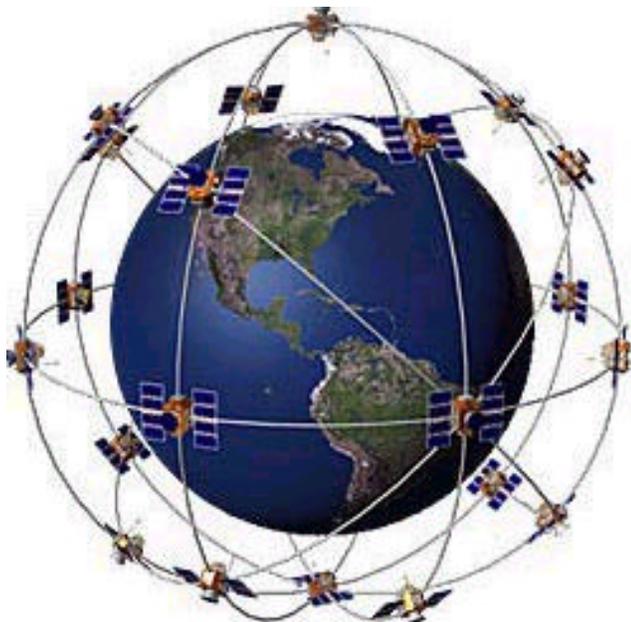




***COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS TECNICOS EN TOPOGRAFIA
DELEGACION TERRITORIAL DE MADRID-CASTILLA-LA MANCHA***

***FUNDAMENTOS DEL SISTEMA GPS
Y APLICACIONES EN LA TOPOGRAFIA***



***Javier Peñafiel
Jorge Zayas
Septiembre de 2001***

TEMA I. FUNDAMENTOS SOBRE EL SISTEMA.

1.1 EVOLUCION Y GENERALIDADES SOBRE LA GEODESIA ESPACIAL.....	5
• Generales sobre los satélites	6
• Propagación de emisiones radioeléctricas	8
• Sistemas de posicionamiento global por Satélite	10
• Constelación de Satélites Glonass	10
• Introducción al Proyecto Galileo	19
1.2 INTRODUCCION. ¿ Que es el GPS?.....	25
1.3 SECTORES GPS.....	27
1.3.1 SECTOR ESPACIAL	27
1.3.1.1 Constelación de Satélites	27
1.3.1.2 Puesta en Orbita	31
1.3.1.3 Satélites	31
1.3.1.4 Escala de Tiempo	33
1.3.1.5 Señal de los Satélites	34
1.3.1.6 Disponibilidad Selectiva	36
1.3.2 SECTOR USUARIO	37
1.3.3 SECTOR DE CONTROL	41
1.4. MEDIDAS DE DISTANCIAS A SATELITES Y METODO DIFERENCIAL.....	42
1.5. FUENTES DE ERROR.....	45
1.6. D.O.P., MASCARAS DE ELEVACION Y ACIMUT DE SATELITES.....	47
1.7. SISTEMA DE REFERENCIA GPS (WGS84) Y SISTEMAS LOCALES DE REFERENCIA..	50

TEMA II. TIPOS DE INSTRUMENTOS GPS DEPENDIENDO DE LAS OBSERVABLES.

2.1 DIFERENCIAS ESENCIALES ENTRE GPS DE CODIGO-GIS Y GPS DE MEDIDA DE FASE.....	60
--	-----------

TEMA III. POSICIONAMIENTOS GPS, METODOS Y APLICACIONES.

3.1 POSICIONAMIENTO ABSOLUTO.....	65
3.2 POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL.....	66
3.2.1 METODO ESTATICO	68
3.2.1.1 ESTATICO	68
3.2.1.2 ESTATICO RAPIDO	70
3.2.1.3 REOCUPACION	73
3.2.2 METODO CINEMATICO	74
3.2.2.1 CINEMATICO	74
3.2.2.2 STOP AND GO	76
3.2.2.3 RTK	78
3.2.2.5 RTD GPS	86
3.3 FICHERO RINEX. EJEMPLO.....	87

TEMA IV. GLOSARIO DE TERMINOS. **90****TEMA V. PLANIFICACION DE UNA OBSERVACION.** **100****APENDICE I**

ALGORITMOS DE CALCULO.....	119
ALGORITMOS EN DIFERENCIA DE FASE	
SIMPLES DIFERENCIAS.	
DOBLES DIFERENCIAS.	
TRIPLES DIFERENCIAS.	
ALGORITMOS EN SEUDODISTANCIAS	
ALGORITMOS EN CINEMATICO	

BIBLIOGRAFIA..... **133**

TEMA I:

FUNDAMENTOS SOBRE EL SISTEMA.

1.1 EVOLUCION Y GENERALIDADES SOBRE LA GEODESIA ESPACIAL

La geodesia espacial es la ciencia que se encarga de la recepción y observación de las señales procedentes de elementos que no estén ligados directamente a la superficie terrestre.

Esta ciencia utiliza directamente los satélites artificiales.

Antiguamente los geodestas se veían limitados a distancias no superiores a 200 Km. debido a la visibilidad entre puntos.

Por esta razón se utilizaba observaciones a las estrellas para obtener una posición absoluta del punto, cuando por razones de visibilidad no se podía realizar diferencialmente.

Esta posición conseguida iba aumentando a medida que iba aumentando la precisión de los relojes.

Las redes geodésicas observadas eran lo bastante precisas, pero no así, las redes no intervisibles.

Uno de los más brillantes intentos de observaciones de redes no visibles se realizó para la unión de las redes geodésicas de Escandinavia y Británica.

Estas observaciones se realizaron desde ambas costas con una serie de instrumentos de medida angular que tenían la posibilidad de registrar fotográficamente las lecturas de los limbos.

En los vértices costeros de ambas redes se estacionaban y orientaban teodolitos. Entonces desde un barco, situado entre las dos estaciones, soltaba un globo visible desde las dos estaciones de ambas redes, el cual emitía destellos periódicos mediante un sistema de flash.

Mientras los observadores seguían continuamente el globo hasta los 30 ó 40 Km. de altitud, una central de radiocontrol iba disparando simultáneamente con intervalos regulares el registro angular fotográfico en todos los instrumentos.

La sucesiva liberación de globos a lo largo de una línea intermedia entre ambas costas, y la observación realizada como se ha dicho, permitía establecer entre ambas redes, por intersección directa, una cortina de puntos comunes de coordenadas en el sistema de cada red, pudiéndose enlazar con suficiente precisión ambas redes.

GENERALIDADES SOBRE LOS SATÉLITES

En un simposium científico celebrado en Toronto a finales de septiembre de 1957, se presentó la posibilidad de utilizar unos hipotéticos satélites artificiales con aplicaciones geodésicas. Esta idea se contempló desde el escepticismo y la ironía de los asistentes, dado lo absurdo de la idea en aquellas circunstancias de aquel año.

Precisamente, aquel año, el 4 de Octubre de 1957, la URSS pone en órbita el primer satélite artificial de la tierra: el SPUTNIK I.

Desde aquel momento la Historia de la geodesia espacial comenzó. Desde ese momento se han lanzado más de 11.000 satélites artificiales, y los geodestas han sacado provecho, de todos los satélites aunque no estuviese previsto la utilización de este satélite con fines geodésicos.

Y decimos esto porque los geodestas han intentado sacar provecho de todo, porque pronto pudieron observar que, analizando la cuenta Doppler de las señales radiofundidas desde el Sputnik I y recibidas en estaciones de posición conocida, era posible establecer la órbita del satélite. Evidentemente esto se podía realizar a la inversa y obtener la posición del receptor, después de la recepción y análisis de las señales recibidas durante diferentes y suficientes pasos del satélite.

Este sistema no daba una precisión idónea pero ponía de manifiesto la viabilidad de la aplicación.

Existen dos tipos de satélites: pasivos y activos.

Los pasivos no llevan ningún tipo de mecanismo para realizar emisiones propias; solo pueden reflejar energía que en ellos incida. En esta clase de satélites están los globos y los provistos de prismas refractarios como los Starlettes o Lageos.

Los activos realizan emisiones de luz en pulsos de alta intensidad y breve duración, repetidores de microondas, transmisiones radioeléctricas continuas moduladas para observar cuenta Doppler o tiempos de transmisión, transmisión de señales de tiempo generadas por osciladores propios del satélite, etc. Además también pueden llevar prismas retroreflectores pasivos para devolver señales ópticas.

Los satélites tienen un sistema de producción de energía, normalmente placas fotovoltaicas o paneles solares. Pueden disponer también de elementos para su control y maniobra (combustible, motores cohete, etc.).

Es evidente que la utilización de un satélite, especialmente en las aplicaciones que más no son afines, exige un preciso conocimiento de su situación espacio temporal en forma de coordenadas concretas, lo que resuelve con el conocimiento de las efemérides, siempre que dispongamos del adecuado sistema de referencia.

DATUM: Un datum está constituido por una superficie de referencia geoméricamente definida, habitualmente un elipsoide, dado por la longitud, latitud, y altura, y un punto fundamental en el que la vertical del geoide y al elipsoide sea común.

La altimetría se refiere al geoide como altura H . Es evidente que como el geoide es una superficie irregular, sólo coincidente con el elipsoide al menos en el punto fundamental del Datum elegido, habrá

que tener en cuenta la separación del geoide y elipsoide, u ondulación del geoide. Estableciéndose la expresión $h=N+H$. Del sistema del satélite podemos obtener h , pero sin una buena carta del geoide no podremos conocer N ni calcular H que es el valor que necesitaremos para trabajar topográfica y geodésicamente.

Desde el punto de vista de las coordenadas de los satélites no se complica demasiado el problema, pues solo hay que añadir a las fórmulas que daban su posición en el sistema inercial los parámetros de rotación terrestre antes mencionados; en cualquier caso las coordenadas del satélite seguirán siendo variables en función del tiempo.

Desde este sistema de referencia podemos pasar a otros, como al elipsoide, por ejemplo, mediante un proceso matemático, obteniendo longitud, latitud y altura, una vez conocida la orientación y situación de la superficie de referencia definida por el datum. Si conocemos la altura del geoide N sobre el elipsoide, podremos manipular altitudes ortométricas sobre el geoide, que son las que queremos usar normalmente porque son directamente mensurable.

PROPAGACION DE EMISIONES RADIOELECTRICAS

Una onda electromagnética que provenga del espacio debe atravesar tres zonas características antes de alcanzar un receptor estacionado sobre la superficie terrestre: El vacío, la ionosfera y la troposfera.

El retardo es el incremento que sufre el tiempo de propagación de una señal electromagnética entre dos puntos al efectuarse el tránsito por un medio que no sea el vacío, en vez de hacerlo por el vacío.

Se debe a dos factores: la velocidad de propagación es menor y la trayectoria aumenta su longitud al curvarse por refracción y ser envolvente de la recta que une los puntos origen y destino de la señal.

VACÍO.

En el vacío, el retardo es inexistente, siendo el tiempo de propagación perfectamente determinable al ser proporcional a la distancia en función de la luz, sea cual sea la frecuencia de la onda considerada.

IONOSFERA

En la ionosfera, que está entre 100 y 1000 Km. de altitud, las radiaciones ultravioleta, solar y otras, ionizan una porción de las moléculas gaseosas liberando electrones. El número de electrones libres contenidos en un metro cúbico puede oscilar entre 10^{16} y 10^{19} , según la radiación solar, la actividad de las manchas solares y otros fenómenos, como los geomagnéticos.

El retardo es proporcional al número total de electrones libres encontrados por la señal en su camino y está en función del inverso del cuadrado de la frecuencia de la onda, a igualdad de circunstancias. Varía para cada punto en concreto de recepción según su latitud, la dirección y el momento de observación.

El retardo puede variar en el cenit entre 2 ns. y 50 ns. para frecuencias de la banda L, llegando hasta 2,5 el factor por inclinación de la trayectoria, y siendo hasta 5 veces mayor el efecto al mediodía que entre medianoche y el amanecer.

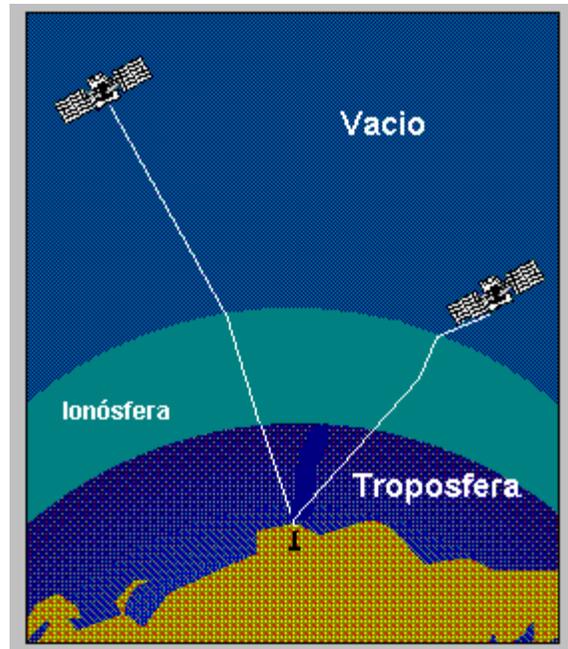
Existen modelos enviados los satélites.

Para resolver el problema, en lo que se refiere a la recepción proveniente de un satélite, se emplea el artificio de utilizar dos frecuencias diferentes y razonablemente separadas dentro de la banda de trabajo. Como el retardo es proporcional a la longitud de onda, y por lo tanto distinto para cada frecuencia, podremos observar un retardo diferencial entre ambos, tanto mayor cuanto mayor sea el retardo ionosférico sufrido, siendo por tanto éste deducible indirectamente, con una precisión ya aceptable.

TROPOSFERA

La última zona que se debe atravesar es la troposfera y otras regiones de atmósfera superior. Aunque llegan hasta 80 Km., sólo en los 40 km. más bajos se causan retardos significativos.

Este retardo equivale a incrementos de camino del orden de 1m. en el cenit y de hasta 30m. a 5° de elevación.



SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL POR SATÉLITE

SLR (**S**atellite **L**aser **R**anging). Es un sistema de medida directa de distancias por pulso laser a satélites provistos de prismas de reflexión total.

VLBI (**V**ery **L**ong **B**aseline **I**nterferometry). Es una técnica que permite calcular con precisión centimétrica la distancia entre los centros radioeléctricos de dos o más telescopios. Se observan cuásares extragalácticos en períodos simultáneos, comparándose interferométricamente las señales recibidas.

DOPPLER. Se basa en la medición de la variación de distancias satélites mediante la cuenta DOPPLER de la frecuencia de las señales recibidas.

GPS. (**G**lobal **P**ositioning **S**ystem). Es un sistema que puede trabajar con medida directa de distancias, en sistema Doppler, o en medida de fase que veremos en capítulos siguientes. A diferencia de los otros sistemas, este es un sistema que tiene cobertura en cualquier parte del mundo y a cualquier hora, ya sea por el día o por la noche.

CONSTELACION DE SATELITES GLONASS .

La antigua Unión Soviética inició, a principios de los años 80, el desarrollo de un sistema de navegación por satélites llamados GLONASS (**GL**obal **OR**biting **NA**avigation **S**atellite **S**ystem).

En el año 1993, oficialmente el Gobierno Ruso colocó el programa GLONASS en manos de Fuerzas Espaciales Militares Rusas (RSF). Este organismo es el responsable del desarrollo de satélites GLONASS, de su mantenimiento y puesta en órbita. Este organismo Militar, trabaja en colaboración con el CSIC (Coordinational Scientific Information Center), el cual publica la información sobre la constelación GLONASS.

Durante los 80, la información acerca de GLONASS era escasa. No se sabía mucho de las órbitas de los satélites ni de las señales usadas para transmisión de las señales de navegación. Pero actualmente, gracias a estudios e investigaciones sobre este sistema, se dispone ya de gran cantidad de información acerca GLONASS. Los Rusos, a través del RSF y del CSIC publican el documento ICD (Interface Control Document). Este documento es similar en estructura al Segmento Espacial del sistema NAVSTAR GPS, donde se describe el sistema, sus componentes, estructura de la señal y el mensaje de navegación para uso civil.

Los canales de información son:

- El **Channel of Standard Accuracy (CSA)**, similar al Standar Positioning Service (SPS) del Sistema GPS, disponible para uso civil.
- El **Channel of High Accuracy (CHA)**, similar al Precise Positioning Service (PPS) del Sistema GPS, disponible solo para usuarios autorizados.

Al igual que el GPS, GLONASS está constituido por tres sectores fundamentales: el espacial, el de control y el usuario. Una vez completado, el sector espacial consistirá en 24 satélites distribuidos en tres planos orbitales con ocho satélites en cada planos.

Un usuario equipado con un receptor adecuado, puede recibir unas señales, extraer de ellas el mensaje de navegación que contienen y llevar a cabo mediciones unidireccionales de distancia (pseudodistancia). Con esta información dicho usuario puede calcular su posición con una precisión de unos 100 m.

Debido al carácter unidireccional de las medidas de distancia a los satélites GLONASS, un receptor necesita medidas de 4 satélites para poder calcular su posición: 3 incógnitas son procedentes de la posición (X,Y,Z) y la 4ª es debido a la falta de sincronización entre el reloj del receptor y la escala del tiempo del sistema.

ESTADO DE LA CONSTELACIÓN GLONASS

Desde que el sistema Glonass fue completado en 1996 sólo en 40 días estuvieron disponibles los 24 satélites. Tres satélites que fallaron en 1996 no han sido reemplazados por lo que actualmente sólo hay 21 satélites activos de los 70 que han sido lanzados.

Además el sistema acusa serios problemas con la calidad de las señales transmitidas, se han observado errores de medida de algunos kilómetros que causan resultados de navegación erróneos.

El problema es que se toman medidas de satélites supuestamente sanos que pueden no serlo ya que no se envían avisos de problemas que puedan tener los satélites a bordo. Es fácil detectar errores muy grandes pero cuando éstos son del orden de metros no lo es tanto.

Otro problema es que el sistema carece de una red de sector de control con lo que no es posible el seguimiento continuo y la detección de errores en las señales puede no ser detectados en horas durante las cuales los satélites están transmitiendo señales erróneas. Pero el mayor problema es la incapacidad de los rusos de mantener la constelación completa así como de mandar nuevos satélites, lo que, teniendo en cuenta su corta vida, proporcionará una cobertura insuficiente para posicionamiento, aún en combinación con el GPS.

FRECUENCIAS EN GLONASS

Cada satélite GLONASS transmite en diferente frecuencia. Por ello algunas de las frecuencias en las que emite el sistema GLONASS interferirán con el sistema IRIDIUM de Motorola que será llevado a cabo en los siguientes años. Para evitar estas interferencias los rusos han accedido a cambiar sus frecuencias a otra zona del espectro, lo que requiere mandar nuevos satélites ya que es imposible cambiar la frecuencia de los ya enviados, con la consiguiente inversión financiera.

Si ya supone un problema para los rusos mantener la constelación actual, es cuestionable que puedan llevar a cabo esta modificación del sistema.

NAVEGACIÓN CONTRA TOPOGRAFÍA

La Organización Internacional de Aviación Civil (ICAO) aceptó formalmente en Julio 1996, el uso de GLONASS/CSA para uso en aviación civil, como ya se hizo en 1994 con el GPS/SPS.

El interés de usar GPS más GLONASS viene principalmente de las empresas de navegación. Si el GPS pudiera ser combinado con el GLONASS, la navegación aérea comercial podría basarse en dos sistemas independientes con dos veces más satélites. El riesgo de accidente sería menor y los márgenes de seguridad se incrementarían.

Para Topografía es totalmente diferente, los topógrafos requieren precisiones centimétricas pero no son responsables de 400 vidas. Un avión no puede parar y esperar ha que haya suficientes satélites, pero el topógrafo si puede observar más tiempo en un punto o volver de nuevo.

Aunque podría haber ventajas para los topógrafos con la combinación si se pudieran obtener precisiones centimétricas, la necesidad es menor que en el caso de navegación, por lo cual los receptores de GPS/GLONASS construidos hasta hoy son para navegación.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA GLONASS

El Sistema GLONASS, al igual que el Sistema GPS, está formado por tres sectores fundamentales: el Sector de Control, el Sector Espacial y el Sector Usuario.

· SECTOR DE CONTROL

El Sector de Control está formado por un Sistema Central de Control (SCC) en la región de Moscú (Golitsyno-2) y una red de estaciones de seguimiento y control (Command Tracking Stations, CTS), emplazadas por todo el área alrededor de Rusia. El Sector de Control GLONASS, al igual que el de GPS debe seguir y vigilar el estado de sus satélites, determinar las efemérides y errores de los relojes de los satélites, es decir, la diferencia entre el tiempo GLONASS y la escala de tiempo UTC(SU). Además también deben actualizar los datos de navegación de los satélites. Estas actualizaciones se realizan dos veces al día.

Las estaciones de control (CTSs) realizan el seguimiento de los satélites y almacenan los datos de distancias y telemetría a partir de las señales de los satélites. La información obtenida en las CTSs es procesada en el Sistema Central de Control (SCC) para determinar los estados de las órbitas y relojes de los satélites, y para actualizar el mensaje de navegación de cada satélite. Esta información es enviada a cada satélite por medio de las CTSs. Las CTSs calibran periódicamente los datos de distancias a los satélites mediante láser. Para ello, los satélites GLONASS van provistos de unos reflectores especiales.

La sincronización de todos estos procesos en el Sistema GLONASS es muy importante. Para conseguir esta sincronización, se dispone de un reloj atómico de hidrógeno de alta precisión, el cual determina la escala de tiempo GLONASS. Los satélites GLONASS llevan a bordo un reloj de cesio y se sincronizan respecto a la State Etalon UTC(CIS) en Mendeleevo, a través de la escala de tiempo del sistema GLONASS.

A todas estas estaciones de control debemos añadir otras estaciones de seguimiento que se utilizan para obtener los parámetros de transformación del Sistema GLONASS PZ-90 al Sistema GPS WGS-84, además de la determinación de las órbitas y observación y análisis de las anomalías de los satélites. Estos parámetros de transformación se aplican cuando se trabaja con el sistema combinado GPS/GLONASS. Estas estaciones están repartidas

por todo el mundo y utilizan técnicas láser, radar y ópticas. Estos parámetros son calculados por mínimos cuadrados utilizando 9 días de datos de seguimiento.

La calidad de las posiciones estimadas obtenidas a partir de GLONASS es comparable a la que se obtiene con GPS cuando la Disponibilidad Selectiva está desactivada. El valor del rms (URE) en la determinación de las órbitas para GLONASS es de aproximadamente 10 m.

El Gobierno de la Federación Rusa ha declarado que GLONASS proporciona a los usuarios civiles una precisión en toda la Tierra para el posicionamiento absoluto en tiempo real basado en medidas de código de unos 60 m en horizontal (99.7%) y de unos 75 m en vertical (99.7%). Los rusos han anunciado que no tienen previsto introducir ninguna medida intencionada de degradación de la precisión del sistema.

· SECTOR ESPACIAL.

El Sector Espacial está formado por la constelación de satélites. La constelación completa se compone 24 satélites en tres planos orbitales, cuyo nodo ascendente es de 120° y argumento de latitud de 15° . Cada plano contiene 8 satélites espaciados regularmente, con argumento de latitud de 45° . Los planos están inclinados $64,8^\circ$ respecto al Ecuador. Los satélites GLONASS se encuentran a una distancia de aproximadamente 19100 Km y se sitúan en órbitas casi circulares con semieje mayor de aproximadamente 25510 Km, siendo el periodo orbital de 675,8 minutos, es decir, 11 horas y 15 minutos. Esto garantiza, con la constelación completa, (Circunstancia que no ha ocurrido todavía) la visibilidad de un mínimo de 5 satélites en todo el mundo con adecuada geometría, es decir, la constelación GLONASS proporciona una cobertura de navegación continua y global para la ejecución satisfactoria de observaciones de navegación. Cada satélite transmite una señal de navegación de radiofrecuencia, conteniendo un mensaje de navegación para los usuarios.



Satélite GLONASS bajo construcción.

Los planos se numeran del 1 al 3. Cada satélite, según el plano en el que esté, 1, 2 ó 3, se numera del 1 al 8, del 9 al 16 y del 17 al 24 respectivamente.

El primer satélite se lanzó el 12 de Octubre de 1982, y el último el 14 de Diciembre de 1995.

En este periodo de tiempo se han realizado un total de 27 lanzamientos (dos de ellos fallidos con fecha 24-4-1987 y 17-2-1988), poniendo en órbita un total de 73 satélites.

Cada satélite GLONASS dispone de un pequeño reflector, que es usado para el seguimiento de los satélites por láser desde las estaciones de control. Existen 4 prototipos o modelos de satélite. El primer prototipo lo componen un total de 10 satélites que forman el Bloque I, lanzados entre Octubre-82 y May-85. Otros 6 satélites del segundo prototipo forman el Bloque IIa, lanzados entre Mayo-85 y Septiembre-86. Un total de 12 satélites forman el Bloque IIb del tercer prototipo, lanzados entre Abril-87 y Mayo-88, de los cuales seis se perdieron en los dos fallos anteriormente reseñados por fallo del vehículo de lanzamiento. El cuarto prototipo forma el Bloque IIv, constituido por 43 satélites, de los cuales se han lanzado la totalidad de ellos hasta la fecha de 14 de Diciembre de 1995.

Cada subsiguiente generación de satélites contiene equipamientos más modernos y tienen un mayor periodo de vida.

Los satélites GLONASS llevan a bordo relojes de atómicos de Cesio con un oscilador de frecuencia fundamental de 5 MHz. A partir de esta frecuencia fundamental se pueden obtener o modular los códigos C/A y P, de frecuencias 0.511 MHz y 5.11 MHz respectivamente. En la señal también se introduce un mensaje de 50 bits por segundo. La **banda L1** funciona en la frecuencia $1602 + 0.5625 \cdot k$ MHz, donde k es el canal (0-24), lo genera un rango de frecuencias que van desde 1602 - 1615.5 MHz. La **banda L2** funciona en la frecuencia $1246 + 0.4375 \cdot k$ MHz, lo que genera un rango de frecuencias que van desde 1246 - 1256.5 MHz.

El mensaje de navegación se transmite con una velocidad de 50 bit/s y se modula junto con los códigos C/A y P. El mensaje de navegación GLONASS del código C/A divide los datos en datos operacionales o inmediatos y datos no operacionales o no inmediatos. Los **datos operacionales** son las efemérides, los parámetros de reloj y época del reloj del satélite. Las efemérides de los satélites se dan en términos de posición, velocidad, y vector de aceleración de la época de referencia. Los **datos no operacionales** comprenden el almanaque (o efemérides aproximadas) de la constelación, junto con los estados de salud de todos los satélites GLONASS. Los datos de salud de los satélites no tienen tiempo de actualización. Además, en los datos no operacionales hay un parámetro que indica la diferencia entre el sistema de tiempo GLONASS y el UTC.

Las efemérides GLONASS están referidas al Datum Geodésico Parametry Zemli 1990 o PZ-90, o en su traducción Parámetros de la Tierra 1990 o PE-90. Este sistema reemplazó al SGS-85, usado por GLONASS hasta 1993.

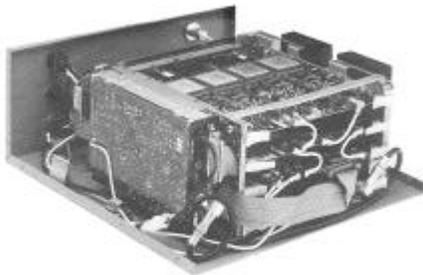
El sistema PZ-90 es un sistema de referencia terrestre con coordenadas definidas de la misma forma que el Sistema de Referencia Internacional Terrestre (ITRF). Las constantes y parámetros del PZ-90 se muestran en la siguiente tabla:

PARAMETROS DATUM PZ-90

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Rotación de la Tierra</i>	$72.92115 \cdot 10^{-6} \text{ rad/s}$
<i>Constante Gravitacional</i>	$398600.44 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{s}^2$
<i>Constante Gravitacional de la atmósfera</i>	$0.35 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{s}^2$
<i>Velocidad de la luz</i>	299792458 m/s
<i>Semieje mayor del elipsoide</i>	6378136 m
<i>Aplanamiento del elipsoide</i>	$1 / 298.257839303$
<i>Aceleración de la gravedad en el Ecuador</i>	978032.8 mgal

La realización del Sistema PZ-90 por medio de la adopción de coordenadas de estaciones de referencia ha dado como resultado el desfase en el origen y orientación de los ejes, así como la diferencia en escala con respecto al ITRF y al Sistema WGS-84 también.

