

Capítulo 16

SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS) TECNOLOGÍA SATELITAL EN SUS MANOS

Manuel Palacios M.

Sistema de Posicionamiento Global (GPS) Tecnología Satelital en sus manos

El Sistema de Posicionamiento Global, conocido por sus siglas en inglés GPS (Global Positioning System), es un sistema de radionavegación satelital operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América. Este sistema está diseñado para que un observador pueda determinar cuál es su posición en la Tierra, con una cobertura sobre todo el planeta, en todo momento y bajo cualquier condición climática.

Si bien el sistema GPS fue diseñado esencialmente con fines militares, el uso civil se ha difundido debido a su utilidad en las más variadas disciplinas, que van desde las netamente científicas, como la geodesia y tectónica, hasta fines comerciales como el geomarketing, pasando por fines puramente recreacionales. Otro factor importante en su difusión ha sido el bajo costo, ya que el uso del sistema es gratuito. Sólo es necesario contar con un receptor GPS, cuyo precio variará según el nivel de precisión que permita obtener.

Nuestro país está siendo sometido a una creciente demanda de información, la que en la mayoría de los casos tiene un componente espacial. Ya no basta conocer, por ejemplo, la superficie de suelos erosionados o la cantidad de vertederos ilegales existentes en Chile, como una estadística que sirva para tomar decisiones. Ahora es necesario identificar su ubicación para poder acceder a ellos cuando sea necesario verificar, actualizar o corregir la información existente, y llevar a efecto las decisiones tomadas con respecto a ellos. Es en este contexto cuando aparece el GPS como una herramienta útil a los fines de espacialización de la información. Se hace frecuente que algunos organismos del Estado y muchas empresas lo utilicen o exijan que la información que se les entregue por parte de terceros sea acompañada con las coordenadas de ubicación de ella. Como ejemplo podemos mencionar que a algunos organismos estatales a los cuales se les entrega información sobre análisis de suelos, se les debe adjuntar las coordenadas de ubicación del lugar en el cual fueron tomadas las muestras de suelo.

16.1.¿CÓMO FUNCIONA EL SISTEMA GPS?

El sistema GPS se basa en la constelación de satélites NAVSTAR (Navegación por Satélite en Tiempo y Distancia) que comenzó su operación entre los meses de febrero y diciembre de 1978, con el lanzamiento de los primeros cuatro satélites. Luego se llegó a un total de 24 satélites ubicados en seis planos orbitales, que tienen una inclinación de 55° con respecto al Ecuador. Los satélites se encuentran a una distancia aproximada de 20.200 km de la Tierra y describen una órbita elíptica, casi circular, de doce horas de duración.

Con esta configuración se garantiza que en cualquier lugar de la Tierra habrá al menos cuatro satélites sobre el horizonte en todo momento, número mínimo requerido para obtener una posición mediante un receptor GPS.

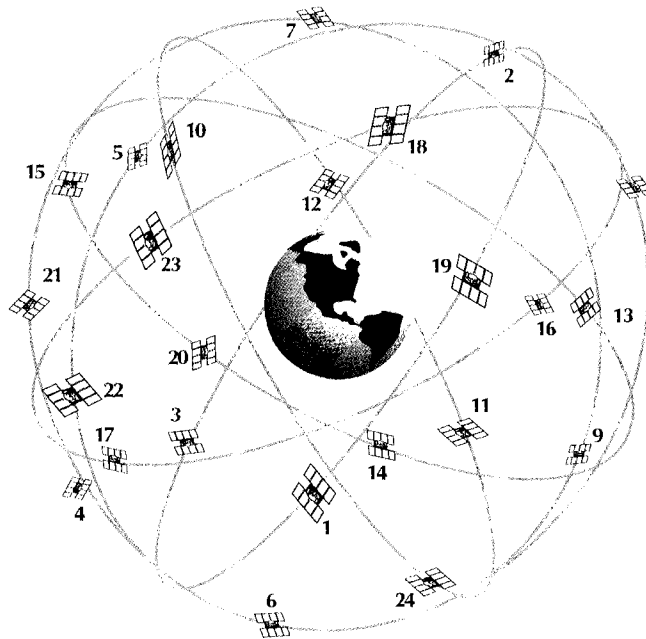


Figura 16.1. Esquema de la constelación NAVSTAR.

Si bien al hablar de GPS lo más común es pensar en el equipo receptor que nos permite determinar nuestra posición, éste es sólo una parte de un sistema compuesto por tres segmentos: espacial, control y usuario.

- El Segmento Espacial está compuesto por la constelación NAVSTAR ya mencionada, cuyos satélites cuentan con relojes atómicos que permiten garantizar una altísima precisión en la generación y emisión de la información que es transmitida vía ondas de radio y que permite a los receptores GPS determinar su posición.
- El Segmento de Control está compuesto por bases dedicadas al seguimiento continuo de todos los satélites de la constelación NAVSTAR con la finalidad de asegurar el correcto funcionamiento de cada satélite y determinar su posición en el espacio. De esta manera es posible calcular los parámetros necesarios para predecir dónde se encontrará el satélite en un momento dado. Esta información es transmitida a los satélites por el segmento de control y se conoce como efeméride.

Las estaciones de control de la constelación son:

- Colorado Springs (U.S.A.). Central de cálculo y operaciones.
- Ascensión (Atlántico Sur).
- Hawai (Pacífico Oriental).
- Kwajalein (Pacífico Occidental).
- Diego García (Índico).

