de Ptolomeo. Claudio Ptolomeo realizó mediciones en los lugares más importantes del mundo conocido, utilizando el gnomon y un instrumento nuevo: el astrolabio. Introdujo como novedad que el paralelo de referencia ya no es el de Rodas, sino el Ecuador, el mismo que utilizamos hoy en día y el meridiano de referencia ya no está en mitad del mundo conocido, en Rodas, sino que lo sitúa en las Islas Afortunadas, es decir en nuestras Islas Canarias, consideradas entonces el fin del mundo.

Siglos después, en la Edad Media podemos también encontrar algunas innovaciones interesantes relativas al posicionamiento. En el mundo árabe existió un notable desarrollo de las matemáticas y la trigonometría, que son tan importantes para el posicionamiento. Además perfeccionaron instrumentos como el astrolabio y el cuadrante, que provenía de la agrimensura romana, para medir altura de estrellas. Personajes importantes de esa época en el mundo árabe relacionados con el posicionamiento son: Al-Battani, que elaboró un catálogo sin precedentes de las



ciudades conocidas más importantes de entonces con su posición, y Al-Biruni, que realizó otra nueva medida de arco de meridiano hacia el año 1000 cerca de Bagdad, la más precisa hasta entonces, con una interesante novedad, que consistió en que usó las montañas como gnomon, cuya altura le proporcionó una mayor precisión. No podemos olvidar a los árabes de al-Andalus, como Averroes, muy notable en Astronomía, y Azarquiel, que perfeccionó el astrolabio y lo transformó en un nuevo instrumento, la azafea, útil en cualquier latitud.

El siguiente precedente importante en posicionamiento lo encontramos a miles de kilómetros de distancia, en el Lejano Oriente, en China, en donde se inventó la brújula allá por el siglo XI. Las primeras brújulas consistían, como se ve en la figura, en una placa de bronce sobre la que se situaba una especie de cucharita con un material imantado. Esa cucharita se orientaba en la línea norte-sur. Para la navegación marítima, era sencillo tomar un balde de agua, colocar un corcho y sobre el corcho, un material magnético. La brújula se fue perfeccionando y llegó a Europa hacia el siglo XII, probablemente gracias a expediciones como la de Marco Polo.

5. EL POSICIONAMIENTO EN LA NAVEGACIÓN MARÍTIMA MODERNA

Todos esos instrumentos, la brújula, el astrolabio, el cuadrante, fueron fundamentales para que pudiera llegar una gran época en la historia del conocimiento, el Renacimiento, la época de las grandes exploraciones. Los primeros grandes exploradores fueron los portugueses, pero los portugueses rara vez se alejaban de la costa. El primer navegante que se atrevió a desafiar verdaderamente al océano y navegar hacia el oeste, como saben, fue Cristóbal Colón, que se basó en un mapa del italiano Toscanelli, que utilizó el valor del radio de la Tierra de Poseidonio, el valor equivocado del que ya hemos hablado, por lo que pensaba que nuestro planeta era más pequeño de lo que realmente es. Colón creía que donde

está América encontraría China y Japón, menos mal que se encontró otro continente, si no quizás no hubiesen podido volver, hubiera supuesto muchos más meses de navegación. Colón es importante porque marca el inicio de una nueva época en el posicionamiento, la de los descubrimientos y las grandes expediciones de navegación. En esa época, desde el siglo XV hasta el siglo XVIII, se perfeccionaron y evolucionaron los instrumentos que ya hemos visto.

Para navegar, lo primero es situarse en el mapa y el método se llama 'echar el punto'. Por medio del rumbo y la distancia recorrida, se sitúa la posición del barco después de un día de navegación en la carta. Por otro lado, determinando la latitud y, lo que es mucho más difícil, la longitud, se puede situar otro punto en el mapa, y ambos puntos deben coincidir. Vamos a ver cómo evolucionó cada uno de los instrumentos que sirven para determinar estos parámetros.

