

TEMAS PROFESIONALES



LA NAVEGACIÓN CON EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

SL Sistema de Posicionamiento Global (GPS), basado en la situación de puntos en o cerca de la superficie terrestre mediante la observación simultánea de satélites artificiales de la constelación NAVSTAR (*Navigation System using Time and Ranging*), se ha convertido en una de las herramientas más importantes en todos los ámbitos de la navegación terrestre, marítima y aérea. Esto es debido fundamentalmente a la fácil accesibilidad de los receptores a nivel de uso y coste, así como al gran número de satélites que forman parte de la constelación antes citada.

El GPS es un sistema que proporciona exactitudes en la posición, que van desde 100 metros a pocos milímetros, dependiendo del procedimiento de proceso y equipos utilizados. Por tanto, es importante conocer sus características principales, sus limitaciones y qué técnicas son necesarias para alcanzar las exactitudes requeridas por el usuario. Debemos resaltar que una confianza excesiva, por un lado, y una errónea explotación del sistema, por otro, están conduciendo a numerosos accidentes de navegación.

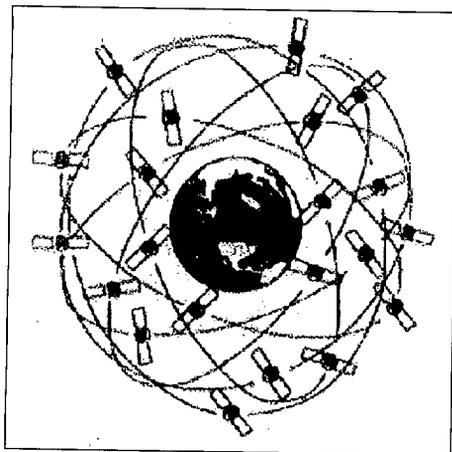


Figura 1. Constelación NAVSTAR.

Características del sistema

De una forma sencilla, podemos decir que el funcionamiento del GPS está basado en:

- Una constelación de satélites (NAVSTAR), 24 satélites más tres de reserva, que asegura la existencia de, al menos, cuatro satélites siempre a la vista.
- Un conjunto de cinco estaciones de seguimiento situadas a lo largo de la superficie terrestre encargadas de establecer las órbitas precisas de los distintos satélites.
- Una escala de tiempo bastante exacta y accesible determinada por osciladores de gran estabilidad instalados en los satélites de la constelación.
- El conocimiento con gran exactitud de la posición de los satélites, determinada desde las estaciones de seguimiento e inyectada al satélite en forma de mensaje de navegación, para ser retransmitido al usuario.
- Los osciladores mencionados anteriormente generan dos frecuencias portadoras de transmisión en la Banda D, conocidas como L1 y L2, sobre las que se modulan los códigos C/A (Clear/Acquisition) en L1, P (Precision) sobre L1 y L2 y el mensaje de navegación con efemérides del satélite que dan su posición y hora para uso por los receptores de usuario. Estos códigos son distintos e identifican a cada satélite.

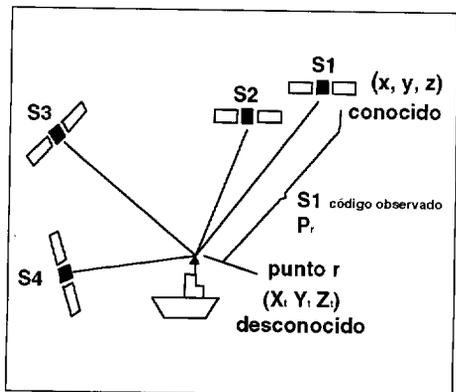


Figura 2. Determinación de la posición.

Como dato importante, cabe decir que por el momento el sistema está desarrollado y es mantenido por el Departamento de Defensa (DoD) de los Estados Unidos.