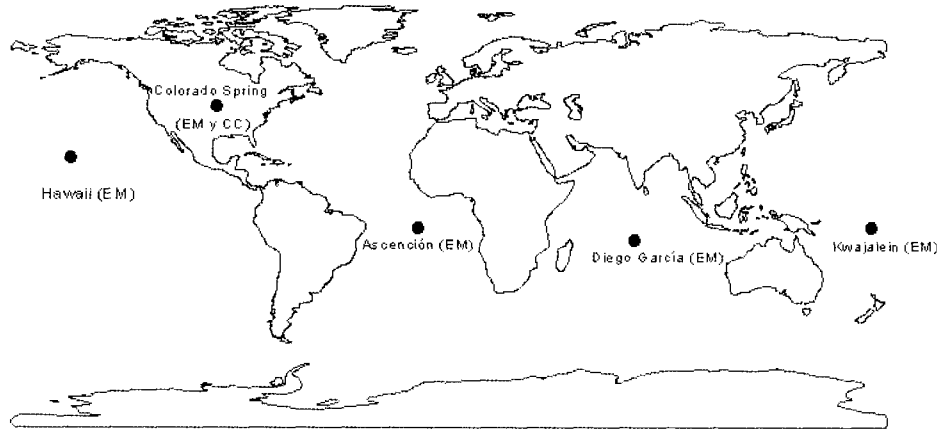


Figura 16.2. Distribución de las estaciones de control GPS en el mundo.

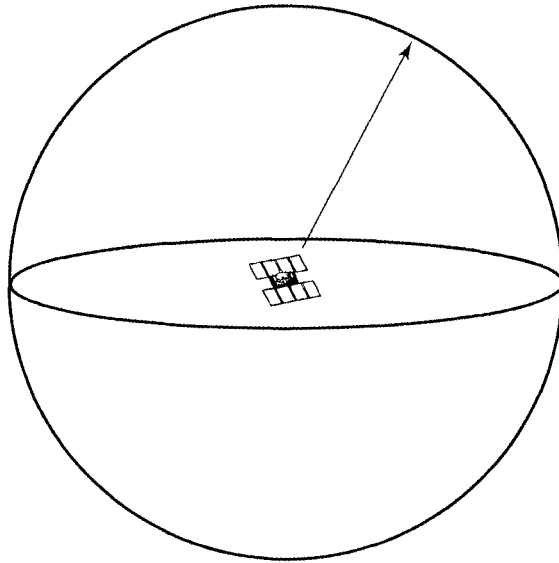
El Segmento de Usuarios lo componen el instrumental y software utilizados por el usuario para determinar su posición. En general los componentes básicos del receptor GPS son la antena, una sección de radiofrecuencia, un microprocesador, una unidad de control y despliegue (CDU), unidad de almacenamiento de información y una fuente de energía. Usualmente todos los componentes están incorporados en una sola unidad. Sin embargo, también podemos encontrar los componentes por separado, especialmente la antena. Recientemente podemos encontrar en el mercado las tarjetas computacionales GPS, que permiten ser incorporadas en otro tipo de equipos.

Ahora veremos cómo se relacionan estos tres segmentos para que logremos determinar en qué lugar del planeta nos encontramos. Para ello describiremos cinco pasos básicos del funcionamiento del sistema GPS:

1. Triangulación de los satélites.
2. Medición de distancia a los satélites.
3. Control del Tiempo.
4. Determinación de la posición de los satélites.
5. Corrección de errores.

16.1.1. Triangulación de los satélites

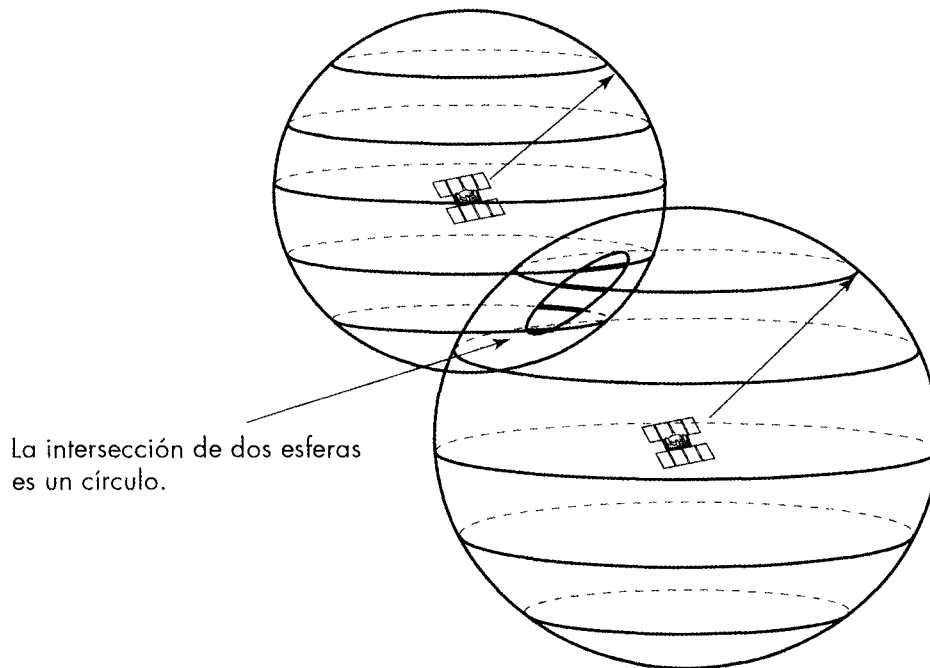
Para determinar una posición sobre la superficie de la Tierra, se calcula la distancia desde el punto geográfico hasta el grupo de satélites que actúa como puntos de referencia de alta precisión. Si conocemos nuestra distancia a un satélite, podemos estimar dicha distancia como el radio de una esfera con centro en el satélite, por lo que nosotros estaríamos ubicados en algún punto de la superficie de esta esfera.



Nuestra posición es un punto en la superficie de la esfera generada con radio igual a la distancia del satélite al receptor GPS.

Figura 16.3. Medición de la distancia a un satélite.

Al determinar el receptor GPS la distancia a un segundo satélite se puede generar otra esfera, con lo que la búsqueda de nuestra posición se reduce a la intersección de las dos esferas.



La intersección de dos esferas es un círculo.

Figura 16.4. Conocida la distancia a un segundo satélite reducimos las posibles posiciones.

