



TEXTO



Andreu Alvarruiz (Cardedeu)
y David Segura (Bossòst)

Ingenieros en Geomática y Topografía titulados por la Universitat Politècnica de Catalunya y miembros del grupo Sostremetries.

www.sostremetries.cat [@sostremetries](https://www.instagram.com/sostremetries)

¿CÓMO SE MIDEN LAS MONTAÑAS?

La altura que ostentan y se atribuye a la práctica totalidad de cumbres de nuestro planeta contiene errores. Prueba de ello es que la altitud que encontramos para un mismo pico puede variar entre uno y cinco metros en función de la cartografía consultada, y en ocasiones, rebasar la veintena. De hecho, el repaso de los mapas publicados por una misma editorial puede revelarnos las variaciones existentes en sus diferentes ediciones. ¿Pero por qué sucede esto? ¿No se han medido bien?

Andreu Alvarruiz y David Segura miembros del equipo de Sostremetries nos explican en este reportaje cuál es la técnica que ofrece más precisión a la hora de medir montañas y hasta qué punto podemos fiarnos de los valores hechos públicos.

RECEPTORES GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM)

Popularmente conocidos como receptores GPS, estos instrumentos reciben señales de la o las constelaciones de satélites empleadas para determinar nuestras coordenadas sobre el globo terráqueo.

La primera constelación en ponerse en órbita, el *Global Positioning System* (GPS), data de los años 70 y fue obra de los norteamericanos que lo reservaron para usos militares.

Posteriormente, la Unión Soviética lanzó su propia versión, el sistema GLONASS, muy similar en prestaciones al estadounidense, pero que no cosechó tanto éxito como su rival, ni consiguió generalizar esta denominación. Finalmente, a principios del siglo XXI China, la Unión Europea, Japón e India pusieron en órbita sus respectivas constelaciones que responden a los nombres de BeiDou, Galileo, QZSS e IRNSS respectivamente. El conjunto de todas estas es lo que se conoce como *Global Navigation Satellite System* (GNSS).

