

**SISTEMA DE**  
**POSICIONAMIENTO**  
**GLOBAL**  
**(GPS)**

**Tamara Giménez Rodríguez**  
**María Elena Ros Bernabeu**  
**Gravitación y Astrofísica**  
**Curso 2009-2010**

# ÍNDICE

Pág.

1. Introducción.....	2
2. Historia.....	3
3. Características técnicas.....	4
• Segmento espacial	
• Segmento control	
• Segmento de usuario	
4. Evolución.....	7
5. Funcionamiento.....	8
6. Relación con Física.....	8
• Principio de triangulación	
• Medición precisa del tiempo	
• Efectos relativistas	
7. Fuentes de error.....	12
8. GPS diferencial.....	13
9. Vocabulario.....	15
10. Aplicaciones.....	15
11. Conclusiones.....	15

## 1. Introducción

El Sistema de Posicionamiento Global o GPS, aunque su nombre correcto es NAVSTAR-GPS1, es un sistema global de navegación por satélite que permite determinar en todo el mundo la posición de un objeto, una persona, un vehículo o una nave. Podemos alcanzar una precisión hasta de centímetros, usando el GPS diferencial, pero lo habitual son unos pocos metros.

Aunque su invención se atribuye a los gobiernos de Francia y Bélgica, el sistema fue desarrollado e instalado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, del que actualmente se encarga.

El GPS funciona mediante una red de 27 satélites (24 operativos y 3 de respaldo) en órbita a 20.200 km sobre el globo terráqueo, con trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie de la Tierra. Cuando se desea determinar una posición, el receptor que se utiliza para ello localiza automáticamente como mínimo tres satélites de la red, de los que recibe unas señales indicando la posición y el reloj de cada uno de ellos. Con base en estas señales, el aparato sincroniza el reloj del Sistema de Posicionamiento y calcula el retraso de las señales; es decir, la distancia al satélite. Por "triangulación" los tres satélites calculan la posición en que el GPS se encuentra. La triangulación en el caso del Sistema de Posicionamiento Global se basa en determinar la distancia de cada satélite respecto al punto de medición. Conocidas las distancias, se determina fácilmente la propia posición relativa respecto a los tres satélites. Conociendo además las coordenadas o posición de cada uno de ellos por la señal que emiten, se obtiene la posición absoluta o coordenadas reales del punto de medición. También se consigue una exactitud extrema en el reloj del GPS, similar a la de los relojes atómicos que llevan a bordo cada uno de los satélites. (Estos datos serán especificados más adelante).

La antigua Unión Soviética tenía un sistema similar llamado GLONASS, ahora gestionado por la Federación Rusa.

Actualmente la Unión Europea está desarrollando su propio sistema de posicionamiento por satélite, denominado Galileo.

## 2. Historia

Todo empieza cuando en 1957 la Unión Soviética lanzó al espacio el satélite Sputnik I, que era monitorizado gracias al Efecto Doppler de la señal que transmitía. Debido a este hecho, se comenzó a pensar que, de igual modo, la posición de un observador podría ser establecida mediante el estudio de la frecuencia Doppler de una señal transmitida por un satélite cuya órbita estuviera determinada con precisión.

La armada estadounidense rápidamente aplicó esta tecnología, para proveer a los sistemas de navegación de sus flotas, posiciones actualizadas y precisas. Así surgió el sistema TRANSIT, que quedó operativo en 1964, lo que podríamos considerar los inicios del GPS, y hacia 1967 estuvo disponible, además, para uso comercial.

Las actualizaciones de posición, en ese entonces, se encontraban disponibles cada 40 minutos y el observador debía permanecer casi estático para poder obtener información adecuada.

Posteriormente, en esa misma década y gracias al desarrollo de los relojes atómicos, se diseñó una constelación de satélites, portando cada uno de ellos un reloj, estando todos sincronizados con base a una referencia de tiempo determinada.

En 1973 se combinaron los programas de la Armada y el de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, este último consistente en una técnica de transmisión codificada que provee datos precisos usando una señal modulada con un código de ruido pseudo-aleatorio (PRN), en lo que se conoció como Navigation Technology Program, posteriormente renombrado como NAVSTAR GPS.