Método de resolución de la posición

Para determinar la distancia desde una estación al satélite, el receptor produce un código similar al que envía el satélite. La generación de este código réplica se va retrasando

hasta que ambos se encuentran alineados, produciendo máxima salida en el circuito de correlación. El tiempo que hay que retrasar la generación del código réplica corresponde al tiempo que emplea el código generado en el satélite en su viaje hasta el receptor. Aplicando a este retardo la velocidad de la luz, determinamos la distancia. Esta distancia no está corregida de errores tanto externos como propios del sistema, recibiendo el nombre de «pseudo distancia».

El GPS es un sistema de medida de distancias transmisor-receptor en una sola vía. El transmisor de la señal y el usuario que la recibe poseen relojes separados, siendo por tanto necesario determinar las desviaciones (*offset*) que existen entre ellos.

Parece claro que para determinar la posición de un punto en el espacio necesitamos tres coordenadas o incógnitas (latitud, longitud y altura o X, Y, Z), siendo fácil su obtención a partir de la distancia a tres satélites o tres distancias a un satélite. Estas distancias definen tres esferas cuya intersección determina la posición del punto. No obstante, existe cierta incertidumbre debido a los *offset* entre el reloj del receptor y de los satélites, que provocan la aparición de una cuarta incógnita. Ésta se resuelve, fácilmente, por la introducción de una cuarta ecuación en el cálculo de la posición. Por tanto, con la utilización de al menos cuatro distancias tendríamos resuelto, en un principio, el problema de la posición de un punto.

Errores en la explotación del sistema

Las precisiones ofrecidas por la utilización de los códigos C/A y P están afectadas por degradaciones artificiales de la posición. Éstas son debidas a la implementación al sistema por parte del DoD de:

- La «disponibilidad selectiva (SA)» en el código C/A: inyección de datos degradados relativos a los relojes y órbita de los satélites.
- El «Anti-Spoofing (A-S)»: encriptación del código P (paso a código Y), siendo posible su acceso únicamente con receptores que dispongan de descodificadores o capaces de descryptar la señal.

Ahora bien, el GPS, además de estar afectado por estos errores introducidos deliberadamente (SA y A-S), se encuentra afectado, como cualquier otro método de posicionamiento, por errores aleatorios que, en el caso del GPS, se pueden agrupar en:

- Errores propios del sistema que afectan a la medida de las distancias a los satélites (tabla 1).
- Orbitales: errores residuales en el cálculo de la posición del satélite a partir de los datos contenidos en el mensaje de navegación. Éstos se

TABLA 1.

MAGNITUD DE LOS ERRORES PROPIOS DEL SISTEMA	
ERROR	MAGNITUD
Orbital	>30 m (S/A activado) 10 m (S/A desactivado)
Reloj del satélite	10 m
Ionosférico	5 m
Troposférico	1 m
Multipaso	50 cm a 20 cm (dependiendo del equipo)
Ruido del receptor	10 cm a 3 m (dependiendo del tipo del receptor)

estiman en el orden de los 10 metros para el usuario en condiciones normales, siendo de más de 30 metros cuando se activa la SA.

- En el reloj del satélite: el *offset* es modelizable a partir de los datos del mensaje de navegación, si bien subsisten errores residuales del orden de algunos metros.
- Debidos al medio de propagación: retardos producidos al atravesar la señal las distintas capas de la atmósfera, en concreto la ionosfera y la troposfera.
- Multipaso (*multipath*): producido por interferencias en la señal debido a rebotes en las proximidades de la antena.
- Ruidos del receptor: vinculados a la resolución de los circuitos de correlación, estabilidad de su oscilador, etc. Su magnitud depende del tipo de receptor utilizado.
- Errores externos al sistema:
 - Errores aleatorios de observación: aquéllos en los que interviene la medida de parámetros externos, como, por ejemplo, traslado de la posición de la antena al punto de referencia del buque, medida de la altura física de ésta o medida de condiciones atmosféricas, entre otros.
 - Utilización del *datum* geodésico: debido a que, por lo general, el *datum* representado en las cartas náuticas es distinto al *datum* propio del sistema, Sistema Geodésico Mundial WGS84 (World Geodetic System 84).
 - Calidad y escala de los mapas o cartas.

