

## ***CAPITULO 10***

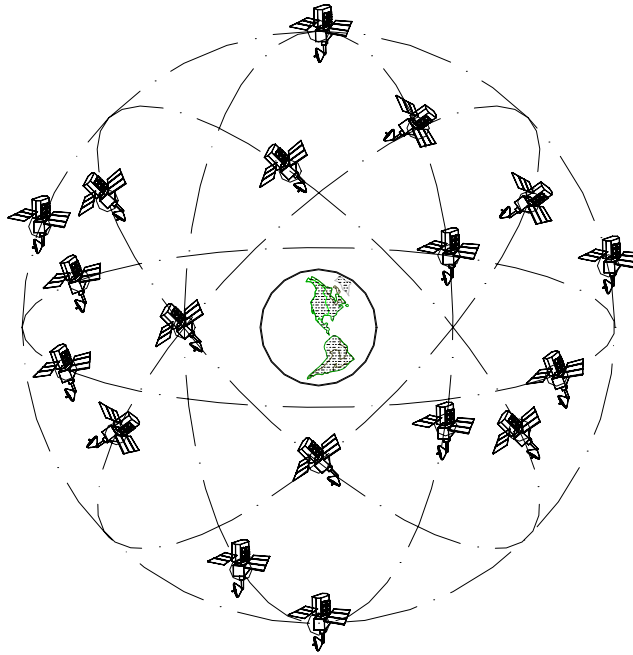
### ***SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (G.P.S.)***

10. Sistema de posicionamiento global	10-1
10.1. Fundamentos	10-2
10.1.1. Trilateración satelital	10-2
10.1.2. Medición de distancia desde los satélites	10-3
10.1.3. Precisión en la medida del tiempo	10-4
10.1.4. Posicionamiento del satélite	10-4
10.1.5. Corrección de errores	10-5
10.1.5.1. Errores propios del satélite	10-5
10.1.5.2. Errores originados por el medio de propagación	10-6
10.1.5.3. Errores en la recepción	10-6
10.2. Componentes del sistema G.P.S.	10-7
10.2.1. El segmento usuario	10-8
10.2.2. El segmento espacial	10-9
10.3. Precisiones con G.P.S.	10-9
10.4. Sistemas de coordenadas	10-10
10.5. Sistemas de proyecciones	10-11
10.6. Aplicaciones de los G.P.S.	10-11



## 10. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (G.P.S)

El sistema de posicionamiento global, G.P.S, es un sistema mundial de navegación desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Actualmente este sistema consta de 24 satélites artificiales (21 regulares más 3 de respaldo) y sus respectivas estaciones en tierra, proporcionando información para el posicionamiento las 24 horas del día sin importar las condiciones del tiempo.



*Figura 10.1. Representación gráfica del sistema de satélites artificiales NAVSTAR*

Los satélites artificiales son utilizados por el G.P.S, como punto de referencia para el cálculo de posiciones de puntos sobre la superficie de la tierra con precisiones cada día mejores.

Desde sus inicios puramente militares en el año 1978, sus aplicaciones han ido incrementándose constantemente en diversas áreas y los equipos receptores de G.P.S han ido disminuyendo tanto en tamaño como en costo.

En el campo de la ingeniería civil, el G.P.S se ha convertido en una herramienta indispensable para profesionales y técnicos en la determinación de posiciones y realización de levantamientos topográficos con rapidez y precisión.

Actualmente la tecnología existente permite manejar los datos obtenidos por medio de G.P.S. con los programas de aplicación en las ramas de ingeniería y geodesia.

## 10.1. Fundamentos

El sistema de posicionamiento global por satélite o G.P.S., se basa en la medición de distancias a partir de señales de radio transmitidas por un grupo de satélites artificiales cuya órbita se conoce con precisión y captadas y decodificadas por receptores ubicados en los puntos cuya posición se desea determinar.

Si medimos las distancias de al menos tres diferentes satélites a un punto sobre la tierra, es posible determinar la posición de dicho punto por trilateración.

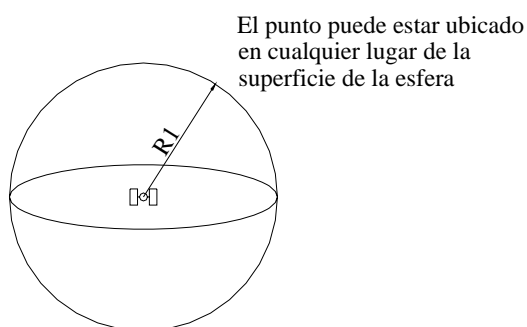
Recordaremos que la trilateración es un procedimiento similar a la triangulación pero basado en la medidas de los lados de un triángulo.