. SECTOR USUARIO.



882 2/18
81000 1
Figure 10. GPS/GLONASS Receiver

Un equipo de recepción de señales GLONASS, al igual que uno de GPS, está formado por una antena y un receptor, así como terminal o colector de datos. La antena suele llevar un plano de tierra para evitar el efecto multipath. Los receptores disponen de un reloj para sincronizar las señales recibidas. Lo normal y aplicado para Topografía es encontrar un receptor combinada GPS/GLONASS

CONCLUSIÓN

Hasta hoy el sistema GLONASS no satisface las expectativas de rentabilidad e integridad que precisa el usuario como lo hace el GPS. Algunos problemas nunca se resolverán como la falta de una red del sector de control.

Considerando los problemas económicos de los rusos, es posible que la constelación no se mantenga y deje de ser operativa, en un corto periodo de tiempo.

Introducción al Proyecto Galileo

Muchos servicios y equipos han sido desarrollados con base al tiempo de referencia GPS y su posicionamiento. El ritmo de crecimiento de los usuarios lleva a la diversificación de aplicaciones ampliando el campo de actividades desde la gestión del tráfico en carretera, hasta la mejora de la precisión de acercamiento y aterrizaje de aviones, pasando por aplicaciones tan diversas como la agricultura.

Sin embargo, los criterios en los ámbitos técnicos y socio-políticos necesarios para garantizar los beneficios que podrán ser obtenidos por los servicios de radionavegación por satélite, no están plenamente satisfechos en el entorno actual. La situación está ilustrada por un número de restricciones que son inherentes a GPS:

- *Sistema bajo control unilateral de una autoridad nacional de defensa.*
- *Ausencia de garantías de servicio y de responsabilidad jurídica de terceros,*
- *Los sistemas civiles tienen una prioridad más baja.*
- *Vacíos de cobertura imprescindibles.*
- *Baja disponibilidad en áreas urbanas y en elevadas latitudes.*
- *Falta de visibilidad del futuro desarrollo y costes en un entorno comercial civil.*

GALILEO es la iniciativa europea para desarrollar un sistema de navegación por satélite dedicado primera y básicamente a satisfacer las necesidades de la comunidad civil mundial. La componente principal del sistema es una constelación de satélites con una cobertura global. Dirigido por la Unión Europea y por la Agencia Espacial Europea, la fase de definición del sistema empezó en 1999, con un despliegamiento inicial previsto en 2005 y una plena capacidad operativa en el 2008.

El programa GALILEO

El objetivo de GALILEO es desarrollar servicios de valor añadido, basados en la determinación de la posición, tiempo y velocidad de los terminales usuarios desde una

infraestructura de satélites. La necesidad de la existencia de sistemas complementarios e interoperables como GPS y GLONASS para permitir la obtención de los máximos beneficios que se puedan obtener de la tecnología de navegación por satélite está ampliamente reconocida. Especialmente, para aplicaciones involucradas en la seguridad de la vida humana, y otras aplicaciones críticas, que tienen que apoyarse en la robustez, fiabilidad y por lo tanto en la redundancia entre sistemas.

Así pues, las líneas principales de desarrollo del programa GALILEO son:

- Será independiente del sistema GPS de Estados Unidos pero complementario e interoperables con él.
- Estará abierto a la contribución de capital privado internacional.
- Teniendo en cuenta las restricciones impuestas por la interoperabilidad con el GPS, GALILEO explotará las nuevas capacidades del estado-del-arte en un sistema civil, permitiendo el desarrollo de nuevas aplicaciones, facilitando la robustez del GNSS y poniendo remedio a ciertas deficiencias que existen en la actualidad.
- Tendrá una cobertura global para proveer un mercado mundial para el sistema y sus aplicaciones. GALILEO incluirá un servicio de acceso restringido.
- El sistema permanecerá bajo el control de autoridades civiles, pero un sistema de seguridad y de interfaces adecuados será puesto en funcionamiento para asegurar la compatibilidad con las restricciones globales de seguridad.

La constelación GALILEO

Actualmente se están estudiando dos tipos de constelaciones para Galileo. La primera consiste en una constelación de 24 satélites MEO (Medium Earth Orbit), complementados con 8 satélites GEO (Geostationary Earth Orbit). La segunda consta de 30 satélites MEO. El sistema proporcionará fundamentalmente dos tipos de servicios: unos básicos y gratuitos y otros de mayores prestaciones y de acceso restringido.

Servicios Galileo

GALILEO se está diseñando para proporcionar tres niveles distintos de servicio:

- *Nivel 1: Un sistema de acceso abierto ("O.A.S: Open Access Service") similar al GPS standard actual, principalmente dedicado a las aplicaciones para el mercado de masas.*
- *Nivel 2: Un servicio de acceso restringido ("C.A.S 1: Controlled Access Service 1"), dedicado a aplicaciones comerciales y profesionales que requieren un nivel de servicio más elevado (en términos de prestaciones, garantías de servicio,...)*
- *Nivel 3: un servicio de acceso restringido ("C.A.S 2: Controlled Access Service"), dedicado a aplicaciones exigiendo un nivel de seguridad crítica que no pueden tolerar una interrupción o perturbación (caso de la aviación civil).*

Además de estos servicios de posicionamiento, GALILEO proveerá un servicio de "Tiempo Preciso" en todo el mundo, con una escala de diferentes niveles de precisión y garantías.

Atractivo mundial del sistema GALILEO.

GALILEO representa una oportunidad única para desarrollar servicios de posicionamiento en todo el mundo para toda categoría de usuarios, evitando el desarrollo de complejas infraestructuras terrestres:

1. GALILEO es un sistema complementario al GPS y a GLONASS

GALILEO no es un sistema en competencia con los sistemas existentes. Las futuras aplicaciones se beneficiarán de la posibilidad de utilizar todos los sistemas de navegación disponibles, Así pues, GALILEO será compatible e interoperable con GPS y GLONASS. Los criterios de diseño de la estructura de la señal del sistema de GALILEO se están desarrollando para añadir un coste mínimo adicional a los terminales de usuario. El uso combinado de GALILEO y otros sistemas como EGNOS proveerá elevadas prestaciones, por ejemplo en términos de disponibilidad de navegación en áreas urbanas.

2. GALILEO es independiente de GPS y GLONASS

Las ventajas de GALILEO residen también en su independencia de GPS y de GLONASS, asegurando que las aplicaciones críticas en términos de

seguridad están protegidas de los posibles errores que puedan ocurrir en modo común. Además, el uso creciente de los servicios de posicionamiento en la vida de cada día, genera una dependencia también creciente de estos servicios, que a su vez exige garantías de disponibilidad a largo plazo bajo el control internacional.

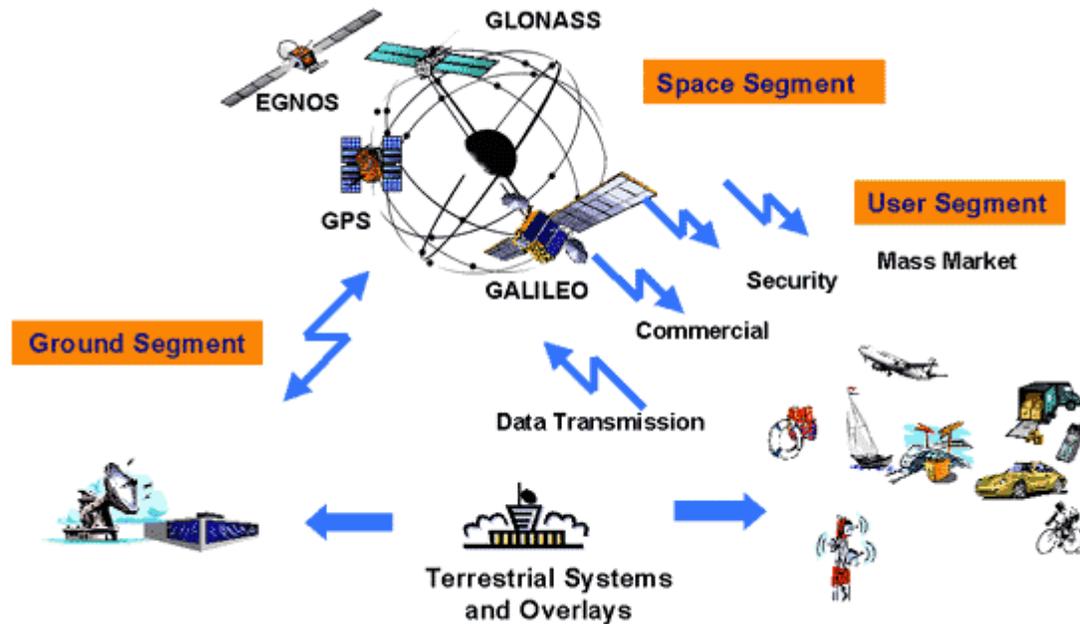
GALILEO aprovecha la ventaja de la innovación

- *GALILEO es un sistema civil que proporciona un conjunto de servicios a varias categorías de usuarios. Será operado por una entidad independiente asegurando el servicio a un número máximo de usuarios, incluyendo aplicaciones involucradas con la seguridad para la vida humana, con el comercio y con las aplicaciones para mercado de masas.*
- *Su acercamiento en términos de negocios se basa en promover el desarrollo de servicios de valor agregado en cualquier zona del mundo permitiendo la adaptación eficiente de aplicaciones comerciales rentables.*
- *El acercamiento integral en la filosofía del diseño de la arquitectura eliminará la necesidad de desarrollar mejoras futuras en el diseño para satisfacer necesidades específicas. La filosofía está basada en la optimización de sus componentes (global, regional, local, equipos de usuario,...) para poder hacer la interfaz con otros sistemas (GSM, UMTS,...) y así disminuir la complejidad y el coste de cada componente.*
- *Los aspectos relacionados con la responsabilidad jurídica identificados con el uso del sistema, serán los conductores principales del diseño. La integridad del sistema puede ser nacional o regional, e incluirá registros legales obligatorios.*

GALILEO es un sistema seguro

Mejorar la seguridad de todo tipo de transporte es una de las claves para favorecer el desarrollo de los países en el mundo. Como GALILEO tendrá aplicaciones involucradas con la seguridad para la vida humana y aplicaciones seguras, su diseño está basado en los estándares adecuados en términos de seguridad (desarrollo de software, análisis en

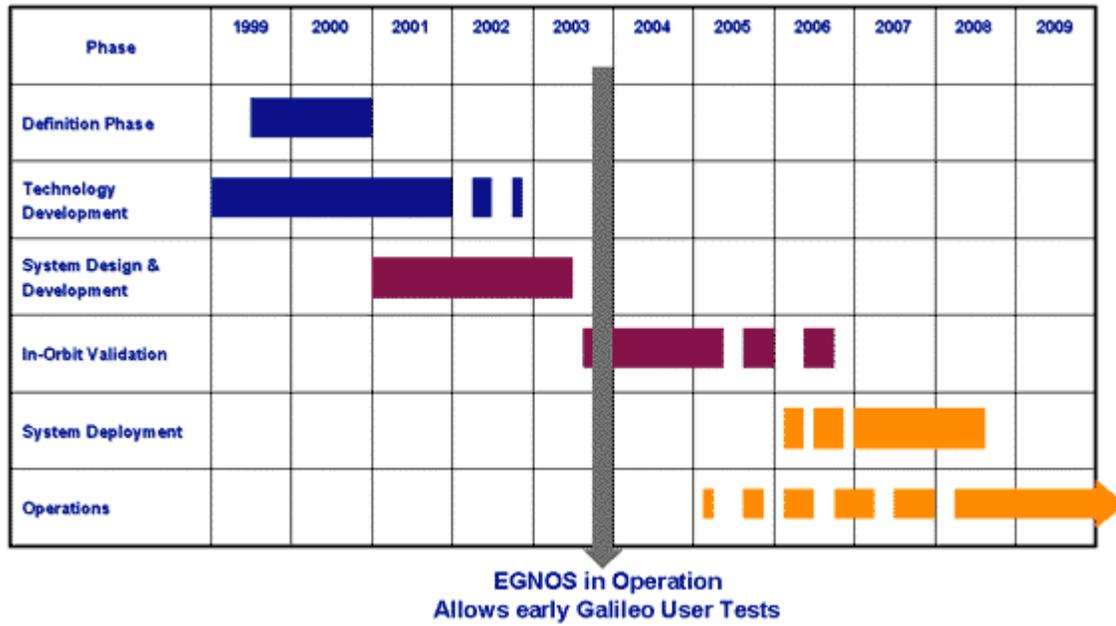
modo error,...) y en la política de seguridad definida (protección de amenazas identificadas,...)



Fases del programa.

Estados Unidos tiene previsto la sustitución progresiva de la constelación de satélites GPS actuales por una nueva generación conocida como GPS bloque II F. Según las previsiones actuales, dicha sustitución se completará hacia el año 2010.

Aprovechando esta circunstancia, Europa intentará que Galileo entre en operación con dos años de adelanto respecto a GPS, hacia el año 2008, con el objeto de capturar mercados potenciales antes que GPS Bloque II F. De este modo, Europa podrá disponer de un sistema propio de satélites de última generación a medio plazo, lo que le permitirá solventar la dependencia actual en la tecnología americana. La siguiente figura muestra los calendarios que se barajan en la actualidad para el desarrollo de Galileo y GPS bloque II F.



1.2. INTRODUCCION ; QUE ES EL GPS ?

Como se ha comentado anteriormente, GPS significa **Global Positioning System**, o lo que es lo mismo Sistema de Posicionamiento Global.

Este sistema, puesto en funcionamiento desde 1973, se desarrolló a partir de los satélites de las constelación **NAVSTAR (NAVigation Satellite Timing And Ranging)**, fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD), y se lanzó el primer satélite el 22 de Febrero de 1978.

Este sistema fue desarrollado para mejorar el sistema, de medición distancias DOPPLER, TRANSIT en servicio civil desde 1967. Por razones militares, necesitaban un sistema que tuviese cobertura global, a cualquier hora del día y en cualquier medio funcionase, ya sea, mar, aire o tierra.

Se tenía la necesidad, además, que el sistema fuese pasivo, es decir, el usuario no tenía que emitir señal de ningún tipo para no ser delatada su posición.

El sistema está pensado para sustituir todos los sistemas de precisión media de navegación civil, Decca, Loran C, Omega, Transit, Tacan, ILS, Radiofaros, etc..

Las precisiones esperadas en Navegación se obtienen solamente utilizando un receptor. Si utilizamos dos receptores observando simultáneamente, las precisiones que se pueden alcanzar son ya de 5mm. En este ámbito estaremos hablando de geodesia y de topografía.

El sistema se ha declarado oficialmente operativo, por el DoD, en enero de 1994.

La constelación proyectada en principio consistente en 8 satélites por cada plano orbital de los tres previstos, fué modificado por motivos presupuestarios, siendo en la actualidad seis órbitas casi circulares con cuatro satélites por cada una.

La altitud de los satélites es de unos 20.180 km. cuando están en el Zenit del lugar. Completando cada uno de ellos dos vueltas por cada rotación de 360° a la tierra, es decir el periodo es de 12 horas sidéreas por lo que la configuración de un instante se repite el día anterior debido a la aceleración de las fijas o diferentes entre día sidereo y el día solar medio.

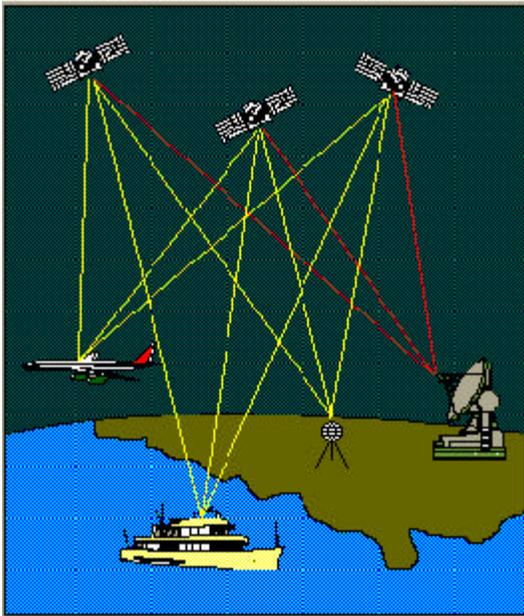
Los seis planos orbitales se suelen definir con las letras A,B,C,D,E,F y dentro de cada órbita cada uno de los satélites con los números 1,2,3,4. Hay otros sistemas de

identificarlo, como puede ser por su PRN característico, por número de catálogo de la NASA, fecha de lanzamiento, etc.

Además de los satélites lógicamente se ha de disponer de un receptor de la señal enviada por los satélites en tierra, y de algún sistema de control sobre ellos. De ahí el motivo de hablar de tres sectores fundamentales que constituyen el sistema:

- 1.- Sector Espacial.*
- 2.- Sector de Control*
- 3.- Sector Usuario*

1.3 SECTORES GPS



El GPS puede ser dividido en tres segmentos como se ha comentado anteriormente: el segmento espacial, el segmento usuario y el segmento de control

1.3.1. SEGMENTO ESPACIAL

Compuesto por la constelación de satélites **NAVSTAR (NAVigation System with Time And Ranging)** de satélites transmite señal de tiempos sincronizadas, parámetros de posición de los satélites e información adicional del estado de salud de los satélites sobre las dos portadoras.

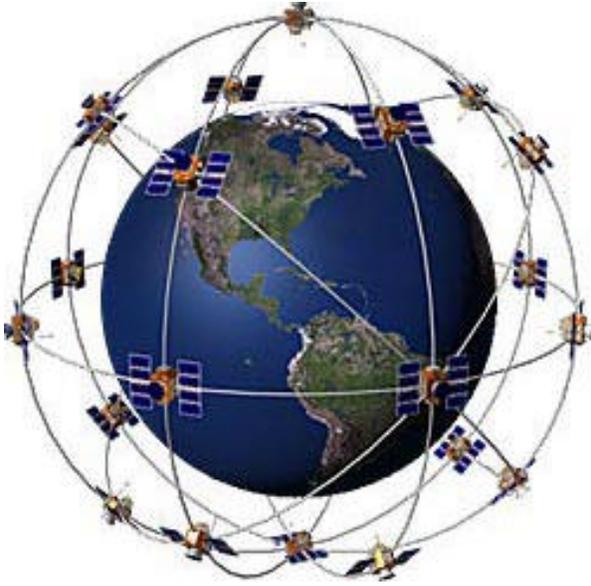
1.3.1.1 Constelación de satélites

La constelación propuesta inicialmente, consistía en 3 planos orbitales, con ocho satélites por órbita, luego se redujeron a seis por órbita, por motivos de recorte presupuestario, y más tarde, se decidió distribuir los dieciocho satélites en seis planos orbitales.

La constelación final, operativa desde Enero de 1994, consta de seis órbitas con cuatro satélites. Esta órbita tiene una inclinación de 55 grados y están distribuidas uniformemente en el plano del ecuador. Los satélites están aproximadamente a 20.200 Km. de la superficie terrestre, con una velocidad angular de 12 horas sidéreas. Cuando un satélite en su órbita pasa por el zenit del lugar, le tendremos sobre el horizonte durante unas cinco horas.

La constelación está pensada para dar cobertura a cualquier hora del día y en cualquier parte del mundo.

Se planificaron tres generaciones de satélites compuestas por los siguientes bloques:



Bloque I

Los satélites de este bloque están aún en servicio parcialmente y fué experimental. Estos satélites fueron lanzados desde la base de Vandenburg (California) entre los años 1978 y 1985.

Bloque II

El bloque II se puso en órbita mediante transbordadores espaciales llevando tres satélites en cada viaje, Actualmente se están lanzando con el cohete MLV Delta 2.

Bloque III

El bloque III en proyecto puede que se sustituya por el modelo II-R evolución de los del bloque II.

**HISTORIAL Y ESTADO DE LA CONSTELACION GPS
(SITUACION AL 4 DE SEPT. DE 1997)**

SVN	PRN	LANZA	ORBIT	OPER	OPE.OUT	RAZON FALLO	MESES ACTIV
1	4	22/2/78	**	29/3/78	25/1/80	RELOJ	21.9
2	7	13/5/78	**	14/7/78	30/7/80	RELOJ	25.5
3	6	6/10/78	**	9/11/78	19/4/92	RELOJ	161.3
4	8	11/12/78	**	8/1/79	27/10/86	RELOJ	93.6
5	5	9/2/80	**	27/2/80	28/11/83	out orb	45
6	9	26/4/80	**	16/5/80	10/12/90	out orb	126.8
7		18/12/81	**	**	**	+Tensio	0
8	11	14/7/83	**	10/8/83	4/5/93	efe degr	116.8
9	13	13/6/84	**	19/7/84	28/2/94	reloj	115.6
10	12	8/9/84	**	3/10/84	18/11/95	reloj	133.5
11	3	9/10/85	**	30/10/85	27/2/94	TT&C	99.9
14	14	14/2/89	E1	14/4/89	OPERATIV		101.6
13	2	10/6/89	B3	12/7/89	OPERATIV		98.6
16	16	17/8/89	E5	13/9/89	OPERATIV		96.6
19	19	21/10/89	A4	14/11/89	OPERATIV		94.6
17	17	11/11/89	D3	11/1/90	OPERATIV		92.7
18	18	24/1/90	F3	14/2/90	OPERATIV		91.6
20	20	25/3/90	B5	19/4/90	OPERATIV		72.7

SVN	PRN	LANZA	ORBITA	OPER	OPE.OUT	RAZON FALLO	MESES ACTIVO
21	21	2/8/90	E2	31/8/90	OPERATIV		85
15	15	1/10/90	D2	20/10/90	OPERATIV		83.4
23	23	26/11/90	E4	10/12/90	OPERATIV		81.7
24	24	3/7/91	D1	30/8/91	OPERATIV		73
25	25	23/2/92	A2	24/3/92	OPERATIV		66.2
28	28	10/4/92	C2	25/4/92	5/5/97	HWARE	
26	26	7/7/92	F2	23/7/92	OPERATIV		62.3
27	27	9/9/92	A3	30/9/92	OPERATIV		60
32	1	22/11/92	F1	11/12/92	OPERATIV		57.7
29	29	18/12/92	F4	5/1/93	OPERATIV		56.9
22	22	3/2/93	B1	4/4/93	OPERATIV		53.9
31	31	30/3/93	C3	13/4/93	OPERATIV		53.6
37	7	13/5/93	C4	12/6/93	OPERATIV		51.6
39	9	26/6/93	A1	21/7/93	OPERATIV		50.3
35	5	30/8/93	B4	20/8/93	OPERATIV		48.4
34	4	26/10/93	D4	1/12/93	OPERATIV		46
36	6	10/3/94	C1	28/3/94	OPERATIV		42.1
33	3	28/3/96	C2	9/4/96	OPERATIV		17.7
40	10	16/7/96	E3	15/8/96	OPERATIV		13.5
30	30	12/8/96	B2	1/10/96	OPERATIV		12

1.3.1.2 Puesta en órbita

Cada satélite lanzado con los Delta 2 se pone en órbita en 3 fases:

1- La primera y segunda etapa el cohete, de propelente sólido, sitúan la 3ª etapa y su carga en una órbita elíptica de aparcamiento con apogeo y perigeo de 870 y 180 Km de altitud, respectivamente.

2- Con la tercera etapa se aumenta el apogeo de la órbita hasta un valor de 20.200 Km de altitud, pero manteniendo la fuerte excentricidad. Esta órbita es de transferencia.

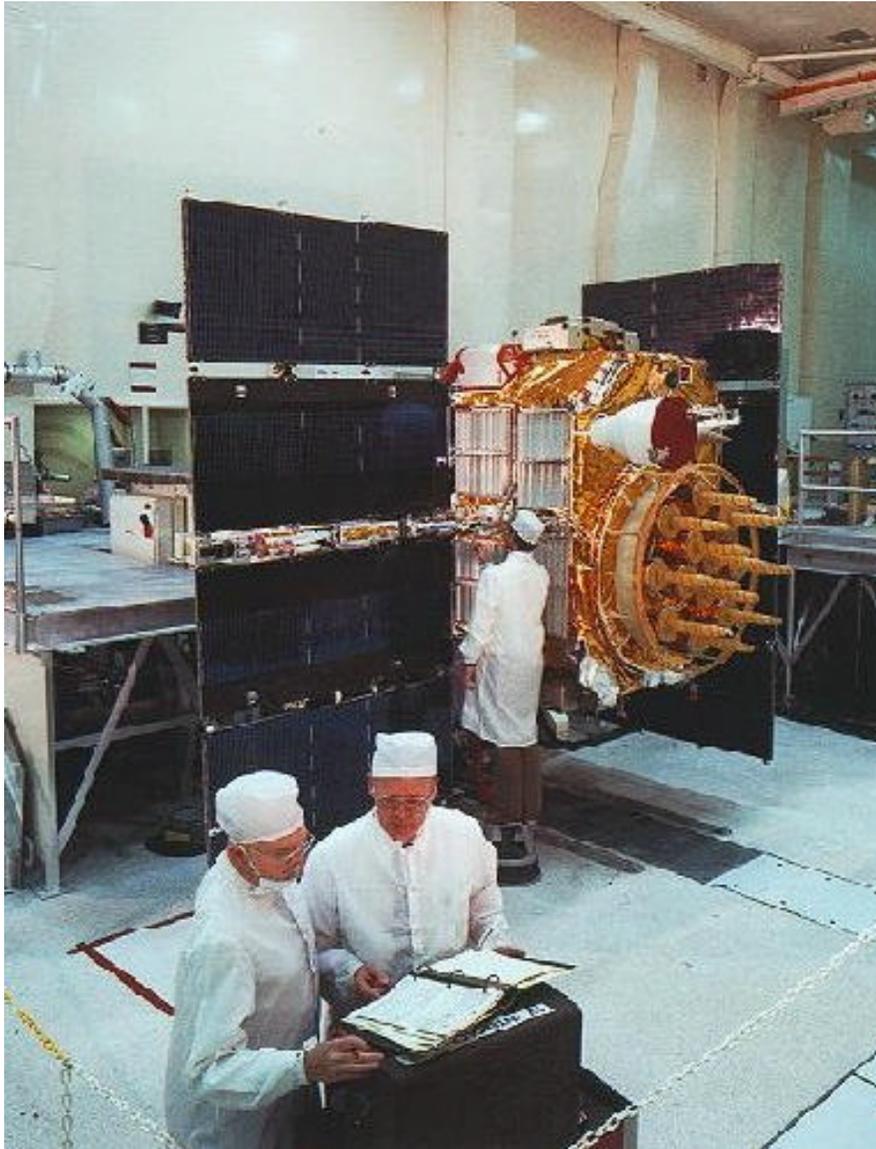
3- Se activa el cohete de inserción que lleva el propio satélite, y entra en una órbita casi definitiva que finalmente se retoca con los cohetes de maniobra del mismo, hasta establecer la órbita final de servicio.

Desde el control de tierra se puede manipular el funcionamiento y manipular los cohetes de maniobra de los propios satélites, permitiendo corregir la órbita o incluso cambiar de posición dentro de la órbita.

1.3.1.3 Satélites

Los satélites del bloque I pesaban sobre unos 400 Kg. con paneles solares de 400 vatios de potencia. Cuatro satélites llevan osciladores de cuarzo, tres con relojes atómicos de rubidio, tres con osciladores atómicos de cesio de los diez puestos en órbita. La vida media de estos satélites son de cinco años.

SATELITE NAVSTAR (GPS)



Los del bloque II pesaban aproximadamente el doble que los del bloque I, y más pesados aún si iban provistos de los detectores de explosiones atómicas NUDET.

Estos llevan todos osciladores atómicos y paneles de 700 vatios de potencia.