La distancia se determinaba en tiempos de Colón por el método de la astilla, que consiste en tirar al agua una astilla por proa, esperar a que llegue a popa y cronometrar el tiempo con un reloj de arena, llamado ampolleta. Conocida la longitud del barco, se puede calcular aproximadamente su velocidad y conociendo la velocidad y el tiempo transcurrido, la distancia. Posteriormente apareció el método de la corredera de barquilla, que se basa en tirar una tabla lastrada por popa, la tabla se frenaba y quedaba bastante fija en el agua. Una cuerda con nudos regularmente espaciados se iba desenrollando libremente, y contando los nudos y con una ampolleta, se podía estimar la velocidad del navío. De ahí viene el nudo (1 milla náutica/h, 1852 m/h) como unidad de velocidad. Posteriormente, mucho más tarde, se inventó la corredera automática.

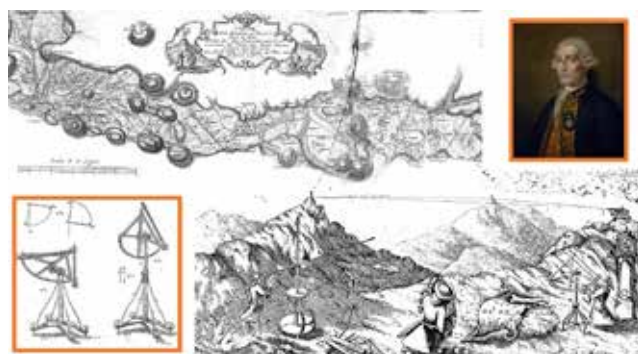
En cuanto a la dirección, era muy sencillo determinarla con la brújula. Las brújulas fueron cada vez más sofisticadas y a finales del siglo XVIII incluso se corregía por declinación magnética.

En cuanto a la determinación de la latitud, sufrió muchas mejoras a lo largo de los siglos. En la época de Colón, se usaba o bien el cuadrante, para medir la altura de los astros, preferentemente la Estrella Polar o el Sol, o bien se utilizaba el astrolabio. Posteriormente se inventó lo que

se llamaba la ballestilla, un invento muy bien ideado que permitía mayor precisión. A la ballestilla le sucedieron el cuadrante de Davis, el octógono de Hadley que incorporaba un nonio y finalmente, el sextante, instrumento que aún hoy en día tienen que llevar los barcos por si fallan los sistemas electrónicos.

En cambio, la longitud es lo más difícil de determinar y lo que más siglos se tardó en resolver. Era tan difícil de resolver, que las potencias marítimas de esos siglos, españoles, ingleses, holandeses... ofrecieron grandes sumas de dinero al que pudiese resolver el problema. Todos los métodos se basan en que si se conocen las horas solares de dos lugares en el mismo instante de tiempo, la diferencia es la diferencia de longitudes. Para ello, se puede observar un mismo fenómeno astronómico a distinta hora solar en cada punto. Por ejemplo, se utilizó la observación de un eclipse. La diferencia de las horas en las que se observó en dos lugares determinados es igual a la diferencia de longitud. Galileo propuso utilizar las lunas de Júpiter. Otro método utilizado era el llamado de distancias lunares, que a partir de las posiciones relativas del Sol y la Luna permitía determinar la longitud del lugar después de una serie de cálculos. Pero el método más simple consistía en algo tan sencillo como llevar la hora con un reloj allí a donde vaya y la diferencia de la hora solar en ese lugar con la de mi reloj me proporciona la latitud. Inicialmente se intentó llevar la hora con ampolletas, pero eran poco precisos, con relojes de péndulo, pero el movimiento de la nave los volvía inútiles y finalmente, John Harrison a finales del siglo XVIII resolvió el problema inventando el llamado cronómetro de Harrison, con el que ganó la recompensa de 20 000 libras esterlinas que ofrecía la corona inglesa.