En el presente capítulo se explicarán en forma resumida los siguientes fundamentos involucrados en las mediciones con G.P.S.

- Trilateración Satelital
- Medición de distancia desde los satélites
- Medición precisa del tiempo
- Conocimiento preciso de la órbita del satélite
- Corrección de errores en la propagación de la onda

### 10.1.1. Trilateración Satelital

Los satélites del sistema de posicionamiento global se encuentran girando alrededor de la Tierra en órbitas predefinidas a una altura aproximada de 20.200 kilómetros, siendo posible conocer con exactitud la ubicación de un satélite en un instante de tiempo dado, convirtiéndose por lo tanto los satélites en puntos de referencia en el espacio (figura 10.1).



**Figura 10.2**

Supongamos que un receptor en la Tierra capta la señal de un primer satélite determinando la distancia entre ambos. Esto solamente nos indica que el receptor puede estar ubicado en un punto cualquiera dentro de la superficie de una esfera de radio  $R_1$  tal y como se muestra en la figura 10.2.

Si medimos la distancia de un segundo satélite al mismo receptor se generará una superficie esférica de radio  $R_2$ , que al intersectarse con la primera esfera se formará un círculo en cuyo perímetro pudiera estar ubicado el punto a medir (figura 10.3).

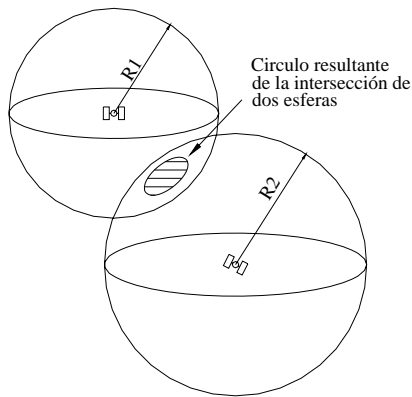


Figura 10.3

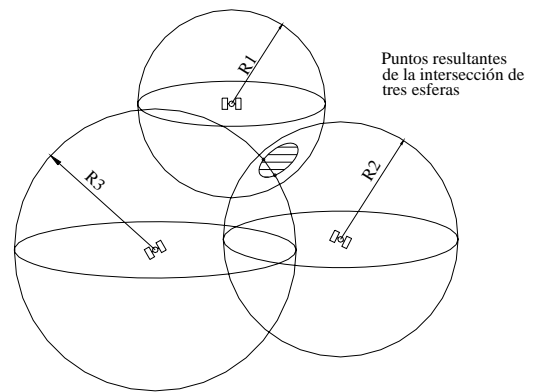


Figura 10.4

Si agregamos una tercera medición, la intersección de la nueva esfera con las dos anteriores se reduce a dos puntos sobre el perímetro del círculo descrito (figura 10.4).

Uno de estos dos puntos puede ser descartado por ser una respuesta incorrecta, bien sea por estar fuera de espacio o por moverse a una velocidad muy elevada.

Matemáticamente es necesario determinar una cuarta medición a un diferente satélite a fin de poder calcular las cuatro incógnitas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y tiempo (figura 10.5).

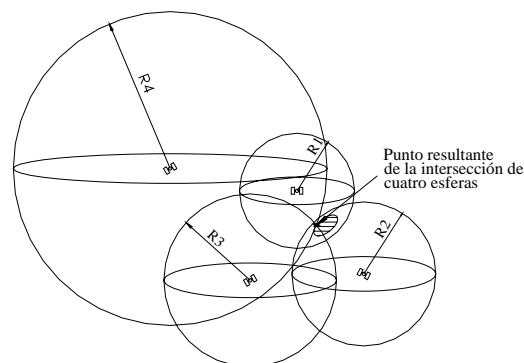


Figura 10.5

### 10.1.2. Medición de distancia desde los satélites

La distancia de un satélite a un receptor se calcula midiendo el tiempo de viaje de la señal de radio desde el satélite al receptor. Conociendo la velocidad de la señal de radio, la distancia se determina por medio de la ecuación de movimiento con velocidad uniforme.

$$D = v.t \quad (10.1)$$

Siendo:

$D$  = distancia en kilómetros desde el satélite al punto considerado

$v$  = velocidad de la señal de radio, aproximadamente la velocidad de la luz

$v \approx 300.000 \text{ km/s}$

$t$  = tiempo de viaje de la señal en segundos

Para poder medir el tiempo de viaje de la señal, es necesario conocer el instante en que la señal parte del satélite. Esto se logra generando códigos pseudoaleatorios tanto en el satélite como en el receptor y sincronizando ambas señales de manera que sean generadas al mismo tiempo, luego, comparando las dos señales se mide el desfase en tiempo ( $\Delta t$ ) en el que la señal del satélite y la del receptor generan el mismo código. El  $\Delta t$  representa el tiempo de viaje de la señal. Este proceso se esquematiza gráficamente en la figura 10.6.

- <> Se sincronizan el satélite y el receptor de manera que generen el mismo código al mismo tiempo.
- <> Se mide el desfase del tiempo de repetición del mismo patrón.

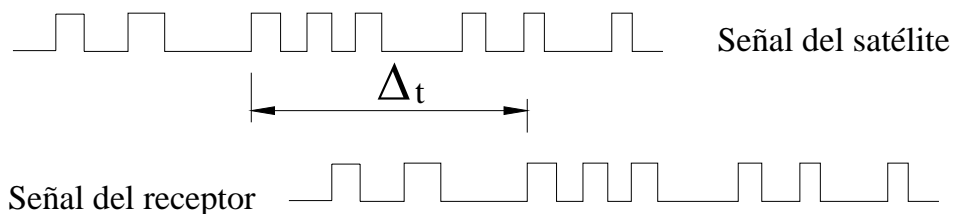


Figura 10.6. Esquema de medición del tiempo de viaje de la señal.

### 10.1.3. Precisión en la medida del tiempo

La medición del tiempo de viaje es una actividad difícil de realizar. Debido a la gran velocidad de las señales de radio y a las distancias, relativamente cortas, a la cual se encuentran los satélites de la Tierra, los tiempos de viaje son extremadamente cortos. El tiempo promedio que una señal tarda en viajar de un satélite orbitando a 20.200 kilómetros a la Tierra es de 0,067 segundos. Este hecho hace necesario la utilización de relojes muy precisos.

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

### 10.1.4. Posicionamiento del satélite

Como se ha mencionado previamente, existen 24 satélites operacionales en el sistema NAVSTAR (Navigation Satellite Timing and Ranging) orbitando la Tierra cada 12 horas a una altura de 20.200 kilómetros. Existen seis diferentes órbitas inclinadas aproximadamente  $55^\circ$  con respecto al Ecuador.

Alrededor de cada uno de estos planos giran cuatro satélites que son monitoreados constantemente por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. En Tierra existen cinco estaciones de seguimiento y control: tres estaciones para la alimentación de datos y una estación de control maestro. La estación de control maestro calcula, con los datos de las estaciones de seguimiento, la posición de los satélites en las órbitas (efemérides), los coeficientes para las correcciones de los tiempos y transmiten esta información a los satélites.

### 10.1.5. Corrección de errores

Los errores que afectan las mediciones con G.P.S. se pueden agrupar en tres tipos diferentes:

- Errores propios del satélite
- Errores originados por el medio de propagación
- Errores en la recepción

#### 10.1.5.1. Errores propios del satélite

**Errores orbitales** o de efemérides, que afectan la determinación de la posición del satélite en un instante determinado con respecto a un sistema de referencia dado. Estos errores se originan debido a que no se conocen con la exactitud necesaria las órbitas de los satélites.

**Errores del reloj.** Aunque sumamente precisos, los relojes atómicos pueden presentar variaciones debido a la deriva propia del instrumento y a la acción de los efectos relativísticos que originan un diferencial del tiempo entre el sistema del satélite y del sistema del G.P.S. Este diferencial de tiempo no es constante para todos los satélites, sin embargo, estos errores, de muy poca magnitud, son ajustados por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos.

**Errores de configuración geométrica.** El efecto de la geometría en la ubicación de los satélites utilizados en la determinación de un posicionamiento queda expresado por los parámetros de la dilación de precisión geométrica (DPG).

Los parámetros de la DPG resultan en una medida compuesta que refleja la influencia de la geometría de los satélites sobre la precisión combinada de las estimaciones del tiempo y posición de la estación.