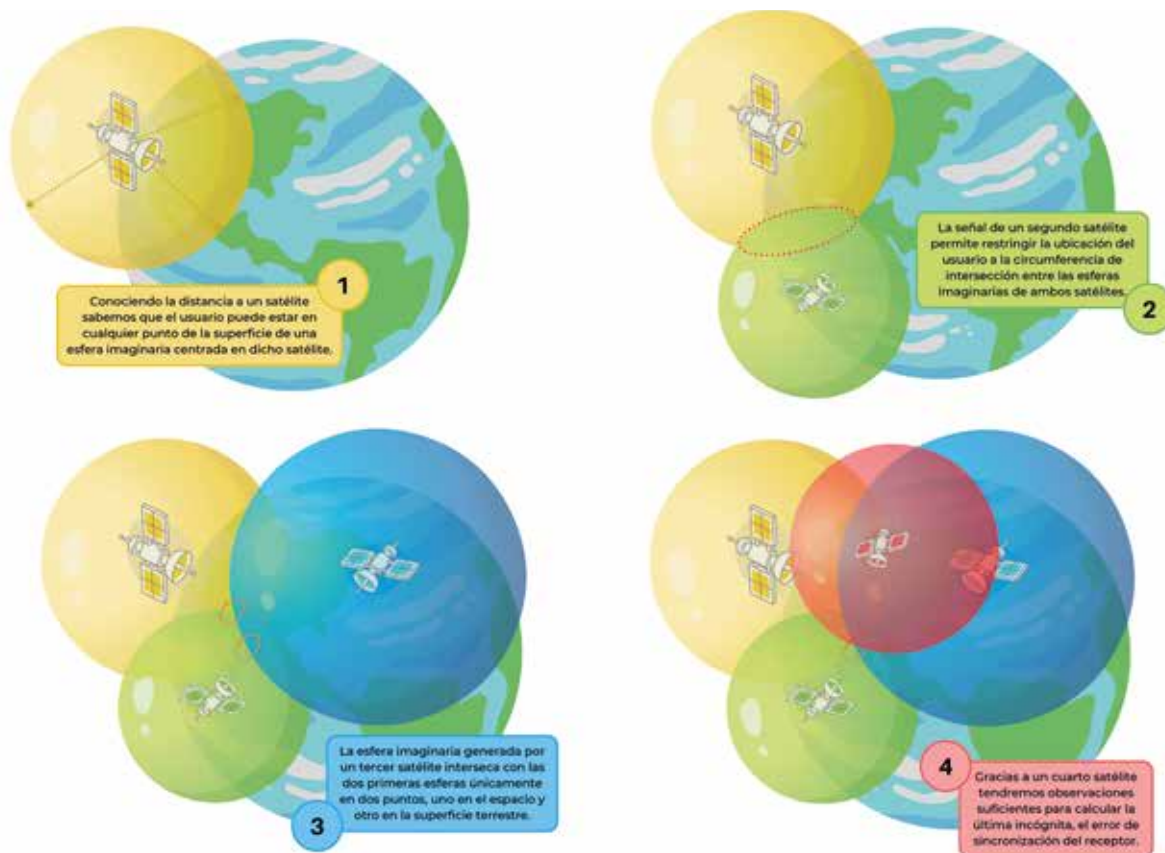


FIGURA 1 · Principio de funcionamiento del GNSS: la posición del receptor se calcula por multilateración, a partir de la distancia a, al menos, cuatro satélites · FUENTE: Sostremetries 2023

¿CÓMO FUNCIONA UN GNSS?

Cada satélite en órbita emite continuamente su posición y la hora de emisión de la señal. Mientras tanto, los receptores únicamente se dedican a "escuchar y calcular". El satélite no comunica al receptor dónde se encuentra, simplemente señala que ha enviado una señal a determinada hora desde cierta posición y con ambos datos el receptor es capaz de calcular la distancia que le separa de ese satélite.

Estos instrumentos reciben señales de la o las constelaciones de satélites empleadas

Conociendo la distancia a un satélite, el receptor "sabe" que puede encontrarse en cualquier punto de la superficie de una esfera imaginaria cuyo centro se halla en dicho satélite. Si el receptor recibe señales de un segundo satélite esta información le permite restringir su posición a cualquier punto de la circunferencia definida por la intersección entre las esferas imaginarias construidas a partir de cada uno de ellos. Por último, la señal de un tercer satélite (figura 1) permite limitar la posición a sólo dos puntos (la intersección de la circunferencia anterior con la tercera esfera imaginaria). Como uno de estos puntos deberá descartarse por hallarse demasiado lejos de la superficie terrestre, tendremos, forzosamente, que elegir el otro.

tarse por hallarse demasiado lejos de la superficie terrestre, tendremos, forzosamente, que elegir el otro.

La determinación de coordenadas a partir de distancias a varios puntos de coordenadas conocidas se conoce con el nombre de multilateración. Este concepto es mucho más fácil de visualizar gracias a la reducción del problema a dos dimensiones. Supongamos que un receptor ha medido la distancia a los tres satélites de la figura que se muestra a continuación (figura 2). La distancia a cada uno de ellos limita su posición a la circunferencia correspondiente y, en consecuencia, el receptor se encontrará en el único punto donde intersecan las tres circunferencias.

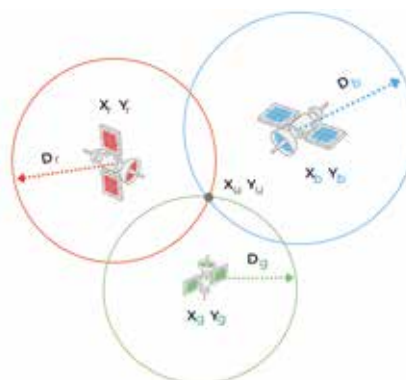


FIGURA 2 · Simplificación bidimensional a partir de tres satélites · FUENTE: Sostremetries 2023



Pedres Albres. Andreu Alvarruiz con la controladora en mano y David Segura colocando el jalón con la antena GNSS sobre el punto más alto.