Otra novedad importante para el posicionamiento en la navegación es el uso de la proyección llamada de Mercator, que tiene la ventaja de que conserva los ángulos. Eso quiere decir que si se navega siguiendo un rumbo fijo durante cierto periodo de tiempo, la línea que se dibuja en una carta es una línea recta, lo que simplifica mucho los cálculos en la mar. Aunque por otro lado, esa línea recta en el mapa no es la distancia más corta entre dos puntos, pero en distancias cortas, la diferencia no es muy grande.



6. LA APARICIÓN DE LA GEODESIA MODERNA

Paralelamente, a la vez que evolucionaba el posicionamiento en la navegación, se mejoraba el posicionamiento en tierra y la Geodesia. La Geodesia moderna nace con el primer antecedente que encontramos en los antiguos países bajos españoles, de los que Carlos V ordenó elaborar una cartografía en la que se empleó por primera vez el método de triangulación, que consiste básicamente en que se dispone de una red de triángulos en los que se miden todos los ángulos, cosa bastante fácil por aquel entonces, y solo es necesario medir uno de los lados, o unos pocos si se quiere, para conocer las coordenadas de todos los vértices. Medir con precisión distancias sí era un problema de difícil solución en el siglo XVI. El siguiente precedente que encontramos es que parece, según defienden algunos autores, que nuestro humanista Antonio de Nebrija realizó una medición de arco de meridiano en la Vía de la Plata. También se dice que posiblemente un famoso navegante portugués, Duarte Pacheco Pereira, realizó otra medida de arco de meridiano en Brasil; pero lo que sí sabemos con seguridad es que se efectuó una medición del arco de meridiano por Jean Fernel en el siglo XVI en Francia, entre París y Amiens, aportando como novedad la utilización del número de vueltas que daba la rueda de su carro para medir la distancia, una idea genial para la época.

En el siglo XVII también tenemos una medición de arco de meridiano en Inglaterra a cargo de Norwood, que también aportó como idea genial que utilizó en lugar de un gnomon, los campanarios de las iglesias que había entre York y Londres. Sin embargo la primera medida de arco de meridiano que podemos calificar como rigurosa y científica se realizó un poco más tarde, entre 1668 y 1669, de nuevo entre París y Amiens, y se la debemos a Picard. Las novedades que introdujo fue que utilizó para medir la distancia el método de triangulación, con aparatos con anteojo dotados de retículo, lo que era una novedad para entonces; además para medir la altura de las estrellas y poder determinar así la latitud, usó un cuadrante con tornillo micrométrico lo que hacía la medición mucho más precisa. Esa medición y determinación del radio terrestre fue importantísima, porque le sirvió a Isaac Newton para ratificar su ley de la gravitación universal. Posteriormente, los siguientes avances importantes que encontramos, aparecen también en Francia y se deben a una familia de geodestas, los Cassini, que extendieron el arco de Meridiano de París a Amiens, hasta Dunquerque, al norte, y hasta la frontera con España, al sur. Al realizar los cálculos, se dieron cuenta de algo muy curioso y es que si se determina el radio de la Tierra con la parte nor-