Los cuatro parámetros de la dilación de precisión geométrica son:

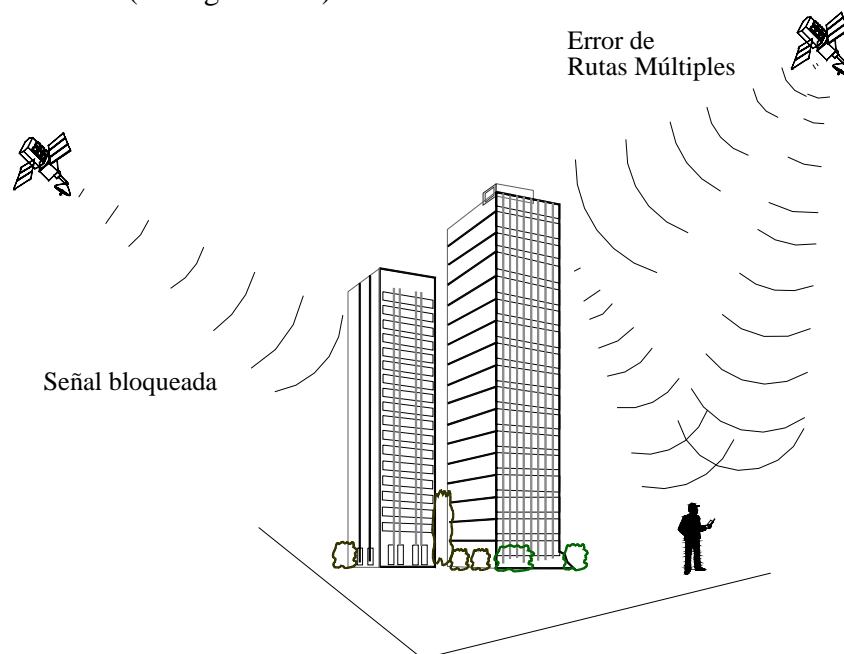
- PDOP: dilación de precisión para la posición
- HDOP: dilación de precisión horizontal
- VDOP: dilación de precisión vertical
- TDOP: dilación de precisión del tiempo

La configuración geométrica ideal se da cuando la posición relativa entre satélites forma ángulos agudos. Por el contrario, una configuración geométrica pobre se da cuando los satélites están alineados o su posición relativa forma ángulos llanos.

### 10.1.5.2. Errores originados por el medio de propagación

Como se mencionó anteriormente, los cálculos en el posicionamiento por satélite asumen que la señal viaja a una velocidad constante igual a la de la luz. Sin embargo, la velocidad de la luz se mantiene constante solamente en el vacío. Cuando la señal penetra la ionosfera y la troposfera, debido a los cambios en densidades de las diferentes capas, se producen las refracciones ionosféricas y troposféricas, reduciendo la velocidad de la señal. Actualmente los receptores de G.P.S. toman en cuenta estas demoras haciendo las correcciones pertinentes.

**El error por ruta múltiple (multipath)** se origina debido a la posibilidad de que una señal reflejada por objetos ubicados en la superficie de la Tierra lleguen al receptor por dos o más trayectorias diferentes (ver figura 10.7).



*Figura 10.7. Error de rutas múltiples o multipath*

Para minimizar los efectos del multipath se han desarrollado técnicas avanzadas de procesamiento de señales así como antenas para filtrar las señales que llegan de diferentes direcciones.

### 10.1.5.3. Errores en la recepción

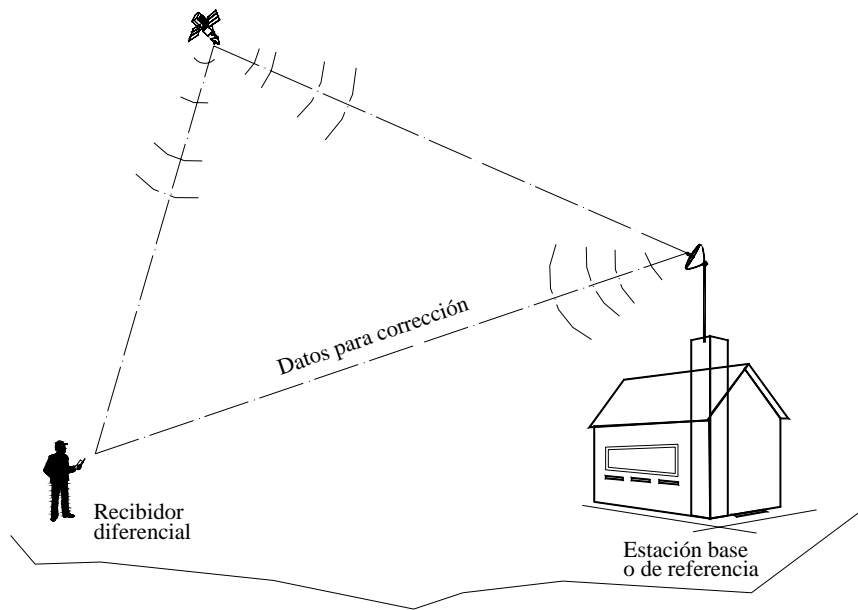
Por ser los errores en la recepción solamente dependientes del modo de medición y del tipo de receptor, en el presente capítulo solamente haremos mención de ellos.