Al conocer la distancia a un tercer satélite la intersección de las tres esferas se reduce a dos puntos. Una de estas posiciones puede ser descartada como una respuesta no válida, por dar una posición muy lejana de la superficie de la Tierra o porque se mueve a una alta velocidad.

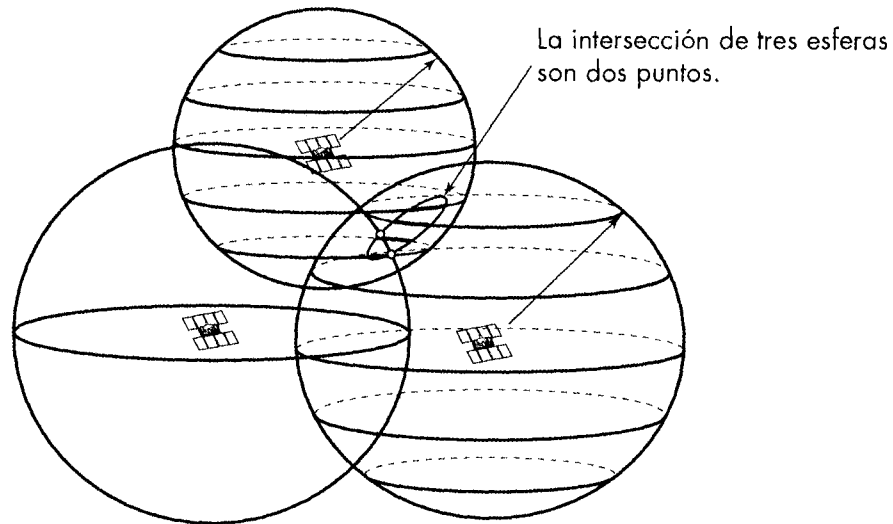


Figura 16.5. Con tres satélites ya podemos determinar una posición en dos dimensiones.

A pesar de que podríamos determinar nuestra posición con sólo tres satélites, metodología conocida como posicionamiento 2D, en la práctica es necesario la información de un cuarto satélite para resolver adecuadamente las ecuaciones que determinan las coordenadas X, Y, Z, y el tiempo, para obtener una precisión aceptable.

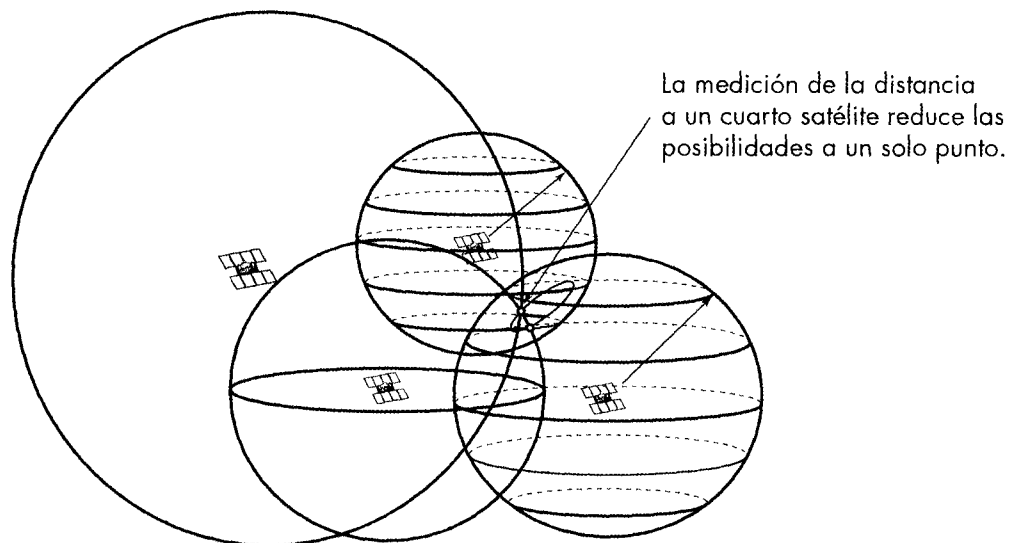


Figura 16.6. Con cuatro satélites podemos obtener una posición confiable.

16.1.2. Medición de distancia a los satélites

Para resolver el problema de la triangulación, el receptor GPS primero debe determinar la distancia a los satélites, para lo cual se vale de las señales de radio emitidas por cada uno de ellos, midiendo cuánto tardan en llegar desde el satélite al receptor.

Matemáticamente es un problema sencillo, similar a los problemas del colegio en que se pregunta qué distancia recorre un tren que viaja a 120 km/h durante 2 horas. En el caso del GPS estamos midiendo una señal de radio que viaja a la velocidad de la luz, aproximadamente 300.000 km/seg.

Para determinar cuanto tiempo tarda la señal en llegar, tanto el satélite como el receptor generan una señal con un código Pseudo Aleatorio en forma simultánea. El receptor GPS examina el código que está recibiendo desde el satélite y determina cuanto tiempo ha transcurrido desde que generó el mismo código. Sólo falta multiplicar este tiempo por la velocidad de la luz y ya tenemos la distancia.

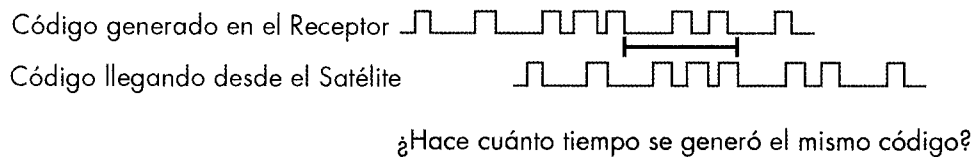


Figura 16.7. Comparación de los códigos pseudo aleatorios del receptor y el satélite, para determinar la distancia que los separa.

El Código Pseudo Aleatorio corresponde a una sucesión muy complicada de pulsos «on» y «off». La complejidad del código permite asegurar que el receptor GPS no se sintonice accidentalmente con otra señal. Esta complejidad también dificulta la interferencia intencional por parte de terceros que pretendan manipular o dificultar el funcionamiento del sistema GPS.

