

Sistemas de Posicionamiento

*Autores: Ing. Agr. Axel von Martini,
Ing. Agr. Mario Bragachini,
Ing. Agr. Agustín Bianchini.
Proyecto Agricultura de Precisión INTA Manfredi*

Un sistema de posicionamiento, como el nombre lo sugiere, es un **método para identificar y grabar**, generalmente en forma electrónica, la **ubicación de un objeto o persona**. Este sistema puede ser usado para registrar el recorrido de un vehículo a través de la superficie terrestre, en el aire o en el espacio. Estos sistemas pueden ser de **gran utilidad en la agricultura moderna**, de hecho, se lo puede considerar **como la base de la agricultura de precisión**, ya que cada dato tomado, como por ejemplo rendimiento, humedad, altimetría, materia orgánica, etc., va a estar exactamente localizado y de esta forma tenemos la posibilidad de volver a él, localizarlo, obrar en consecuencia, y poder grabar nuevamente el resultado.

Existen una serie de sistemas de posicionamiento, algunos terrestres y dos satelitales. En este capítulo se explicará solamente el **Sistema de Posicionamiento Global (GPS)**, que es el de mayor difusión en la Argentina y es el que posee más y mejores prestaciones.

Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El sistema de posicionamiento global (GPS) es un sistema de navegación basado en satélites, creado y operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Comenzado a principios de los '80 este sistema fue declarado completamente operacional el 27 de Abril de 1995. Completamente operacional significa que el sistema puede ser usado para determinar la posición de un receptor las 24 horas del día, en cualquier parte de la tierra. **El sistema fue concebido originalmente como un auxiliar para la navegación para las fuerzas militares de los Estados Unidos**, pero **hoy en día el GPS sirve también para fines industriales, comerciales y civiles**. El servicio está disponible, en forma gratuita, las 24 horas del día y bajo cualquier condición meteorológica.

Para describir mejor el sistema se lo puede dividir en tres partes:

- Segmento espacial
- Segmento de control
- Segmento de usuario

Segmento espacial

Este segmento consiste de una constelación de 24 satélites **NAVSTAR** (**NAV**igation by **S**atellite **T**iming and **R**anging). Con una órbita de 20200 km de altura (10900 millas) sobre la superficie terrestre, cada satélite orbita la tierra 2 veces al día, o sea una vez cada 12 horas. Los 24 satélites se dividen en 6 órbitas con 4 satélites cada una. **Esta distribución particular garantiza que por lo menos 4 satélites estarán en línea de vista de un receptor de GPS en cualquier parte del mundo durante todo el día.**

Por supuesto que no se pueden ver los satélites en su órbita, pero los receptores deben ser capaces de recoger la señal satelital enviada a la tierra. **Los satélites cuya señal puede ser recibida son aquellos que están por sobre el horizonte.** Cada satélite está equipado con receptores y emisores de ondas de radio que transmiten con una frecuencia de entre 1200-1500 MHz. Las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz (300.000.000 m/s) en el vacío, y disminuyen su velocidad cuando atraviesan la atmósfera terrestre.

Los satélites también están equipados con relojes atómicos, que mantienen el tiempo en base a vibraciones naturales periódicas dentro de los átomos. Estos **relojes increíblemente precisos son un componente crítico que hacen posible el uso de satélites para navegación y mapeo.** Cada satélite cuenta con cuatro relojes, 2 de cesio y 2 de rubidio, a pesar de que uno sería suficiente, de esta forma se evita el riesgo de rotura o pérdida de precisión por alguno de los relojes.

Segmento de Control

Los satélites son seguidos y monitoreados por varias estaciones ubicadas estratégicamente alrededor del mundo. Esta red de estaciones de monitoreo se denomina generalmente **segmento de control** del GPS, y consta de 4 estaciones de monitoreo y una estación de control principal ubicada en la Base de la Fuerza Aérea Falcon en Colorado Springs, Colorado.

Las estaciones de monitoreo miden las señales de ondas de radio que son transmitidas continuamente por los satélites y pasan esa información a la estación de control principal. Ésta usa la información para determinar la órbita exacta de los satélites y para ajustar sus señales de navegación, por ejemplo: error de reloj, correcciones, estado del satélite, etc.