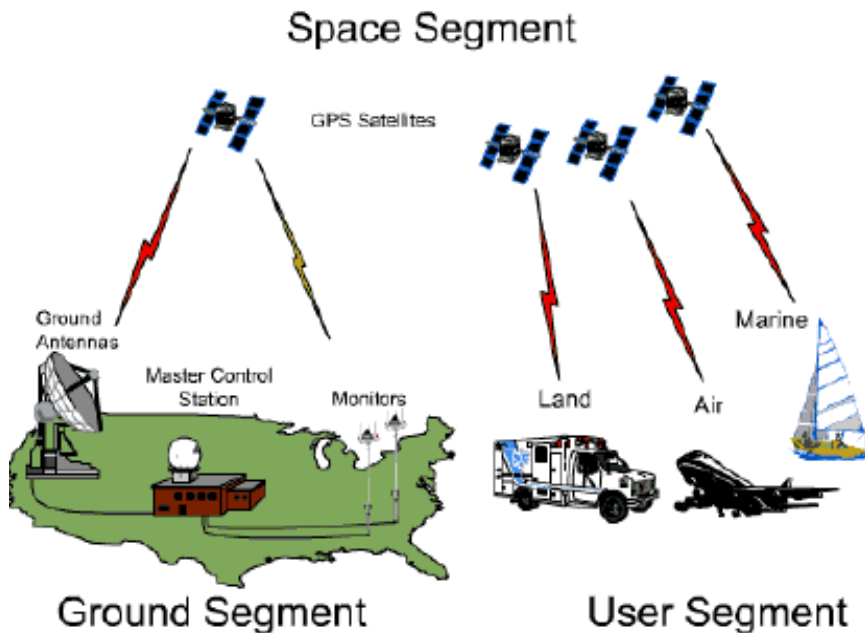
Entre 1978 y 1985 se desarrollaron y lanzaron once satélites prototipo experimentales (Block I,Block II,Block IIA,Block IIR y Block IIF)\*<sup>anexo1</sup>, llevan incorporados un reloj atómico( $\pm 1s$  en un millón de años) después siguieron otras generaciones de satélites con relojes maser pasivos de hidrógeno ( $\pm 1s$  en 2.7 millones de años), hasta completar la constelación actual, a la que se declaró con «capacidad operacional inicial» en diciembre de 1993 y con «capacidad operacional total» en abril de 1995.

En 1994, EEUU ofreció el servicio normalizado de determinación de la posición para apoyar las necesidades de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), y ésta aceptó el ofrecimiento.



Fig.1: Reloj atómico

### 3. Características técnicas



El Sistema Global de Navegación por Satélite lo componen:

#### 1. Segmento espacial

En el segmento espacial nos encontramos 24 satélites con trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie del globo terráqueo. Más concretamente, repartidos en 6 planos orbitales de 4 satélites cada uno. La energía eléctrica que requieren para su funcionamiento la adquieren a partir de dos paneles compuestos de celdas solares adosados a sus costados. A continuación mostramos esquemáticamente la altitud a la que se encuentran, el periodo de tiempo de los satélites en orbitar, la vida útil de un satélite, y la inclinación de estos respecto al ecuador terrestre.

- a) Altitud: 20.200 km
- b) Período: 11 h 56 min (12 horas sidéreas)
- c) Inclinación: 55 grados (respecto al ecuador terrestre).
- d) Vida útil: 7,5 años
- e) Utilizan paneles solares y baterías de Ni-cad