Dado que cada satélite tiene su propio y único Código Pseudo Aleatorio, esta complejidad también permite garantizar que el receptor no se confunda accidentalmente de satélite. Este código le da la posibilidad al Departamento de Defensa de Estados Unidos de controlar el acceso al sistema GPS en caso necesario.

16.1.3. Control del tiempo

Vimos que la distancia se determina calculando el tiempo que tarda la señal de radio en llegar al receptor, pero debemos tener presente que si esta medición se realiza con un desvío de una milésima de segundo, a la velocidad de la luz, significa un error de aproximadamente 300 km.

Por esto es que la sincronización de la emisión del código entre el satélite y el receptor debe ser prácticamente perfecta. En este sentido se cuenta con relojes atómicos a bordo de cada satélite, los

que cuentan con una precisión de un nanosegundo. Sin embargo, en el caso de los receptores es impracticable el uso de estos relojes, entre otras cosas, debido al altísimo costo que ello implicaría para cada receptor (costos por sobre los US\$50.000 a US\$100.000). Por este motivo se utilizan relojes de menor precisión, los que usualmente son de cuarzo con una alta estabilidad, especialmente diseñados para el uso en el GPS.

Como se explicó en la Triangulación, podríamos calcular una posición con tan solo 3 satélites, pero el sistema ha sido diseñado de modo que permita corregir el error de sincronización en el reloj del receptor, mediante la medición de un cuarto satélite.

Con relojes perfectos la intersección de las distancias a todos los satélites sería un punto único que indicaría nuestra posición. Pero con relojes imperfectos, una cuarta medición, realizada como control cruzado, no intersectará en el punto calculado con los tres satélites iniciales. Cuando esto ocurre la computadora del GPS atribuirá la diferencia a una desincronización con la hora universal utilizada por el sistema, por lo que el reloj interno será automáticamente adelantado o atrasado hasta que permita que las mediciones de las distancias coincidan en un solo punto.

De esta forma se puede tener un reloj de precisión atómica en la palma de la mano, por lo que el sistema GPS no sólo trae como beneficio determinar posiciones sino también un control de tiempo altamente preciso.

Medición de distancia a los satélites, en dos dimensiones

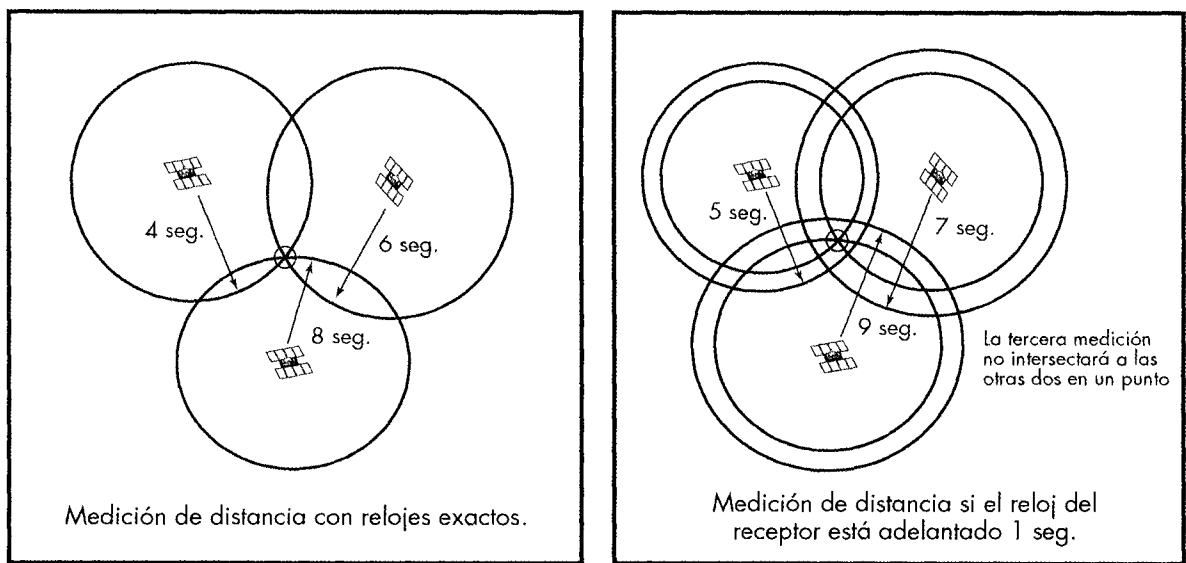


Figura 16.8. El sistema realiza un ajuste automático del reloj interno del receptor GPS.

16.1.4. Determinación de la posición de los satélites

Para utilizar los satélites como puntos de referencia necesitamos saber, exactamente, dónde están en el momento en que se realiza la medición. Recordemos que esta posición será el centro de una esfera de radio igual a la distancia al receptor que, intersectada con otras esferas, nos dará nuestra posición en la Tierra.

Cada satélite de la constelación NAVSTAR está a una distancia aproximada de 20.200 km de la Tierra, en una órbita sumamente estable por lo que también predecible mediante ecuaciones matemáticas.

Los receptores GPS tienen en su memoria un almanaque que les permite saber dónde está cada satélite en un momento determinado. Este almanaque es actualizado con las efemérides que corresponden a los datos que el Segmento de Control transmite a cada satélite, con información sobre las correcciones en los cálculos de las órbitas, luego de los continuos monitoreos realizados por este Segmento, mediante radares muy precisos que les permiten determinar la exacta altura, posición y velocidad de cada satélite.

16.1.5. Corrección de errores

Ahora debemos considerar algunas fuentes de error que pueden afectar el funcionamiento del sistema que, en mayor o menor grado, determinan la precisión del posicionamiento. Si bien se ha calculado la distancia a los satélites utilizando la velocidad de la luz para el desplazamiento de las señales de radio, esto ocurre sólo en condiciones de vacío, por lo que en la realidad la velocidad de viaje de las señales emitidas por los satélites se ve disminuida al pasar por la ionosfera y la troposfera.