Segmento de usuario

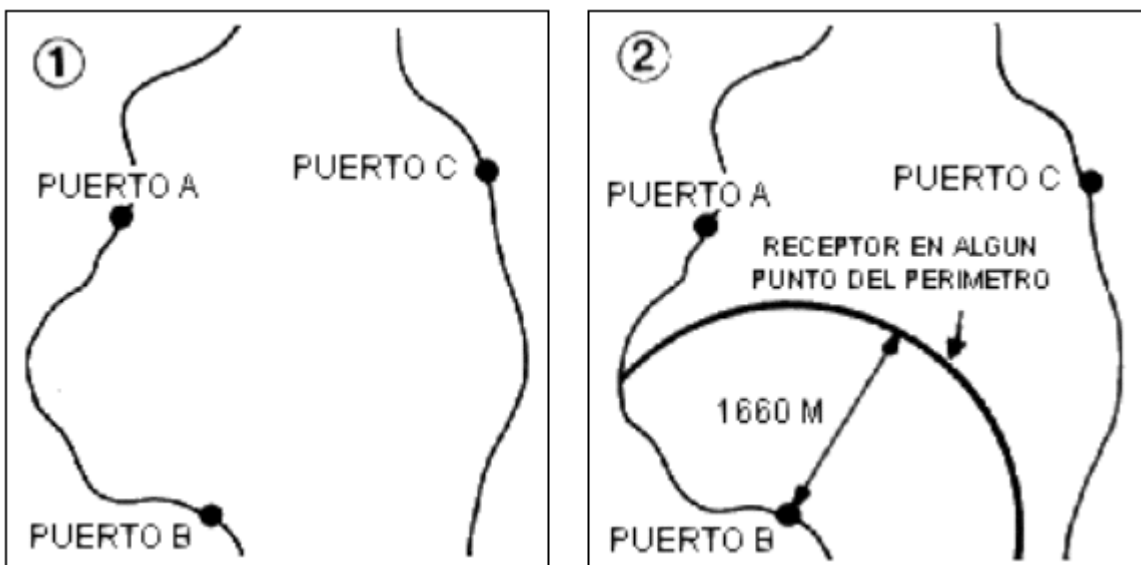
Las unidades o receptores GPS son el segmento de usuario, que computan la posición del usuario por medio de las señales recibidas. Los GPS de uso civil no requieren licencia para operar ya que no transmiten señales de radio, solamente las reciben. Hay una gran gama de receptores con distintas precisiones y por ende precio, cada uno se adapta a un uso en particular.

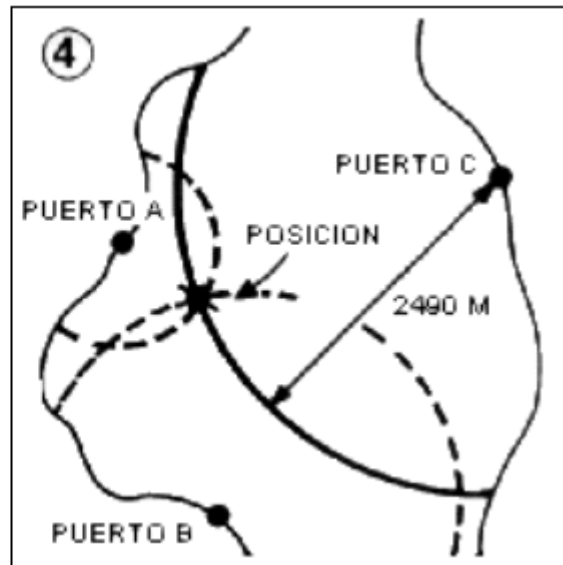
Principios de Funcionamiento del GPS

El GPS se basa en las distancias entre el receptor y una serie de satélites para conocer su posición. El principio básico detrás del GPS es bastante simple, y lo vamos a ilustrar con un ejemplo: si se quiere ubicar un bote en el mapa de un lago, y se sabe que está ubicado a 10 minutos desde el puerto A, a 5 minutos desde el puerto B y a 15 minutos desde el puerto C, asumiendo una velocidad constante de 10 km/h. El primer paso es calcular la distancia que separa cada puerto del lugar a ubicar. Para hacer esto se multiplica la velocidad 10 km/h (166 m/minuto) por el tiempo desde el punto hasta cada puerto.