Hasta el momento todos los satélites están fabricados por Rockwell International.

Todos los satélites llevan paneles solares para la energía mientras pasa por la zona de sombra de la Tierra.

Estos satélites poseen una serie de antenas emisoras que funcionan en la banda L del espectro. Estas señales son las que recibiremos en nuestro receptor.

La identificación de los satélites se pueden hacer por varios sistemas:

- 1- Por el número NAVSTAR (SVN). Es el numero de lanzamiento del satélite.
- 2- Por el numero de órbita.
- 3- Por la posición que ocupa en la órbita.
- 4- Por el número de catálogo NASA
- 5- Por la identificación internacional constituida por el año de lanzamiento. el número de lanzamiento en el año y una letra según el tipo.
- 6- Por el número IRON. Número aleatorio asignado por la NORAD (Junta de Defensa Norteamericana de Estados Unidos y Canadá).

Pero la forma generalizada de llamarlos es por PRN o ruido pseudo-aleatorio, que es característico de cada satélite NAVSTAR.



Los satélites últimos son mucho más fiables que los de la primera generación. Los actuales tienen sistemas alternativos computables desde tierra.

Un satélite queda fuera de servicio cuando por avería o envejecimiento de los paneles solares, falta la capacidad de los acumuladores, averías no commutables en los

sistemas electrónicos, o agotamiento del combustible de maniobra y recuperación de órbita.

1.3.1.4 Escala de Tiempo

Para definir el tiempo usado en el sistema GPS se empezará por la definición del Tiempo Universal UT. El UT en el tiempo solar medio referido al meridiano de Greenwich.

El UT0 es el tiempo universal deducido directamente a partir de observaciones estelares y considerando la diferencia entre día universal y sidéreo de 3 minutos 56,555 segundos.

El UT1 es el UT0 corregido de la componente rotacional inducida por el movimiento del polo.

El UT2 es el UT1 corregido por variaciones periódicas y estacionales en la velocidad de rotación de la Tierra. Esta escala es equivalente a la Greenwich Mean Time GMT.

El tiempo universal coordinado UTC es un tiempo atómico uniforme, cuya unidad es el segundo atómico. Es básicamente igual al UT2, al que se aproxima muchísimo mediante correcciones llamadas segundos intercalares (leap second) que son sucesivos incrementos de un segundo, motivados por la variación de la velocidad de rotación de la Tierra.

El US Naval Observatory establece un escala de tiempo atómico, que llama GPS Time, cuya unidad es el segundo atómico Internacional.

El origen de la escala GPS se ha fijado como coincidente con el UTC a las 0 horas del 6 de Enero de 1980.

1.3.1.5 Señal de los satélites

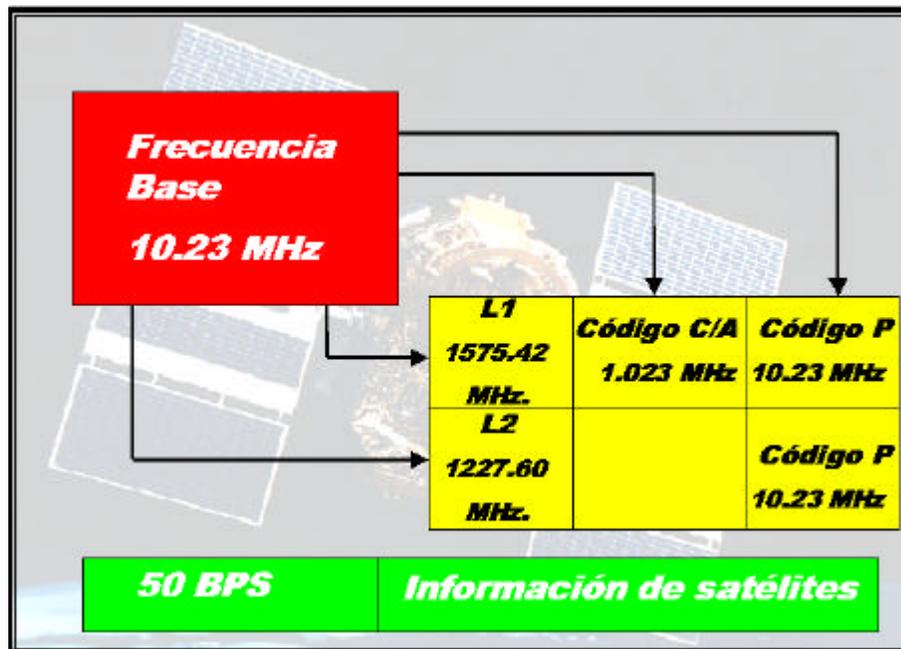
Una de las características más importantes del Sistema GPS, es la medida precisa del tiempo, por esta razón, cada satélite contiene varios osciladores de alta precisión, con estabilizadores muy precisos dando medidas de tiempo del orden de 10^{-14} .

A continuación, exponemos ejemplos de osciladores de alta precisión:

<u>Oscilador</u>	<u>Precisión</u>
RUBIDIO	$10^{-11} - 10^{-12}$
CESIO	$10^{-12} - 10^{-13}$
HIDROGENO	$10^{-14} - 10^{-15}$

El oscilador de alta precisión del satélite tiene una frecuencia fundamental de 10.23 MHz.. Todas las otras frecuencias (L1, L2) están derivadas de ésta.

La portadora L1 emite en una frecuencia de 1575,42 MHz. y una longitud de onda de 19,05 cm.; la portadora L2 utiliza la frecuencia 1.227,60 MHz. y una longitud de onda de 24,45 cm.. La L es porque los valores usados están en la banda L de radiofrecuencias que abarcan desde 1 GHz. hasta 2 GHzs.



El motivo de usar las dos frecuencias es porque nos permite, por comparación de sus retardos diferentes, el retardo ionosférico.

Sobre las portadoras L1 y L2 se envían por modulación dos códigos y un mensaje, cuya base también es la frecuencia fundamental 10.23 MHz.. El primer código llamado C/A (Course Adcquisition) es una moduladora usando la frecuencia fundamental dividida entre 10. El segundo código llamado P (Precise) modula directamente con la fundamental de 10.23 MHz..

Los códigos sirven fundamentalmente para posicionamientos absolutos y son usados principalmente para navegación. El código C/A ofrece precisiones nominales decamétricas. El P ofrece precisiones nominales métricas.

La longitud del mensaje es de 1500 bits, correspondiente a 30 segundos. El mensaje está dividido en 5 celdas de 10 palabras cada una. Cada palabra contiene 5 bits.

CELDA 1 *Parámetros de desfase del reloj y un modelo de retardo ionosférico para usuarios de equipos monofrecuencia.*

CELDA 2 Y 3 *Contiene información sobre las efemérides de los satélites.*

CELDA 4 *Está reservado para mensajes alfanuméricos para futuras aplicaciones.*

CELDA 5 *Contiene datos de almanaque por cada satélite. El almanaque completo se recibe completo en el receptor después de 12,5 minutos de observación.*

Para minimizar el tiempo que necesita el receptor para actualizar su posición el mensaje se repite cada 6 segundos.

Las efemérides de los satélites es actualizado cada hora pero es válido para más de una hora y media.

Las efemérides son un conjunto de parámetros que contienen, no solo las órbitas, sino las correcciones que hay que aplicar a estas.

1.3.1.6 Disponibilidad

En un principio se pensó que el sistema GPS ofrecería precisiones de 10 a 20 metros en el posicionamiento preciso (PPS), en tiempo real. Después se descubrió que estas precisiones eran alcanzables en el posicionamiento estándar (SPS) destinado a usuarios civiles.

Para preservar los intereses militares se ideó degradar a 100 metros la precisión en el SPS mediante la disponibilidad selectiva (SA). Con la SA activada el sistema ofrece precisiones horizontales absolutas de 100 metros durante el 95% del tiempo, y peores de 300 metros en el 5% restante.

Para llevar la SA a cabo, se actúa sobre la información enviada en el mensaje correspondiente a estados de relojes y a parámetros orbitales. La información sobre estos estados sufre unas variaciones de corto y largo período, llamado "clock error" y en los parámetros orbitales se introducen errores que generan variaciones de largo período entre la situación real del satélite y la nominal.

Los usuarios autorizados disponen de adecuado contraprocés para recuperar la precisión original, eludiendo así la SA en posicionamiento absoluto, estándar o preciso.

El posicionamiento relativo diferencial no se ve seriamente afectado. Una precisión absoluta de 25 metros en una figura geodésica trilaterada con lados de más de 20000 Km representa 1 ppm y esa sería la precisión obtenible y aplicable a la red de vértices en tierra.

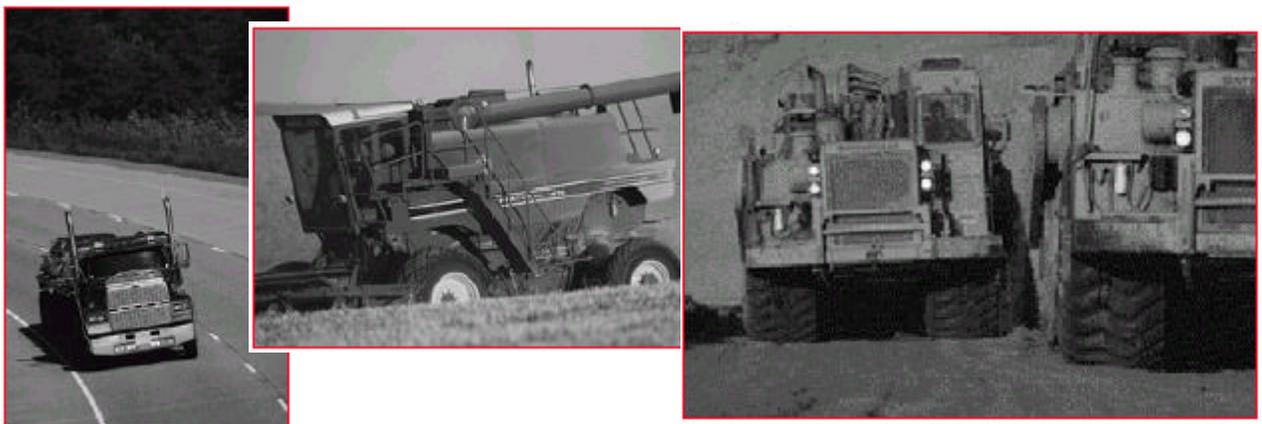
Si la precisión absoluta pasa a ser de 120 metros, la relativa se degrada a 5 ppm, que en principio sería esperable en posicionamiento relativo. Hay que tener en cuenta que los estados se eliminan en el proceso matemático, mejorando la precisión.

El problema casi se elimina si en el proceso de cálculo, en lugar de usar las efemérides radiodifundidas, usamos efemérides precisas en las que se interpola la posición del satélite para cada evento observado.

El sistema GPS ha sido oficialmente declarado operativo, y la SA está activada definitivamente.

En el Mayo de 2000 el Gobierno Americano dio por finalizado la activación de la SA (Disponibilidad Selectiva).

1.3.2. SEGMENTO USUARIO



El segmento de Usuarios comprende a cualquiera que reciba las señales GPS con un receptor, determinando su posición y/o la hora. Algunas aplicaciones típicas dentro del segmento Usuarios son: la navegación en tierra para excursionistas, ubicación de vehículos, topografía, navegación marítima y aérea, control de maquinaria, etc.

Hablando de la utilización del GPS como instrumento topográfico este segmento comprende los siguientes elementos:

El equipo de campo estaría compuesto de los siguientes elementos:

- Antena: Componente que se encarga de recibir y amplificar la señal recibida por los satélites.



Antena GPS Tipo Choke Ring



Antena GPS Tipo MicroStrip

- Receptor: Recibe la señal recogida por la antena y decodifica esta para convertirla en información legible.



Receptor GPS de Doble Frecuencia

- Terminal GPS o Unidad de Control: Ordenador de campo que muestra la información transmitida por los satélites y recoge todos datos útiles para su posterior cálculo, de aplicaciones Topográficas



Terminal GPS

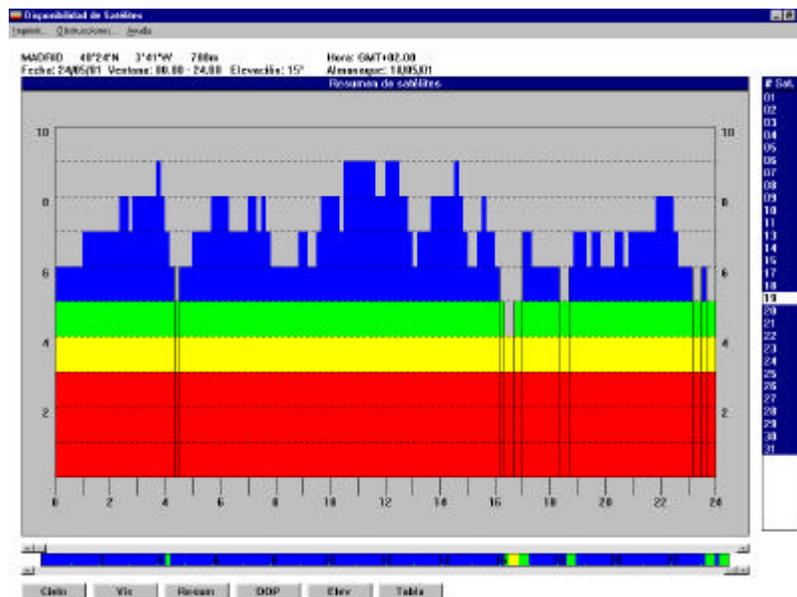


En aplicaciones de navegación o de observaciones en modo absoluto (recepción de señal con un solo receptor), por lo general, estos tres elementos irán unidos para formar una sola unidad.

Equipo de gabinete: Este lo utilizaremos cuando queramos conseguir una gran precisión utilizando el GPS en modo diferencial.

- Software de gestión y cálculo de datos: Por lo general son programas que funcionan en el entorno Windows.

- a) Deben de tener las herramientas necesarias para planificar las observaciones en función de los almanaques enviados por los satélites. El almanaque se carga automáticamente en el receptor, ya que lo envían los satélites cada 12,5 minutos. Solo nos queda introducir las coordenadas del lugar donde queremos observar la disponibilidad de satélites. Estas predicciones tienen una validez de 3 días, contando a partir de su obtención.



b) Una parte muy importante es la descarga de datos. Nos debe permitir la descarga de cualquier receptor de cualquier marca. Este formato es el RINEX, del cual hablaremos en capítulo 3.3.

c) Una opción para la gestión de proyectos. En la que podremos crear uno nuevo, abrir uno existente, moverlo de directorio, cambiarle el nombre, borrarlo, etc.

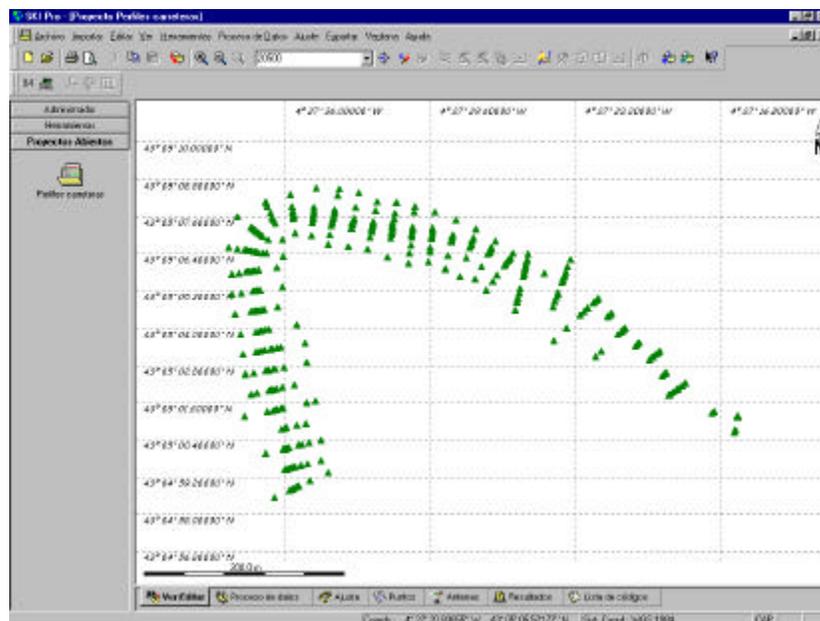
d) Una vez descargados los datos provenientes del campo en un proyecto determinado, efectuaremos el cálculo de las " Ambigüedades" de todas las líneas-bases.

e) Cuando ya hemos calculado todos los datos iremos a visualizar y editar los resultados mediante una opción del programa para ese menester.

f) Después de comprobar que los resultados están dentro de la tolerancia de nuestro trabajo, procederemos a realizar un ajuste por mínimos cuadrados, siempre y cuando las observaciones hayan sido redundantes.

g) Por último pasaremos las coordenadas que hemos obtenido de los puntos en cuestión, al sistema de referencia que necesitemos utilizar. En España, utilizamos el elipsoide de Hayford.

Este programa nos debe también proporcionar las coordenadas en cualquier proyección. Por ejemplo UTM.



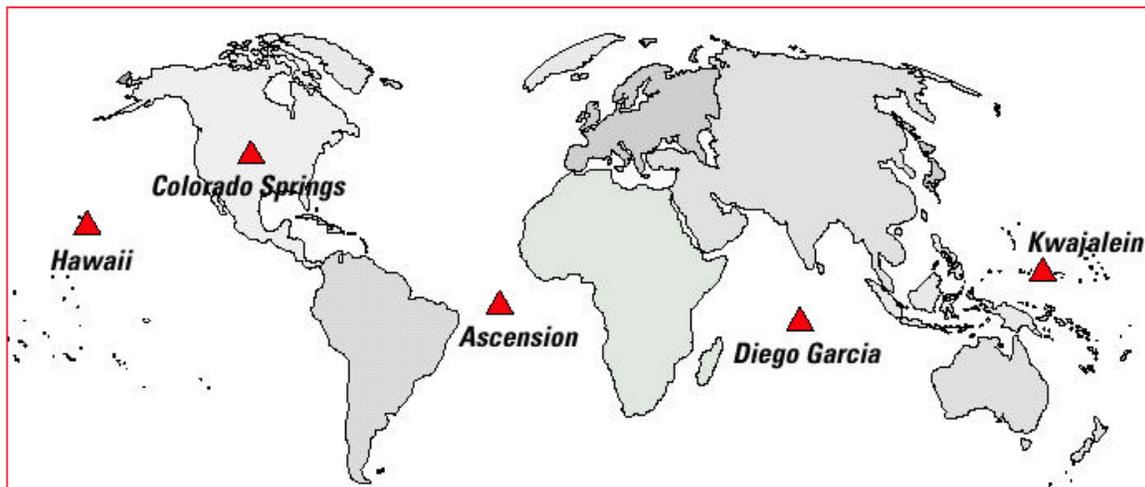
1.3.3. SEGMENTO DE CONTROL

Este segmento tiene la función de realizar el seguimiento continuo de los satélites, calcular su posición precisa, transmisión de datos y la supervisión necesaria para el control diario de todos los satélites del sistema NAVSTAR.

Existen cinco estaciones de seguimiento; una principal en Colorado Springs, y otras cuatro distribuidas en longitud, homogéneamente por todo el mundo.

El nombre de las cinco estaciones de seguimiento son las siguientes:

Colorado Springs, Ascensión, Diego García, Kwajalein y Hawaii.



Localización de las estaciones del segmento Control

Los datos de las estaciones de seguimiento, cuyas posiciones son perfectamente conocidas, son transmitidos a la estación principal de control. Aquí las órbitas de los satélites son predichas junto con las correcciones del oscilador de los satélites. Estos datos son entonces transmitidos al correspondiente satélite, formando una parte esencial del mensaje-satélite.

La sincronización del tiempo de los satélites es una de las más importantes misiones del segmento control. Por ello, la estación principal de control está conectada directamente con el tiempo standard del observatorio naval de los Estados Unidos en Washington D.C.

1.4 MEDIDAS DE DISTANCIAS A SATELITES Y METODO

DIFERENCIAL

MEDICION DE SEUDODISTANCIAS.

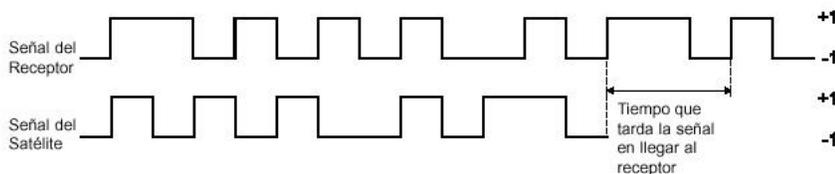
Con los métodos de medición de caracteres del GPS, se miden distancias entre la antena del receptor y los satélites.

Para la solución geométrica son suficientes tres mediciones de este tipo. La posición de la antena viene dada por el punto de intersección de tres esferas, con la posición de los satélites como centro de las esferas, y tres distancias medidas como radios. La distancia desde el receptor al satélite se obtiene por medio de una medición del tiempo de propagación con ayuda del código C/A, o bien, el código P. Simplificando se puede representar como sigue: El satélite transmite un impulso (código), el cual contiene como información adicional el instante de la emisión (a). En el receptor se mide el momento de llegada (b) del impulso y se lee la información contenida sobre el instante de emisión. La diferencia de tiempo (b-a) multiplicada por la velocidad de propagación de la señal da la distancia, siempre que el reloj del satélite y del receptor estén perfectamente sincronizados.

Ya que normalmente éste no es el caso, se obtiene una distancia falsa proporcional a la diferencia de relojes.

Cálculo del Tiempo

La señal del satélite es modulada por dos códigos, el Código C/A y el Código P (véase la sección 2.1). El código C/A está basado en el tiempo marcado por un reloj atómico de alta precisión. El receptor cuenta también con un reloj que se utiliza para generar un código C/A coincidente con el del satélite. De esta forma, el receptor GPS puede "hacer coincidir" o correlacionar el código que recibe del satélite con el generado por el receptor.



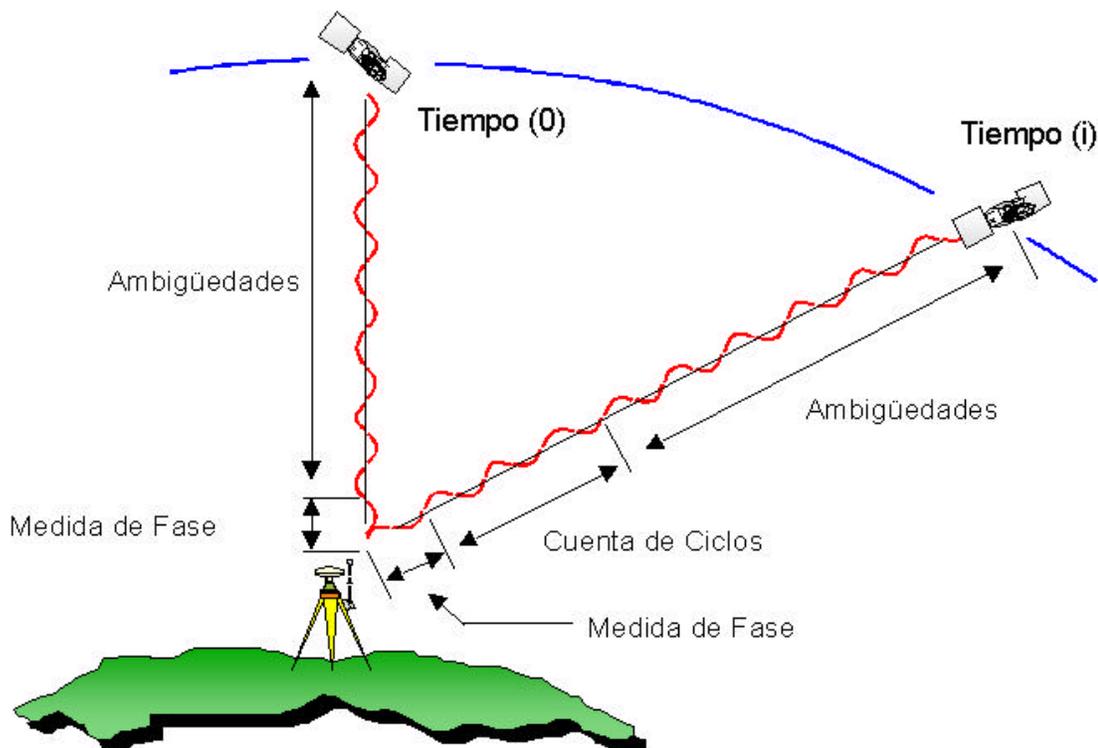
El código C/A es un código digital que es 'seudo aleatorio', o que aparenta ser aleatorio. En realidad no lo es, sino que se repite mil veces por segundo.

De esta forma es como se calcula el tiempo que tarda en viajar la señal de radio desde el satélite hasta el receptor GPS.

MEDICION DE DISTANCIAS CON MEDIDAS DE FASE

Contrariamente a la pseudodistancia, en la que se mide el tiempo de propagación con ayuda de los códigos modulados C/A o P, aquí se mide el desfase de la onda portadora. La fase de la señal llegada del satélite es comparada con la fase de una señal de referencia generada en el receptor.

Del desfase se obtiene una parte de la distancia como parte de la longitud de onda; esto significa en la medición hecha en la frecuencia L1, una parte de la distancia comprendida en 19 cm; en la frecuencia L2, en 24 cm, y esto con resolución en el ámbito submilimétrico. En principio, el número de longitudes de ondas completas en la distancia satélite - Receptor-, permanece desconocido. Por ello, el programa de cálculo tiene que estar en condiciones de determinar el número de longitudes de onda desconocidas, para poder calcular las coordenadas de la estación.

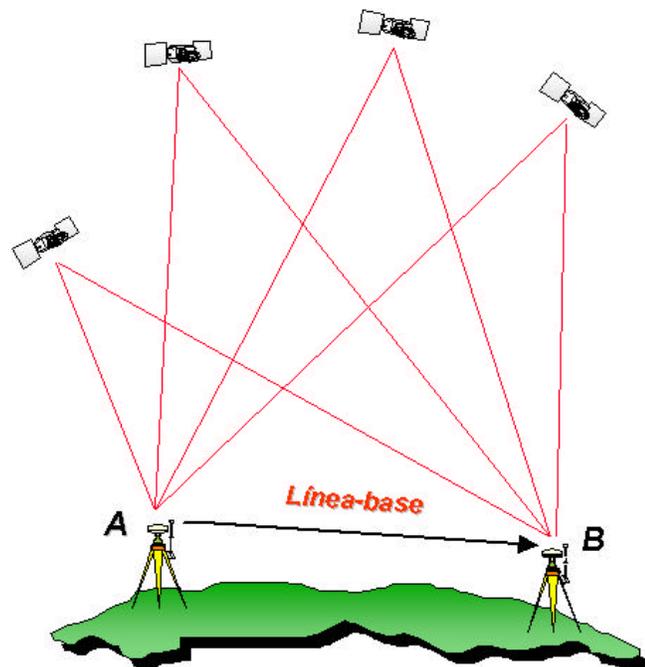


METODO DIFERENCIAL

Las señales de los satélites son recibidas simultáneamente por dos receptores. Con este método se anulan hasta un cierto grado errores inevitables como la imprecisión de la órbita del satélite y se obtiene con ello una mayor precisión que con la determinación de un punto aislado. Se utiliza aquí el método de medición de fase que da una mayor precisión que el de la medida de la pseudodistancia. Evidentemente es necesario restituir en un ordenador los puntos medidos en distintas estación.

Los errores que se eliminan utilizando el método diferencial son los siguientes:

- **Disponibilidad selectiva (SA)**
- **Retardo ionosférico.**
- **Retardo troposférico.**
- **Error en las efemérides.**
- **Error reloj satélite.**



1.5. FUENTES DE ERROR

Igualmente que en todos los equipos que utilizamos, una observación GPS también está sometida a varias fuentes de error que se pueden minimizar dependiendo del equipo que utilicemos y metodología de la observación. Estas fuentes de error son las siguientes:

Satélites:

- Variaciones Orbitales.
- Errores en el oscilador.

DoD:

- S/A. Disponibilidad Selectiva.