Para minimizar este tipo de error algunos receptores realizan algunas correcciones en base a modelos que permiten predecir el error tipo en un día promedio, pero en la práctica es difícil que las condiciones atmosféricas se ajusten a un promedio previsto. Otro método consiste en comparar la velocidad relativa de dos señales diferentes, para lo que se debe recurrir a receptores de doble frecuencia bastante sofisticados.

Errores en los relojes atómicos y en las órbitas de los satélites son factibles y afectan las mediciones realizadas, pero en general son menores y son permanentemente monitoreadas y corregidas por el Segmento de Control.

Otro problema práctico corresponde a que hemos supuesto que la señal que recibe el receptor ha viajado directamente desde el satélite; sin embargo, esta señal puede llegar luego de rebotar en superficies como laderas de montañas, edificios y bosques, siguiendo rutas más largas que las esperadas. Este tipo de error se minimiza mediante el uso de antenas especialmente diseñadas y utilizando avanzados procesamientos de las señales.

La geometría de la distribución de los satélites en el momento de la medición es otro factor que afecta la precisión de las mediciones. Esto se conoce como «Dilución Geométrica de la Precisión»

o GDOP. Idealmente la intersección de las distancias a los satélites será un punto, pero debido a que el sistema tiene cierto rango de incerteza, en realidad la intersección es un área.

Si los satélites se encuentran muy juntos en el espacio el área de intersección que se produce es muy grande y la precisión baja. Si los satélites se encuentran bien distribuidos en el espacio los ángulos de intersección son casi rectos y la precisión aumenta. Los buenos receptores son capaces de determinar qué satélites de los visibles en un momento son los óptimos para disminuir el error por Dilución Geométrica de la Precisión.

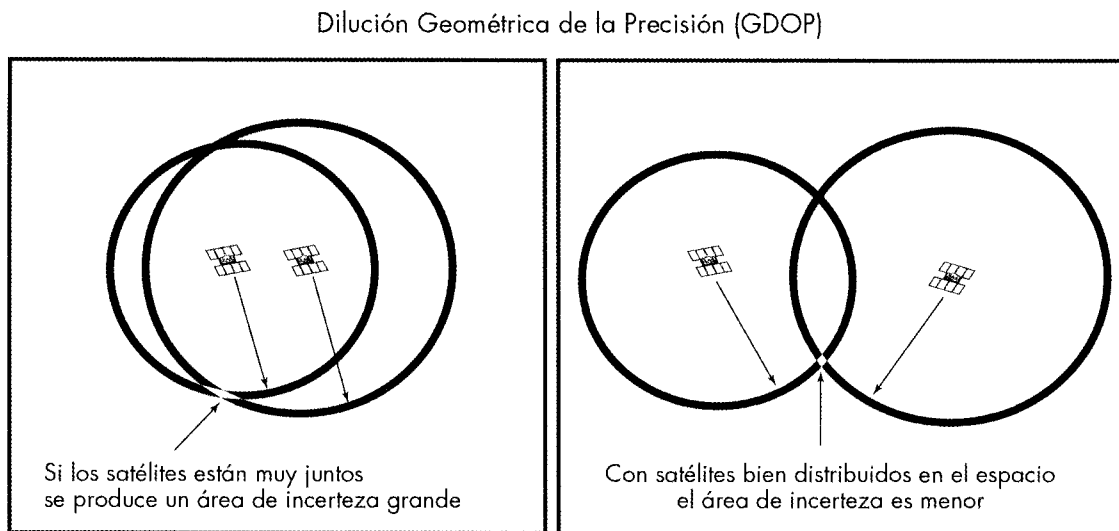


Figura 16.9. Influencia de la distribución de las satélites en el espacio sobre el nivel de precisión obtenido, GDOP.

Uno de los factores que significaba una mayor degradación en la precisión y exactitud del sistema GPS correspondía a la Disponibilidad Selectiva. Ésta correspondía a una serie de errores introducidos intencionalmente al reloj de los satélites, por el Departamento de Defensa de Estados Unidos, para evitar que su propio sistema de radionavegación fuese utilizado en su contra por algún enemigo. Esta degradación de la precisión hacía frecuente errores en la posición del orden de los 100 m en los GPS de uso civil, no así en los de uso militar que se encontraban equipados de modo de evitar esta fuente de error.

Finalmente, la Disponibilidad Selectiva fue desactivada en mayo del año 2000, ya que no se justificaba degradar la precisión del sistema cuando existen otros métodos de posicionamiento bastante precisos, como es el caso del sistema GLONASS (Global' naya Navigatsionnaya Sputnikova Sistema o Sistema Global de Navegación por Satélite), símil ruso del sistema GPS que jamás incorporó alguna fuente de error intencional. Además, en estos momentos Estados Unidos cuenta con la tecnología que le permite activar la Disponibilidad Selectiva en zonas específicas del planeta que se encuentren en conflicto, sin degradar la precisión del sistema para el resto del mundo.