Técnicas de posicionamiento

Las exactitudes obtenidas en la resolución de la posición con el sistema GPS vienen determinadas por las técnicas de medición utilizadas. Entre las posibles técnicas, las que más interesan al navegante son las siguientes:

- Posicionamiento Absoluto: éste es el uso más frecuente en la actualidad y depende de que la observación se realice sobre código C/A o P. Se pueden alcanzar, en condiciones favorables de geometría de satélites, exactitudes con el código C/A del orden de 100 metros y con el código P de 21 metros, en posición horizontal al 95 por 100 de probabilidad. Estos errores pueden ser menores haciendo observaciones largas de forma estática en un punto, pudiendo alcanzar los pocos metros.
- Posicionamiento Diferencial (DGPS) de ámbito local: un receptor móvil conectado vía radio a un receptor base. El receptor base, situado en un punto de coordenadas conocidas, transmite correcciones a las distancias medidas a los satélites, alcanzándose exactitudes de uno a cinco metros. Éstas dependen fundamentalmente de las distancias entre receptores, así como de los problemas de enlace vía radio. Los buques hidrográficos y la Fuerza MCM utilizan esta técnica desde 1990, colocando estaciones de referencia portátiles. En la actualidad, el ente público Puertos del Estado está desplegando una red de estaciones diferenciales fijas, con el fin de transmitir correcciones desde los radiofaros marítimos.
- Posicionamiento Diferencial de gran cobertura (WADGPS, *wide area DGPS*), consistente fundamentalmente en lo mismo que el anterior caso, pero las correcciones son transmitidas vía satélite de comunicaciones por operadores comerciales desde varias estaciones de referencia situadas a lo largo de la superficie terrestre. El sistema «sintetiza» un juego de correcciones diferenciales optimizadas para la zona donde se encuentra el usuario, alcanzándose exactitudes del orden de un metro.
- Posicionamiento Cinemático en Tiempo Real: consiste en la transmisión de correcciones diferenciales calculadas con observaciones de fase de la portadora, cuyas mediciones ofrecen mayor resolución (uso topográfico y trabajos de ingeniería marítima o civil). Se alcanzan exactitudes de pocos centímetros.

Existen otras técnicas de utilización del Sistema GPS, capaces de alcanzar exactitudes cercanas al milímetro, de uso en trabajos geodésicos de alta precisión, como son el establecimiento de redes geodésicas o el control de deformaciones de la corteza terrestre, entre otros.

El problema de la posición

Hemos hablado en el apartado anterior de las exactitudes teóricas que se pueden obtener dependiendo de la técnica de medición utilizada. Ahora bien, existe un exceso de confianza en el navegante debido, en la mayoría de los casos, al desconocimiento de uno de los principales problemas que surgen a la hora de utilizar el GPS como sistema de posicionamiento. Este problema es el de los errores producidos por la escala y el *datum*, representado en el mapa o carta utilizados.

Con anterioridad se reseñó que el *datum* utilizado por el GPS está representado por el WGS84. Éste es un sistema de referencia global cuyo elipsoide tiene origen en el centro de masas de la Tierra y está adaptado de forma global a la superficie media de la Tierra. El sistema WGS84 está materializado por un conjunto de puntos de control establecidos a lo largo de toda la superficie terrestre. Resulta necesario tener en cuenta que el WGS84 no coincide con la mayoría de sistemas de referencia utilizados para representar la cartografía terrestre, náutica o aérea de cada país. Ésta utiliza sistemas de referencia locales que mejor se adapten a su zona de influencia (es decir, distintos elipsoides y distintos orígenes).

Es necesario establecer las directrices para obtener la posición correcta de un punto a partir de la lectura de sus coordenadas en un receptor GPS. En la cartografía terrestre y náutica española, la red oficial en la que están representadas, generalmente, todas las posiciones es el sistema de referencia geodésico ED50 (elipsoide internacional y *datum postdam*) que difiere en el orden de unos 300 metros respecto al sistema WGS84. Por tanto se deben transformar las coordenadas obtenidas por los receptores GPS a dicho sistema de referencia.