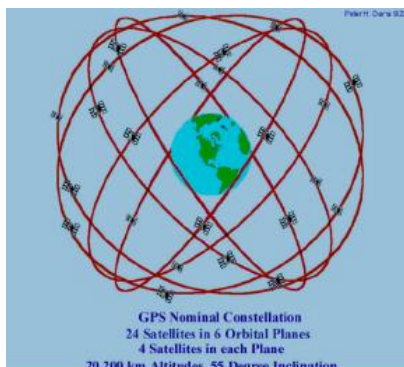


Fig.2: Satélites en orbita

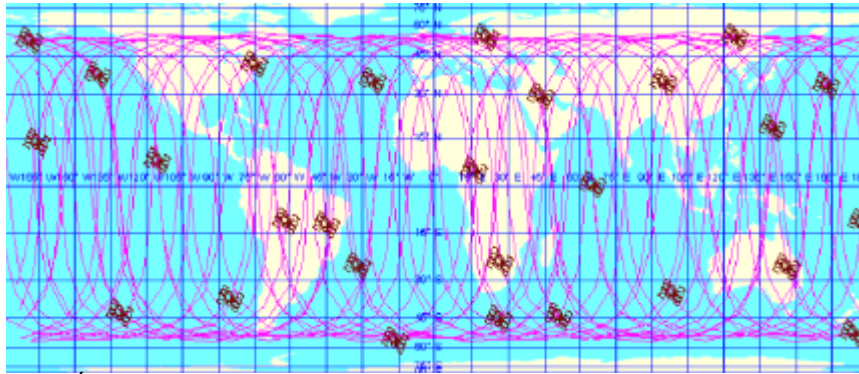


Fig.3: Órbitas que describen los satélites

## 2. Segmento de control

El sistema global de navegación por satélite compuesto por el segmento de control se refiere a una serie de estaciones terrestres. Éstas envían información de control a los satélites para controlar las órbitas y realizar el mantenimiento de toda la constelación. Se podría decir que son estaciones de rastreo automáticas distribuidas globalmente y que monitorean las órbitas junto con las señales de cada satélite enviando correcciones. Activan y desactivan los satélites según las necesidades de mantenimiento. Hay una estación principal, 4 antenas de tierra y 5 estaciones monitoras de seguimiento.



Fig.4: Mapa de estaciones terrestres



Fig.5: Estación terrestre de hawa .



Fig.6: Base Aérea de Schriever.

### 3. Segmento del usuario

En este apartado nos referimos al instrumento en sí. Los Sistemas de Posicionamiento indican la posición en la que se encuentran. Conocidas también como Unidades GPS, son las que podemos adquirir en las tiendas especializadas.

El GPS es el conjunto de elementos (Software y Hardware) que permiten determinar la posición, velocidad y tiempo de un usuario, además de los parámetros necesarios adicionales que requiera.

A continuación enumeraremos las partes de las que consta un GPS:

1. Antena con preamplificador
2. Sección de radio frecuencia o canal
3. Micro procesador para reducción, almacenamiento y procesamiento de datos
4. Oscilador de precisión para la generación de los códigos pseudo aleatorios utilizados en la medición del tiempo de viaje de la señal
5. Fuente de energía eléctrica
6. Interfases del usuario (pantalla, teclado de comandos).
7. Memoria de almacenamiento

Llegado a este punto, es necesario plantearnos una pregunta, ¿Qué hace un GPS?

1. Identificación y seguimiento de los códigos asociados a cada satélite.
2. Determinación de la distancia.
3. Decodificación de las señales de datos de navegación para obtener las efemérides, el almanaque..
4. Aplicar las correcciones (del reloj, ionosféricas,...).
5. Determinación de la posición y velocidad.
6. Validación de los resultados obtenidos y almacenamiento en memoria.
7. Presentación de la información.

\*Anexo II: ejemplos de GPS.

#### 4. Evolución del sistema GPS

El GPS está evolucionando hacia un sistema más sólido, el GPS III, con una mayor disponibilidad y que reduzca la complejidad de las aumentaciones GPS. Algunas de las mejoras previstas comprenden:

1. Incorporación de una nueva señal en L2 para uso civil.
2. Adición de una tercera señal civil (L5): 1176,45 MHz
3. Protección y disponibilidad de una de las dos nuevas señales para servicios de Seguridad Para la Vida (SOL).
4. Mejora en la estructura de señales.
5. Incremento en la potencia de señal (L5 tendrá un nivel de potencia de -154 dB).
6. Mejora en la precisión (1 – 5 m).
7. Aumento en el número de estaciones monitorizadas: 12 (el doble)
8. Permitir mejor interoperabilidad con la frecuencia L1 de Galileo

El programa GPS III persigue el objetivo de garantizar que el GPS satisfaga requisitos militares y civiles previstos para los próximos 30 años. Este programa se está desarrollando para utilizar un enfoque en 3 etapas, una de las etapas de transición es el GPS II. El programa es muy flexible, permite cambios futuros y reduce riesgos.