Los errores en la recepción son el ruido, centro de fase de la antena, errores del reloj oscilador y el error de disponibilidad selectiva (S/A), el cual es una degradación de la señal del satélite causada en forma intencional por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos.



El error de disponibilidad selectiva se corrige mediante la técnica de la corrección diferencial, en la cual se usa un receptor en una estación base cuya posición sea conocida con precisión y un receptor en el punto que se desea ubicar, recolectando datos simultáneamente (ver figura 10.8).

Con la información obtenida en la estación base se calculan los diferenciales o correcciones que deben aplicarse a las mediciones del receptor en la estación del punto a ubicar.



**Figura 10.8. Corrección diferencial**

## 10.2. Componentes del Sistema G.P.S.

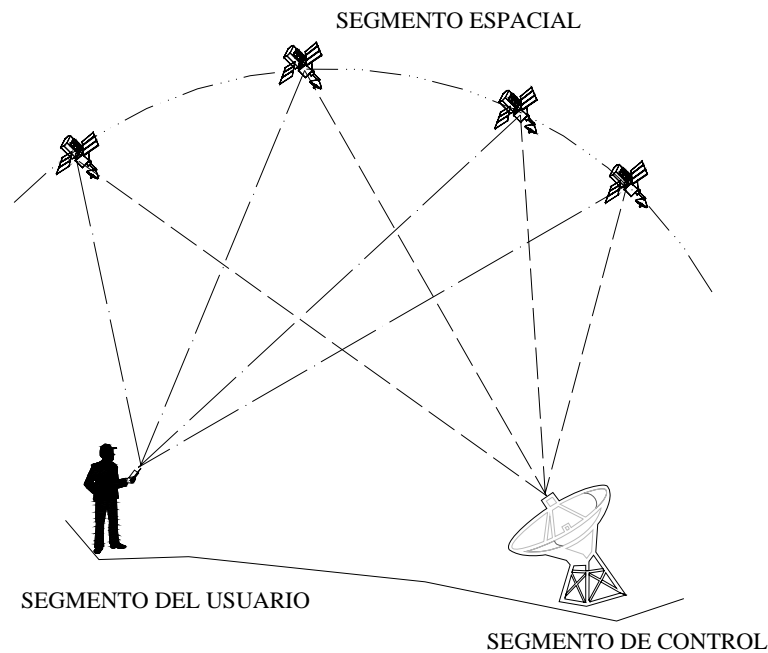
Un sistema G.P.S. está compuesto por el segmento espacial conocido como la constelación NAVSTAR conformado actualmente por 24 satélites (21 regulares más 3 de respaldo), el segmento de control conformado por estaciones de control master y de alimentación y el segmento usuario constituido por los receptores, recolectores de datos y programas de aplicación o software (figura 10.9).

Aunque brevemente, el segmento de control ha sido descrito en el punto 10.1.4, por lo que a continuación nos dedicaremos a describir la parte correspondiente a los segmentos del usuario y espacial.

Una información más detallada de los segmentos espacial y de control se puede obtener en Hoyer<sup>1</sup> y Hoffman et al<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Hoyer R. Melvin. (1995) *Introducción al Sistema de Posicionamiento Global, G.P.S.* Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida,.

<sup>2</sup> Hofmann B. – Wellenhopf, Lichteneger H., and Collins S. J. (1993). *Global Positioning System, Theory and Practice*, (2<sup>nd</sup> Edition). New York: Springer – Verlag, Wien, ..