te del meridiano no se obtiene el mismo valor que si se toma la parte sur, lo que hizo dudar de que la Tierra fuese esférica y originó que apareciesen dos teorías: una, defendida entre otros por los Cassini y Descartes, afirmaba que la Tierra era alargada por los polos; otra, sostenida por Newton y Higgins, contemplaba la Tierra como un elipsoide de revolución achatado por los polos y se apoyaba en medidas pendulares hechas en América del Sur y en París. Para resolver esa controversia, los franceses organizaron expediciones geodésicas que viajarían a latitudes muy al norte y a un lugar cerca del Ecuador. Las regiones elegidas fueron Laponia y el antiguo Virreinato de Nueva Granada, el actual Ecuador, entonces parte de España. Es por eso que en esa expedición participaron un jovencísimo Jorge Juan, un personaje importantísimo en la historia de la Astronomía y la Geodesia españolas, y Antonio Ulloa. El resultado de estas expediciones fue que, efectivamente, la forma de la Tierra se parece más a un elipsoide de revolución achatado por los polos. En los siguientes los, se repitieron las medidas de arco de meridiano, pero había un problema muy importante y es que no había una unidad de longitud común, con lo que no se podían comparar bien los resultados. En Francia, después de la Revolución Francesa, se propuso la adopción de una medida universal para todos los países y se propuso la utilización del metro, que precisamente se definió en un principio como la diezmillonésima parte de un cuarto de meridiano terrestre, y para conocer su valor con exactitud fue necesario realizar otra medición de arco de meridiano, para lo que se tomó de nuevo el meridiano de París, pero esta vez se midió desde Dunquerque hasta Barcelona, incluso posteriormente se extendió hasta la isla de Formentera, en Baleares. En la campaña participaron los franceses Mechain y Delambre, y también los españoles, Planet, Bueno y el astrónomo Chaix entre otros. Fue una campaña que estuvo llena de problemas, ya que el mismo Mechain acabó muriendo en Castellón de la Plana de tifus y posteriormente en el intento del geodesta Aragón de extenderlo hacia Formentera, estalló la Guerra de la Independencia en España, con lo que eso suponía para la colaboración entre españoles y franceses. Tenemos que mencionar otro geodesta francés importante de esa época, que es Bordá, que introdujo importantes avances, sobre todo en la instrumentación, como el teodolito repetitivo, y participó en la unión entre Greenwich y París. Anecdóticamente, podemos recordarle también que realizó una campaña en las Islas Canarias, acompañado de los oficiales de la Armada Varela y Arguedas, en la que hizo una medición del Teide por triangulación, a partir de la medición de bases en la parte baja, una medición excepcional que es tan precisa como las que podemos hacer hoy en día.

7. EL POSICIONAMIENTO EN LA GEODESIA DEL SIGLO XIX

En el siglo XIX se produjo un gran perfeccionamiento de la instrumentación y también nuevas mediciones de arco de meridiano, no ya para averiguar el radio de la Tierra porque ya se sabe que su forma se puede aproximar mejor mediante un elipsoide achatado por los polos, sino para determinar los semiejes de ese elipsoide. Pues bien, el arco de meridiano más colosal jamás medido es el arco de Struve, medido allá por 1870. Se trata de un arco de 2820 km y se extiende desde Laponia hasta la desembocadura del Danubio en el Mar Negro, en Rumanía. Esas mediciones dieron lugar a la definición del elipsoide de Struve, que se utilizó durante cierto tiempo en la cartografía española. A ese elipsoide le suceden los de Bessel, Ayre, Clarke en Estados Unidos, Everet en la India y finalmente uno que también se utilizó en la cartografía española durante un tiempo y que proviene de principios del siglo XX, el elipsoide de Hayford.

Otra novedad muy importante para el posicionamiento en aquella época fueron las reflexiones que hicieron Gauss y Helmert sobre cuál es la mejor aproximación de la figura de la Tierra. Se dieron cuenta que la aproximación por un elipsoide de revolución no es suficiente para la tercera coordenada, la altitud, porque si no tenemos en cuenta nada más, hay lugares en los que las aguas no correrían hacia altitudes más bajas. Apareció entonces el concepto de geoide, esa figura que para hacerla más comprensible explicamos que se obtendría prolongando el nivel medio de mares y océanos por debajo de los continentes. En consecuencia, cuando estamos hablando de altitud, en realidad estamos hablando de gravedad. Tanto es así que es en esos años cuando se realizan las primeras mediciones del valor de la gravedad.

Pero ese siglo es importante sobre todo por el gran desarrollo que experimentan los mapas topográficos, los mapas básicos de cada país, sobre todo en los países más desarrollados, que para gestionar mejor sus recursos y conocer el territorio inician grandes proyectos de cartografía nacional, para lo que es necesario disponer de una red geodésica, una red de puntos de coordenadas bien conocidas sobre el territorio.