En un mundo perfecto, en el que las observaciones de distancia y tiempo fueran infinitamente precisas, habríamos calculado nuestra posición exacta, pero en el mundo real cualquier observación contiene un error. En este caso, tratamos de determinar una distancia en base al tiempo que tarda una señal que viaja a una velocidad cercana a la de la luz recorriendo un trayecto relativamente corto, poco más de 20.000 km. Es otras palabras, debemos cronometrar una carrera cuya duración es inferior a una décima de segundo y asumir que, si cometiéramos un error de una milésima de segundo, la posición se desplazaría unos 300 km, una distancia que eliminaría la posibilidad de realizar cualquier cálculo medianamente preciso. Dado que hoy en día un reloj atómico supera el presupuesto de cualquier excursionista, la única alternativa realista es utilizar más satélites. De ese modo, recibiendo señales de cuatro satélites diferentes, contaremos con observaciones suficientes para resolver las cuatro incógnitas del sistema (coordenadas x , y , z y error de sincronización del receptor). Partiendo de esta base de cuatro satélites, cada satélite adicional contribuirá a incrementar la precisión del cálculo.

Volviendo al símil bidimensional, añadir el error inherente a la observación de distancia equivaldría a convertir las circunferencias en anillos con un cierto grosor como los de la siguiente imagen (figura 3), donde el área de la intersección entre anillos representaría la incertidumbre de nuestra localización.

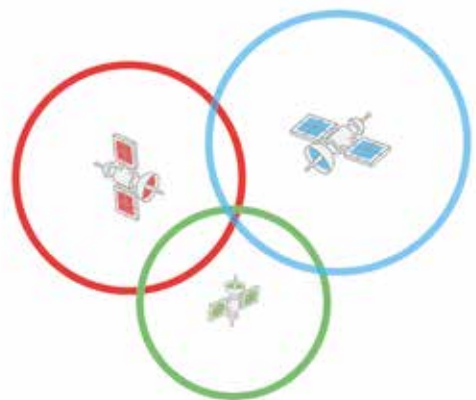


FIGURA 3 · Al introducir cierto error en el cálculo de las distancias, la intersección pasa a tener una cierta extensión · FUENTE: Sostremetries 2023

¿QUÉ PRECISIÓN SE PUEDE ALCANZAR?

Para responder esta pregunta hay que distinguir entre dos tipos de receptores muy diferentes: de ocio y profesionales. Los primeros, en condiciones óptimas de constelación de satélites, poseen una precisión máxima de entre 3 y 5 metros siempre que carezcan de obstáculos que oculten parcialmente la bóveda celeste. Los encontramos en teléfonos móviles, relojes deportivos y navegadores, y su precisión viene determinada por el tipo de señal que pueden procesar. Habitualmente están limitados a utilizar el código C/A (*coar-*

MEDIR MONTAÑAS CON PRECISIÓN CENTIMÉTRICA

La principal característica que distingue los receptores GNSS profesionales de los de ocio es el tipo de antena que incorporan. La antena profesional suele ser multifrecuencia y multiconstelación, está dotada de más sensibilidad y es capaz de filtrar mejor la señal recibida. Se distinguen a simple vista porque suelen ocupar el interior de una carcasa en forma de disco de un palmo de diámetro situada en el extremo de un jalón largo o un trípode (figuras 4 y 5). Además, los receptores profesionales son idóneos para “escuchar” la señal portadora original, una onda sinusoidal (sin modular) de frecuencia mucho mayor que el código C/A que posee una longitud de onda bastante más corta, de unos 20 cm. Esto proporciona una resolución que es tres órdenes de magnitud superior a la de los bits de 300 m del código C/A. La cosa no acaba aquí porque el receptor también posee la capacidad de calcular el número de ciclos enteros que han transcurrido desde que se envió la señal y sumar la fracción del último ciclo. De este modo, el resultado será una medición de la distancia hasta el satélite de precisión centimétrica.