El desarrollo de satélites GPS II comenzó en 2005, y el primero de ellos estará disponible para su lanzamiento en 2012, con el objetivo de lograr la transición completa de GPS III en 2017. Los desafíos son los siguientes:

1. Representar los requisitos de usuarios, tanto civiles como militares, en cuanto a GPS.
2. Limitar los requisitos GPS III dentro de los objetivos operacionales.
3. Proporcionar flexibilidad que permita cambios futuros para satisfacer requisitos de los usuarios hasta 2030.
4. Proporcionar solidez para la creciente dependencia en la determinación de posición y de hora precisa como servicio internacional.



Fig.7: Antiguo



Fig.8: Nuevo



## 5. Funcionamiento

En la introducción hemos hecho un breve resumen de lo que es el funcionamiento del GPS para tener así una idea global, ahora vamos a explicarlo más detalladamente teniendo en cuenta la parte física que nos concierne.

Lo primero que tenemos que saber es que para su buen funcionamiento se necesita tener en cuenta la diferencia de frecuencias a las cuales son emitidas y recibidas las señales en dos localizaciones con distinto potencial gravitatorio.

Este se basa en considerar el sistema de referencia espacio-tiempo de la Tierra, es decir, un marco solidario con el observador estacionario en Tierra. Lo que ocurre es que el satélite GPS manda una señal codificada con su tiempo de emisión y localización y el observador la recibirá un intervalo de tiempo después. Con esta base nos adentramos ahora en la “relación con la física”.

## 6. Relación física

### 1. Principio de triangulación

El Principio de Triangulación es el usado por el GPS para calcular una posición. Éste consiste simplemente en el conocimiento de la posición del instrumento respecto a cuatro satélites diferentes, lo explicamos a continuación detenidamente.

El receptor calcula el tiempo que le ha tardado en llegar la señal emitida por el satélite, y conociendo la velocidad de propagación de la señal, éste determina una esfera dentro de la cual está su posición necesariamente. Como todos sabemos para ello simplemente hace uso de la fórmula que nos dice que la distancia es igual a la velocidad por el tiempo empleado. Si calcula la ecuación de una esfera alrededor de cada satélite, la intersección de todas ellas determina la posición real del receptor. Es por ello que cuantos más satélites haya obtendrá una mayor precisión. Se llama Trilateración Satelital.

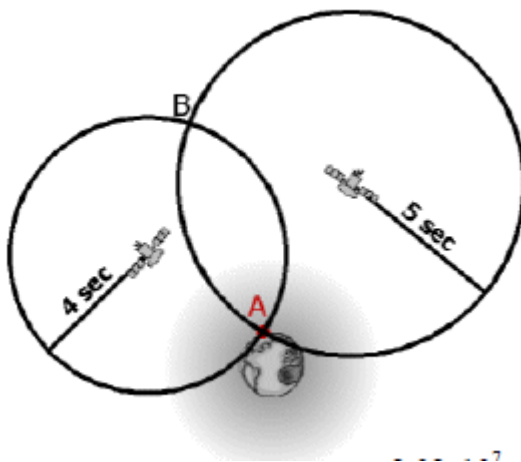
### 2. Medición precisa del tiempo

La medición del tiempo de viaje es una actividad difícil de realizar. Debido a la gran velocidad de las señales de radio y a las distancias, relativamente cortas, a la cual se encuentran los satélites de la Tierra, los tiempos de viaje son extremadamente cortos.

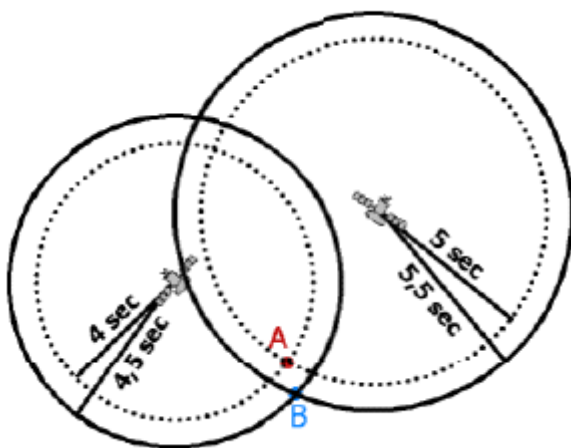
El tiempo promedio que una señal tarda en viajar de un satélite orbitando a 20.200 km de la Tierra es de 0.067 segundos. Esto hace necesaria la utilización de relojes muy precisos.

Los satélites portan relojes atómicos con precisiones de un nanosegundo, pero colocar este tipo de relojes en los receptores sería muy costoso. Para solucionar este problema los receptores corrigen los errores en la medición del tiempo mediante una medición a un cuarto satélite.