*Figura 10.9. Componentes del sistema G.P.S.*

### 10.2.1. El Segmento Usuario.

Diferentes fabricantes producen una gran variedad de equipos y productos para los usuarios de G.P.S. Debido al permanente desarrollo tecnológico, estos equipos son constantemente mejorados en calidad y precisión haciendo cada vez más común su aplicación en diferentes disciplinas.

**El receptor**, como su nombre lo indica es el instrumento que recibe y decodifica la señal del satélite calculando las coordenadas del punto deseado.

Los receptores varían en precisión, tamaño, peso, capacidad de almacenamiento de datos y número de satélites que utilizan para calcular posición.

En la actualidad los receptores G.P.S. están diseñados con la tecnología de canales múltiples paralelos conteniendo entre 5 y 12 circuitos receptores sintonizados cada uno ellos a la señal de un satélite en particular.



*Figura 10.10 Receptor manual*

Los componentes básicos de un receptor G.P.S. son:

- 1) Antena con preamplificador para recibir la señal
- 2) Sección de radio frecuencia o canal
- 3) Microprocesador para la reducción, almacenamiento y procesamiento de datos

- 4) Oscilador de precisión para la generación de los códigos pseudoaleatorios utilizados en la medición del tiempo de viaje de la señal
- 5) Fuente de energía eléctrica
- 6) Interfases del usuario constituidas por el panel de visualización y control o pantalla, teclado de comandos y manejo de datos
- 7) Dispositivo de almacenamiento de datos o memoria de almacenamiento

### 10.2.2 El Segmento Espacial

Cada uno de los satélites de la constelación NAVSTAR transmite dos señales de radio, L1 con una frecuencia de 1.575,43 MHz y L2 1.227,6 MHz. La señal L1 se modula con dos códigos de ruido pseudoaleatorios (Pseudo Random Noise, PRN), denominados Servicio de Posicionamiento Preciso (PPS) o código P o protegido, el cual puede ser encriptado para uso militar y el código de adquisición grueso (C/A Coarse/Adquisition) conocido como Servicio Estándar de Posicionamiento (SPS).

La señal L2 se modula solamente con el código P. La mayoría de los receptores de uso civil usan el código C/A para obtener la información del sistema G.P.S.

Además de los códigos, los satélites transmiten a los receptores información en un paquete de información repetitivo de cinco diferentes bloques con duración de 30 segundos.

- Bloque 1: Contiene los parámetros de corrección de tiempo y refracción ionosférica.
- Bloques 2 y 3: Contienen información orbital y precisa para el cálculo de efemérides
- Bloques 4 y 5: Con información orbital aproximada de todos los satélites del sistema en operación, tiempo universal coordinado, información ionosférica e información especial.

### 10.3. Precisiones con G.P.S.

La precisión obtenida con equipos G.P.S. puede variar en un rango entre milímetros y metros dependiendo de diversos factores.

Es importante mencionar que la precisión obtenida en la determinación de las coordenadas horizontales (Norte y Este) es de dos a cinco veces mayor que la determinación en la coordenada vertical o cota.

En general la exactitud obtenida en mediciones con G.P.S. dependen de los siguientes factores:

- Equipo receptor
- Planificación y procedimiento de recolección de datos
- Tiempo de la medición
- Programas utilizados en el procesamiento de datos.

Existen dos tipos de exactitudes, la absoluta y la diferencial. En cuanto a la exactitud absoluta, utilizando el Servicio Estándar de Posicionamiento (SPS) se pueden obtener exactitudes en el orden de 20 m.

Si se usa el Servicio Preciso de Posicionamiento (PPS), o código P se pueden obtener exactitudes entre 5 y 10 m.

En cuanto a la exactitud diferencial, se pueden obtener exactitudes de hasta  $\pm 0,1-1$  ppm y en proyectos científicos con equipos adecuados y un riguroso control en todas las etapas del trabajo se pueden lograr exactitudes de  $\pm 0,01$  m  $\pm 0,1$  ppm.

#### 10.4. Sistemas de Coordenadas

En el capítulo 6 se estableció que la superficie de la Tierra podría ser representada en forma muy precisa por un elipsoide ajustado a la forma del geoide, sin embargo, el tamaño, forma y ubicación relativa de un elipsoide con respecto al geoide varían de acuerdo al lugar, por lo que se han propuesto diferentes elipsoides para diferentes zonas sobre la Tierra.