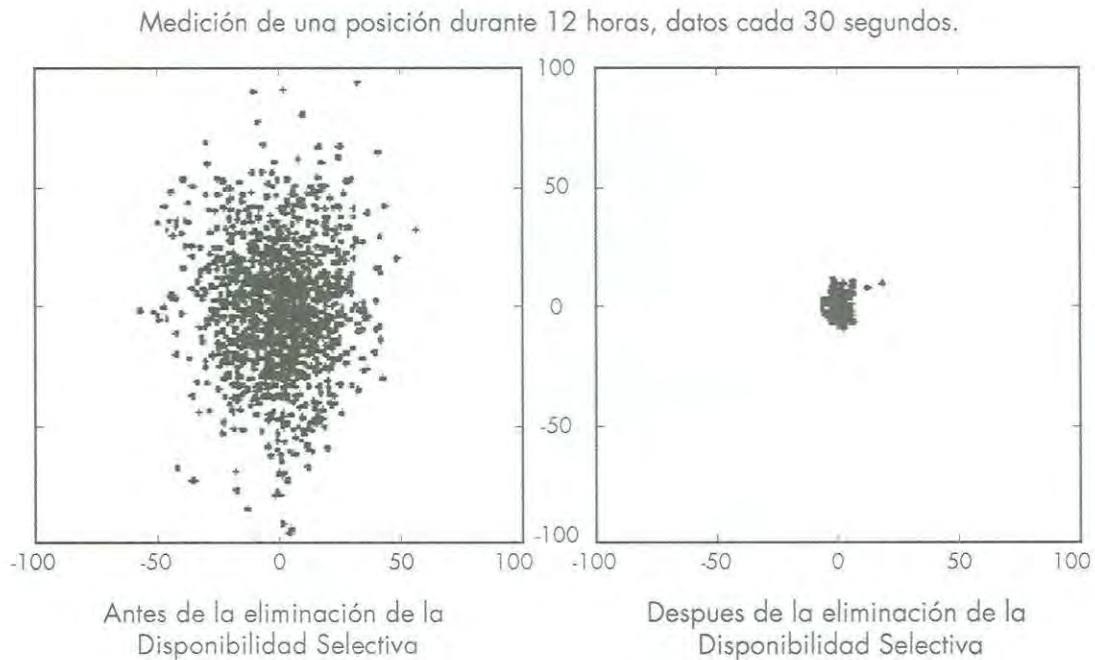


Figura 16.10. Dispersión de las posiciones obtenidas en un solo punto, antes y después de la eliminación de la Disponibilidad Selectiva, expresadas en metros.

16.2. CORRECCIÓN DIFERENCIAL DGPS

Debido a la limitación que implicaba la presencia de la Disponibilidad Selectiva, se diseñó una metodología que permitiera eliminar esta fuente de error y a la vez ayudar a corregir los errores atmosféricos.

Si se utiliza un GPS de alta precisión en un punto de ubicación conocida (GPS Base), esperaremos que el GPS nos entregue como resultado esa posición. Si esto no sucede, podemos determinar la magnitud del error ocurrido comparando el resultado obtenido con el resultado esperado. Esta diferencia, expresada para cada eje de coordenadas, puede ser utilizada por otro GPS ubicado en una posición no conocida (GPS móvil) para corregir los resultados que está obteniendo.

Del mismo modo podemos determinar la diferencia entre la distancia esperada a cada satélite y la obtenida. Así, el GPS móvil realizará la corrección sólo para los satélites que esté utilizando en cada medición.

La información del GPS móvil puede ser almacenada para, más tarde, realizar la corrección diferencial al comparar los datos con los de un archivo de la estación base. Esta metodología es conocida como Corrección Diferencial Post Proceso.

Cuando se requiere una información inmediata de alta precisión se puede utilizar el método de Corrección Diferencial en Tiempo Real. En este caso, la información generada por la Base es

transmitida al GPS móvil para que la posición que determine ya incorpore la corrección. En áreas pequeñas se puede utilizar sistemas de transmisión VHF. Para distancias medias se utilizan transmisores de baja frecuencia como los utilizados por los Radio Faros del Servicio de Guardacostas de los Estados Unidos. Finalmente, para cubrir extensas áreas, llegando a un continente completo, se recurre al uso de satélites geostacionarios como, por ejemplo, los de la empresa OmniSTAR.

Luego de que se eliminó la Disponibilidad Selectiva, la principal fuente de error que permite corregir el método diferencial es el Atmosférico, que puede ser del orden de los 10 metros aproximadamente. Debido a la alta variabilidad espacial de las condiciones atmosféricas, idealmente el GPS base y el GPS móvil deben estar dentro de una distancia que les asegure encontrarse bajo las mismas condiciones atmosféricas y la visibilidad de los mismos satélites.

En el caso de utilizar corrección basada en sistemas continentales, se utilizan varias estaciones distribuidas en el área que calculan la corrección para cada satélite visible en el continente. Esta información es enviada a una central que codifica y comprime la información para luego ser enviada al satélite geostacionario. Éste retransmite la información para que los receptores diferenciales decodifiquen y descompriman la información. De esta información el GPS utilizará aquella correspondiente a la corrección de los satélites que tenga a la vista desde su ubicación. En este caso, como las estaciones base están ubicadas a gran distancia unas de otras y el GPS móvil puede estar en cualquier lugar dentro del área de cobertura del satélite, es necesario determinar una corrección atmosférica mediante cálculos estadísticos. Para ello se utiliza un método conocido como distancia inversa, en el que a la corrección determinada por cada estación se le asigna un peso relativo de acuerdo a la distancia a la que se encuentren del GPS móvil. Así, estaciones más cercanas serán más relevantes que aquellas que se encuentren más alejadas, lo que en teoría debería coincidir con el hecho de que las condiciones atmosféricas serán más parecidas en las Bases más cercanas.

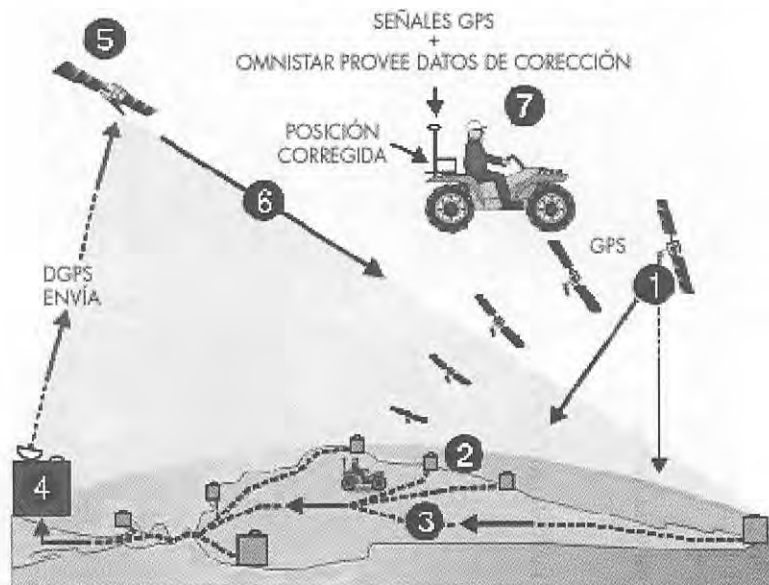


Figura 16.11. Esquema del método DGPS utilizando un satélite geostacionario de la empresa OmniSTAR.