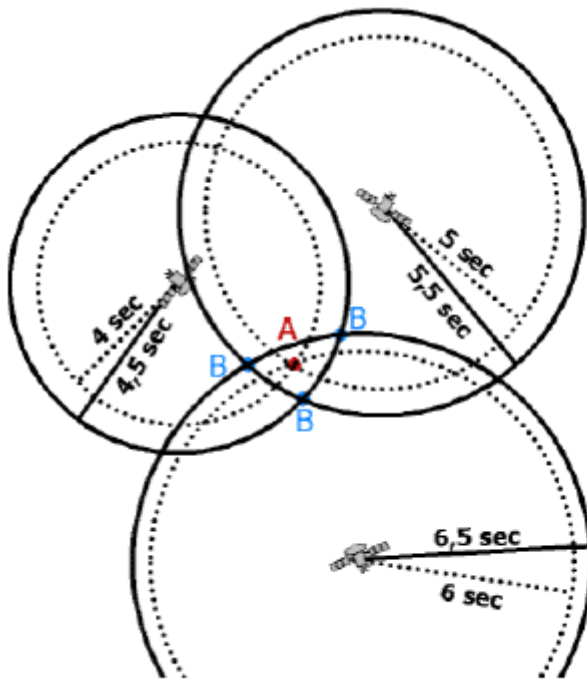
Podemos verlo más claramente con las imágenes:



El punto B se desecha debido a que punto buscado debe estar cerca de la superficie.



Debemos incluir el error sistemático que existe en el reloj del receptor.



Para que el reloj del receptor se sincronice con el reloj atómico de los satélites se varía el tiempo medido por el primero hasta que las tres circunferencias se corten en un punto.

### 3. Efectos relativistas

Quien conozca algo de la Teoría de Relatividad sabe que el tiempo va más despacio durante movimientos más rápidos. Esto va a afectar a los satélites en órbita, ya que su velocidad alrededor de la Tierra es de  $v = 3874 \text{ m/s}$ , por tanto los relojes que llevan se atrasan respecto a los que están en la superficie del planeta. La dilatación del tiempo relativista provoca una inexactitud en el tiempo de aproximadamente 7'2 microsegundos al día.

También conocemos que el tiempo corre más despacio cuanto mayor es el campo gravitatorio, por tanto para un observador en la Tierra el reloj del satélite irá más deprisa que el suyo, ya que estos se encuentran a una altitud de 20.000 km y el potencial gravitatorio es entonces más débil. Tener en cuenta que este efecto es seis veces mayor que el anterior descrito.

Con los dos efectos obtenemos que los relojes de los satélites parecen ir algo más deprisa y es necesario corregirlo. Para ello se colocan los relojes de los satélites a una frecuencia de 10.229999995453 Mhz y se operan con 10.23 Mhz . Con este truco logramos compensar errores provocados en el cálculo de la distancia de 10 km por día y tiempos de 38 milisegundos.

Otro efecto relativista es el llamado Efecto Sagnac, causado por el movimiento del observador en la superficie de la Tierra, que también se mueve a una velocidad de 500 m/s (en el Ecuador) debido a la rotación del planeta. Su influencia en el funcionamiento del GPS es muy pequeña y complicada de calcular, por tanto solo es considerada en ocasiones especiales.

Si no se tuvieran en cuenta los efectos gravitacionales y los efectos relativistas de la dilatación del tiempo, el sistema fallaría tras sólo una fracción de hora.

Una vez explicados los efectos relativistas cualitativamente, podemos ver las ecuaciones que se manejan. Es el Principio de Equivalencia el que establece la relación entre las señales emitidas en un punto A (en nuestro caso el satélite) y recibidas en un punto B (que será la Tierra).

$$(rate\ signals\ received\ at\ B) = \left(1 + \frac{\phi_A - \phi_B}{c^2}\right) \cdot (rate\ signals\ emitted\ at\ A)$$

Cuando el que recibe la señal está en un potencial gravitatorio mayor que el emisor, las señales serán recibidas más lentamente que cuando fueron emitidas ( y viceversa).