Punto de referencia:

- Error del oscilador receptor.
- Error en las coordenadas referencia.

Observaciones:

- Retrasos ionosféricos.
- Retrasos Troposféricos.
- Pérdidas de ciclos.
- Errores de medida de fase con el receptor en movimiento.
- Multipath. Ondas reflejadas.
- Errores en el estacionamiento.
- Errores en la manipulación del equipo.

Estos errores se reducen de la siguiente manera:

El sesgo del oscilador de los satélites mediante las correcciones enviadas por las estaciones de seguimiento.

El sesgo orbital mediante las efemerides radiofundidas igualmente las estaciones de seguimiento. Se puede conseguir las efemerides precisas de un día de observación.

El retraso ionosferico mediante la utilización de dos frecuencias y el proceso diferencial.

El multipath. Se situará la antena de tal forma que evitemos este tipo de ondas y nos serviremos de planos de tierra si es preciso.

Los errores debidos al oscilador del receptor los resolveremos observando diferencialmente.

Los errores de manipulación se producen cuando no se siguen las indicaciones del fabricante del instrumento y que suelen descuidarse cuando se trabaja rutinariamente.

Por ejemplo, es importante que no se comience una observación hasta que no se haya sincronizado perfectamente con los satélites ya que lo único que estaremos haciendo es introducir ruido a la observación.

MODELOS DE ERRORES

FUENTE DE ERROR	ERROR TIPICO	COMO CORREGIR
ORBITA SATELITES	20 M.	DIFERENCIAL
RELOJ SATELITES	10 M.	DIFEREN CIAL
RETARDO IONOSFER.	50 M.	DIFER.+2 FREC.
RETARDO TROPOSFE.	2.3 M.	MODELO+DIFERENC.
MULTIPATH	10 M.	SITUCION ANTENA
RELOJ RECEPTOR	10 M.	POST-PROCESO
RUIDO	MM. PORTADORA	CODIGO

1.6 D.O.P., MASCARAS DE ELEVACION Y ACIMUT DE SATELITES.

a) D.O.P. (Dilution of precision)

Es la contribución puramente geométrica a la incertidumbre de un posicionamiento.

Es un valor adimensional descriptivo de la "solidez" de la figura observable constituida por los satélites.

Su valor ideal es 1, si la geometría empeora, el valor aumenta, llegándose a producir un "outage" o situación en la que, aunque haya sobrados satélites a la vista, deba suspenderse la observación porque el DOP llegue a exceder de un cierto valor preestablecido, como 6, límite habitualmente empleado. El DOP es un factor por el que debe ser multiplicado el error obtenido en las determinaciones de distancias a los satélites para establecer el correspondiente error de posicionamiento.

*Los **DOPs** mas utilizados son:*

** GDOP: tres coordenadas de posición y estado del reloj.*

** PDOP: tres coordenadas de posición.*

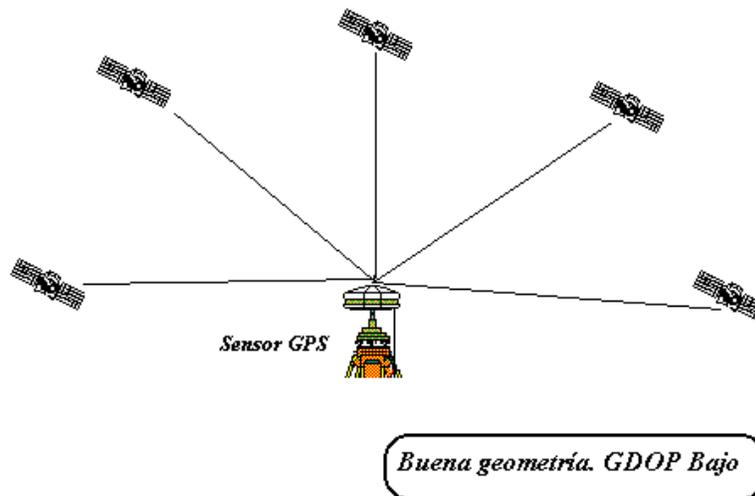
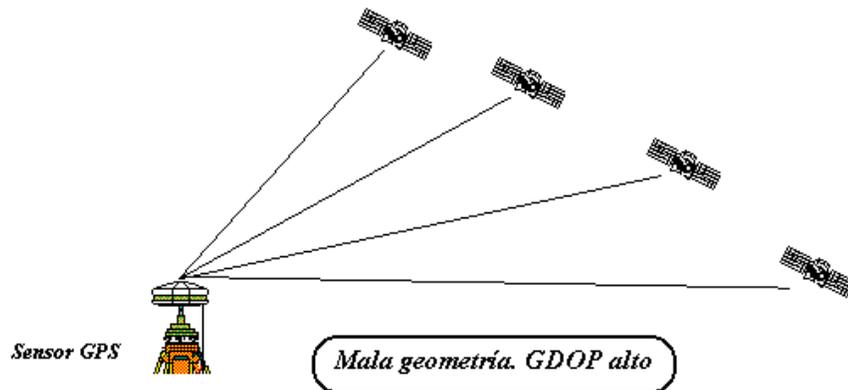
** HDOP: dos coordenadas de posición planimétrica.*

** VDOP: solo la altitud.*

** TDOP: solo estado del reloj.*

GDOP (Geometry Dilution Of Precision)

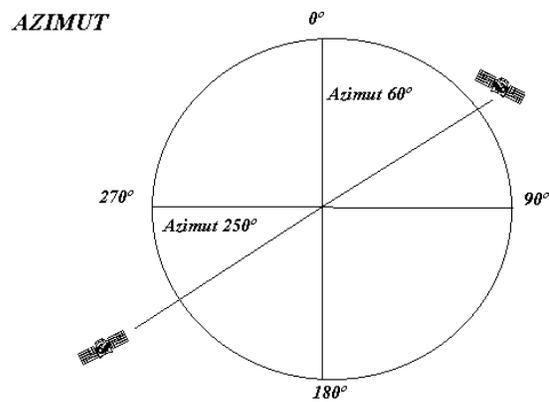
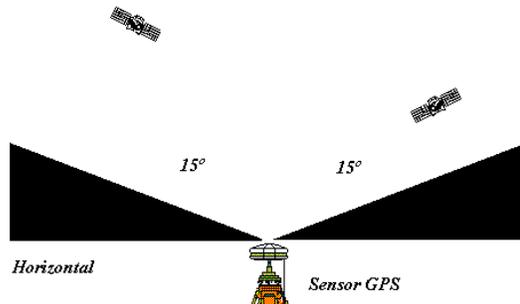
GDOP: Es un indicador de la precisión en el posicionamiento.



GDOP ideal: un satélite en el cenit con los otros satélites distribuidos homogeneamente sobre el horizonte.

b) MASCARAS DE ELEVACION

Es el ángulo de elevación mínimo que tendrán los satélites para que recibamos señal de estos. Este ángulo es configurable y se considera como el mínimo ideal de 15° de elevación, ya que por debajo de este ángulo, la señal recibida de los satélites, está muy influenciada por la refracción atmosférica.

AZIMUT Y MASCARA DE ELEVACION**MASCARA DE ELEVACION**

1.7. SISTEMAS DE REFERENCIA GPS (WGS84) Y SISTEMAS LOCALES DE REFERENCIA.

La determinación de una posición con GPS consigue un objetivo fundamental de la Geodesia: la determinación absoluta de una posición con precisión uniforme en todos los puntos sobre la superficie de La Tierra. Utilizando la geodesia clásica y técnicas topográficas, la determinación de la posición es siempre relativa a los puntos de partida del levantamiento, la precisión obtenida es dependiente de la distancia a este punto. Por lo tanto, el GPS ofrece ventajas sobre las técnicas convencionales. La ciencia de la geodesia es fundamental para el GPS y, a la inversa, el GPS se ha convertido en la herramienta principal de la geodesia. Esto se hace evidente si recordamos los objetivos de la Geodesia:

1. Establecer y mantener las redes de control geodésico tridimensionales nacionales y globales en tierra, tomando en cuenta la naturaleza cambiante de estas redes debido al movimiento de las placas tectónicas.
2. Medición y representación de fenómenos geofísicos (movimiento de los polos, mareas terrestres y movimiento de la corteza).
3. Determinación del campo gravitacional de La Tierra, incluyendo las variaciones temporales. Aunque la mayoría de usuarios nunca llevan a cabo las tareas mencionadas, es esencial que los usuarios de equipo GPS tengan un conocimiento general de la geodesia.

Aunque la Tierra parezca ser una esfera uniforme cuando se la observa desde el espacio, su superficie dista mucho de ser uniforme. Debido al hecho de que el GPS debe proporcionar coordenadas en cualquier lugar de la superficie terrestre, este utiliza un sistema de coordenadas geodésico basado en un elipsoide. Un elipsoide (también conocido como esferoide) es una esfera aplanada o achatada.

El elipsoide elegido será aquel que se ajuste más exactamente a la forma de la Tierra. Este elipsoide no tiene una superficie física, sino que es una superficie definida matemáticamente. Actualmente existen diversos elipsoides o lo que es lo mismo, diferentes definiciones matemáticas de la superficie de la Tierra, tal como lo discutiremos más adelante. El elipsoide utilizado por el GPS es conocido como WGS84 o Sistema Geodésico Mundial 1984 (por sus siglas en inglés World Geodetic System 1984).

Un punto sobre la superficie de La Tierra (esta no es la superficie del elipsoide), puede ser definido utilizando su Latitud, su Longitud y su Altura Elipsoidal.

El sistema convencional de referencia terrestre (CTRS) adoptado para el posicionamiento GPS es el denominado World Geodetic System 1984 (WGS84), definido por:

- Origen en el geocentro.
- Eje Z paralelo a la dirección del Origen Convencional Internacional (C.I.O), posición del polo medio en 1903
- El eje X es la intersección del plano meridiano de referencia y el plano del ecuador astronómico medio
- El eje Y, situado en este plano, constituye con X,Z un sistema coordenado rectangular dextrorsum

Los valores de las constantes son:

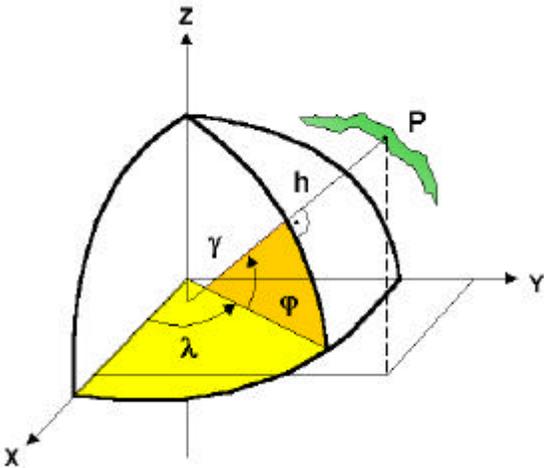
$$a = 6378137 \text{ metros (semieje mayor)}$$

$$b = 6356752,3 \text{ metros (semieje menor)}$$

$$u = 3986005 * 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2 \text{ (cte gravitacional)}$$

$$w = 7292115 * 10^{-11} \text{ rd/s (velocidad de rotación)}$$

Un método alternativo para definir la posición de un punto es utilizando el sistema de Coordenadas Cartesiano, empleando las distancias sobre los ejes X, Y y Z desde el origen o centro del esferoide. Este es el método básico que emplea el GPS para definir la posición de un punto en el espacio.



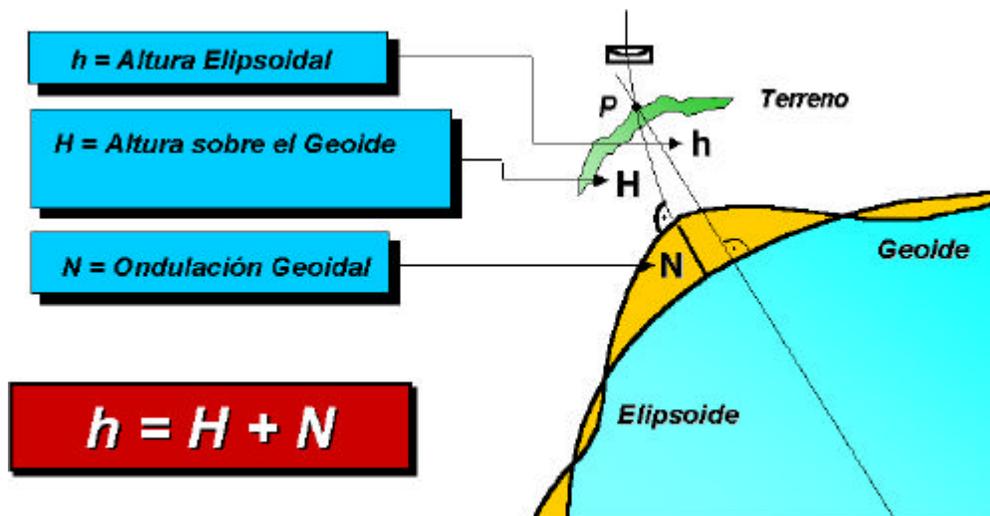
De la misma manera que con las coordenadas GPS, las coordenadas locales o lo que es lo mismo las coordenadas utilizadas en la cartografía de un país en particular, están basadas en un elipsoide local, diseñado para coincidir con el geode de la zona. Usualmente, estas coordenadas serán proyectadas sobre la superficie de un plano para proporcionar coordenadas de cuadrícula.

Los elipsoides utilizados en la mayoría de los sistemas de coordenadas locales alrededor del mundo fueron definidos por primera vez hace muchos años, antes de la aparición de las técnicas espaciales.

Estos elipsoides tienden a acomodarse lo mejor posible al área de interés, pero no podrían ser utilizados en otras zonas de la Tierra. De aquí que cada país definiera un sistema cartográfico/ marco de referencia basado en un elipsoide local. Cuando se utiliza GPS, las coordenadas de las posiciones calculadas están basadas en el elipsoide WGS84. Generalmente, las coordenadas existentes están en el sistema de coordenadas locales, por lo que las coordenadas GPS deben ser transformadas a este sistema local.

La naturaleza del sistema GPS también afecta la medición de la altura. Todas las alturas medidas con GPS están dadas con relación a la superficie del elipsoide WGS84. Estas son conocidas como Alturas Elipsoidales. Las alturas existentes son alturas ortométricas medidas en relación con el nivel medio del mar. El nivel medio del mar corresponde a una superficie conocida como geode. El Geode puede ser definido como una superficie equipotencial, lo que significa que la fuerza de la gravedad es constante en cualquier punto sobre el geode.

El geoide tiene una forma irregular y no corresponde a ningún elipsoide. La densidad de La Tierra tiene, sin embargo, un efecto sobre el geoide, provocando que éste se eleve en las regiones más densas y caiga en las regiones menos densas. La relación entre el geoide, el elipsoide y la superficie de la Tierra, se muestra en la siguiente ilustración. Debido a que la mayoría de los mapas existentes muestran las alturas ortométricas (relativas al geoide), la mayoría de usuarios de GPS requieren que las alturas sean también ortométricas



Este problema es resuelto mediante el uso de modelos geoidales para convertir las alturas elipsoidales en alturas ortométricas. En áreas relativamente planas, el geoide puede ser considerado como constante. En tales áreas, el empleo de ciertas técnicas de transformación puede crear un modelo de alturas y las alturas geoidales pueden ser interpoladas a partir de los datos existentes.

Todas las redes geodésicas están calculadas sobre un sistema de referencia local definido por:

- Elipsoide de referencia.
- Punto fundamental (donde coinciden la vertical astronómica y geodésica).
- Origen de longitudes.

- Origen de altitudes.

Para poder utilizar las observaciones GPS deberemos pasar del sistema WGS84 al sistema geodésico local. En el caso de España este sistema es el ED50 definido por:

- 1- Elipsoide de Hayford
- 2- Punto fundamental Postdam
- 3- Longitudes referidas al meridiano de Greenwich
- 4- Altitudes referidas al geoide (datum en Alicante)

El primer problema se plantea entre las altitudes, al estar el WGS84 referido al elipsoide y el ED50 al geoide.

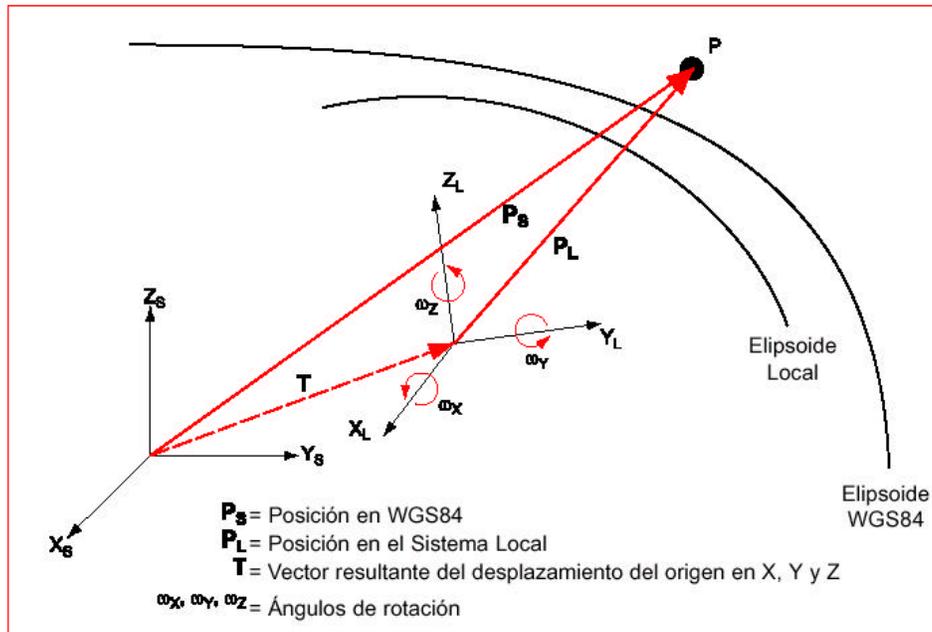
Así, para pasar de uno a otro deberemos conocer la ondulación del geoide N respecto al elipsoide medido sobre la normal al elipsoide.

El propósito de estas es el de transformar coordenadas de un sistema a otro. Se han propuesto diferentes métodos para llevar a cabo las transformaciones. La elección de alguno de ellos dependerá de los resultados requeridos. El procedimiento básico de campo para la determinación de los parámetros de transformación es el mismo, independientemente del método a emplear. Primero, se debe contar con coordenadas en ambos sistemas de coordenadas (por ejemplo en WGS84 y en el sistema local) para tener por lo menos tres puntos comunes. A mayor cantidad de puntos comunes incluidos en la transformación, se tendrá mayor oportunidad de tener redundancia y se podrán verificar los errores. Se consiguen puntos comunes midiendo los puntos con GPS, donde las coordenadas y las alturas ortométricas sean conocidas en el sistema local. (Por ejemplo, en los puntos de control existentes). De esta forma se pueden calcular los parámetros de transformación, utilizando alguno de los métodos de transformación.

Es importante notar que la transformación sólo se deberá aplicar a los puntos que se encuentren en el área delimitada por los puntos comunes en ambos sistemas. Los puntos fuera de esta área no deberán ser transformados utilizando los parámetros calculados, sino que deberán formar parte de una nueva área de transformación.

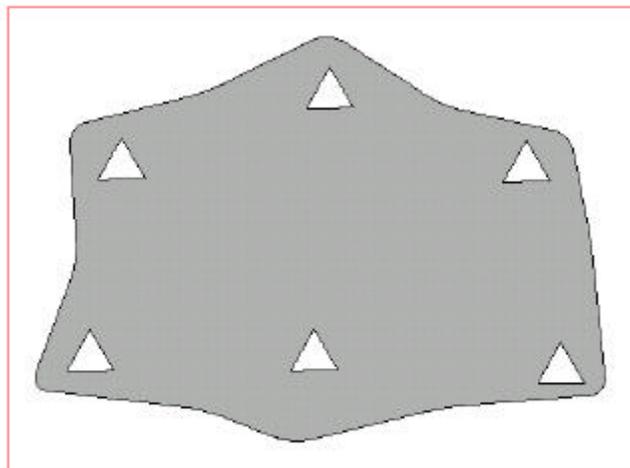
Transformación Helmert

La transformación de 7 parámetros de Helmert ofrece una transformación matemáticamente correcta. Esta transformación conserva la precisión de las mediciones GPS y las coordenadas locales.



Transformación de 7 parámetros de Helmert

En la gran mayoría de casos, los puntos medidos previamente no serán tan precisos como los puntos medidos con GPS., lo cual puede provocar una falta de homogeneidad en la red. Al transformar un punto entre diferentes sistemas de coordenadas, lo mejor es tener en cuenta que lo que cambia es el origen desde el cual se derivan las coordenadas y no la superficie sobre la cual se apoyan.



Transformaciones aplicadas en un área de puntos comunes

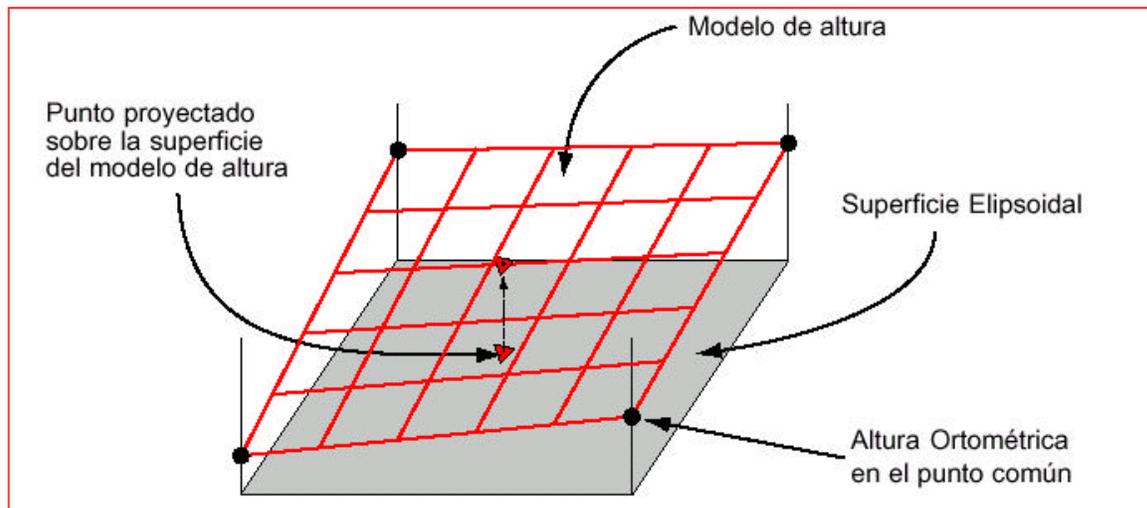
La experiencia ha demostrado que comúnmente, los levantamientos con GPS son medidos con un nivel de precisión mucho más alto que los antiguos levantamientos efectuados con instrumentos ópticos tradicionales.

Para transformar una coordenada de un sistema a otro, los orígenes y ejes del elipsoide deben ser conocidos uno con relación al otro.

Con esta información, el desplazamiento en el espacio de X, Y y Z desde un origen hasta el otro, puede ser determinado, seguido de una rotación alrededor de los ejes X, Y y Z y cualquier cambio en la escala entre los dos elipsoides.

Otros métodos de transformación

Mientras que el método de transformación de Helmert es matemáticamente correcto, no toma en cuenta las irregularidades en el sistema de coordenadas locales, y para obtener valores precisos de altura, debe conocerse el valor de la ondulación geoidal. El llamado **Método de Interpolación o Transformación Afín** no se basa en el conocimiento del elipsoide local ni de la proyección.



Modelo de altura generado por 4 puntos conocidos

Las inconsistencias en las coordenadas locales se tratan estirando o encogiendo las coordenadas GPS para poder encajar de manera homogénea en el sistema local. Además, si se tiene disponible suficiente información altimétrica, se puede construir un modelo de alturas. De esta manera se compensa la falta de información de ondulación geoidal, siempre y cuando se cuente con suficientes puntos de control.

Un método alternativo al de Interpolación es el llamado de **Un paso**, el cual trabaja también con las transformaciones de altura y posición en forma separada. Para transformar la posición, las coordenadas WGS84 se llevan a una proyección Transversa de Mercator temporal. De esta forma, se calculan los giros, desplazamientos y el factor de escala de la proyección "temporal" a la proyección verdadera. La transformación de la altura es un cálculo de la misma en una sola dimensión. Este tipo de transformación se puede emplear en áreas donde no se conoce el elipsoide local ni la proyección y donde además, el geoide se mantiene razonablemente constante. Tanto el método de Interpolación como el de Un Paso deben estar limitados a un área de más o menos 15km x 15km.

Una combinación de los métodos de transformación de Helmert e Interpolación se puede encontrar en el método "**Stepwise**". Este método emplea una transformación de Helmert 2D para obtener la posición y una interpolación de alturas para obtener las alturas. Este método requiere del conocimiento del elipsoide local y de la proyección.

Proyecciones y Coordenadas Planas

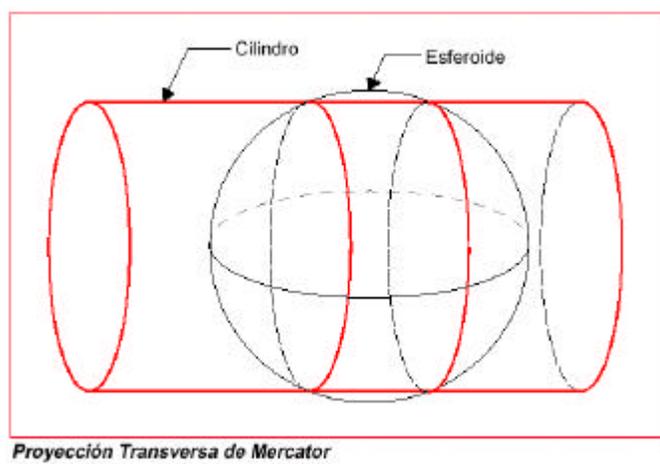
La mayoría de topógrafos mide y registra coordenadas en un sistema de cuadrícula ortogonal. Esto significa que los puntos están definidos por su coordenada Este, su coordenada Norte y su altura ortométrica (altura sobre el nivel del mar). Las proyecciones de mapas les permiten a los topógrafos representar una superficie curva tridimensional sobre una hoja de papel plana. Estas proyecciones se muestran como planos, pero realmente definen pasos matemáticos para especificar las posiciones sobre un elipsoide en términos de un plano. La forma en que una proyección trabaja se muestra en el diagrama. Los puntos sobre la superficie del esferoide son proyectados sobre la superficie plana desde el origen del esferoide. El diagrama pone de manifiesto el problema de la

imposibilidad de representar dimensiones verdaderas o formas sobre tales planos. Las dimensiones verdaderas se pueden representar sólo donde el plano corta al esferoide.

La Proyección Transversa de Mercator es una proyección conforme. Esto significa que las mediciones angulares realizadas sobre la superficie de la proyección son verdaderas. La proyección está basada en un cilindro que es ligeramente más pequeño que el esferoide y después se desarrolla en forma horizontal. Este método es utilizado por muchos países y se adapta especialmente a países grandes cerca del ecuador.

La Proyección Transversa de Mercator se define por:

- Falso Este y Falso Norte.
- Latitud de Origen
- Meridiano Central
- Factor de Escala sobre el Meridiano
- Ancho de Zona



El Falso Este y el Falso Norte se definen de tal manera que el origen de la cuadrícula de la proyección se pueda ubicar en la esquina inferior izquierda, tal como lo establece la convención general.

Con esto se elimina la posibilidad de coordenadas negativas.

La **Latitud de Origen** define la Latitud del eje del cilindro. Generalmente corresponde al ecuador (en el hemisferio norte).

El **Meridiano Central** define la dirección del norte de la cuadrícula y la Longitud del centro de la proyección.

La escala varía en la dirección este-oeste.

Como el cilindro es, por lo general, más pequeño que el esferoide, la **Escala en el meridiano Central** es demasiado pequeña, siendo correcta en las elipses de intersección y muy grande en los bordes de la proyección.