Por lo tanto, aparecen las primeras redes geodésicas, aunque cada país establece la suya de manera independiente. La primera red geodésica oficial de España tiene su origen en el datum Madrid, en el Observatorio Astronómico del Retiro, donde se encuentra el punto de origen de la red y el meridiano origen era el de Madrid. Hubo que esperar hasta 1884 para que, en la Conferencia de Washington se tomase como meridiano origen común para todos los países el meridiano de Greenwich. Por entonces, ya existía un proyecto de mapa topográfico nacional debido a Jorge Juan, que planeaba una cartografía 1:100 000 para todo el país, ya a finales del siglo

XVIII. Desgraciadamente, el convulso principio del siglo XIX en España impidió que se llevase a cabo ese proyecto. Hubo que esperar hasta 1843, cuando se creó la llamada Comisión del Mapa, en la que participó el general Ibáñez de Ibero, para que se volviese a tener un proyecto de Mapa Nacional, el Mapa 1:50 000. Inmediatamente empiezan los trabajos de planificación y desarrollo de la Primera Red Geodésica española tanto es así que en el año 1858 se observó la base fundamental, la base de Madrideojos, de unos 14 km, lo que por aquel entonces seguía constituyendo un problema de difícil solución. En este caso se optó por una regla calibrada y transportable que se iba desplazando por la base. Fue una campaña geodésica muy importante y vinieron geodestas de todo el mundo a observar cómo se realizaba. Poco después se fundaría el Instituto Geográfico Nacional, en 1870, con la geodesia ya empezada, aunque la observación de los ángulos se hizo en la década de los 70 del siglo XIX. Como puede verse en la figura, la primera red se basaba en cadenas de triángulos que seguían los paralelos y meridianos. Posteriormente, esta red se unió con las de los países colindantes. Merece especial mención el enlace realizado en 1879 con Argelia con triángulos con lados de más de 200 km. Esa campaña geodésica tuvo mucho éxito internacional, recibió premios e incluso el general Ibáñez de Ibero recibió por ello el Marquesado de Mulhacén. A continuación, se completó la red geodésica española de primer orden rellenando las zonas que dejaban esas cadenas de triángulos, trabajos que no se finalizaron hasta el año 1918. En la figura puede verse la medición de la base de Madrideojos.

8. EL POSICIONAMIENTO DEL SIGLO XX A LA ACTUALIDAD

Llegamos así al siglo XX. En cuanto a los grandes logros de ese siglo en cuanto a posicionamiento, lo primero hay que subrayar es que el desarrollo de la electrónica fue fundamental para disponer de una instrumentación más sencilla y también más precisa. Un avance muy importante fue la utilización de ondas electromagnéticas para medir distancias,



empleando la técnica llamada interferometría, inventada por Michelson, que permite tanto la medición electrónica de distancias en tierra, como la medición de la distancia a satélites (SLR), además de otra técnica importantísima, la llamada Interferometría de Muy Larga Base (VLBI) e incluso adicionalmente también es utilizada para medir la distancia recorrida por un móvil en los modernos gravímetros absolutos. Otro invento fundamental que hizo posible la aplicación de técnicas como la interferometría fue la aparición de los relojes atómicos u osciladores, que con su enorme precisión permiten que la interferometría sea la base, entre otras cosas, de los Sistemas por Satélite de Navegación Global (GNSS).