- Distancia al puerto A
 $166 \text{ m/min} \times 10 \text{ min} = 1660 \text{ metros}$
- Distancia al puerto B
 $166 \text{ m/min} \times 5 \text{ min} = 830 \text{ metros}$
- Distancia al puerto C
 $166 \text{ m/min} \times 15 \text{ min} = 2490 \text{ metros}$

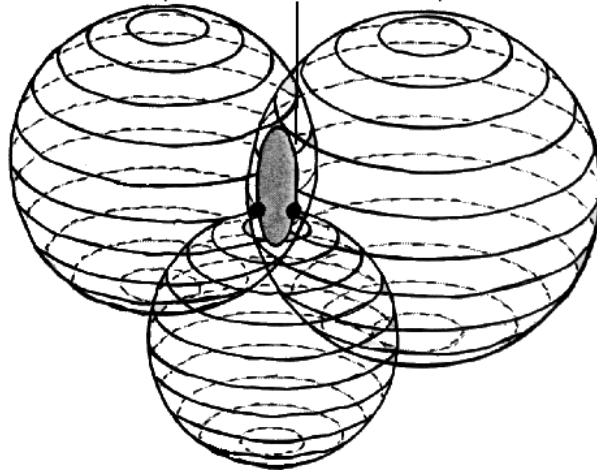
A continuación se debe dibujar un círculo con centro en el puerto A y un radio de 830 m. El punto a ubicar puede estar en cualquier parte sobre el perímetro de éste círculo. Luego se dibuja un segundo círculo con centro en el puerto B y un radio de 1660 m. Estos dos círculos se intersectan en solamente dos puntos, lo que indica que el punto a ubicar está en uno de esos dos puntos. Cuando se dibuja el tercer círculo con centro en el puerto C, con un radio de 2490 metros, los tres círculos se cruzan en un solo punto posible, y esa es la ubicación del bote.



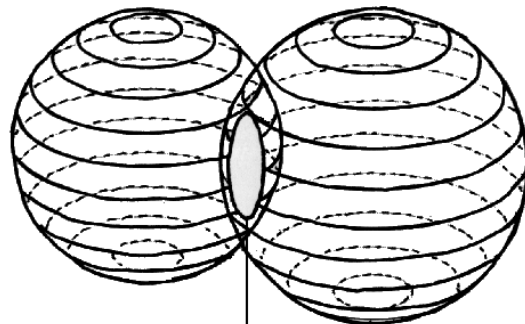


Estos son esencialmente los mismos pasos que usa un receptor de GPS para determinar su posición. En el ejemplo se usó éste método para determinar una posición en dos dimensiones a través de tres distancias. En un plano tres círculos intersectan en un único punto. Sin embargo el GPS provee la posición en tres dimensiones para lo que hace falta cuatro (o más) mediciones de distancia. En tres dimensiones 4 esferas coinciden en un único punto. Cuando un receptor quiere averiguar su posición se comunica con un satélite (A en el ejemplo) y deduce que la distancia que los separa es de 20400 km. Esto significa que el receptor se encuentra en algún punto de la superficie de una esfera con centro en el satélite y un radio de 20400 km. Si simultáneamente se conoce la distancia a un segundo satélite (B), de por ejemplo 22200 km se reduce la localización del receptor a un círculo en la intersección de las 2 esferas. Si se realiza la medición de distancia desde un tercer satélite (C) se reduce la ubicación posible del receptor a 2 puntos en el espacio, dónde la tercer esfera intersecta el círculo formado por la primera con la segunda. Para decidir cuál de esos dos puntos es la ubicación correcta hay dos opciones: o hacer una cuarta medición desde otro satélite o hacer una suposición. Generalmente uno de los dos puntos es una ubicación ridícula, o no se encuentra sobre la superficie terrestre o