La escala en la dirección norte-sur no cambia. Por esta razón, la Proyección Transversa de Mercator es la más adecuada para cartografiar áreas que se extienden en dirección norte-sur. La proyección UTM cubre al mundo entre los 80° de latitud norte y los 80° de latitud sur. Es un tipo de proyección transversa de Mercator, donde muchos de los parámetros de definición se mantienen fijos. La Proyección UTM se divide en zonas de 6° de longitud con zonas adyacentes que se superponen 30'. El parámetro que las define es el Meridiano Central o el Número de la Zona. (Cuando se define uno, el otro queda implícito).

El **Ancho de Zona** define la porción del esferoide en la dirección este-oeste sobre la cual se aplica la proyección.

TEMA II:
TIPOS DE INSTRUMENTOS GPS DEPENDIENDO DE
LAS OBSERVABLES.

DIVISION DE EQUIPOS GPS

El criterio que se utiliza para realizar la división de los equipos GPS es la precisión que pueden alcanzar, así como su aplicación.

METODO	FRECUENCIA	OBSERVABLE	PRECISION	APLICACION
ABSOLUTO	L1	CODIGO C/A	± 100 Metros	NAVEGACION
DIFERENCIAL	L1	CODIGO C/A	1-2 Metros	CARTOG/GIS
DIFERENCIAL	L1	C/A y FASE	1 cm. ± 2 ppm.	TOPOGRAFIA
DIFERENCIAL	L1 y L2	C/A, P y FASE	5 mm. ± 1ppm.	TOPOG./GEO

1.- NAVEGADORES:



Solo reciben datos de código C/A por la portadora L1.

Los equipos para navegación son receptores GPS muy sencillos y de bajo precio.

Son equipos que funcionan autónomamente, no necesitan descargar datos para conseguir la precisión menor de los 100 m.

Son muy sencillos de manejar, con Firmware específicos para la navegación.

Suelen tener accesorios para la colocación de antenas sobre barcos.

2.- GPS SUBMETRICOS:

Son receptores GPS con recepción de las mismas observables que los anteriores. L1 solo código C/A.

La gran diferencia con los anteriores es que ya trabajan diferencialmente, es decir, un equipo de referencia, grabando datos continuamente y el equipo móvil tomando los puntos que deseemos levantar ya sea de modo estático o bien cinemático.

Las precisiones que se pueden conseguir oscilan desde los 30 cm. a los 10 m. dependiendo del tipo de equipo que tome los datos y el programa que los procese.

Las aplicaciones de estos equipos se encuadran en la cartografía y GIS.



3.-GPS MONOFRECUENCIA DE CODIGO Y FASE:

Estos receptores al igual que los anteriores toman todas sus observables de la portadora L1, pero con la diferencia de que además de tomar medidas de código C/A también realizan medida de fase. También trabajan en modo diferencial, es decir, se necesitan dos receptores tomando medidas simultáneamente, referencia y móvil. La principal ventaja es el aumento de la precisión en el levantamiento de puntos. Con estos equipos se pueden realizar posicionamientos Estáticos, Estático Rápido, Stop&go, cinemático y también es posible trabajar en Tiempo Real con la precisión que proporciona la medida de código. La precisiones nominales para estos equipos son $1\text{cm}+2\text{ppm}$, esto nos permite el utilizarlos para aplicaciones Topográficas.

4.- GPS DOBLE FRECUENCIA

Se trata de los equipos de mayor precisión y son los equipos por excelencia para Topografía y Geodesia. Toman observables de ambas portadoras emitidas por los satélites L1 y L2, realizando medidas de Código C/A y P en L1, de Código P en L2 y medidas de fase en L1 y L2. Como se puede apreciar, estos equipos incluyen a todos los anteriores añadiendo las medidas sobre la portadora L2.



Los posicionamientos posibles con estos equipos son: Estático, Estático Rápido, Stop&Go, Cinemático y KOF como métodos de postproceso y además la posibilidad de realizar todos éstos en Tiempo Real. La principal ventaja con respecto a los equipos monofrecuencia con medida de fase es un aumento en la precisión hasta 5mm+1ppm y sobre todo una enorme disminución en los tiempos de observación. Las aplicaciones de estos equipos abarcan el mundo de la Topografía y la Geodesia.

***TEMA III:
POSICIONAMIENTOS GPS, METODOS Y
APLICACIONES.***

INTRODUCCION

Debido a sus numerosas ventajas en materia de precisión, rapidez, polivalencia y productividad, el sistema GPS se está empleando cada vez más en topografía. No obstante, debe tenerse en cuenta que las técnicas empleadas son muy diferentes a los de métodos clásicos.

Siempre que se respeten determinadas reglas fundamentales, las medidas GPS no presentan dificultades y ofrecen buenos resultados. Desde el punto de vista práctico, sin duda es más importante conocer las reglas de base relativas a la planificación, la observación y los cálculos GPS, antes que disponer de conocimientos teóricos profundos sobre el sistema de posicionamiento global.

3.1. POSICIONAMIENTO ABSOLUTO.

Decimos que un posicionamiento es absoluto, cuando se calcula la posición del punto utilizando las medidas de pseudodistancia ya sea procedentes del código C/A, o código P. Dependiendo del código que utilicemos y de la disponibilidad selectiva obtendremos una precisión que variará de 15 a 100 m. Este tipo de posicionamiento es utilizado por los equipos llamados navegadores.

Gracias a los últimos avances tecnológicos, y la desaparición de la disponibilidad selectiva, existen en el mercado receptores que alcanzan precisiones de 3-5 m en tiempo real.



3.2 POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL

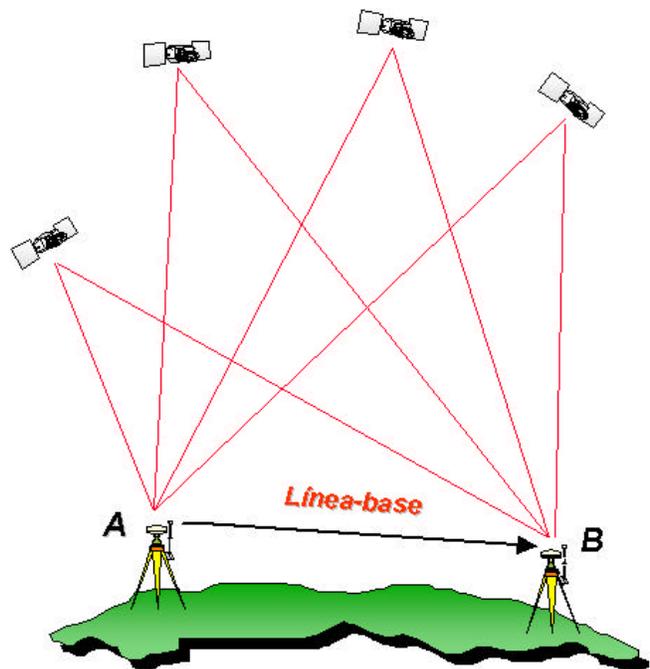
Llamamos posicionamiento diferencial cuando están involucrados dos o más instrumentos GPS, con el fin de eliminar los errores propios del sistema GPS, calculando los incrementos de coordenadas desde el equipo de referencia al móvil.

Este incremento de coordenadas vendrá dado en el sistema geocéntrico de coordenadas.

La gran ventaja de este método es que los errores de posicionamiento muy similares o comunes en ambos puntos, no tienen ninguna influencia en los incrementos de coordenadas.

Recordamos los errores que eliminaba:

- **Disponibilidad selectiva (SA)**
- **Retardo ionosférico.**
- **Retardo troposférico.**
- **Error en las efemérides.**
- **Error reloj satélite.**



Dentro del método diferencial y atendiendo al tipo de aplicación, tendríamos que hacer una nueva distinción:

Método diferencial con Código (precisiones de 0,3 m. a 5 m.)

Estáticos : entidades puntuales y nodos de entidades lineales y de áreas

Cinematicos: Levantamientos de entidades lineales y de área sin nodos intencionados, es decir levantados por tiempo de manera automática.

Método diferencial con medidas de fase (precisiones de 5 mm. a 30 mm.)

3.2.1. METODO ESTATICO.

3.2.1.1 ESTATICO

Este método se utiliza para distancias largas (por lo general mayores de 20 Km.) y la más alta precisión. Es la medición clásica de líneas bases.

Consiste en estacionar dos receptores o más receptores en los puntos los cuales queremos conocer sus coordenadas, almacenar datos y calcular las coordenadas en tiempo diferido.

En este tipo de posicionamiento se obtienen soluciones tan redundantes como deseemos, tan solo deberemos prolongar la observación.

** E.M.C. de una línea- base: 3 mm. \pm 0,5 ppm.*

** Método estándar para distancias superiores a 20 Km.*

- *Precisión de milímetros en líneas- bases cortas.*



Tendremos que recordar que las coordenadas que se obtienen están referidas al elipsoide WGS-84, y como recordamos tendremos que incluir en la medición de está triangulación, al menos 3 puntos de coordenadas conocidas en el sistema donde queramos dar nuestras coordenadas, que por lo general, serán UTM.

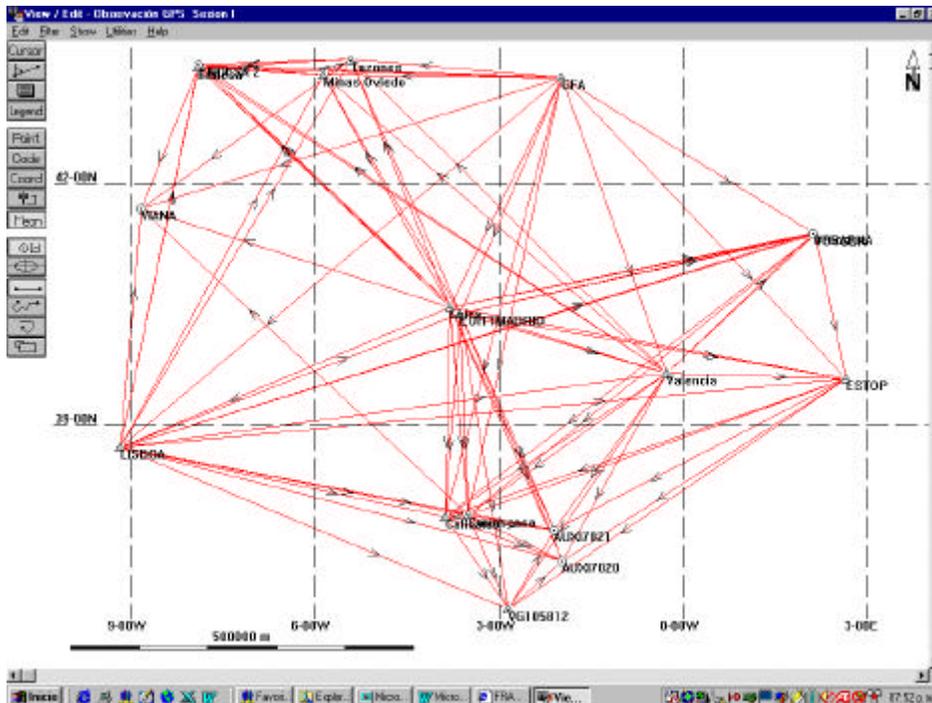
Aplicaciones:

- * Control Geodésico.
- * Redes Nacionales e internacionales.
- * Control de movimientos tectónicos.
- * Control de deformaciones en diques y estructuras.

Ventajas:

- * Más preciso, eficiente y económico que los métodos topográficos tradicionales.
- Sustituye al método clásico de triangulación.

A continuación vemos un ejemplo de una observación realizada con equipos de doble frecuencia y periodos de observación de 4 horas.



3.2.1.2 ESTÁTICO RÁPIDO.

Las distancias máximas que pueden existir entre el referencia y el móvil es de 20 Km.

La máscara de elevación que se introduce es, como se ha comentado anteriormente, de 15° de elevación y las épocas de 15 segundos (intervalo de registro de datos, varía de 1 segundo hasta 60 segundos).

* Estacionamiento de una estación de referencia temporal: observa y almacena datos de todos los satélites a la vista continuamente.

* El Receptor móvil se estaciona en el punto que se pretende levantar.

* Estaremos en el punto el tiempo que nos indique las tablas en función del Nº de satélites, Distancia a la referencia, GDOP, etc.

* Los tiempos breves de observación posibilitan una precisión de 5 a 10 mm. \pm 1 ppm. (EMC)

* Los tiempos de observación son: de 5 a 10 minutos para distancias inferiores a 5 Km.

Aplicaciones:

- Levantamientos de control, densificación.
- Sustituye a la método clásico de poligonación.
- Determinación de puntos de control, ingeniería civil, bases de replanteo.
- Levantamiento de detalles y deslindes.
- Cualquier trabajo que requiera la determinación rápida de un elevado número de puntos.
- Apoyos fotogramétricos.



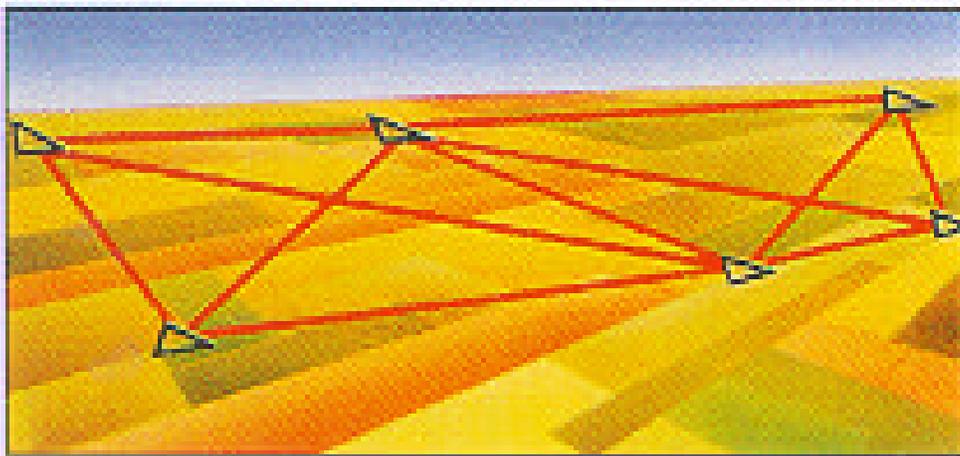
Ventajas:

- Sencillo, rápido y eficiente comparado con los métodos clásicos
- No requiere mantener el contacto con los satélites entre estaciones.
- Se apaga y se lleva al siguiente punto.
- Reducido consumo de energía.
- Ideal para un control local.
- No existe transmisión de errores ya que cada punto se mide independientemente.

Inconvenientes:

No se puede utilizar en zonas de población, cerca de edificios, debido al efecto multipath y en general en zonas que nos impidan recibir cuatro o más satélites.

Este método de posicionamiento se puede utilizar simultáneamente con el estático, realizando la triangulación con método estático y la densificación con el estático rápido, tal como se muestra en la figura.



El tiempo de observación depende de los siguientes factores:

- Longitud de la línea- base.
- Numero de satélites.

- Geometría de los satélites. GDOP.
- Ionosfera. Depende de los disturbios de la ionosfera, día/noche,
- mes, año, posición sobre la tierra.

<i>Nº de satélites GDOP <= 8</i>	<i>Longitud de la línea base</i>	<i>Tiempo de observación DIA</i>	<i>Tiempo de observación NOCHE</i>
<i>ESTAT. RAPIDO</i>			
<i>4 ó 5</i>	<i>menos de 5 Km.</i>	<i>de 5 a 10 min.</i>	<i>5 min.</i>
<i>4 ó 5</i>	<i>de 5 a 10 Km.</i>	<i>de 10 a 20 min.</i>	<i>de 5 a 10 min.</i>
<i>4 ó 5</i>	<i>de 10 a 15 Km.</i>	<i>alrededor de 30</i>	<i>de 5 a 20 min.</i>
<i>ESTATICO</i>			
<i>4 ó 5</i>	<i>de 15 a 30 Km.</i>	<i>de 1 a 2 horas</i>	<i>1 hora</i>
<i>4 ó 5</i>	<i>más de 30 Km.</i>	<i>de 2 a 3 horas</i>	<i>2 horas</i>

3.2.1.3 REOCUPACION

Este método se utiliza cuando la situación para la observación no es del todo idónea, es decir, no tenemos 4 satélites como mínimo, o bien, el GDOP es superior al permitido 8.

Este método es muy útil cuando el método estático rápido no es posible realizarlo.

Se realiza de la misma manera que el estático rápido pero estacionando en el punto dos veces, con una diferencia en el estacionamiento en el punto de una hora. La razón de hacerlo con una hora de diferencia es por que de esta manera aseguramos que vamos a recibir al menos 3 satélites distintos. Lo que hace el software es sumar la información de una y otra observación y lo calcula como si fuese una sola observación.

Alta precisión en dos pasos.

- * Estación de referencia temporal: rastrea continuamente.*
- * Receptor móvil: ocupa cada punto por breves minutos.*
- * Reocupación después de al menos 1 hora de espera.*
- * El software SKI combina las observaciones.*
- * Precisión de una línea -base: 5 a 10 mm. + 1 ppm. (EMC)*

Aplicaciones:

- * Las mismas que el rápido estático.*

Ventajas:

- * La precisión depende menos de la constelación de satélites que en el modo estático rápido.*
- * Buenos resultados con solo 3 Satélites.*
- * Método ideal cuando las condiciones dadas no son adecuadas para el estático rápido o cuando por obstrucciones se reduce el número de satélites disponibles.*

3.2.2. METODOS CINEMATICOS

El receptor de referencia se estaciona siempre en posicionamiento estático, el que se mueve es el receptor móvil.

3.2.2.1 CINEMATICO

Como hemos dicho anteriormente, el de referencia siempre estará estático. El móvil se inicializará de dos formas, con estático rápido, o bien partiendo de un punto conocido.

Las épocas a cadencia de toma de datos se realizará en función a la cantidad de puntos que queramos levantar.

Se dice que el mínimo de satélites que tenemos que tener sobre el horizonte es de 5, ya que de esta forma podremos perder un satélite en el transcurso de la operación de medición. El valor del GDOP nunca debe de exceder 8, aunque para obtener una buena precisión el valor debería ser 5 ó menos.

Medición de trayectorias y de objetos en movimiento.

- Estación de referencia temporal: Rastrea continuamente.
- Estación móvil en un vehículo, embarcación, plataforma, etc.
- Antes de desplazarlo, algunos minutos de observación estática en el punto inicial para determinar las coordenadas de salida u ocupar un punto de coordenadas conocidas durante 2 segundos.
- Mediciones en intervalos preseleccionados, por ejemplo: 1, 2, 5 seg. etc.
- Precisión de una línea -base:
 - 1 a 3 cm. + 1 ppm. (EMC) posición.
 - 2 a 3 cm. + 1 ppm. Altimetría.

Aplicaciones:

- Determinación de la trayectoria de objetos en movimiento.

- Levantamientos de ejes de carreteras y ferrocarriles.
- Medición de perfiles transversales.
- Levantamientos hidrográficos, Batimetría.

Ventajas:

- Mediciones continuas rápidas y económicas.
- Debe mantenerse el contacto con los satélites.

KOF (Cinemático con resolución de ambigüedades en movimiento)

Existe una posibilidad más para equipos de doble frecuencia. **AROF.**

AROF significa resolución de ambigüedades en movimiento. Esto quiere decir que no es necesario partir de un punto de coordenadas conocidas o con un estático rápido sino comenzamos directamente en movimiento y después de 10 segundos se resuelven las ambigüedades y utiliza éstas para trasmitirlas a los puntos anteriores a la resolución de ambigüedades.

3.2.2.2 STOP AND GO

Es un tipo de estacionamiento muy parecido al cinemático, la diferencia principal es que aquí realizaremos una parada para levantar el punto en cuestión, nos detendremos durante 2 épocas (10 segundos por lo normal) almacenaremos la información del punto (nombre atributo, etc.) y seguiremos sin perder señal de los satélites, hacia el siguiente punto.

El método para inicializar este posicionamiento es igual que para el cinemático. Bien con un punto conocido, o partir de un punto con un estático rápido, luego mantendremos durante la observación el seguimiento sobre los satélites.

La antena ha de ir lo más vertical posible con el fin de no perder la señal de los satélites.

En el caso de perder señal de los satélites deberemos comenzar una nueva cadena.

Es el método ideal para levantamientos

Estación de referencia temporal. Colocaremos la estación de referencia en un punto recibiendo datos cada 5 segundos con método estático.

Receptor móvil: Se comenzará con la inicialización de la cadena con pocos minutos de observación (de 5 a 10 minutos, si no conocemos las coordenadas del punto y 30 segundos si ya se ha observado previamente el punto)

- *Durante el cambio de estación debe mantenerse el contacto con los satélites.*
- *Se para solo dos épocas (10 segundos) en los puntos 2, 3, 4...n.*
- *Precisión de línea- base: 1 a 2 cm. + 1 ppm. (EMC)*

Aplicaciones:

- *Levantamientos de detalles e ingeniería civil.*
- *Levantamientos de carreteras, conductos, fronteras.*
- *Modelos digitales del terreno.*
- *Medición de puntos situados en un espacio reducido.*

Ventajas:

- *Rápido y económico.*
- *El método más rápido para levantar puntos de detalle con GPS.*
- *Puede emplearse mientras se camina o se desplaza en vehículo.*

3.2.2.3 RTK (Real Time Kinematic)

Esta es la última innovación en las técnicas de medida GPS. Consiste en obtener coordenadas en tiempo real en el sistema de referencia adoptado previamente.

En la actualidad, la topografía con métodos de medición GPS está cada vez más arraigada y comienza a sustituir a los métodos clásicos de medición, como por ejemplo redes locales, triangulaciones apoyos fotogramétricos, bases de replanteo, etc. Todo esto ha sido gracias al desarrollo de técnicas introducidas en los últimos cinco años y explicadas anteriormente, Estático Rápido, Stop&Go, Cinemático, etc. Debido a que la constelación de se ha completado con 24 satélites es posible llevar a cabo posicionamientos en los que las condiciones de cobertura son más estrictas, de esta manera tenemos una cobertura de 24 horas al día en cualquier parte del mundo.

Todos los avances tecnológicos efectuados en las técnicas de medición GPS se dirigen hacia estar el menor tiempo posible en la toma del punto y tener el resultado en el propio campo. Hasta ahora este tipo de trabajo quedaba reservado a los métodos clásicos (Estaciones Totales). Sin embargo mediante el Tiempo Real en el GPS, podremos utilizar éste de manera similar a una Estación Total: Obtención de coordenadas al instante con precisión de 1 cm+2ppm. Esto quiere decir que podremos utilizar nuestro equipo GPS para métodos de replanteo.

RTK: DESCRIPCION DEL SISTEMA

Dejando a buen recaudo el equipo de referencia, podremos decir que es un sistema que necesita un solo operador. Con la gran ventaja añadida de poder trabajar a grandes distancias de la referencia, es decir, tan lejos como la cobertura de radio nos permita. Y por lo tanto, evitar perder tiempo en la tediosa tarea de los cambios de estación, propio de un método de medición clásica, en el que la intervisibilidad es imprescindible.

Por otra parte, debemos de tener en cuenta, que es posible trabajar en el mismo área, simultáneamente y de forma independiente, varias estaciones móviles, apoyándose de esta manera sobre la misma referencia.

La técnica GPS en tiempo Real resulta particularmente atractiva en aplicaciones donde se han de medir y replantear cientos o miles de puntos en áreas relativamente pequeñas y abiertas.

Equipo GPS de Referencia:

- El receptor de referencia captará todos los satélites a la vista.
- El receptor envía los datos observados al Radio- módem.
 - El radio- módem transmitirá todos los datos observados al equipo/s móvil/es.



Receptor Móvil

- El Radio- Módem recibirá los datos enviados por equipo de referencia.
- El receptor móvil buscará todos los satélites a la vista.
- El receptor trabaja y calcula con los datos de su posición mas la información recibida de la referencia.

- *Fijas las ambigüedades de todos los satélites comunes. Con las técnicas actuales, este proceso no supera los 10 segundos.*
- *El receptor calcula las coordenadas de su posición y las muestra con un control de calidad asociado. A partir de fijar las ambigüedades, el equipo proporciona posición precisa a un intervalo de hasta 0,1 segundos.*



Características y peculiaridades del sistema.

Es conveniente tener en cuenta varias características para poder evaluar las posibilidades de un receptor GPS RTK. Al igual que en el apartado anterior vamos a desglosarlo en receptores Referencia y Móvil.

Receptor de Referencia RTK.

Como ya hemos comentado, el funcionamiento del sistema RTK está basado en un radioenlace entre equipo de Referencia y Móvil, si este no se produce, simplemente no hay RTK. El receptor de referencia va equipado con un radiomodem que se encarga de esta función. Este radiomodem debe cumplir la siguientes características:

- *Suficiente potencia de emisión, de forma estándar suele oscilar entre 0,5 y 1 W.*
- *Es fundamental el tipo de antena con la que se trabaje, ésta debe estar calibrada adecuadamente a la frecuencia de trabajo y ofrecer la mayor ganancia posible, todo ello redundará en el alcance y por lo tanto en una mayor área de cobertura.*
- *Homologación del mismo por la administración correspondiente (p.ej: Dirección General de Telecomunicaciones).*

Es importante también considerar meticulosamente la ubicación de la estación de referencia. Básicamente hay dos premisas a cumplir:

- *Horizonte completamente despejado, libre de obstrucciones físicas y evitando en lo posible la cercanía a radiotransmisores potentes.*
- *Elevación, una estación de referencia RTK conviene que esté lo más alta posible, intentando que domine el área de trabajo. Esta es la condición más importante para asegurar el mayor alcance de nuestro radioenlace.*

Alternativamente, existen receptores GPS que pueden realizar este radioenlace mediante telefonía móvil GSM. Es decir, en vez de utilizar radiomodem, este se sustituye por un teléfono móvil que nos asegurará la conexión con la referencia, mientras haya cobertura por el operador de telefonía. E incluso existen receptores GPS que pueden combinar ambas tecnologías simultáneamente, el usuario deja configurado el receptor de referencia con ambos sistemas, y es en el equipo móvil donde elegiremos el tipo de comunicación (radiomodem o GSM) según las condiciones de cobertura.

Conseguir una cobertura completa del radioenlace, no siempre es posible, sobre todo si nuestro trabajo consiste en levantamientos a lo largo de obras lineales de muchos Kilómetros; este sería el caso de un apoyo o de un levantamiento de bases de replanteo para una carretera. En esta situación la única alternativa, es la implantación de estaciones de referencia temporales, en donde la estación de referencia se va trasladando a puntos a lo largo del levantamiento, que cumplan las condiciones antes descritas para una estación de referencia. En estos casos resulta particularmente útil la reversibilidad de función de equipo de referencia y equipo móvil. Es decir, la capacidad de funcionar todos los receptores GPS de un sistema, tanto como estación de referencia como estación móvil. De este modo es posible el trasladar la equipo de referencia directamente a la siguiente estación, sin haber calculado previamente su posición. Y una vez estacionado allí, calcular la posición como si fuese un equipo móvil (temporalmente), recibiendo las correcciones del equipo móvil que está estacionado en la última estación levantada, funcionando como equipo de referencia (temporalmente). Esta capacidad, nos puede hacer ahorrar mucho tiempo en desplazamientos.

RECEPTOR MÓVIL RTK.

Un receptor móvil RTK, al igual que el receptor de referencia, estará dotado de un radiomodem. La función del mismo será recibir los datos emitidos por la estación de referencia, con el fin de procesarlos junto con los datos correspondientes a su situación, y de este modo calcular con precisión su posición.