En cualquier caso, el avance más importante del siglo XX en cuanto a posicionamiento es, sin lugar a dudas, el posicionamiento por satélite. Ya desde el lanzamiento del Sputnik en el año 1957 se pensó en la posibilidad de observar satélites para calcular posiciones en tierra y fue en la década de los setenta del siglo XX cuando los americanos idearon la puesta en marcha de la primera constelación de satélites con ese fin, la constelación Transit, a la que siguió la constelación soviética TSIKADA. La utilidad de estas primeras constelaciones se basaba en observar el fenómeno Doppler, proporcionaba precisiones del orden de 1 metro y constituyó una revolución. Aunque no se podía prever lo que iba a aparecer después, los sistemas de posicionamiento global por satélite (GNSS, *Global Navigation Satellite System*) que supusieron una auténtica revolución, y que ahora todos llevamos en nuestros teléfonos móviles. El primero en aparecer fue el sistema GPS (*Global Positioning System*) militar estadounidense, luego apareció el sistema ruso militar (GLONAS), también tenemos uno chino (Beidou) y el mejor de todos, el que va a ser más preciso y va a ofrecer más servicios, el europeo Galileo. Estos sistemas son tan importantes que el usuario puede con su navegador saber su posición con una precisión de pocos metros en tiempo real, sin hacer nada especial. Pero además, utilizando un sistema de aumentación, como el Servicio de Posicionamiento en Tiempo Real que proporciona el IGN y que se apoya fundamentalmente en la red nacional GNSS (ERGNSS), se pueden conseguir precisiones del orden del centímetro. Muchos Agricultores trabajan así para conocer la

posición de su maquinaria con precisión y dirigirla, incluso se hace lo mismo con maquinaria de obra. Pero es que además, con cálculos más sofisticados, las precisiones alcanzadas están revolucionando las aplicaciones geodésicas al acercarse al nivel del milímetro, podemos medir el movimiento de los continentes, los desplazamientos del Polo, el rebote postglacial que se produce en algunos países escandinavos debido a la retirada de los hielos de las últimas glaciaciones, las deformaciones debidas a volcanes o las previas a un sismo. Aplicaciones tan importantes que nos están permitiendo estudiar de manera indirecta los efectos del cambio climático, y que también sirven para mitigar o intentar prever posibles desastres naturales, por ejemplo en la deformación volcánica mencionada que se usó operativamente aquí, en el Instituto Geográfico Nacional, con motivo de la erupción del volcán de la isla del Hierro.

Otro aspecto importante es que esas técnicas tan precisas han revolucionado los sistemas de referencia geodésicos. A mediados del siglo XX teníamos sistemas geodésicos de referencia de cada país independiente, pero gracias a la aparición de la informática, y el consiguiente incremento de la capacidad computación, se calcularon redes regionales, como la europea, para dar lugar a lo que llamamos sistemas continentales. Incluso esos sistemas continentales, usados en la cartografía española hasta hace poco, han quedado obsoletos, no sirven por ser locales y poco precisos, están por detrás de la instrumentación. Por todo ello se crearon los sistemas geocéntricos y globales, el primero de los cuales es el sistema estadounidense WGS, nacido con fines militares para permitir fácilmente que cada misil alcance su objetivo, aunque esté en otro continente. El siguiente en aparecer fue el sistema soviético, llamado PZ. Mientras tanto, la comunidad científica internacional, a través del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS) definió su propio sistema geocéntrico, el ITRS (*International Terrestrial Reference System*), un sistema fundamenta que se está mejorando continuamente utilizando todas las técnicas de medición posibles (VLBI, GNSS, mediciones láser a satélite y otras). Son sistemas tan importantes que recientemente las Naciones Unidas ha publicado una resolución en la que reconocen su papel esencial para el desarrollo y el progreso, e instan a todos los países para que colaboren en su mantenimiento.

9. CONCLUSIONES Y EXPECTATIVAS

Como conclusión, vamos a ver cómo ha evolucionado el posicionamiento a lo largo de la historia. Me he permitido realizar una gráfica, véase la figura, que muestra la evolución en precisión de la posición en cada época, aunque reconoz-



co que es un empeño difícil y que puede tener algún error. Tenemos, desde los griegos, que cálculo que tendrían una incertidumbre de unos 500 km hasta la actualidad en la que se alcanzan precisiones de milímetros. Tenemos una ampliación de esa gráfica, para ver la mejora en los últimos años.