16.3. APLICACIONES DEL GPS

El sistema GPS fue diseñado para fines militares y ese es el uso primordial para el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América. El uso civil del GPS se ha masificado debido al amplio rango de campos en los que puede ser aplicado. Seguramente el GPS más conocido en Chile en este momento es el que acompaña a Carlo De Gavardo en los rallies por desiertos y recónditos lugares del planeta, que le permite saber en cada momento su ubicación y dónde se encuentra la meta.

Este uso en navegación se aplica a transporte terrestre, marítimo y aéreo, aumentando la seguridad de los viajes si se conocen de antemano las zonas de riesgo. Y si al receptor GPS se le agrega un equipo que pueda transmitir la posición determinada, se tiene una herramienta de control de flotas que permite saber dónde se encuentra cada vehículo en todo momento. Ejemplo de la utilidad de esta herramienta es el caso de determinar la ambulancia que se encuentra más cercana al lugar en el que se ha producido un accidente, o un radiotaxi de un pasajero. En Chillán podemos observar que algunas Líneas de Microbuses cuentan con equipos GPS que almacenan la información del recorrido y que es bajada a un computador al llegar al terminal.

El uso científico del GPS abarca las más variadas investigaciones, como apoyo en el estudio de la Atmósfera, en la Geodesia, Antropología, Arqueología, Topografía, etc.

Un ejemplo puede ser el uso del GPS en Agricultura de Precisión, donde la componente espacial acompaña toda la información que se genera en terreno, como el lugar donde se toman las muestras de suelo, el monitoreo del rendimiento de los cultivos, o la presencia de plagas y enfermedades, para luego tomar decisiones de aplicación de tasas variables de semillas, fertilizantes o pesticidas, cuando corresponda.



Figura 16.12: Toma de muestras de suelo, georeferenciadas con GPS Diferencial.

Se ha utilizado GPS en el seguimiento de animales en peligro de extinción, en evaluación de los efectos de huracanes y terremotos, actualización de cartografía marítima y terrestre, excursiones deportivas y, últimamente, en un juego denominado «geocaching» en el cual se esconde un envase sellado en algún lugar del planeta y se publican las coordenadas de ubicación del objeto en Internet. La persona que encuentra el envase retira su contenido a modo de premio y debe dejar un nuevo premio a cambio, para que otros tengan la oportunidad de jugar. En algunos casos los premios son simples recuerdos y en otros consisten en sumas de dinero bastante interesantes.

En Chile podemos encontrar algunos tesoros escondidos, uno de ellos se encuentra en:

S 33°29.050 W 071°38.390 (WGS-84) , escondido el 29/09/2001 por PETE&AIRD, en la playa Chépica, Comuna El Tabo, Quinta Región, en la segunda duna detrás de una cruz en la playa, en dirección este, enterrada a 30 cm. Dentro de una bolsa plástica negra (<http://www.geocaching.com>).



Figura 16.13. Iconos para GPS Garmin eTrex diseñados para geocaching.

16.4. SOFTWARE DE APOYO

La información generada por el GPS es almacenada en la memoria interna del equipo para poder ser utilizada nuevamente en el receptor o para ser transmitida a otros equipos como, por ejemplo, un computador.

Existe una gran variedad de softwares relacionados con el uso del GPS, desde aquellos que nos permiten transferir los datos al computador o realizar la Corrección Diferencial Postproceso, a otros con las más variadas finalidades, como puede ser el cambio de proyección, incorporación de los datos a un Sistema de Información Geográfica, sistemas de navegación en tiempo real, etc.

Dentro de los softwares que permiten el traspaso de datos desde y hacia un computador, se puede mencionar a «Garmin PCX5», «Magellan Waypoint», «Waypoint+», «GPS Pathfinder Office».

El Software OziExplorer permite tener conectado el GPS a un computador portátil, en el que podemos tener un mapa base y sobre el cual se irá desplazando el cursor a medida que el GPS registre nuestros movimientos.

Muchos de estos softwares permiten determinar la configuración de la constelación de satélites sobre el horizonte visible desde un punto determinado, en cualquier momento que se necesite conocer. Esto es útil para determinar qué condiciones de trabajo encontraremos cuando salgamos a terreno o, mejor aún, nos permite determinar cuándo se darán las mejores condiciones de trabajo para así programar las campañas de terreno.