En un receptor móvil consideraremos las siguientes características que influirán directamente en su productividad:

1. *Radiomodem, se encargará de recibir y proporcionar al GPS los datos emitidos de la referencia. Deberá tener la mayor capacidad de recepción posible, así como un bajo peso y consumo, ya que forma parte del sistema que el usuario a de transportar continuamente. Si el consumo es bajo, será necesaria menos batería y por lo tanto menor peso a igual autonomía. También es importante que disponga de la función de emisor y de receptor, esto nos posibilitará la reversibilidad de función como referencia o como equipo móvil indistintamente. Esta última característica también proporciona, en el caso de trabajar con tres receptores (1 referencia + 2 móviles) la posibilidad de sustituir al equipo de referencia ante una hipotética avería. Esto puede ser muy importante en instalaciones en las que existe un receptor de referencia dando servicio a varios receptores móviles, si se produce una avería en el equipo de referencia, todos los equipos móviles quedarían inutilizados.*
2. *Antena de radiomodem. Será fundamental trabajar con antenas de la mayor ganancia posible, pues esto redundará en una mayor distancia de trabajo con respecto a la referencia.*
3. *Actualización de la posición y Latencia. El receptor móvil nos proporcionará posición precisa, pero es muy importante tener en cuenta dos características, la actualización y la latencia. La actualización consiste en el número de posiciones por segundo que calcula el receptor, pero el cálculo de esa posición necesita un tiempo, lo que se traduce en un retardo denominado Latencia. A efectos prácticos, la Latencia sería el tiempo que tarda el receptor en informarnos de que nuestra posición ha cambiado. Por ejemplo, si estamos realizando el último tanteo en el replanteo de un punto, estaremos a pocos centímetros del mismo, y siguiendo las indicaciones del equipo nos moveremos en la dirección adecuada para llegar a ese punto. Pues bien, desde que iniciamos ese último movimiento hasta que el equipo detecta el movimiento y nos informa del mismo, lo denominamos Latencia, y lógicamente va a influir en la velocidad de replanteo. El valor de la latencia varía según la tecnología de la que disponga el sistema; en los primeros receptores RTK que salieron al mercado, la latencia llegaba a ser de 2 o 3 segundos, y tenían una actualización de 1 posición por segundo. Hoy en*

día, existen en el mercado receptores con actualizaciones de 10 Hz (10 posiciones por segundo) y con latencias de 0.05 segundos (la percepción del usuario es de posición instantánea).

Los tipos de posicionamientos RTK no son distintos a los disponibles en postproceso, vamos a realizar una comparativa de su modo de funcionamiento en un sistema y en otro:

ESTÁTICO: En teoría, sería un posicionamiento que se podría realizar tanto en tiempo real como en postproceso, ya que los datos con los que se trabaja son exactamente los mismos. Sin embargo en realidad no es un posicionamiento que se utilice en RTK, esto es debido a que las distancias a las que se trabaja son muy grandes y a posibilidad de un radioenlace es complicada. El tratamiento de los datos en este tipo de posicionamiento, está basado en varias horas de captura de datos de forma continua y sin cortes ni pérdidas de paquetes de datos, que podrían ocurrir en una transmisión por radio. El modo de cálculo es tipo RED, en la que todos los receptores están triangulando, y por lo tanto funcionando como referencia y como móvil simultáneamente. Y quizá lo que es más importante, al menos con la tecnología actual, no incrementaría la productividad.

ESTÁTICO RÁPIDO: El modo RTK se adapta perfectamente a este tipo de posicionamiento, de hecho podemos decir, que el estático rápido en modo RTK proporciona unos niveles de productividad, rendimiento y fiabilidad sensiblemente más altos que el estático Rápido en postproceso. Rendimiento: Un estático rápido en postproceso implica un tiempo de estacionamiento no inferior a 5 minutos, en tiempo real conseguimos lo mismo en 10 segundos. Fiabilidad: Si queremos obtener soluciones completamente independientes, con una constelación diferente (técnica idónea para localizar un posible multipath), necesitaríamos hacer dos estacionamientos de 5 minutos; en tiempo real serían 2 de 10 segundos. Seguridad: en un posicionamiento en postproceso solo tendremos el 100% de certeza de que nuestra observación a sido adecuada, cuando volcamos y postprocesamos los datos en gabinete (eso si no se ha quedado sin batería la referencia, o algún amigo de lo ajeno ha decidido fijarla como objetivo). En RTK disponemos de un control continuo del estado de funcionamiento de la referencia (nivel de

batería, coordenadas, recepción satélites), y además disponemos de solución en el campo, desapareciendo el postproceso en gabinete.

CINEMÁTICOS: El tipo de posicionamiento por excelencia cuando se trabaja en RTK es un Cinemático, para ser más exactos un OTF (Cinemático con Inicialización en movimiento). Es decir, un receptor GPS RTK por defecto y sin mayor interacción del usuario, comienza a trabajar en OTF. Fijará las ambigüedades en movimiento y en un breve instante nos dará nuestra posición con precisión y con un control de calidad asociado. A partir de disponer de la posición, no tiene sentido hablar de tipos de posicionamientos cinemáticos. Simplemente utilizaremos esa posición como mejor nos venga a nuestras necesidades de trabajo.

Si queremos levantar una línea o una trayectoria, activaremos en el equipo la captura automática de posiciones atendiendo al criterio que mejor se adapte, por ejemplo levantamiento de puntos a un determinado tiempo, o a una determinada distancia, o a una determinada variación de cota.

Si queremos hacer un taquimétrico, levantaremos cada punto en el instante y posición que necesitemos y lo etiquetaremos con la numeración y codificación pertinente.

Podemos replantear cualquier punto o entidad que nuestro receptor pueda gestionar o convertir en coordenadas,

Podemos levantar y sincronizar en Tiempo Real con cualquier otro tipo de sistema externo de medición, como puede ser una Ecosonda para una batimetría, una Cámara aérea al mismo tiempo que el sistema nos ayuda a navegar por la entidad a levantar.

Como podemos ver las posibilidades son enormes, y cada día se van incorporando a más aplicaciones.

3.2.2.5 RTDGPS.

Estas siglas significan Real Time Differential GPS (GPS Diferencial en Tiempo Real).

Se puede obtener en tiempo real una precisión que ronda el metro de precisión o superior precisión. La diferencia con el RT-SKI es que en este método GPS solo hacemos una corrección de la pseudodistancia y no de medida de fase como el RT-SKI.

Para realizar esta corrección de la pseudodistancia será necesario conocer las coordenadas del receptor de referencia, que debe tener un horizonte amplio y sin obstrucciones por encima de 5° de elevación. Este receptor de referencia calculará unas correcciones (RTCM, Radio Technical Commission for Maritime Services) y las enviará por radio-módem a cualquier receptor que esté trabajando en la zona con un radio- módem de la misma frecuencia que el de referencia. El receptor móvil calcula una nueva posición corrigiendo la posición de navegación por medio de las correcciones RTCM.

Existen bandas de UHF, VHF y HF.

Existe un mensaje para la sincronización con instrumentos externos (por ejemplo la ecosonda), el mensaje MNEA, dentro de este mensaje existen varios en función de las necesidades que tengamos. Entre ellos podremos encontrarnos por ejemplo, el mensaje ZDA, en el que nos proporciona UTC de la posición, día, mes, año, y descripción de la zona. Otros mensajes son el GGA, GLL, VTG, GGK, GGQ, etc. (para más información consultar manual para RT-SKI).



3.3 RINEX. FORMATO INDEPENDIENTE DE INTERCAMBIO

(Receiver INdependent EXchange format)

INTRODUCCION.

La necesidad de combinar distintos tipos de receptores de distintas casas comerciales, de distintas versiones, en el mismo proyecto, y calcular los datos con un mismo programa se convierte en una de las primeras necesidades.

El formato RINEX satisface esta necesidad de intercambio de información registrada por equipos de posicionamiento por diferentes satélites, ya sean GPS, TRANSIT, GLONASS o combinados.

A menudo el topógrafo, que quiere combinar los datos de los diferentes tipos de receptores, tiene que estar familiarizado con ciertas características; tiene que conocer la amplitud y restricciones de los procesos posteriores del programa de cálculo que se utiliza y ,finalmente, tiene que tener la suficiente experiencia en los cálculos de GPS para determinar los resultados finales.

La Versión 2 de RINEX se presentó tras la revisión de la primera versión durante el segundo Symposium Internacional de Posicionamiento de Precisión con GPS, en Ottawa, Canadá, en Septiembre de 1990.

FORMATO DE LOS FICHEROS RINEX.

Cada tipo de receptor GPS tiene su estructura de datos en información original. Por ejemplo, el System 200, organiza sus datos en diferentes ficheros binarios.

La facilidad de intercambiar los datos GPS a un formato común, a sido definido y aceptado a un formato estándar de la colectividad GPS: el formato RINEX.

Una descripción detallada del formato fue publicada en el CSTG GPS-BULLETIN vol.2 nº3 Mayo-Junio de 1989, y vol.3 nº3, Septiembre-Octubre de 1990.

Los ficheros RINEX se denominan por convención de la siguiente forma:

SSSSDDDF.YYT

donde:

SSSS...	Primeros cuatro caracteres del nombre de la estación.
DDD....	Día del año, empezando a contar desde el primer día del año.
F.....	Sesión.
YY.....	Los dos últimos dígitos del año.
T.....	Tipo de fichero: O... Fichero de observación. N... Fichero de navegación. M... Fichero meteorológico.

A continuación pasaremos a mostrar un fichero de observación RINEX, procedente de receptor WILD SR9500 de LEICA:

```

2          OBSERVATION DATA          RINEX VERSION / TYPE
OBSTORNX  Version 2.2          29-OCT-97 18:13  PGM / RUN BY / DATE
                                                OBSERVER / AGENCY
LEICA     MARKER NAME
LEICA     MARKER NUMBER
10012     SR9500          5.2          REC # / TYPE / VERS
280497    external without GP      ANT # / TYPE
4849056.1986 -322441.0332  4118025.7914  APPROX POSITION XYZ
          0.0000          0.0000          0.0000  ANTENNA: DELTA H/E/N
          1          1          WAVELENGTH FACT L1/2
          4 P1 L1 P2 L2          # / TYPES OF OBSERV
1997     10     23     7     0     60.000000  TIME OF FIRST OBS
                                                END OF HEADER

97 10 23 7 0 60.0000000 0 8G14G15G29G31G16G 2G 7G 1          0.000000004
20594851.286 108226672.16649 20594842.429 84332436.65149
20258245.711 106457796.99049 20258236.358 82954091.99649
21470435.084 112827897.45348 21470426.132 87917805.92149
22773920.211 119677760.78248 22773911.937 93255362.64148
22645894.350 119004979.09047 22645885.270 92731116.15348
23738429.674 124746287.78246 23738421.437 97204864.56047
23671354.259 124393803.78347 23671346.269 96930206.95748
23860797.947 125389340.58147 23860788.969 97705940.01948

97 10 23 7 1 15.0000000 0 8G14G15G29G31G16G 2G 7G 1          0.000000075
20591296.155 108207989.82849 20591287.285 84317878.99349
20259758.915 106465748.80749 20259749.535 82960288.20449
21468082.898 112815537.01148 21468074.028 87908174.38349
22783482.672 119728011.04148 22783474.240 93294518.67348
22637631.220 118961556.42347 22637622.192 92697280.29448
23740765.424 124758561.60246 23740757.074 97214428.53947
23662024.811 124344776.95547 23662016.785 96892004.21748
23867127.925 125422603.65447 23867118.650 97731859.25848

97 10 23 7 1 30.0000000 0 8G14G15G29G31G16G 2G 7G 1          0.000000017
20587776.223 108189492.64549 20587767.381 84303465.57249
20261302.063 106473857.91949 20261292.640 82966606.95949
21465775.126 112803410.27048 21465766.396 87898724.95449
22793070.474 119778394.59348 22793061.892 93333778.56648
22629397.406 118918288.31647 22629388.559 92663564.88048
23743137.407 124771026.70846 23743129.125 97224141.56748
23652721.014 124295885.17247 23652713.015 96853906.71148
23873493.664 125456055.21247 23873484.177 97757925.40148

97 10 23 7 1 45.0000000 0 8G14G15G29G31G16G 2G 7G 1          0.000000044
20584279.664 108171118.23249 20584270.845 84289147.84449
20262862.747 106482059.55448 20262853.379 82972997.86249
21463499.427 112791451.27048 21463490.685 87889406.23449
22802670.966 119828845.51948 22802662.371 93373090.92548
22621180.837 118875109.95147 22621172.030 92629919.37848
23745533.702 124783619.26146 23745525.391 97233953.93847
23643430.896 124247065.27047 23643422.926 96815865.22248

```

TEMA IV:
GLOSARIO DE TERMINOS.

ALMANAQUE

Información acerca de los satélites utilizada para calcular su posición en el espacio, elevación y acimut.

ALTURA SOBRE EL ELIPSOIDE

Distancia vertical entre un punto y el elipsoide.

ALTURA ORTOMETRICA

Distancia de un punto sobre el geoide medido a lo largo de la línea de la plomada a través de dicho punto (altura sobre el nivel del mar).

AMBIGUEDAD

Numero de ciclos enteros desconocidos de la fase de la onda portadora que contiene un ininterrumpido grupo de mediciones provenientes de un único satélite pasando por un único receptor.

ANCHO DE BANDA

Medida del ancho del espectro de la señal expresada en Hz.

ANGULO DE CORTE (MASCARA DE ELEVACION)

Ángulo de elevación mínima debajo del cual los satélites GPS no son seguidos por el sensor.

ANTI-SPOOFING (AS)

Encriptación del código P. La forma de encriptarlo es sumando un código W secreto para convertirse en un código Y.

ARGUMENTO DEL LATITUD

Es la suma de la anomalía verdadera y del argumento del perigeo.

ARGUMENTO DEL PERIGEO

Es el ángulo medido sobre el plano de la órbita desde el nodo ascendente hasta punto del perigeo.

BANDA L

La banda de la frecuencia de radio se extiende desde 390 Mhz. a 1550 Mhz. La frecuencia portadora de L1 y L2 son transmitidaS en esta banda.

CADENA

El término cadena puede aplicarse a posicionamientos estáticos, STOP&GO y cinemáticos. Una cadena contiene el conjunto de datos suficienete de la observación para calcular las ambigüedades

CHIP

Intervalo de tiempo entre un cero o un uno en código de pulso binario.

CHIP RATE

Numero de chips por segundo.

CLOCK OFFSET

Diferencia constante en el tiempo de lectura de dos relojes.

CODIGO

Es un sistema utilizado para la comunicación en el cual cadenas de ceros y unos, arbitrariamente seleccionadas, son asignados para definir mensajes.

CODIGO C/A

Código de modulación del GPS en la señal L1. Este Código tiene una frecuencia de 1,023 Mhz. de modulación binaria de la onda portadora GPS en un cambio de velocidad de 1023 Mhz, teniendo así un código con un período de repetición de un milisegundo.

CÓDIGO P

Código preciso del GPS. Una secuencia muy larga de falsa aleatoriedad binaria de modulación bifase en la portadora GPS en una relación interrumpida de 10.23 Mhz. Cada segmento del Código P es único para cada satélite GPS. El acceso al Código P está restringido por el gobierno de los Estados Unidos que tiene su uso exclusivo.

CÓDIGO Y

$P + W = Y$ (secreto)

CIO (CONVENTIONAL INTERNATIONAL ORIGIN)

Posición media del eje de rotación de la tierra durante los años 1900 a 1905.

DILUCION DE LA PRECISION (DOP)

Una descripción de contribución puramente geométrica a la desconocida posición fija. El factor DOP indica la intensidad geométrica de la constelación del satélite en el tiempo de medición.

GDOP : TRES COORDENADAS DE POSICION MAS EL RELOJ

PDOP : TRES COORDENADAS

DISPONIBILIDAD SELECTIVA (SA)

Degradación de la precisión de la posición del satélite para usuarios civiles por el DoD.

EFEMERIDES

Lista de posiciones o localizaciones de un objeto celeste en función del tiempo.

ELIPSOIDE

Figura matemática, resultada de la revolución de una elipse sobre su eje menor. En se utiliza como sistema de referencia, ya que es la figura geométrica que más se parece a la tierra. (Elipsoide de dos ejes).

EPOCAS

Instante de tiempo fijado para el registro de datos en la unidad de control.

ERROR MULTIPATH

Un error de posicionamiento resultado de la interferencia entre ondas de radio que han viajado entre el transmisor y el receptor por dos caminos de longitud eléctrica diferente.

EXCENTRICIDAD

Es la relación existente entre la distancia desde el centro de la elipse a sus focos y el semi-eje mayor.

FASE

Reconstrucción de la fase portadora.

FRECUENCIA BATIDA

Es la frecuencia obtenida a partir de la mezcla de dos frecuencias adicionales. La frecuencia batida es igual a la suma o a la diferencia de las frecuencias originales.

FRECUENCIA FUNDAMENTAL

Oscilación de alta precisión generada en el oscilador del satélite. Esta frecuencia fundamental es de 10,23 MHz.

GEOIDE

Superficie equipotencial que coincide con el propio nivel del mar y que se extiende por debajo de los continentes. Esta superficie es en cualquier lugar perpendicular a la dirección de la gravedad.

GPS

Sistema de Posicionamiento Global

HORA LOCAL

Hora de un lugar medida en tiempo solar verdadero.

INCLINACION

Angulo entre el plano orbital de un objeto y otro plano de referencia.

LÍNEA BASE

Longitud tridimensional del vector entre un par de estaciones para que la información GPS, tomada simultáneamente, sea calculada y nos determine esta longitud.

MEDICIONES DIFERENCIALES

Mediciones simultanea de dos receptores para determinar el vector de estas dos posiciones.

NODO ASCENDENTE

Es la intersección de la orbita de un objeto con el plano de referencia donde la latitud se incrementa

MEDICION DE FASE

Medición del desfase de la onda portadora. La fase de la señal llegada del satélite es comparada con la fase de una señal de referencia generada en el receptor.

MEDICION DE SEUDODISTANCIA

Para obtener coordenadas de la antena solo es necesario hacer tres mediciones de este tipo a los satélites. La posición de la antena viene dada por la intersección de tres esferas, con la posición de los satélites como centro, y las distancias medidas como radios.

MENSAJE DE DATOS

Un mensaje incluido en la señal GPS que incluye información sobre el estado de los satélites.

MISION

El método de trabajo utilizado en campo para realizar el levantamiento de puntos.

POSICIONAMIENTO CINEMATICO

Método que permite conocer las coordenadas de los puntos de la trayectoria de un receptor en movimiento.

PERDIDA DE CICLO

Es una discontinuidad en el número integrado de ciclos medidos en la fase portadora debido a la temporal pérdida de señal del satélite.

RETARDO ATMOSFERICO

Tiempo de retardo que afecta a la señal del satélite debido a las capas de la ionosfera y troposfera.

RETARDO IONOSFERICO

Una onda de propagación a través de la ionosfera (capa de composición heterogénea) experimenta retraso. La fase de retraso depende del contenido de electrones y afecta a la señal de la portadora.

POSICIONAMIENTO CINEMATICO

Determinación de series de tiempo de los conjuntos de coordenadas para un receptor móvil.

RINEX

Formato de intercambio entre receptores independientes. Fichero ASCII con información legible por cualquier software de cualquier marca.

REOCUPACION

Técnica de medida GPS en la que cada estación se ocupa varias veces. Entre cada ocupación debe de haber más de una hora con el fin de cambiar la geometría de los satélites. Este método se utiliza cuando las condiciones mínimas requeridas no se cumplen debido a obstrucciones.

RUMBO (BEARING)

Termino usado en navegación para describir el ángulo entre una dirección de referencia (Norte magnético, norte geográfico o norte de la cuadrícula) y una dirección determinada.

SERVICIO DE POSICIONAMIENTO PRECISO (PPS)

Es el más alto nivel de precisión en el posicionamiento de un punto proporcionado por el Sistema GPS. Se consigue mediante receptores de doble frecuencia y código P.

TIEMPO GPS

Sistema de tiempo uniforme basado en el tiempo universal coordinado (UTC) desde el 6 de Enero de 1980.

TIEMPO MEDIO EN GREENWICH (GMT)

Hora solar media en el meridiano de Greenwich, utilizado como base del tiempo Standard en todo el mundo.

TRASLACION DOPPLER

Aparente cambio de frecuencia de una señal recibida debido a la variación de distancia entre emisor y receptor.

WGS 84

Sistema geodésico mundial de 1984. Sistema en el que están basadas todas las medidas y resultados del GPS.

TEMA V:
PLANIFICACION DE UNA OBSERVACION GPS

CONSIDERACIONES GENERALES

- Longitud de las Líneas- Base

El receptor GPS mide la fase entrante de las señales difundidas por el satélite con precisión de 1 mm, pero las señales se propagan a través de la atmósfera, considerada como ionosfera y troposfera. Las turbulencias atmosféricas degradan la precisión de las observaciones.

La observación GPS es un método diferencial. Una línea base se observa y calcula entre dos receptores. Cuando ambos receptores observan al mismo conjunto de satélites, simultáneamente, la mayoría de los efectos atmosféricos se cancelan. Cuanto más corta sea la línea base, más se verificará esto, pues la atmósfera que atraviesan las señales recibidas por los receptores respectivos tenderá a ser idéntica.

La observación Estática Rápida implica tiempos de recepción cortos. Para este método es de especial interés que las anomalías atmosféricas sean lo más similares posibles para ambos lugares de observación. Aunque minimizar las longitudes de las líneas bases. es un criterio aplicable a todos los tipos de observación GPS, en el caso del método Estático Rápido es una premisa a tener muy en cuenta.

- Estaciones de Referencia Temporales

Sabemos que el tiempo de observación y la precisión están en función, principalmente, de la longitud de las línea bases. Por tanto se recomienda minimizarla.

Dependiendo del área y del número de puntos a observar, hay que considerar la posibilidad de establecer estaciones de referencia temporales desde las cuales se radien puntos.

Las Líneas bases radiadas desde una referencia temporal pueden ser de varios km., pero también hay que tener en cuenta la premisa de minimización de longitudes

En orden a la precisión y a la productividad es más ventajoso medir líneas bases cortas (5 Km) desde varias estaciones temporales, que medir largas (15 Km) desde una sola estación de referencia.

- Comprobación de los Puntos Observados

Hay que tener cuidado especial al fijar estaciones de referencia, y al radiar desde ellas, con tiempos cortos de observación.

Si la geometría de la constelación es mala (valores altos de GDOP), o si las turbulencias ionosféricas son agudas, puede ocurrir que el software de post-proceso no resuelva ambigüedades, o si las resuelve, que los resultados rebasen las especificaciones de precisión establecidas a las que se ajustarían los resultados en condiciones favorables.

Dependiendo de la precisión requerida, el usuario debe estar preparado para comprobar los puntos observados. Esto es fundamental, obviamente, si los tiempos de recepción han sido recortados al mínimo y no se han tenido especialmente en cuenta las recomendaciones relativas a los valores del GDOP en los instantes de observación.

Para una comprobación independiente y completa valen las siguientes sugerencias:

- Observar los puntos una segunda vez en una ventana diferente. Esto proporcionaría una solución alternativa con condiciones atmosféricas y geometría diferentes.

- Cerrar un itinerario con una medición de la línea base desde el último punto observado hasta el punto de inicio.

- Medir líneas bases independientes desde varios puntos de una red de estaciones temporales.

Se puede obtener comprobación parcial usando dos estaciones de referencia, en lugar de una, haciendo bisección. Así tendremos fijación doble para cada punto, pero cada una estará basada en las mismas observaciones del receptor itinerante y en la misma configuración de la constelación observada.

- Observaciones Diurnas y Nocturnas. Medida de líneas bases largas

La ionosfera se activa por la radiación solar. De día las turbulencias son mayores. Como resultado de esto, el rango de longitud mensurable se duplica en observaciones nocturnas y por tanto, de noche, podemos recortar el tiempo de observación a la mitad del que fuera necesario de día.

En 1992 la actividad ionosférica ha alcanzado un máximo. El ciclo completo es de 11 años. A medida que nos alejamos de las épocas de máxima actividad, podremos reducir los tiempos de observación, al menos en los requerimientos atmosféricos.

Para líneas bases de hasta 20 km se puede intentar el cálculo basado en el algoritmo FARA. Para mayores longitudes, lo aconsejable es aplicar el observable L3, que elimina en gran parte las influencias ionosféricas, a pesar de destruir la naturaleza entera de las ambigüedades.

- Mejores Tiempos de Observación

Al planificar una campaña con un software que muestre las evoluciones del GDOP y el número de satélites observables a lo largo de la jornada de trabajo, podemos ver hay varias ventanas buenas distribuidas a lo largo de un período de 24 horas. Como el método Estático Rápido sólo es aplicable con buenas ventanas de recepción, hay que planificar las observaciones con cuidado.

De todas formas es imposible planificar observaciones al minuto. Mucho mejor que observar el máximo número de puntos, ajustándose a los baremos mínimos requeridos, es medir menos puntos, pero con algunos minutos de más. Sobre todo para trabajos precisos interesa ser conservadores.

- Consideraciones a la Transformación a Coordenadas Locales

Para la mayoría de los proyectos será necesario transformar las coordenadas obtenidas

(WGS-84) al Sistema Local, que tendrá su Elipsoide Local.

Para poder calcular y efectuar esta transformación será necesario incluir en la red de observación puntos de coordenadas conocidas en el Sistema Local. Así comprobaremos la consistencia del Sistema Local y calcularemos los parámetros de transformación.

Estos puntos han de estar esparcidos en el área del proyecto, y han de ser, al menos, 3, pero es aconsejable usar 4 o más.

PLANIFICACION DE UNA MISION

- GDOP

Ayuda a valorar la geometría de la constelación de satélites. La precisión alcanzable es tanto mayor cuanto menor sea el valor del GDOP.

Se puede comparar un valor del GDOP desfavorable con el círculo peligroso de la Trisección Inversa. Se producirán soluciones "débiles". Para el método Estático Rápido lo ideal es que esté en torno a un valor de 5 y en ningún caso ha de exceder de 8.

- Selección de Ventanas de Observación Favorables

Usando un software de planificación, estudiaremos la jornada de trabajo y buscaremos ventanas en las que, sin tener en cuenta los satélites que estén por debajo de 15° , cuyas señales van a llegar muy afectadas por la refracción atmosférica, el valor del GDOP no exceda de 8.

GDOP tiene altibajos a cada lado de una buena ventana (orto y ocaso de satélites). Hay que evitar emplear Estático Rápido en estos momentos en que el GDOP cambia rápidamente.

Las ventanas pobres sólo han de usarse como puentes entre ventanas buenas.

Hay que tener en cuenta los obstáculos que rodeen los puntos donde observar, pues pueden causar la pérdida de la señal de algún satélite en concreto o generar efectos

multicamino. En caso de que exista esta posibilidad, tendremos en cuenta, en la planificación, la posibilidad de no recibir la señal del satélite en cuestión.

TIEMPOS DE OBSERVACION Y LONGITUD DE LAS LÍNEAS-BASE

El tiempo de observación, para alcanzar un resultado preciso en post-proceso, depende fundamentalmente de la longitud de la base, del número de satélites observados, del valor del GDOP, y del estado de la ionosfera.

Como sólo se hará Estático Rápido con GDOP menor 8, el tiempo de observación necesario para alcanzar cierta precisión, sólo es función de la línea base y de las turbulencias ionosféricas.

Como hemos dicho, las anomalías ionosféricas varían con la hora y la posición sobre la superficie terrestre. Por la noche el efecto se reduce a la mitad, con lo cual podríamos reducir también los tiempos de observación. Esto puede ser particularmente interesante para medir líneas bases de 10 a 20 km.

A menos de ser extremadamente restrictivo, es imposible asignar tiempos de observación con garantía total.

Considerando que la actividad ionosférica acaba de pasar por un máximo (1992), siguiendo un ciclo de 11 años, es de esperar que a medida que ésta decrezca, se puedan reducir los tiempos de observación, o, aumentar las distancias observables.

La actividad ionosférica también depende de la posición sobre la superficie de la Tierra. Su influencia es menor en latitudes medias, que en zonas polares.

Las líneas de unos 15 km, de día, o 20 km, de noche, han de ser observadas durante, al menos, una hora, con buena cobertura. Para bases de 30 km, o más, se debe observar durante al menos 2 horas, para alcanzar una precisión de 5 mm + 1 ppm.

También hay que tener en cuenta que los satélites que estén a distancias horizontales bajas, su recepción estará más afectada por los efectos atmosféricos. Para el método Estático Rápido sería interesante aumentar los tiempos de observación si, por ejemplo, dos de los cuatro satélites mínimos están por debajo de 25°.