Para estimar la magnitud de las correcciones, suponemos por simplicidad que el satélite GPS está en órbita de 12h ecuatorialmente, de radio  $R_s$  desde el centro de la Tierra. Si  $V_s$  es la velocidad del satélite, tenemos

$$\frac{v_s^2}{R_s} = \frac{G \cdot M_T}{R_s^2}$$

Y sustituyendo datos

$$R_s = 27.7 \cdot 10^3 km \cong 4.2 R_T$$

$$v_s = 3.9 \frac{km}{s} \rightarrow \frac{v_s}{c} = 1.3 \cdot 10^{-5}$$

Con esto hemos calculado los parámetros de la órbita y ya podemos calcular las correcciones necesarias,

$$(fractional\ correction\ in\ rate\ for\ time\ dilation) \cong \frac{1}{2} \left(\frac{v_s}{c}\right)^2 \cong 0.84 \cdot 10^{-10}$$

$$(fractional\ correction\ in\ rate\ for\ grav.\ potential) \cong \frac{G \cdot M_T}{R_s^2 \cdot c} \cong 1.6 \cdot 10^{-10}$$

## 8. Fuentes de error

Un receptor GPS requiere el instante actual, posición del satélite y retraso respecto la emisión de la señal para el cálculo de su posición. Para que sea preciso hay que tener en cuenta las diferentes fuentes de error que pueden afectar a la señal en su recorrido del satélite al receptor. Algunas de ellas son:

1. Errores debidos a la atmósfera
2. Errores en el reloj GPS
3. Interferencias por la reflexión de las señales (multipath effect)
4. Errores de orbitales, donde los datos de la órbita del satélite no son completamente precisos.
5. Geometría de los satélites visibles

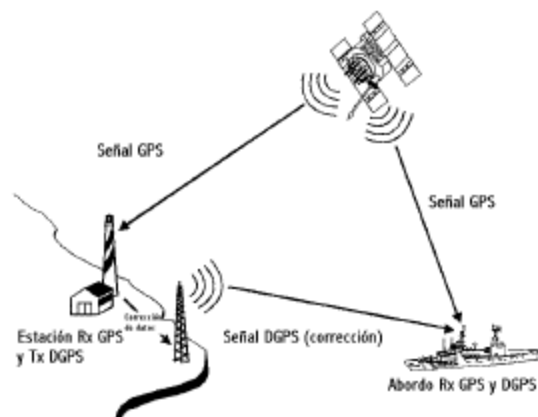
En la siguiente tabla podemos ver ejemplos numéricos de los errores:

<b>FUENTE</b>	<b>ERROR</b>
Ionosfera	$\pm 5$ m
Efemérides	$\pm 2,5$ m
Reloj satelital	$\pm 2$ m
Distorsión multibandas	$\pm 1$ m
Troposfera	$\pm 0,5$ m
Errores numéricos	$\pm 1$ m o menos

## 8. GPS diferencial

El DGPS o GPS diferencial, es un sistema que proporciona a los receptores de GPS correcciones de los datos recibidos de los satélites GPS, con el fin de proporcionar una mayor precisión en la posición calculada. Se concibió fundamentalmente debido a la introducción de la disponibilidad selectiva.

El fundamento radica en el hecho de que los errores producidos por el sistema GPS afectan por igual (o de forma muy similar) a los receptores situados próximos entre sí. Los errores están fuertemente correlacionados en los receptores próximos. Un receptor GPS fijo en tierra (referencia) que conoce exactamente su posición basándose en otras técnicas, recibe la posición dada por el sistema GPS, y puede calcular los errores producidos por el sistema GPS, comparándola con la suya, conocida de antemano. Este receptor transmite la corrección de errores a los receptores próximos a él, y así estos pueden, a su vez, corregir también los errores producidos por el sistema dentro del área de cobertura de transmisión de señales del equipo GPS de referencia.



La estructura DGPS quedaría de la siguiente manera:

1. Estación monitorizada (referencia), que conoce su posición con una precisión muy alta. Esta estación está compuesta por:
  - a) Un receptor GPS.
  - b) Un microprocesador, para calcular los errores del sistema GPS y para generar la estructura del mensaje que se envía a los receptores.
  - c) Transmisor, para establecer un enlace de datos unidireccional hacia los receptores de los usuarios finales.
2. Equipo de usuario, compuesto por un receptor DGPS (GPS + receptor del enlace de datos desde la estación monitorizada).