se acquisition code) cuyos bits tienen una longitud de 300 metros. Esta longitud establece la precisión teórica máxima alcanzable, aproximadamente un 1% del tamaño de cada bit, es decir 3 metros. Por tanto, usar un receptor de ocio para medir la altitud de las montañas aportará una precisión del mismo orden que la conseguida por fotogrametría o menor. Sin embargo, estos receptores cumplen perfectamente su propósito de navegadores ya que su rango de precisión es más que suficiente para dar indicaciones y guiar al usuario hasta su destino. El único modo de mejorar esta precisión sería promediando numerosas lecturas, espaciadas de cuatro en cuatro horas, para que la constelación de satélites variase, y combinando un mínimo de tres receptores diferentes. Aún y con todo, los márgenes de error logrados con estos sistemas se aproximan a un metro.

En el mundo real cualquier observación contiene un error

Los receptores profesionales, por su parte, son mucho más precisos con márgenes que van desde el medio metro hasta los pocos milímetros en función del tipo concreto de receptor, el tiempo de observación, los datos utilizados y su procesamiento. A ellos nos referiremos en el siguiente apartado.



FIGURAS 4 y 5 · Receptor GPS profesional. El disco sobre el extremo superior del jalón y del trípode es la antena · FUENTE: Sostremetries 2023

Otra mejora sustancial de la precisión se consigue gracias a la técnica GNSS diferencial, consistente en utilizar dos receptores simultáneamente. Uno de ellos se coloca sobre el punto que queremos medir y el otro sobre un punto cercano de coordenadas conocidas (por ejemplo, un vértice geodésico). Si los receptores guardan poca distancia entre sí (unos kilómetros), podemos asumir que ambos estarán escuchando los mismos satélites y, por tanto, los errores de propagación de la señal a través de la ionosfera serán muy similares. Al conocer las coordenadas exactas de uno de los receptores, podremos estimar el error en un momento dado y, acto seguido, corregir las coordenadas del otro receptor.

Para entender mejor esta técnica imaginemos que tenemos dos receptores GNSS profesionales. Uno lo estacionamos sobre la roca más alta del pico Alba y lo dejamos media hora calculando coordenadas. Mientras tanto, nuestra compañera ha subido con un receptor similar al Aneto para calcular coordenadas sobre el recientemente renovado vértice geodésico. Al comparar las coordenadas que acaba de obtener con los valores publicados del vértice descubre que hay una discrepancia de 28 cm hacia el NE y de -62 cm en cota. Como sabemos que el Aneto no se ha movido de sitio y que las coordenadas del vértice son fiables, podemos asumir que en todo el macizo de la Maladeta el error será similar y explotar este conocimiento para corregir las coordenadas del Pico de Alba. Además, este error puede alertarnos de que, a esa hora y en este lugar, todas las distancias a los satélites son más cortas de lo esperado y que es necesario estirarlas para que la intersección de esferas ocurra en el punto correcto. Todo esto no es más que una abstracción del concepto de GNSS diferencial. En la práctica, las correcciones se llevan a cabo desde programas de ajuste que tienen en cuenta mucha más información, pero, en esencia, el símil tiene validez.