Entre las opciones que existen para efectuar la transformación de coordenadas, podemos destacar que:

- Algunos receptores incluyen parámetros de transformación para presentar las coordenadas en distintos sistemas de referencia. Este procedimiento lleva consigo el problema de la fiabilidad en dichas transformaciones, ya que los parámetros son de carácter general y suelen estar determinados con escasa precisión, obteniendo errores mayores de 20 metros.
- La cartografía náutica española incluye en sus cartas, de media y gran escala, correcciones a efectuar a la latitud y a la longitud para situar aproximadamente la posición dada por el receptor. Esto lo podemos observar en la tarjeta de la carta náutica (figura 3). Al aplicar las correcciones, los errores en la transformación pueden ser del orden de 10 metros.
- Algunos receptores o sistemas de navegación externos a éstos incluyen la posibilidad de introducir datos de elipsoides y parámetros de trans-



OCEANO ATLANTICO NORTE
COSTA SUDOESTE DE ESPAÑA
APROCHES DEL PUERTO DE CADIZ
ZONA NORTE

CADIZ 1973

Escala 1: 25 000 (36° 35' 15")

SONDAS Y ALTITUDES EN METROS

referidas las primeras a la mayor bajamar y las segundas al nivel medio del mar

Equidistancia entre curvas de nivel, 10 metros

DATUM EUROPEO (POTSDAM)

PROYECCION DE MERCATOR

Producida por el Instituto Hidrográfico de la Marina, España

Ver diagrama de Documentos Originales

Para simbolos y abreviaturas, ver Publicación Especial No. 14 (INT 1)

SITUACIONES OBTENIDAS POR SATELITE: Las situaciones obtenidas mediante sistemas de navegación por satélite referidas al Sistema Geodésico Mundial (WGS - 84), deberán ser desplazadas 0,08 minutos al Norte y 0,07 minutos al Este para estar correctamente representadas en esta carta.

LUCES Y NAUFRAGIOS: Sólo se han representado las luces y naufragios más importantes.

Figura 3. Tarjeta de una carta náutica.

formación locales para una mayor exactitud en la transformación. Los errores resultantes del uso de esta opción dependen de la calidad de los parámetros y las fórmulas utilizadas, siendo, generalmente, inferiores a los tres metros.

El Instituto Hidrográfico de la Marina efectúa comisiones geodésicas, en distintas zonas de la costa española, para obtener parámetros locales de transformación entre los sistemas de referencia WGS84 y ED50. Estos parámetros se traducen o bien en las correcciones que aparecen en las tarjetas de las cartas náuticas (opción 2) o bien en parámetros para introducir en fórmulas de transformación puntual (opción 3).

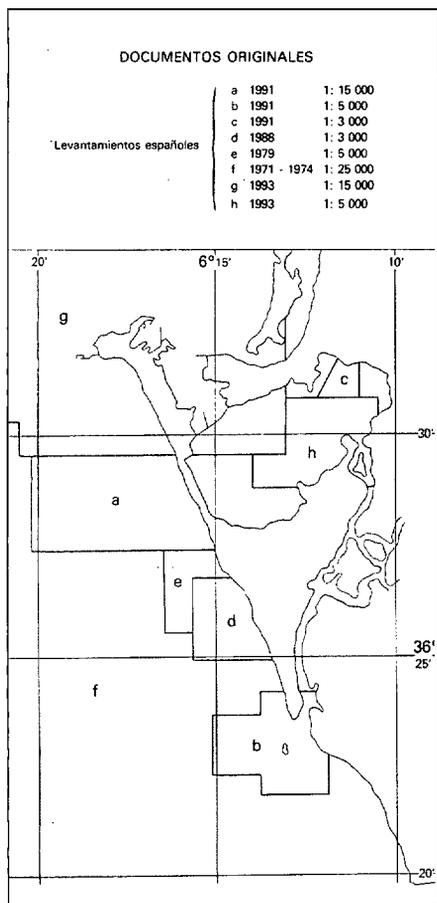


Diagrama de documentos originales.

tud), aun cuando sus posiciones relativas sean correctas. En general, pueden esperarse errores del orden de 100 metros para los levantamientos efectuados el siglo pasado, 50 metros para los efectuados hasta los años 70, y 25 metros, aproximadamente, hasta la utilización del GPS diferencial, en los años 90.