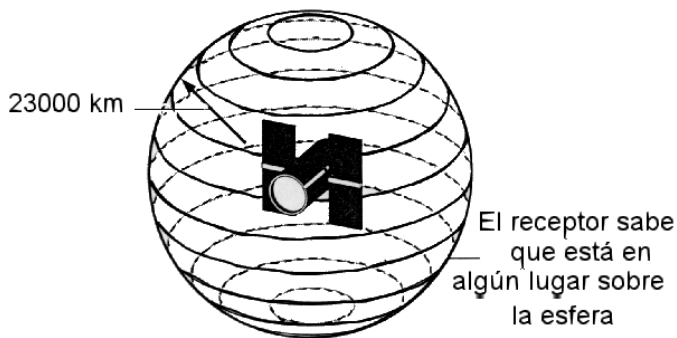
Tres mediciones ubican al receptor en uno de dos puntos



tiene una velocidad imposiblemente alta. Los programas dentro de los receptores de GPS tienen varias técnicas para distinguir el punto correcto del que no lo es. En sentido trigonométrico hacen falta cuatro distancias para determinar una posición en el espacio, pero en la práctica no es necesario por esta razón pero si por otra razón técnica que se discutirá más adelante. Todo lo demás sobre el sistema son los detalles técnicos de cómo se lleva a cabo el proceso de medición o para hacerlo más preciso.

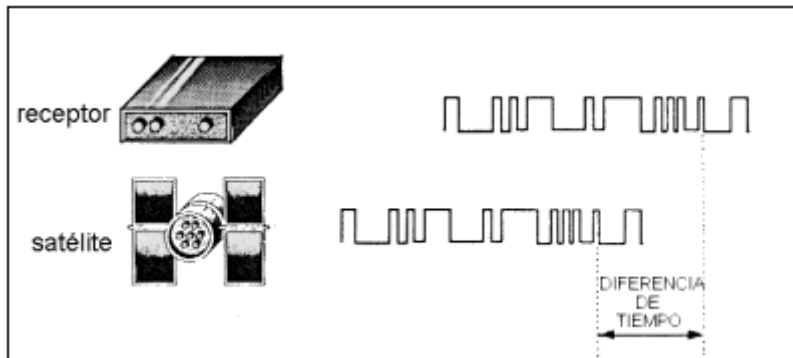


Dos mediciones ubican al receptor en algún punto de un círculo



Medición de la Distancia

El principio básico de la medición de la distancia es el principio de "velocidad por tiempo". El sistema GPS funciona tomando el tiempo que tarda una señal de radio emitida por un satélite hasta llegar al receptor, y de esa forma calcular la distancia, sabiendo que las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz (300.000.000 m/s). Si se conoce el tiempo exacto en que salió la señal del emisor y el tiempo de llegada al receptor, se puede calcular por diferencia el tiempo de viaje de la señal y por ende la distancia. De aquí se deduce que los relojes deben ser bastante precisos en tiempos pequeños, porque la señal de un satélite que esté perpendicular al receptor sólo tarda 6/100 de segundo en llegar.

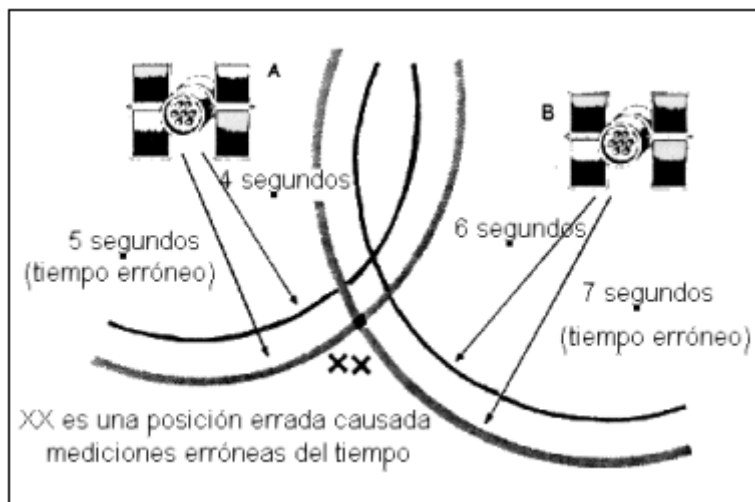
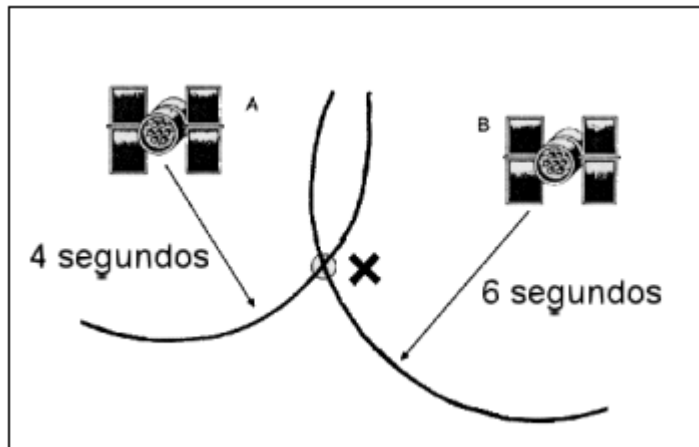