El modelo matemático que mejor se ajusta a la superficie del geoide en un área determinada queda definido por la relación entre un punto en la superficie topográfica escogida como origen del datum y el elipsoide.

Un datum queda definido por el tamaño y forma del elipsoide y la ubicación del centro del elipsoide con respecto al centro de la Tierra.

Siguiendo indicaciones del *Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar*, a partir del 1° de Abril de 1999 y según resolución del MARN publicada en la Gaceta Oficial N° 36.653 de fecha 03.03.99, se ha adoptado para Venezuela un nuevo sistema geocéntrico de referencia para formar la *Red Geodésica Venezolana "REGVEN"*, la cual representa en nuestro país la densificación del *Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas "SIRGAS"*

El elipsoide utilizado por REGVEN es el *Geodetic Referente System 80 (GRS-80)* cuyo datum asociado es el *World Geodetic System 1984 (WGS-84)*. El elipsoide GRS-80 tiene los siguientes parámetros:

- semieje mayor = 6.378.137,00 m.
- semieje menor = 6.356.752,30 m.

Hasta el año 99 en Venezuela se utilizó el elipsoide internacional de Hayford con datum la canoa cuyos parámetros son:

- semieje mayor = 6.378.388,00 m.
- semieje menor = 6.356.912,00 m.

Esta diferencia en parámetros entre los geoides utilizados hace necesario la transformación de los resultados obtenidos con datum La Canoa a REGVEN. Los parámetros para la transformación aparecen publicados en el folleto *REGVEN, La Nueva red Geocéntrica Venezolana*, publicado por el *Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar* en el año 2001.

Para el control vertical se utiliza la red de nivelación de primer orden apoyada en el mareógrafo de La Guaira.

Actualmente la mayoría de los receptores han incorporado rutinas con más de 100 diferentes datums disponibles para obtener las coordenadas reales de un punto en el datum requerido.

### **10.5. Sistemas de Proyecciones**

Como sabemos, el datum representa un modelo referencial de la superficie de la Tierra pero no especifica cómo identificar un punto sobre la superficie de la misma.

Por lo general, las coordenadas se representan expresadas como coordenadas geográficas (latitud y longitud) o coordenadas rectangulares (norte y este).

Los receptores G.P.S. toman las coordenadas geográficas y las proyectan al sistema local de coordenadas en base al datum seleccionado.

En Venezuela el sistema de proyecciones utilizado para la determinación de las coordenadas rectangulares es el Universal Transversal Mercator (UTM), pero existen otros sistemas de proyección como el U.S. State Plain System, el Lambert, el Mercator oblícuo, etc. Información más detallada acerca de los sistemas de proyección UTM y Lambert se puede encontrar en Kavanagh y Bird<sup>3</sup>.

### **10.6. Aplicaciones de los G.P.S.**

Debido al constante desarrollo del sistema G.P.S., día a día se incrementa la aplicación de los mismos en las actividades científicas, profesionales, deportivas, recreacionales, etc.

Sería muy largo describir las actividades en las cuales el G.P.S. es una herramienta fundamental por lo que nos limitaremos a mencionar algunas de las áreas dentro del campo de la ingeniería en las cuales el G.P.S. está siendo utilizado.

Los geólogos, geógrafos e ingenieros forestales utilizan los G.P.S., en combinación con los sistemas de información geográfica (SIG) para la elaboración de mapas temáticos, captando en forma rápida y precisa la posición de puntos y asociando información y atributos a dichos puntos.

En cuanto a la planificación del transporte urbano, constituye un método rápido de levantamiento de la red de transporte, ya que recorriendo las calles y avenidas del sistema con un receptor G.P.S. se puede elaborar automáticamente el plano de la red.

En el mantenimiento vial, (drenajes, pavimentos, puentes, etc.), se pueden ubicar los puntos o sectores de la vía que necesitan mantenimiento, asociándole como atributo el tipo de estructura y mantenimiento a realizar.

En el campo de la topografía, se están aplicando los G.P.S. en el levantamiento de grandes extensiones y de zonas de difícil acceso ya que se requiere menos personal, debido a lo complicado del traslado de equipos tradicionales y a que la captura de datos con el sistema G.P.S. acelera o acorta el tiempo de recolección de los mismos.

---

<sup>3</sup> Kavanagh, Barry F., Bird S.J. Glenn. (1989). *Surveying: Principles and Applications* (2<sup>nd</sup> Edition). New Jersey: Prentice-Hall, inc.. pp. 337-362.