Conclusiones

En resumen, podemos establecer que el GPS utilizado correctamente, y teniendo siempre presente la técnica que estamos utilizando, representa un sistema de gran ayuda a la navegación, debido, como hemos comentado al comienzo de este artículo, a la fácil accesibilidad del sistema.

Ahora bien, a pesar de tener parámetros locales para la transformación de *datum*, se ha de tener en cuenta que al situarnos en la carta también influyen otros factores, como son:

- La escala de la carta. En cartas de pequeña escala (1:100.000 o inferior) no tiene sentido hablar de transformación de *datum*, ya que el margen de incertidumbre al situar un punto es de un orden próximo a las diferencias de *datum*. Por otro lado, en portulanos y aproches, ésta transformación es necesaria, ya que, en estos casos, se pueden identificar en la carta distancias de pocos metros.
- La calidad de las cartas. Los levantamientos hidrográficos se han efectuado hasta hace relativamente pocos años con sistemas de posicionamiento menos precisos que el GPS. Las posiciones se han obtenido, tradicionalmente, con relación a puntos fijos de la costa. Por tanto, puede darse el caso de que determinados accidentes geográficos se encuentren mal representados en un marco de referencia absoluto (latitud, longituditud), aun cuando sus posiciones relativas sean correctas.

Las precisiones obtenidas con el GPS dependen no sólo de la técnica utilizada, sino también, en gran medida, de las características del receptor utilizado. En general, resultan espectaculares si se comparan con las posiciones accesibles hace sólo unas décadas.

Sin embargo, debe tenerse presente que las precisiones que se proclaman siempre se refieren al propio sistema de referencia WGS 84. Esto conduce a un exceso de confianza en el navegante, que tiende inconscientemente a reducir los márgenes de seguridad, convencido de que el escaso error en su posición se lo permite. Ello ha provocado la acuñación en lengua inglesa de un nuevo término, que define bien a las claras la situación: «GPS *aided grounding*», o «varada asistida por GPS».

Todo navegante consciente debe, por tanto, tener siempre en cuenta para contrastar su posición contra los accidentes representados en la carta náutica que:

- Ha de transformar sus coordenadas al sistema de referencia de la carta.
- Ha de evaluar el margen de incertidumbre que tiene la representación de su posición en la carta actual, teniendo en cuenta su escala.
- Ha de evaluar el margen de incertidumbre que tiene la representación de los accidentes en la carta, teniendo en cuenta el año en que se hicieron los levantamientos hidrográficos. Este dato figura en la tarjeta de la carta náutica o en el diagrama de los levantamientos, como se aprecia en la figura 3.

Solo así podrán establecerse con seguridad los límites de las zonas a evitar en la planificación de las derrotas.

Como comentario final, podemos hacer una reflexión acerca de la dependencia del sistema del DoD, ya que nos podríamos plantear la duda de que en un momento determinado el sistema fuera ensombrecido. Esto parece poco probable, pues su uso está demasiado generalizado y afectaría virtualmente a todos los medios de transporte, con unas consecuencias económicas incalculables. Por otro lado, en estos momentos existe otro sistema, desarrollado en Rusia, con una filosofía similar a la del GPS. Este sistema es el «Glonass». Se pueden encontrar en el mercado receptores capaces de tener acceso a ambos sistemas.

Manuel PARDO DE DONLEBÚN MONTESINO



Alberto FERNÁNDEZ ROS