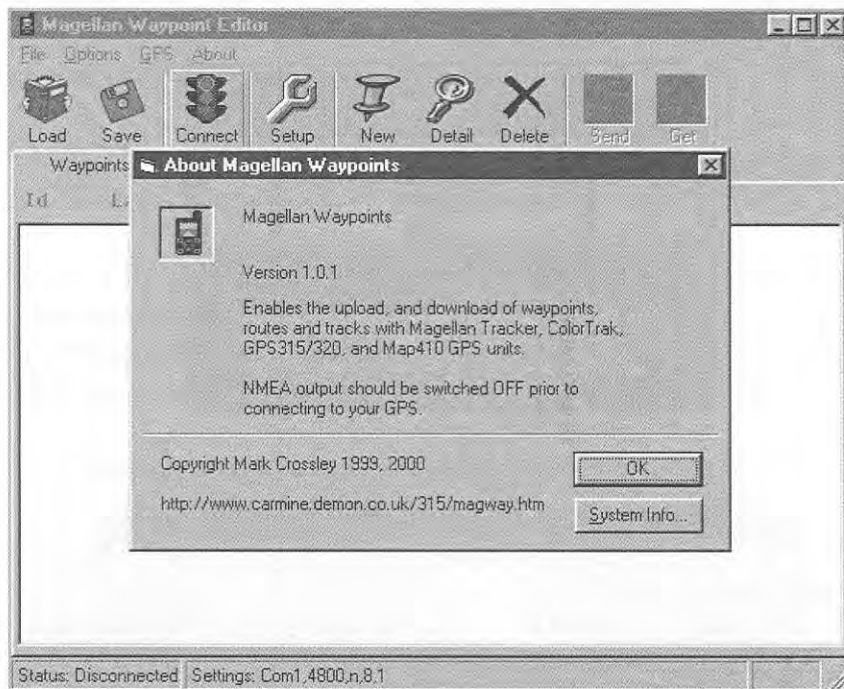


Figura 16.14a. Software que permite la transferencia de datos entre el GPS y el computador.

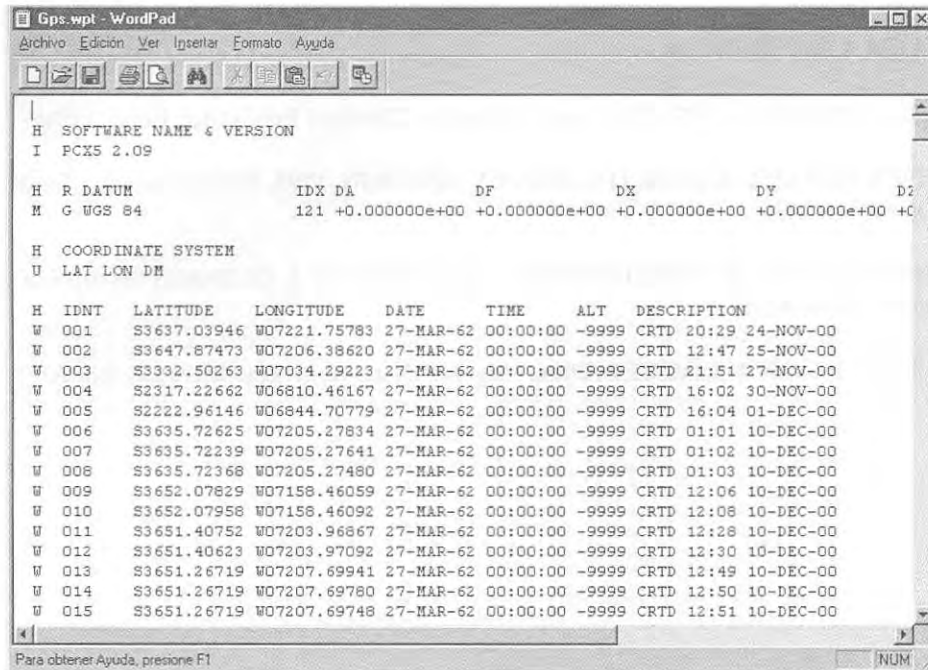


Figura 16.14b. Ejemplo de un archivo de posiciones (waypoints) almacenadas en un GPS.

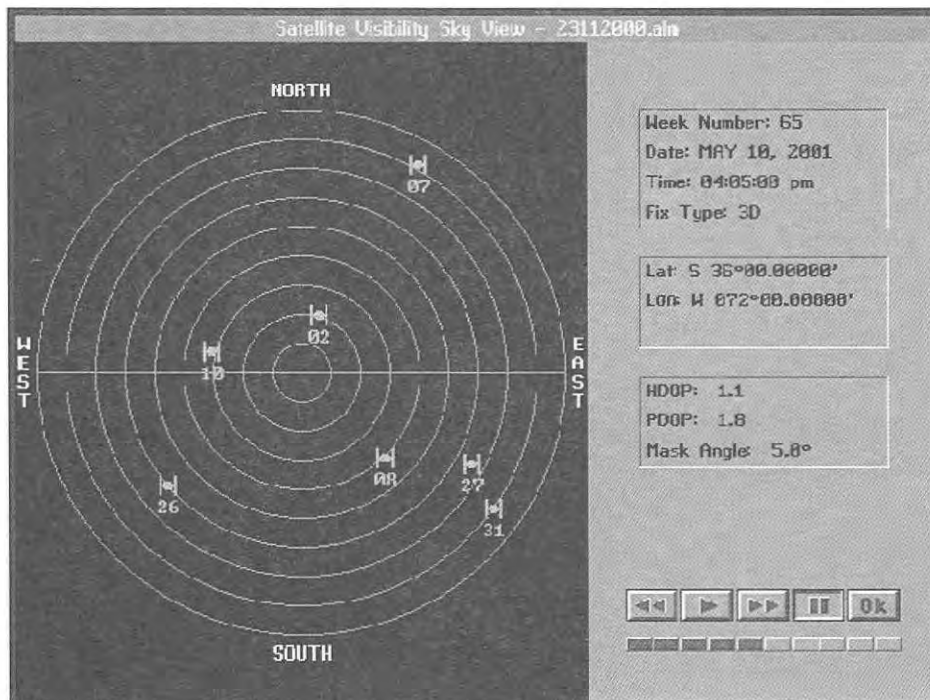


Figura 16.14c. Configuración de los satélites para una fecha, hora y posición determinada.

LITERATURA CONSULTADA

FERGUSON, MICHAEL, 1997, GPS Land Navigation, Glassford Publishing, Boise, Idaho.

GEOMATICS CANADA, GEODETIC SURVEY DIVISION, 1995, GPS Positioning Guide, Ottawa, Ontario.

HOLANDA BLAS, M.P., BERMEJO ORTEGA, J.C., 1998, GPS & GLONASS descripción y aplicaciones, Madrid.

TRIMBLE NAVIGATION LIMITED, 2001, Mapping Systems, general reference. U.S.A.