OBSERVACIONES DE CAMPO

- Estación de Referencia

La Topografía GPS es una técnica diferencial, que implica cálculo de líneas- bases entre el receptor referencia, y el receptor itinerante. Como habrá muchas líneas bases medidas desde cada estación de referencia, la elección de estas estaciones es de particular importancia.

Los lugares para las estaciones han de ser elegidos en orden a que se ajusten a observaciones GPS. Un buen emplazamiento debe cumplir las siguientes características:

- No deben existir obstrucciones por encima de 15° sobre el horizonte.
- No deben haber en los alrededores superficies que puedan reflejar y producir efectos multicamino.
- Deben estar alejadas de lugares de tránsito, si es necesario se debería poder dejar el receptor sólo y desatendido.
- No deben encontrarse en los alrededores emisores potentes (antenas TV, radio, etc).

Los resultados para todos los puntos itinerantes dependerán de la coyuntura en la que se encuentre el receptor de referencia. Por tanto éste debe tener el funcionamiento asegurado.

- Asegurado el suministro de energía
- Asegurada la capacidad de almacenamiento de información
- Asegurada la posición de la antena
- Asegurada la configuración y parámetros de recepción del receptor, coincidentes con los del los receptores itinerantes.

Hay que señalar que el receptor no tiene por qué estar situado en un punto conocido. Es preferible usar Estaciones de Referencia que cumplan las condiciones técnicas expuestas antes que usar vértices conocidos con condiciones deficientes.

Los puntos para calcular la transformación de WGS-84 al Sistema Local han de ser incluidos en la red de trabajo, y pueden ser observados con los receptores itinerantes.

- Necesidad de Conocer un Punto WGS-84

El cálculo de una línea base requiere conocer las coordenadas de un punto de referencia perfectamente. Las coordenadas del otro punto (Rover) se calculan relativas al punto fijado como referencia.

Para que el software de post-proceso pueda resolver correctamente las ambigüedades, las coordenadas WGS-84 de la referencia han de conocerse con un margen de 50 m, si fuera posible con 20 m, para no introducir errores de escala de 1 a 3 ppm.

En caso de no ser disponibles las coordenadas WGS-84 de algún o algunos puntos, se puede usar el Posicionamiento de Navegación, pero hay que tener cuidado, pues unas condiciones técnicas deficientes y la posibilidad de que esté activa la Disponibilidad Selectiva pueden degradar las coordenadas obtenidas. Una posibilidad puede ser usar el Posicionamiento de Navegación en Intervalos de 15 minutos.

- Observación de Puntos con el Receptor Itinerante

Es de particular importancia para Estático Rápido asegurar ciertas condiciones:

- Asegurar que los parámetros de la misión han sido correctamente establecidos, y coinciden con los del receptor itinerante.
- Comprobar la altura de la antena.
- Prestar atención al GDOP cuando se observe durante poco tiempo. Para obtener precisiones de 5-10 mm +- 1 ppm sólo observar con GDOP menor 8. También hay que evitar observar en las ventanas en las que GDOP cambia rápidamente, pues indican cortos y ocasos de satélites e implican pérdidas de cuenta de ciclos.

Es mejor esperar a que GDOP se estabilice y medir entonces.

- Es interesante rellenar hojas de campo de cada punto observado con parámetros y comentarios que faciliten la detección e identificación de posibles errores en gabinete.

PARAMETROS DE PROCESO DE DATOS

- Máscara de Refracción

La recepción por debajo de 15° por encima de horizonte está muy afectada por la refracción atmosférica. El uso de este tipo de información impide la consecución de resultados precisos.

Normalmente se emplea una máscara de refracción, para que el receptor no adquiera información de satélites por debajo de una determinada altura sobre el horizonte.

Como consecuencia hay que planear la observación teniendo en cuenta la máscara de refracción que se va a usar, que afectará a los valores del GDOP.

Luego, al procesar la información grabada en campo, se puede aumentar más la pantalla, pero hay que tener cuidado, pues puede cambiar el GDOP, y al ser mayor que el previsto, si se pierden satélites, puede que no obtengamos resultados coherentes con los planeados.

Teniendo esto en cuenta, a veces puede ser interesante, en post-proceso, aumentar la máscara a 20° , si la ionosfera está muy activa, lo que mejoraría los resultados.

Puede ocurrir que una línea base calculada se salga de tolerancia, usando incluso 5 satélites, si alguno de éstos no sube más de 20° . En estos casos puede mejorar el resultado subir la máscara a 20° y calcular sólo con 4 satélites de elevación mayor.

- Modelo Troposférico

Usar el Modelo de Holpfield, o usar el de Saastromoinen, no produce diferencias sustanciales en los resultados. Lo que no debe hacerse es calcular sin tener en cuenta ningún modelo, pues esto sí produciría errores.

- Modelo Ionosférico

El uso de un Modelo Ionosférico, en principio, sólo afecta apreciablemente al cálculo de líneas bases de más de 20 km.

Normalmente se usa un modelo empírico, basado en el estudio del comportamiento de la ionosfera, en función del ángulo horario solar.

Con el uso de modelo Ionosférico se aplican correcciones a todas las observaciones de fase, que varían con el ángulo horario solar y con la elevación del satélite recibido.

Un modelo Ionosférico incorrecto, o no usar modelo Ionosférico, introduce un error de factor de escala en las bases calculadas. Si no hemos aplicado modelo las líneas bases serán, generalmente, demasiado cortas. El rango de escala durante el día suele ser de aproximadamente 4 a 5 ppm más cortas.

Para líneas bases largas, más de 20 km, los efectos Ionosférico se suelen cancelar, pues en estos casos el tipo de cálculo está basado en el observable L3, que es una combinación de L1 y L2.

- Efemérides

La práctica habitual es usar las efemérides difundidas por el propio satélite. El uso de efemérides de precisión, conseguidas por otros medios, no mejora apreciablemente los resultados, teniendo en cuenta el tipo de cálculos que se siguen para trabajo GPS estándar.

- Información usada en el Proceso

Lo habitual, para obtener la máxima precisión posible, es usar Información de Medida de Código y Fase.

Para cálculos rápidos de líneas bases, cuando no se necesite precisión mejor que 1 m (exploraciones, etc), basta con usar información de sólo Código.

En la medición de líneas bases no hay apenas diferencia entre usar Código y Fase o sólo Fase. Los resultados han de ser prácticamente idénticos

Para líneas bases de más de 100 km, el proceso de observaciones de sólo Código puede dar resultados con precisiones muy buenas, cuando las efemérides también lo son.

Si las medidas de código se corrompen por algún motivo (encriptación, etc), deberemos procesar con sólo medidas de fase.

Para obtener resultados precisos con información cinemática, se debe procesar con código y fase. Las solas medidas de fase son buenas, pero las medidas de código sirven como comprobante y seguridad en caso de que se haya perdido la cuenta de ciclos.

ESTRATEGIA DE CALCULO: SELECCION DE LÍNEAS-BASE

Antes de comenzar el proceso de cálculo hay que considerar cuál es la mejor forma de calcular la red.

Hay que juzgar los siguientes aspectos:

- Obtención de coordenadas WGS-84 de un punto
- Conexión con el Datum Local
- Cálculo de las Estaciones de Referencia
- Distinción entre líneas bases largas y cortas

Hay que enlazar el punto WGS-84 con las Referencias. Después calcular la red de Referencias. También es interesante, al iniciar el cálculo, conectar con los puntos conocidos en el Datum Local.

Para el cálculo de las Referencias es aconsejable hacer bisecciones o polisecciones, pues de ellas dependen los demás puntos observados.

Al radiar el resto de los puntos observados, es aconsejable hacer selecciones de conjuntos de líneas bases de aproximadamente la misma longitud y calcularlas por separado.

INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

- Líneas Base de menos de 20 km

Para este tipo de líneas bases siempre se intenta aplicar FARA. Este algoritmo busca todas la posibles combinaciones de ambigüedades y calcula el emc de una observación sola de cada conjunto formado. Entonces extrae las soluciones con emc más bajos.

Introduce los valores en un nuevo cálculo y elige la solución más coherente. Esta decisión se basa en métodos estadísticos con criterios muy restrictivos que aseguran la mayor probabilidad de obtener un resultado digno de confianza, pero es imposible eliminar la posibilidad de llegar a un resultado erróneo.

En caso de que FARA no haya encontrado una solución coherente, no se presentarán resultados de ambigüedades. Sin éstas es difícil dar una indicación de la precisión alcanzada.

Hay que tener en cuenta que, hasta 20 km, debe ser posible la solución de ambigüedades si se han tomado las suficientes observaciones. Habrá que repasar el proceso, si no ha tenido éxito, para ver si se ha cometido algún error conceptual.

- Líneas Base de más de 20 km

Para estas se aplica el observable L3, y no se intenta resolver ambigüedades. De todas formas, no aporta beneficios intentarlo para líneas bases de más de 20 km.

*A continuación se muestran las pantallas del Software SKI sobre la planificación de una observación en el día 19 de Septiembre de 1996 sobre el horizonte de **MADRID** de coordenadas:*

Longitud.....3° 41' W

Latitud..... 40° 24' N

Altura....710 m.

Tiempo	Sats.	PDOP	GDOP	Satélite Nos
08.30	6	1.31	3.24	2 7 14 15 29 31
08.40	5	1.74	3.50	7 14 15 29 31
08.50	4	1.92	5.49	7 14 15 29
09.00	5	1.50	4.75	7 14 15 18 29
09.10	5	1.50	5.16	7 14 15 18 29
09.20	6	1.32	2.44	7 14 15 18 25 29
09.30	7	1.18	2.10	4 7 14 15 18 25 29
09.40	7	1.18	2.26	4 7 14 15 18 25 29
09.50	6	1.41	3.26	4 7 14 15 18 29
10.00	6	1.41	3.29	4 7 14 15 18 29
10.10	6	1.41	3.26	4 7 14 15 18 29
10.20	6	1.40	3.18	4 7 14 15 18 29
10.30	6	1.38	3.10	4 7 14 15 18 29
10.40	6	1.37	3.08	4 7 14 15 18 29
10.50	6	1.35	3.15	4 7 14 15 18 29
11.00	6	1.33	3.53	4 7 14 18 19 29
11.10	7	1.17	2.16	4 7 14 18 19 24 29
11.20	7	1.17	2.25	4 7 14 18 19 24 29
11.30	7	1.17	2.31	4 7 14 18 19 24 29
11.40	7	1.18	2.32	4 7 14 18 19 24 29
11.50	7	1.21	2.42	4 14 18 19 24 27 29
12.00	7	1.20	2.56	4 14 18 19 24 27 29
12.10	7	1.20	2.71	4 14 18 19 24 27 29
12.20	8	1.12	1.93	4 14 16 18 19 24 27 29
12.30	7	1.20	2.49	4 16 18 19 24 27 29
12.40	7	1.21	2.70	4 16 18 19 24 27 29
12.50	7	1.22	2.97	4 16 18 19 24 27 29
13.00	7	1.23	3.20	4 16 18 19 24 27 29
13.10	7	1.25	3.25	4 16 18 19 24 27 29

Sat.No de a

1 05.30 08.10

1 19.50 23.40

*Es esta lista podemos observar los intervalos
en los que aparecen los satélites*

2 06.20 08.30

2 14.20 18.30

4 09.30 14.30

5 00.00 00.00

5 17.50 24.00

6 00.00 02.20

6 20.40 24.00

7 07.50 11.40

7 17.20 20.10

9 16.10 22.30

12 14.20 19.50

14 06.10 12.20

15 04.30 10.50

16 12.20 17.50

17 00.00 04.10

17 15.50 16.50

17 23.20 24.00

18 09.00 14.40

19 11.00 15.50

20 00.00 01.30

20 19.10 24.00

21 02.40 07.00

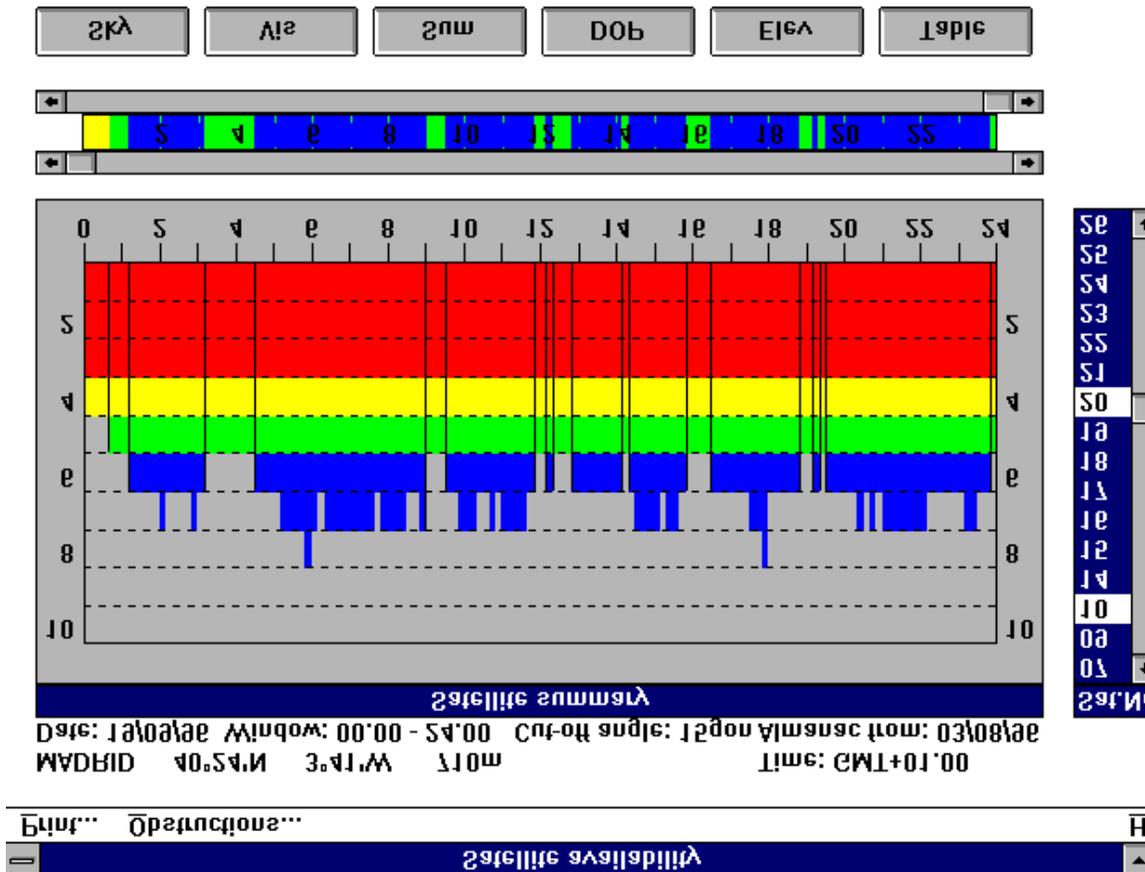
21 18.40 20.40

22 00.00 05.20

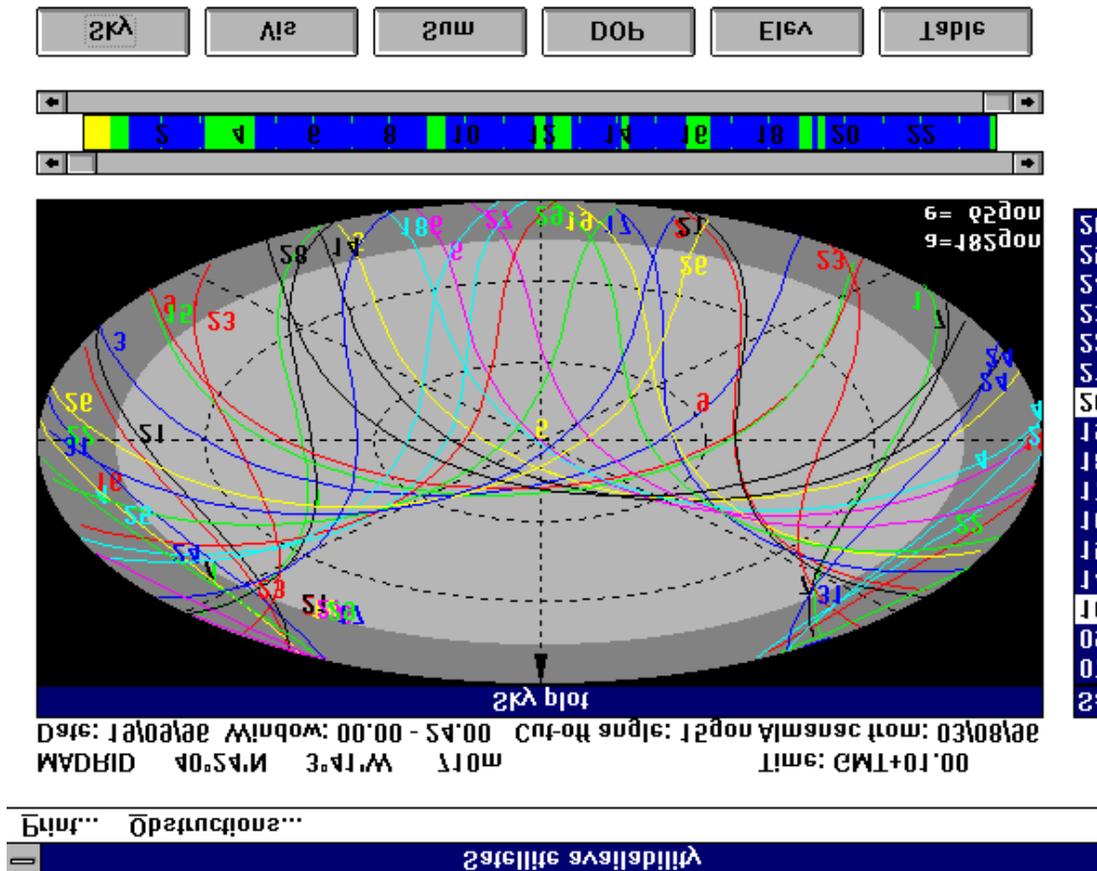
22 23.40 24.00

23 01.50 05.30

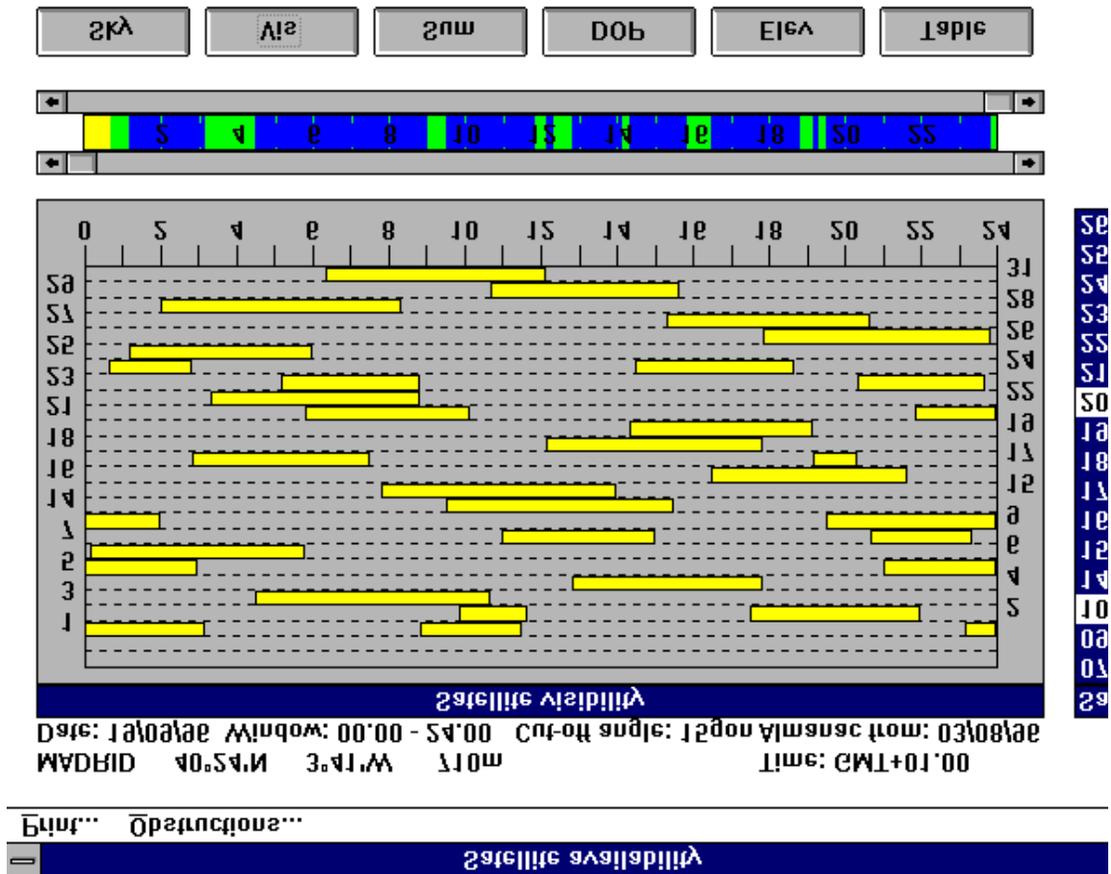
En esta pantalla se puede observar en la escala vertical el número de satélites que existe en un momento determinado, cuyo intervalos es mostrado en la escala horizontal.



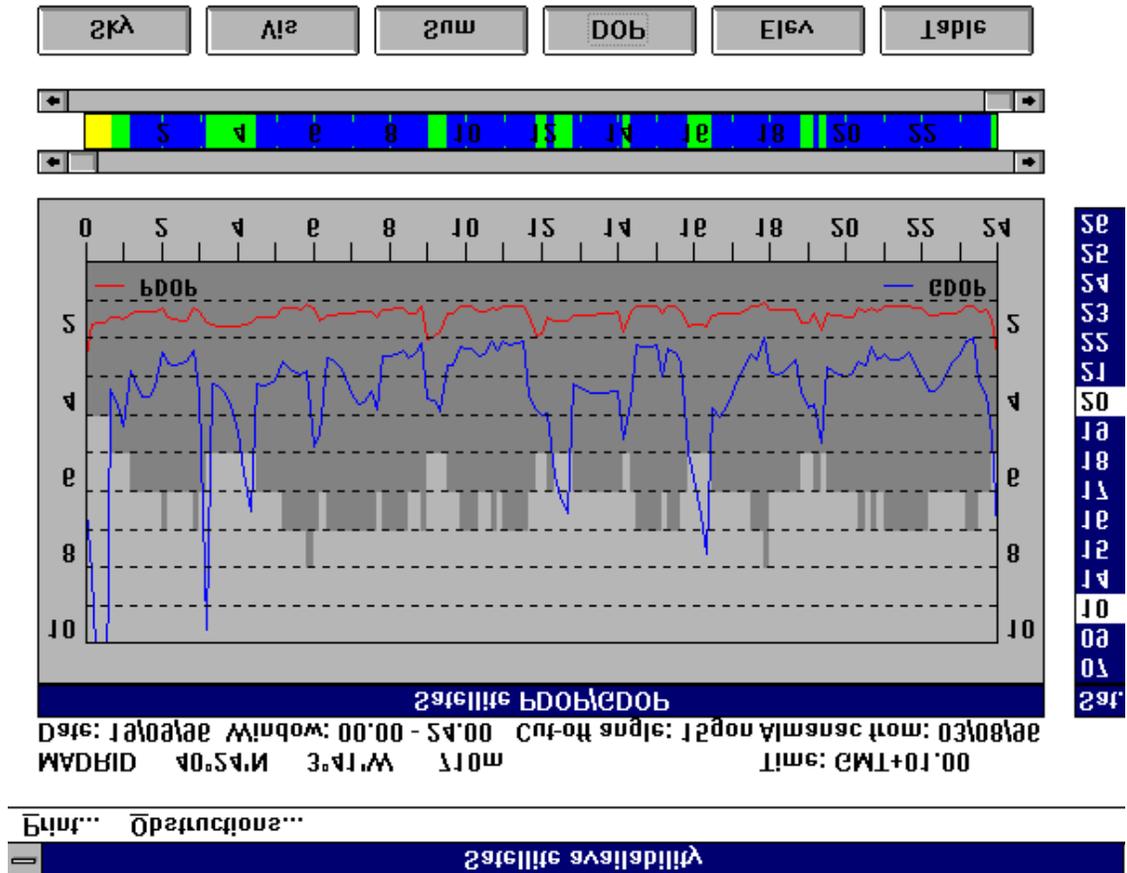
En esta nos muestra la trayectoria seguida por los satélites a lo largo del día.



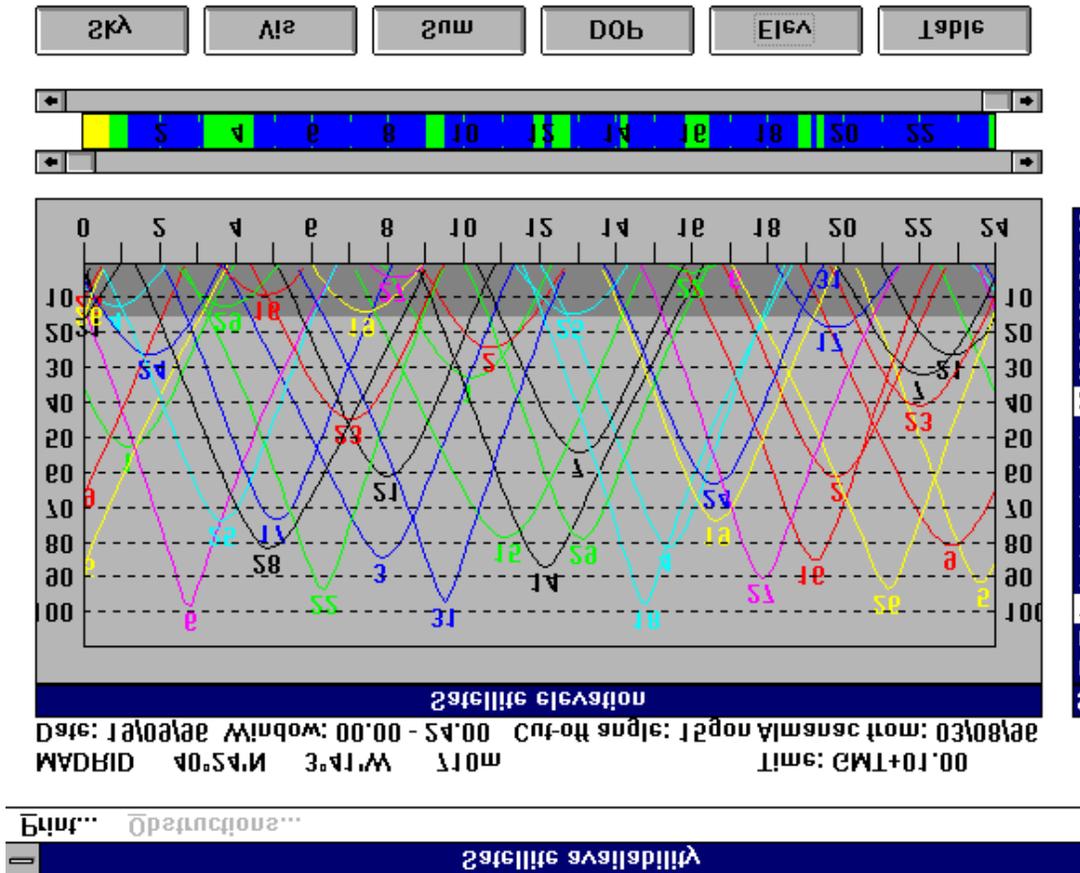
Aquí se nos muestra el Orto y el Ocaso de los satélites en cuestión.



En esta nos muestra el GDOP y el PDOP de la constelación en cada momento del día.



Elevación de cada satélite.



APENDICE I**ALGORITMOS DE CALCULO**

Todos los satélites GPS tienen incorporado un oscilador que genera ondas electromagnéticas con dos frecuencias distintas, L1 con frecuencia 1575.42 Mhz y L2 con 1227.6 Mhz que son recibidos por nuestros receptores en la superficie terrestre.

En el oscilador se produce un movimiento vibratorio armónico del tipo $y = A \sin(\omega t)$. Siendo A la amplitud, " y " la elongación y ωt la fase.