Algunas empresas privadas y organismos gubernamentales han ido un paso más allá desplegando una red de estaciones permanentes por todo el territorio con recep-



FIGURA 6 · GNSS diferencial. La estación permanente (izquierda) envía correcciones al usuario (derecha). Ambos deben observar un mínimo de satélites en común · FUENTE: Sostremetries 2023



FIGURA 7 · Operador comprobando a través de un nivel óptico si la arista en primer plano es la más alta de la cima · FUENTE: Sostremetries 2023

tores que recalculan constantemente coordenadas sobre puntos geodésicos muy bien determinados (figura 6). La información resultante la divulgan a través de internet para que cualquier usuario que se encuentre por la zona pueda utilizarla sin tener que preocuparse ni siquiera de saber qué estación es la más cercana. Simplemente se conecta al sistema y recibe las correcciones que su receptor debe aplicar. Estas últimas pueden aplicarse en tiempo real o a posteriori, en la oficina. La primera opción permite obtener precisiones de algunos centímetros en menos de un minuto; la segunda, lograr un resultado todavía más preciso y, sobre todo, más fiable.

A día de hoy, un GNSS profesional cuesta varios miles de euros y el procesamiento de su información requiere un mínimo de experiencia, especialmente a la hora de interpretar sus frutos porque, de lo contrario, las observaciones, a pesar de su precisión, pueden arrojar resultados erróneos. Utilizar uno de estos receptores permite calcular la altitud de la montaña con una precisión de pocos centímetros, pero el procedimiento es un trabajo demasiado caro y laborioso. El empleo de receptores profesionales para la medición de montañas es un lujo reservado a un puñado de cumbres, las más altas de cada cordillera. Pero en 2020, un grupo de ingenieros topográficos amantes de la montaña llamado Sostremetries, se propuso ascender y medir, tal y como hemos explicado, las cimas de las montañas sobre las que pesaban ciertas incertidumbres históricas. De esta manera, en el verano de 2022 descubrieron que el pico Arnales sí superaba los 3000 m (concretamente en 1 m y 37 cm) y, al año siguiente, hallaron que la cima que acompaña al pico Gías (o Chies) también debe considerarse un tresmil al contar con 3000.59 m y superar los 10 m de prominencia que suelen estipularse para obtener esta consideración.



FIGURA 9 · Mira reglada. El operador debe fijarse en que la mira coincida con la línea horizontal de la cruz filar · FUENTE: Sostremetries 2022

MEDIR DESNIVELES CON PRECISIÓN MILIMÉTRICA

Tal y como hemos señalado, la tecnología GNSS es la que ofrece mayor precisión para medir la altura de un punto determinado. Pero ¿qué sucede si la cima contiene varios puntos de similar cota? En tal caso, hallar la ubicación del punto culminante, incluso con el mejor de los receptores, no es tarea fácil, para ello será necesario utilizar un nivel óptico. Este instrumento (figura 7) permite medir rápidamente pequeños desniveles con precisión milimétrica y sin necesidad de cobertura ni señal de ningún satélite.

Este artefacto consta de una mira telescópica montada sobre una plataforma perfectamente horizontal que únicamente posee libertad para girar en torno al eje vertical. Vendría a ser como un telescopio que tan sólo permite ver las estrellas más cercanas al horizonte. Cuando el operador mira a través del visor (figura 8), observa una cruz filar, la línea horizontal que le permite diferenciar aquellos elementos que quedan por encima de su horizonte de los que quedan por debajo.

Mientras todo esto sucede, un segundo operador sostiene una mira reglada (figura 9) y visita todos aquellos puntos que le parecen visualmente candidatos a ser el culminante. Al apoyar la mira sobre los candidatos, el primer



FIGURA 8 · Visor del nivel óptico. La línea horizontal indica que el mojón de piedras está más bajo que el horizonte del observador · FUENTE: Sostremetries 2021

operador la busca con su visor telescópico y lee el valor que coincide con la línea del horizonte. Este valor le indica el desnivel que hay entre el plano horizontal del nivel y el punto del suelo donde se apoya la mira reglada. Como el nivel siempre estará más elevado que cualquiera de los puntos visitados, aquel que muestre un desnivel menor será el punto culminante de la montaña y, por tanto, el único que habrá que medir con el receptor GNSS.