¿Qué conclusiones podemos sacar de esa gráfica? En primer lugar, que se ha mejorado sustancialmente. Al principio era más fácil mejorar, pero ahora parece que hemos llegado a un límite, el milímetro, que es muy difícil de superar. También hemos aprendido que persiguiendo una mejora continua en el posicionamiento, se han ido perfeccionando indirectamente tanto la navegación, como la Geodesia. Y hemos mejorado sobre todo porque han evolucionado la instrumentación, la tecnología y las metodologías. Pero no hay que olvidar que se ha mejorado también porque cada vez conocemos mejor la forma y dimensiones de nuestro planeta, es decir, porque ha progresado la Geodesia y hemos sabido adaptar los Sistemas de Referencia Geodésicos a la instrumentación y conocimientos de cada época.

Llegados a este punto nos podemos preguntar qué nos deparará el futuro. Creo que la instrumentación seguirá mejorando, que los GNSS seguirán siendo fundamentales. Estoy seguro que dentro de poco tendremos nuestra posición con precisión de centímetros mientras andamos por la calle y gracias a nuestro teléfono móvil. El campo del posicionamiento va a crecer considerablemente, van a llevar navegadores los drones, los vehículos, los robots y todos los dispositivos. Creo que ésa va a ser la revolución que más vamos a notar en el futuro próximo en cuanto a posicionamiento.

Por otro lado, si conseguimos unir los GNSS y la instrumentación sísmica, seremos capaces de medir con mucha precisión los movimientos de la corteza terrestre de periodo muy largo (deriva de continentes) y los movimientos de periodo muy corto (seísmos), con lo que la potencialidad de esos sistemas puede ser muy considerable.

Otras novedades pueden venir de la mano de la interferometría. Si en un laboratorio podemos llegar a dar precisiones de micras, ¿por qué no va a ser posible conseguir esas precisiones en exteriores?

Otras buenas noticias pueden venir de la mano de la

geodesia relativista. Ustedes saben que por la teoría de la relatividad que el tiempo transcurre de modo distinto en función de la gravedad. Luego si observo relojes a diferente altitud y observo su comportamiento, puedo llegar a observar diferencias de gravedad, es decir, diferencias de altitud. Así, podrán usarse relojes atómicos de altísima precisión para medir diferencias de altura también con gran precisión.

Y también auguro que se desarrollará una concepción del planeta como un todo, en el que Meteorología, Geofísica, Geodesia, Geología, etc. se unirán en el estudio del planeta como un sistema interrelacionado y complejo donde el conocimiento desde un punto de vista multidisciplinar tiene mucho que aportar. Y quién sabe si toda esta aventura del posicionamiento y todo lo que hemos aprendido, nos servirá para explorar otros planetas. Lo que sí es verdad es que el progreso en el posicionamiento ha sido una verdadera aventura de superación del ser humano y que a través de su ingenio ha ido mejorando cada vez más los resultados hasta llegar a unas precisiones que antaño parecían inalcanzables. Muchas gracias.

Sobre el autor

Marcelino Valdés Pérez de Vargas

Marcelino Valdés Pérez de Vargas es un geodesta que nació en Madrid en 1972. Ocupa el cargo de Jefe del Área de Geodesia del Instituto Geográfico Nacional (IGN), coordinando el mantenimiento y la actualización de las redes geodésicas nacionales, incluida la red GNSS nacional de estaciones permanentes (ERGNSS), la red de nivelación de alta precisión (REDNAP) y la red de mareógrafos. Además, promueve el procesamiento geodésico aprovechando las observaciones de estas redes y el resto de infraestructura geodésica del país. Comenzó a trabajar en IGN, en su departamento de Geodesia en 1998 y en la actualidad, está enfocado en la modernización del Área de Geodesia de IGN a las nuevas técnicas y procedimientos. Es Ingeniero Técnico en Topografía (1993) por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) licenciado en Ingeniería de Geodesia y Cartografía (1997) por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y Diplomado en Estudios Avanzados (2010) por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Es profesor asociado en la Universidad Complutense de Madrid (UCM) desde el año 2000. Además, es el Secretario de la Sección de Geodesia de la Comisión Española de Geodesia y Geofísica (CEGG) y coordinador del grupo de trabajo de la Comisión Especializada del Sistema Geodésico de Referencia.