Se propaga en forma de ondas electromagnéticas de modo que al cabo de un cierto tiempo t tendremos $y = A \sin(\omega(t-t))$ habiéndose recorrido una distancia $r = t * c$ siendo c la velocidad de la luz en el vacío.

Como $\omega = 2\pi v$ se llega a

$$y = A * \sin(2\pi v * (r/c - t))$$

La fase del campo electromagnético viene dada por $j(r,t) = 2\pi v (r/c - t)$ siendo esta la observación básica GPS del receptor que recibe a los satélites.

Como $\sin(2\pi v * (r/c - t)) = \sin(2\pi v * (r/c - t) + 2\pi m)$ con $m =$ número entero, y además $c = l * v$ la fase se puede escribir

$$j(r,t) = 2\pi/l * (r - ct + ml)$$

que va a ser la ecuación básica para los observables GPS.

ALGORITMOS EN DIFERENCIA DE FASE

Llamemos t_s al tiempo de satélite que emite la señal y t_r el tiempo en que le recibe el receptor.

Si la longitud del camino recorrido es D y la onda se propaga a la velocidad de la luz c ,

$$t_r = t_s + D/c$$

La fase de la señal para $r = 0$ $t = t_s$ es la misma que para $r = r$ $t = t_r$ luego

$$j(0, t_s) = j(r, t_r)$$

por tanto el satélite S genera una señal cuya fase en el instante de emisión es

$$j_s(t_s) = j(0, t_r) = 2\pi f \cdot (-ct_s + ml)$$

y se recibe en el receptor R en el instante t_r .

La incógnita es r (distancia satélite - receptor) puesto que t_s y t_r son medidos por los relojes de alta precisión del satélite y receptor, aunque no necesariamente sincronizados.

La atmósfera es un medio no ideal, sobre todo en la ionosfera y la troposfera, por lo que la velocidad de propagación de la onda no será la velocidad de la luz en el vacío (c_0).

Así descomponemos c en dos partes $c = c_0 + d_c$ siendo d_c una pequeña cantidad que expresa la variación de la velocidad en la atmósfera ($n > 1$)

luego

$$r/c = r/(c_0 - d_c) = r/c_0(1 - d_c/c_0) = r/c_0 + r \cdot d_c/c_0^2$$

Se denomina al segundo termino, tiempo de retardo de propagación de la onda debido a la presencia de la atmósfera.

$$At_A = r \cdot d_c/c_0^2 \quad \text{luego} \quad t_s = t_r - r/c_0 - At_A$$

y por tanto

$$j_s(t_s) = 2\pi f \cdot (r - c_0 t_r + c_0 At_A + ml)$$

es la fase de la señal en el instante de emisión t_s , en función del instante t_r de recepción.

El receptor GPS no puede observar directamente la fase $j_s(t_s)$ sino compararla con la generada por el oscilador del receptor $j_r(t_r)$.

El observable GPS es $A_{ij} = j_{Sj}(t_{Sj}) - j_{Ri}(t_{Ri}) = j_{Sj}(t_{Ri} - r_{ij}/c_0 - At_{Aij}) - j_{Ri}(t_{Ri})$

siendo R_i el receptor i y S_j el satélite j . A_{ij} es la diferencia de fase entre la señal emitida por el satélite en el tiempo t_{Sj} y la generada por el receptor en el tiempo t_{Ri} , relacionada por

$$t_{Sj} = t_{Ri} - r_{ij}/c_0 - At_{Aij}$$

En la ecuación A_{ij} , el tiempo medido en el receptor t_{Ri} puede estar desfasado respecto al tiempo del satélite. Llamamos e_i a este sistematismo $t_{Ri} = t + e_i(t)$ llamando t al tiempo del satélite.

Suponiendo que $e_i(t)$ es una cantidad pequeña, linealizando por Taylor, la ecuación de observación para los observables GPS toma la forma

$$A_{ij} = 2\pi m + 2\pi/l * (r_{ij}(t) + r'_{ij}(t)e_i(t) - 2\pi(v_S + v_R)(t + e_i(t)) + 2\pi v_S At_{Aij})$$

donde $r_{ij}(t_{Ri}) = r_{ij}(t) + r'_{ij}(t)e_i(t)$

$$r'_{ij}(t) = dr_{ij}(t)/dt$$

La ecuación A_{ij} se verifica para el instante t medido en el receptor con un posible error sistemático $e_{ij}(t)$, que para algunas aplicaciones puede considerarse constante a lo largo de un período de observación.

Las incógnitas son $2\pi m$ (ambigüedad de fase), $r_{ij}(t)$, $r'_{ij}(t)$ y At_{Aij} .

Simples diferencias

Supongamos que se tienen dos receptores R_1 y R_2 observando simultáneamente a un satélite. Formamos las ecuaciones de diferencia de fase para cada receptor.

Receptor 1:

$$A_{1j} = 2\pi m_1 + 2\pi / \lambda (r_{1j}(t) + r'_{1j}(t) e_1(t)) - 2\pi (v_s + v_1)(t - e_1(t)) + 2\pi v_s A_{t_{A_{1j}}}(t)$$

Receptor 2:

$$A_{2j} = 2\pi m_2 + 2\pi / \lambda (r_{2j}(t) + r'_{2j}(t) e_2(t)) - 2\pi (v_s + v_2)(t - e_2(t)) + 2\pi v_s A_{t_{A_{2j}}}(t)$$

Restando ambas ecuaciones

$$A_{12j} = A_{2j} - A_{1j} = 2\pi (m_2 - m_1) + 2\pi / \lambda (r_{2j}(t) - r_{1j}(t)) - 2\pi (v_2 - v_1)t + 2\pi v_s (A_{t_{A_{2j}}}(t) - A_{t_{A_{1j}}}(t)) + T(t)$$

$$\text{siendo } T(t) = 2\pi / \lambda (r'_{2j}(t) e_2(t) - r'_{1j}(t) e_1(t)) + 2\pi (v_1 e_1(t) - v_2 e_2(t))$$

llamada ecuación de simples diferencias.

Este observable tiene como incógnitas las diferencias de distancias $r_{2j}(t) - r_{1j}(t)$, las diferencias de ambigüedades $2\pi (m_2 - m_1)$ y las diferencias de errores de tiempo en los relojes de los receptores.

Dobles diferencias

Suponemos que hay dos receptores 1 y 2, observando a dos satélites j y k de la constelación. Se forma para cada satélite una ecuación de simple diferencia.

$$A_{12j} = A_{2j} - A_{1j}$$

$$A_{12k} = A_{2k} - A_{1k}$$

restando ambas se obtiene una ecuación de observación

$$A_{12kj} = 2p(m_{2k} - m_{1k} - m_{2j} + m_{1j}) + 2p/l^*(r_{2k}(t) - r_{1k}(t) - r_{2j}(t) + r_{1j}(t)) + 2pv(At_{A2k}(t) - At_{A1k}(t) - At_{A2j}(t) + At_{A1j}(t)) + T_k(t) - T_j(t)$$

llamada ecuación de doble diferencia, donde se ha supuesto que la frecuencia de oscilación de los dos satélites es la misma e igual a v , y.

Llamando $T_{jk}(t) = T_k(t) - T_j(t)$ podemos expresarlo como

$$A_{12kj} = M + N(t) + G(t) + T_{jk}(t)$$

Vamos a analizar cada uno de los sumandos de esta ecuación:

$$M = 2p(m_{2k} - m_{2j}) - 2p(m_{1k} - m_{1j})$$

siendo m_{2k} la ambigüedad de fase del receptor 2 con el satélite k , m_{2j} del receptor 2 con el satélite j , m_{1k} del receptor 1 con el satélite k y m_{1j} del receptor 1 con el satélite j .

$$N(t) = 2p/l(r_{2k}(t) - r_{2j}(t)) - 2p/l(r_{1k}(t) - r_{1j}(t))$$

Diferencias de las diferencias de distancias del receptor 2 con los satélites k y j y del receptor 1 con los mismos satélites.

$$G(t) = 2pv(At_{A2k}(t) - At_{A2j}(t)) - 2pv(At_{A1k}(t) - At_{A1j}(t))$$

Diferencias de retardo para un mismo instante t y una misma estación, que son muy pequeños y en algunos casos pueden suponerse nulos.

$$T_{jk}(t) = 2p/l((r'_{2k}(t) - r_{2j}(t))e_2(t)) - 2p/l((r'_{1k}(t) - r'_{1j}(t))e_1(t))$$

Errores sistemáticos de los relojes de los receptores 1 y 2. Pueden suponerse constantes cuando la precisión requerida no sea grande $e_1=e_1(t)$ $e_2=e_2(t)$ a lo largo de un período de observación de varias horas.

También aparecen las velocidades de los satélites respecto a los receptores 1 y 2.

Las ecuaciones de doble diferencia evitan los sistematismos en los satélites, pero existe una incógnita, la ambigüedad en el contado de ciclos.

Triple diferencia

Se consideran dos instantes t_1 y t_2 de la observación y se hacen las dobles diferencias $A_{12jk}(t_1)$ y $A_{12jk}(t_2)$ de esos instantes, la ecuación de triples diferencias es la diferencia de estos observables.

$$d_{12jk}(t_1, t_2) = A_{12jk}(t_2) - A_{12jk}(t_1) = N(t_2) - N(t_1) + G(t_2) - G(t_1) + T_{jk}(t_2) - T_{jk}(t_1)$$

que M (diferencia de ambigüedades) es igual a cero por ser constante en el tiempo

El algoritmo de triples diferencias elimina sistematismos, pero incrementa de forma notable el número de observaciones a tratar. Suele utilizarse en un proceso previo de cálculo a fin de determinar las ambigüedades de ciclo M y errores groseros en los observables, para pasar a un proceso definitivo de cálculo con dobles diferencias.

Las ecuaciones obtenidas no son lineales por lo que hay que linealizarla de forma conveniente antes de un tratamiento por mínimos cuadrados.

Las distancias, incógnitas del problema, dependen de la posición del receptor y los satélites.

En un instante t supongamos que las coordenadas del satélite respecto al sistema C.T.R.S. son $(X_S(t), Y_S(t), Z_S(t))$ y los del receptor (X_R, Y_R, Z_R) . La distancia r vendrá dada por

$$((X_S(t) - X_R)^2 + (Y_S(t) - Y_R)^2 + (Z_S(t) - Z_R)^2)^{1/2}$$

siendo las coordenadas del satélite conocidas mediante las efemérides (hecho que se verifica con cierta aproximación) y siendo (X_R^0, Y_R^0, Z_R^0) las coordenadas aproximadas de la estación R.

Bajo estas hipótesis y utilizando el desarrollo en serie de Taylor:

$$r(t) = r^0(t) - (X_s(t) - X_R^0) dX_R / r^0 + (Y_s(t) - Y_R^0) dY_R / r^0 + (Z_s(t) - Z_R^0) dZ_R / r^0$$

siendo (dX_R, dY_R, dZ_R) incógnitas a determinar mediante los observables GPS (diferencias de fase).

Si las efemérides del satélite no se suponen perfectamente conocidas, aparecerían también las incógnitas $(dX_s(t), dY_s(t), dZ_s(t))$ variación de las coordenadas aproximadas en el instante t.

Una vez linealizadas, las ecuaciones de observación GPS serán un sistema de la forma

$$l = A_1 x + A_2 e + v$$

l es el vector de observaciones (diferencias de fase)

A_1 es la matriz de diseño del vector de incógnitas de las coordenadas de las estaciones x respecto de un sistema terrestre fijo, tres para cada línea base ya que un punto se supone fijo y se determinan diferencias de coordenadas.

A_2 es la matriz de diseño del vector E de incógnitas de sincronización de los relojes de los receptores.

v es el vector de residuos

Suponemos que dos receptores están observando simultáneamente desde dos puntos P y Q, suponemos fijas las coordenadas de P ($dX_p = dY_p = dZ_p = 0$) y se dejan variar en el ajuste las coordenadas de Q, se obtiene:

$$AX_{PQ} = (X_Q - X_P, Y_Q - Y_P, Z_Q - Z_P)$$

componentes de la base PQ.

El método usual de estimación es el de mínimos cuadrados de la siguiente forma. Según el modelo

$$l = Ay + v$$

siendo y el vector de incógnitas en coordenadas, y de estados y marchas de los relojes.

Introduciendo la matriz de errores a priori de las observaciones

$$D^2(v) = s^2 Q$$

la estimación mínimos cuadrados del vector de incógnitas es

$$y = (A^T P A)^{-1} A^T P l \quad \text{con } P = Q^{-1}$$

y su matriz de covarianza

$$C_{yy} = s^2 (A^T P A)^{-1}$$

La matriz Q no se conoce a priori de forma rigurosa, puesto que influyen los efectos de la ionosfera, la troposfera, los errores en la órbita, los errores instrumentales, la marcha en los relojes de los receptores, pero con el algoritmo de doble diferencia estos sistematismos se reducen y se puede modelar mejor la matriz.

Si tenemos n estaciones observando simultáneamente a un satélite, se pueden formar

$$n! \cdot m! / 2(n-2)!(m-2)!$$

dobles diferencias, de los cuales solo $(n-1)(m-1)$ son independientes. Así 4 receptores observando a 6 satélites permiten formar en cada instante 15 ecuaciones independientes para determinar 9 incógnitas en coordenadas y 4 en relojes, en total, 13 incógnitas.

Si suponemos la aproximación

$$e_i(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$$

tendremos 3 incógnitas por receptor, es decir, 12 incógnitas adicionales a las 9 incógnitas en coordenadas, lo que se traduce en 21 incógnitas a determinar.

Si en cada instante t en que se observan las diferencias de fase en los 4 receptores, se pueden formar 15 relaciones de observación de dobles diferencias, en una sesión de una hora con observaciones cada 20 segundos tendremos $60 \cdot 3 = 180$ instantes de observación y $180 \cdot 15 = 2700$ relaciones de observación de doble diferencia para determinar 21 incógnitas.

ALGORITMO EN SEUDODISTANCIAS

Esta medida de distancia es una medición instantánea de distancia entre satélite y receptor en función del retardo entre la transmisión y la recepción de las señales emitidas.

La expresión general para la obtención de pseudodistancias es :

$$(T - t - e) \cdot c = r + C_{ion} + C_{trop}$$

donde:

T = tiempo del receptor

e = estado del reloj del receptor

t = tiempo del satélite

e = estado del reloj del satélite

r = distancia satélite-receptor

$c(ion - trop)$ = corrección (ionosférica y troposférica respectivamente)

También se puede escribir

$$(T - t) \cdot c = r - (e - e) + C_{ion} + C_{trop}$$

siendo $(T - t) \cdot c = r$ la pseudodistancia

$$r = r(e-e)c + C_{ion} + C_{trop}$$

$$r = (X_R - X_S)^2 + (Y_R - Y_S)^2 + (Z_R - Z_S)^2$$

siendo (X_R, Y_R, Z_R) coordenadas del receptor y (X_S, Y_S, Z_S) las coordenadas del satélite.

En aplicaciones donde no se requiera mucha precisión, pero posiciones instantáneas, el único observable necesario es el de pseudodistancias.

La ecuación tiene 7 incógnitas:

- * 2 errores de reloj
- * 3 coordenadas del receptor
- * 1 corrección ionosférica y otra troposférica.

Las correcciones troposférica e ionosférica se pueden calcular sobre la base de modelos ionosféricos y troposféricos, y además, puede calcularse a partir de los datos transmitidos en el mensaje de navegación al usuario.

Así que, en realidad, solo tenemos 4 incógnitas : las tres coordenadas del receptor y el estado de su reloj, por lo que necesitamos determinar 4 pseudodistancias al menos, es decir, observar a cuatro satélites simultáneamente.

La precisión dependerá de la exactitud con que las efemérides nos permitan calcular la posición del satélite y del código utilizado, C/A o P.

Con unas coordenadas aproximadas del receptor (X_R', Y_R', Z_R') podemos realizar un desarrollo en serie de Taylor con el fin de linealizar nuestra ecuación.

$$X_R = X_R' + dX \quad Y_R = Y_R' + dY \quad Z_R = Z_R' + dZ$$

Llamamos:

$$r_0 = ((X_R' - X_S)^2 + (Y_R' - Y_S)^2 + (Z_R' - Z_S)^2)^{1/2}$$

a la distancia calculada a partir de las coordenadas aproximadas del receptor.

$$r(X_R - X_S, Y_R - Y_S, Z_R - Z_S) = r(X_R' - X_S, Y_R' - Y_S, Z_R' - Z_S) + (X_R' - X_S)dX + (Y_R' - Y_S)dY + (Z_R' - Z_S)dZ/r_c$$

Sustituyendo en la ecuación de las pseudodistancias :

$$v + r = r_c + (X_R' - X_S)dX_R + (Y_R' - Y_S)dY_R + (Z_R' - Z_S)dZ_R / r_c + (e - e)c + c_{ion} + c_{trop}$$

siendo $v =$ residual.

$$\text{Luego } (X_R' - X_S)dX_R + (Y_R' - Y_S)dY_R + (Z_R' - Z_S)dZ_R / r_c + ec + L = v$$

siendo

$$L = r_c + r - ec + c_{ion} + c_{trop}$$

el termino independiente.

Si se observa a más de 4 satélites tendremos redundancia y podremos aplicar un ajuste por mínimos cuadrados para calcular las incógnitas.

$$AX - L = V$$

ALGORITMOS EN CINEMATICO

En posicionamiento cinemático la observación tiene dos partes: iniciación e itinerario.

Dentro de la iniciación tenemos tres opciones:

- a) Base estática. Se observa la base como un posicionamiento relativo estático y los algoritmos son los mismos que en la medida de fase.
- b) Base conocida. Se conocerán las coordenadas en los extremos de una base con precisión centimétrica, aplicando el algoritmo de dobles diferencias podemos determinar la ambigüedad.

La ecuación de diferencia de fase también se puede expresar como

$$A_{ij} = -1(1/l)r_i^j(t) + N_i^j + v(e_i(t) + e_j(t))$$

siendo:

A_{ij} la diferencia de fase

r_i^j la distancia entre el satélite y el receptor

N_i^j la ambigüedad

$e_j(t)$ el estado del reloj del receptor

$e_i(t)$ el estado del reloj del satélite.

Para dos receptores la ecuación de simple diferencia será

$$A_{ij} = -1(1/l)r_1^j(t) + N_1^j + v(e_1(t) + e_j(t))$$

Si observamos a dos satélites j, k desde dos estaciones 1,2 en el mismo instante, la ecuación de dobles diferencias será

$$A_{2j} - A_{1j} = -1(1/l)(r_2^j(t) - r_1^j(t)) + N_2^j - N_1^j + v(e_2(t) - e_1(t))$$

Como las estaciones 1,2 son de coordenadas conocidas, la incógnita $N_1^j - N_2^j = N_1^k - N_2^k - N_1^j + N_2^j$ puede ser calculada a partir de la ecuación anterior. Será una cantidad conocida mientras no se interrumpa el seguimiento de los satélites.

Si observamos en dos instantes t_1 y t_2 a los satélites j, k desde las estaciones 1,2 la ecuación en triples diferencias es

$$d_{12jk}(t_1, t_2) = -1/l(r_2^k(t_2) - r_1^k(t_2) - r_1^j(t_2) + r_2^j(t_2) - r_2^k(t_1) + r_1^k(t_1) - r_1^j(t_1) + r_2^j(t_1) - r_1^j(t_1))$$

Si la estación 2 la vamos moviendo y situando en sucesivas estaciones tendremos que en la ecuación de dobles o triples diferencias, las únicas incógnitas son las coordenadas de las nuevas estaciones.

Si observamos con n receptores a m satélites tendremos $(n-1)(m-1)$ ecuaciones en dobles diferencias independientes, así con dos receptores tendremos que observar a cuatro satélites para obtener las tres coordenadas del punto de estación

Con el algoritmo de triples diferencias tendrán n receptores, m satélites en p instantes, es decir, $(n-1)(m-1)(p-1)$ ecuaciones independientes en triples diferencias, luego con dos receptores necesitaremos 4 satélites en dos instantes para determinar la posición del receptor móvil.

c) Intercambio (antena swapping). Conocemos las coordenadas de un punto fijo y estacionamos el otro receptor en un punto muy cercano. Tras unos minutos de registro se intercambian las antenas sin mover los receptores y se observa durante un breve período de tiempo, se retorna a la posición inicial y se observa nuevamente durante otro corto período de tiempo.

En el instante t_1 el receptor R_1 esta situado en la estación 1 y el receptor R_2 esta situado en la estación 2.

Se hace un cambio de antena entre los receptores, para el instante t_2 . La ecuación de triples diferencias para estos dos instantes será

$$d_{12jk}(R_2, R_1, t_2) = -(1/l)(r_2^k(R_1, t_1) - r_2^j(R_1, t_1) - r_1^k(R_2, t_1) + r_1^j(R_2, t_1) - N_{12}^{jk}(t_1))$$

La gran ventaja de la antena swap es que los signos de la época 2 están cambiados. Veamos por ejemplo, si suponemos la diferencia entre t_1 y t_2 muy pequeña (un milisegundo) las ecuaciones en triples diferencias de base conocida y antena swap quedan de la forma $0=0$.

$$d_{12ij}(R_1, R_2, t_1, t_2) = -(2/l)(r_1^k - r_1^j - r_2^k + r_2^j)$$

Este ejemplo nos demuestra como no se pueden dar buenos resultados en un corto período de tiempo usando dobles diferencias pero si con el método de antena swap: Matemáticamente significa que las dobles diferencias son linealmente dependientes.

En la solución triples diferencias para el posicionamiento estático deben tomar observaciones en un largo período de tiempo para que ocurran movimientos significativos del satélite. Luego la técnica cinemática usando la antena swapping tiene la misma precisión que las técnicas estáticas

.

El proceso matemático que se sigue a continuación es el mismo que para el algoritmo en triples diferencias, es decir, se linealiza el sistema y se determinan las coordenadas del punto 2, luego entramos en las dobles diferencias y determinamos la ambigüedad.

La bibliografía utilizada ha sido la siguiente:

- * *THE WM GPS PREMIER*, René Scherrer WILD Heerbrugg. Switzerland.
- * *GPS SATELLITE SURVEYING*, Alfred Leick.
- * *GUIDE TO GPS POSITIONING*, David Wells, Canadian GPS Assocites.
- * *SATELLITE GEODESY - FOUNDATIONS, METHODS AND APPLICATIONS*. Günter Seeber.
- * *SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)*, Curso de Verano1992, Universidad de Cantabria.
- * *GUIDELINES TO STATIC AND RAPID STATIC GPS SURVEYING*. Leica AG.
- * *GUIDELINES TO DGPS WITH SYSTEM 200*. Leica AG.
- * *GUIDELINES TO STOP AND GO AND KINEMATIC GPS SURVEYING*. Leica AG.
- * *GPS LA NUEVA ERA DE LA TOPOGRAFIA*. Alfonso Nuñez, Jose Luis Valbuena, Jesús Velasco.
- * *GUIDELINES ON PROCESSING RINEX DATA WITH SKI*. Michael Schubernigg. Leica AG.
- * *Experimental Monitoring of the Humber bridge using GPS*, V. Ashkenazi y W. Roberts. *Proc. Instn Civ. Engrns, Civ. Engrns, 1997, 120, Nov. 177-182*
- * *AMBIGUITY RESOLUTION ON THE FLY "AROF": RESULTS, FACT, LIMITATIONS*. Dr. Erwin Frei, Dr. Joan Yau and Daniel Sauer, Leica AG.
- * *GPS TECHNOLOGY FROM LEICA*. Rod Eckels, Leica Instruments, Australia.
- * *USER MANUAL SKI*. Leica AG.
- * *AMBIGUITY RESOLUTION ON THE FLY FOR HIGH-ACCURACY, KINEMATIC GPS SURVEYING*. Peter Jackson Leica AG.
- * *" APLICACION DE LAS TECNICAS DE MEDICION GPS EN TIEMPO REAL CON PRECISION CENTIMETRICA A LEVANTAMIENTOS BATIMETRICOS"*. Javier Peñafiel, Jorge Zayas. *MAPPING*, Octubre de 1997.
- * *COORDINATE SYSTEMS & REFERENCE DATUMS*, *Journal of Navigation* Vol. 39 Nº 2, Ashkenazi V.
- * *STATIC, RAPID STATIC, REOCUPATION, STOP AND GO, AND KINEMATIC MEASUREMENTS ON THE FGCS TEST NETWORK, MARYLAND, U.S.A*. Johannes Schuwarz, Michael Schubernigg.

- * *FGCS-95 TESTS*. Henri B. Ayers y Joan Yau. LSG Geodesy North America, Abril 1995.
- * *Guidelines to Real Time Surveying using RT-SKI*. Leica AG.
- * *GLONASS, Issues Remain unsolved"*, GPS WORLD, Mars 1997
- * *Geodesy for the LAYMAN*, Lt. Col. Richard K. Burkand et al, NOAA, 1983
- * *GPS for Land Surveyor*, Jan Van Sickle, Ann Arbor Press, 1996.
- * *Navtech Seminars and GPS Supply*.
- * *Hoffmann-Wellenhof, B.H. Lichtenegger, y J. Collins. 1994. GPS: Teory and Practice. 3rd ed. New York:Springer-Verlag.*
- * *Institute of Navigation. 1993. Global Positioning System monographs. Washington, DC.*
- * *Ashkenazi, V. Gough, R. J. y Sykes, R.M. (1977). Satellite Doppler Positioning.*

<http://www.rtcn.org/>

<http://www.ion.org/>

<http://www.unavco.ucar.edu/>

<http://www.navcen.uscg.mil/>

<http://www.navcen.uscg.gov/gps/default.htm#Status>

http://igs.ifag.de/euref_obs.htm

<http://www.leica-geosystems.com/>

<http://www.mfom.es/ign/>

<http://www.coit-topografia.es/>

<http://www.galileo-pgm.org/>

<http://mx.iki.rssi.ru/sfcsic/english.html>

<http://www.geo.ign.es/>

<http://www.mercator.org>

<http://igscb.jpl.nasa.gov/siteindex.html>

<http://www.mundogps.com/>

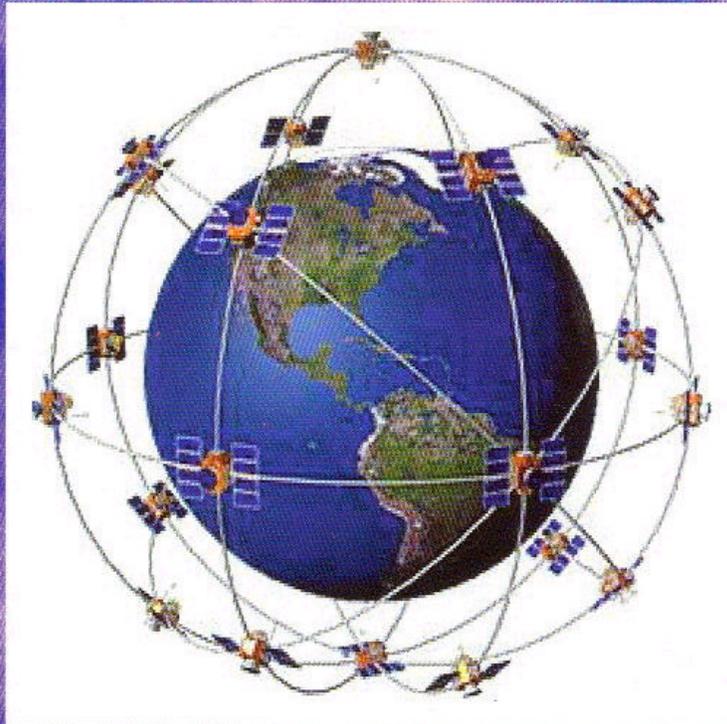
<http://umbc7.umbc.edu/~tbenja1/santabar/rscc.html>

<http://www.profsurv.com/psarchiv.htm>



Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía

*Delegación Territorial
de Madrid-Castilla-La Mancha*



CURSO INTENSIVO SOBRE TECNOLOGÍAS G.P.S.

MÉTODOS Y APLICACIONES

MADRID, AÑO 2001
SEPTIEMBRE: 15, 22 Y 29; OCTUBRE: 6