Existen varias formas de obtener las correcciones DGPS. Las más usadas son:

- Recibidas por radio, a través de algún canal preparado para ello, como el RDS en una emisora de FM.
- Descargadas de Internet, o con una conexión inalámbrica.
- Proporcionadas por algún sistema de satélites diseñado para tal efecto.

En Estados Unidos existe el WAAS, en Europa el EGNOS y en Japón el MSAS, todos compatibles entre sí.

En los mensajes que se envían a los receptores próximos se pueden incluir dos tipos de correcciones:

1. Una corrección directamente aplicada a la posición. Esto tiene el inconveniente de que tanto el usuario como la estación monitorea deberán emplear los mismos satélites, pues las correcciones se basan en esos mismos satélites.
2. Una corrección aplicada a las pseudodistancias de cada uno de los satélites visibles. En este caso el usuario podrá hacer la corrección con los 4 satélites de mejor relación señal-ruido (S/N). Esta corrección es más flexible.

Con el DGPS se pueden corregir en parte los errores debidos a:

- a) Disponibilidad selectiva (eliminada a partir del año 2000).
- b) Propagación por la ionosfera - troposfera.
- c) Errores en la posición del satélite (efemérides).
- d) Errores producidos por problemas en el reloj del satélite.



Fig.9: Receptor GPS Navcom SF-2040G StarFire montado sobre un mástil.

## *Errores GPS vs. DGPS*

Precisión por Satélite	GPS (metros)	DGPS (metros)
Relojes de los satélites	1.5	0
Errores de órbita	2.5	0
Ionosfera	5.0	0.4
Troposfera	0.5	0.2
Ruido en el Rx	0.3	0.3
Multitrayectoria (Reflexión)	0.6	0.6
SA	30.0	0
Precisión Típica		
Horizontal	50	1.3*
Vertical	78	2.0
3-D	93	2.8

## 9. Vocabulario básico en GPS

BRG (Bearing): el rumbo entre dos puntos de pasos intermedios (waypoints)

CMG (Course Made Good): rumbo entre el punto de partida y la posición actual

EPE (Estimated Position Error): margen de error estimado por el receptor

ETE (Estimated Time Enroute): tiempo estimado entre dos waypoints

DOP (Dilution Of Precision): medida de la precisión de las coordenadas obtenidas por GPS, según la distribución de los satélites, disponibilidad de ellos...

ETA (Estimated Time to Arrival): tiempo estimado de llegada al destino

## 10. Aplicaciones

Por último hablaremos de las aplicaciones del GPS. Divididas en tres grupos tenemos

- Transporte, donde están incluidas el marítimo, la aviación, autopistas y el ferrocarril. Este es el más conocido por todos, sobretodo por la incorporación más reciente del GPS en los automóviles y teléfonos.
- Medio ambiente, que engloba tanto aplicaciones en la meteorología como en la minería o construcción.
- Otros, dentro de este último grupo hemos querido mencionar algunas aplicaciones como son telecomunicaciones, Fuerzas de Seguridad o arte.



Fig.10: Aplicación en arte. Ruta sobre la superficie terrestre con forma de letras.

## 11. Conclusiones

La tecnología del sistema de posicionamiento global está permitiendo grandes cambios en la sociedad. Las aplicaciones que usan GPS crecen constantemente y cada vez están siendo más indispensables en nuestra vida cotidiana. Hasta algo tan abstracto como la Teoría de la Relatividad General ha posibilitado la puesta a punto de este moderno sistema de posicionamiento.



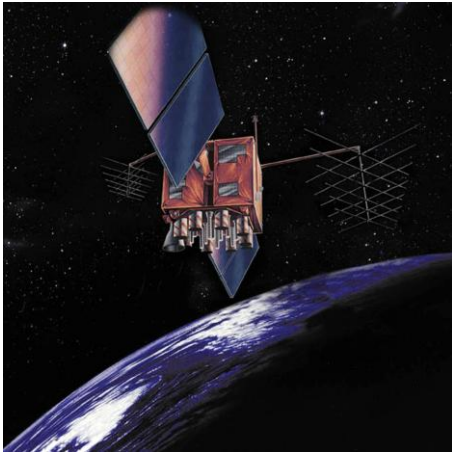
## ANEXO I (tipos de satélites)



Block I



Block II



Block IIA



Block IIR



Block IIF

## ANEXO II (Ejemplos de GPS)