Para poder calcular el tiempo de viaje de la señal de radio, tanto el satélite como el receptor generan códigos sincronizados. Esto es que ambos generan el mismo código al mismo tiempo. Entonces cuando llega una onda al receptor este determina el tiempo transcurrido desde que éste generó el mismo código. La diferencia de tiempo es lo que tardó la onda en llegar.

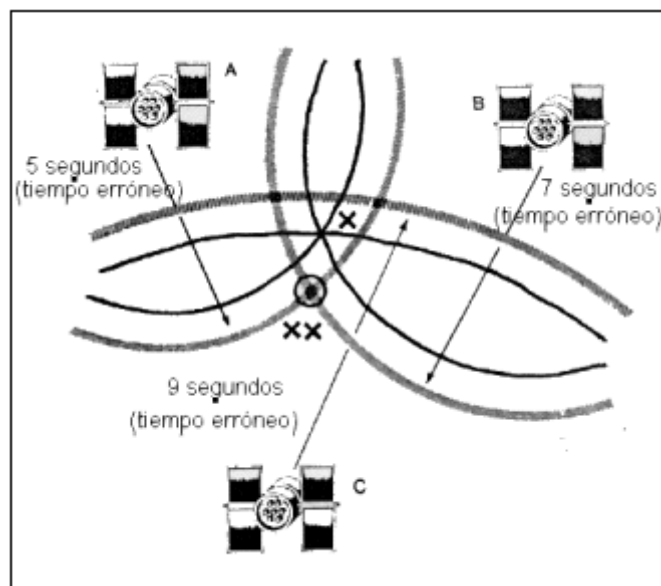
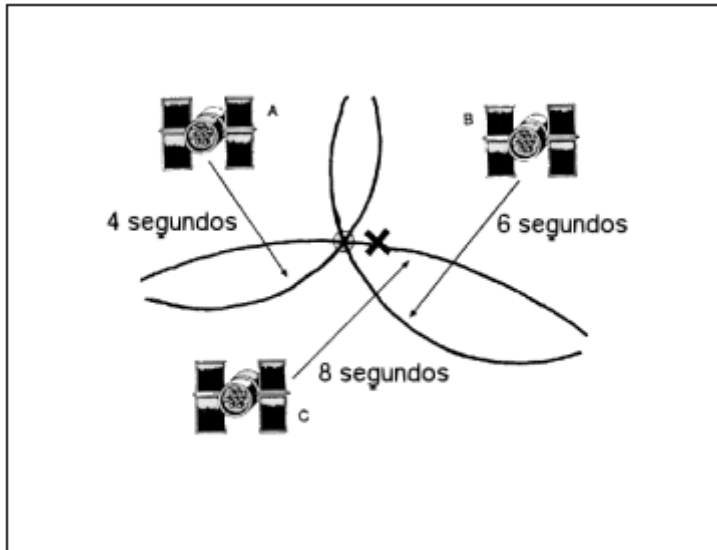
Tanto el satélite como el receptor generan un juego de códigos digitales que responden a un criterio binario. Ese juego de códigos digitales llevan el nombre de pseudo-random (pseudorandom) y están diseñados de forma tal que puedan ser fácilmente comparados, en forma rápida y sin ambigüedades. La secuencia pseudorandom se repite en el orden de los milisegundos.

Sincronización del tiempo

Como ya es sabido la luz viaja a 300.000.000 m/s, lo que implica que si los relojes del satélite y del receptor están desfasados tan solo 1/100 de segundo las medidas de distancia tendrían un error de 3000 km. Los relojes atómicos de los satélites son extremadamente precisos, pero tienen un costo de 100.000 U\$S cada uno, que sería prohibitivo para un receptor de uso civil. Afortunadamente este problema se resolvió utilizando la medición desde un cuarto satélite. La trigonometría indica que se puede localizar un punto en el espacio mediante 3 medidas perfectas, y que cuatro medidas imperfectas pueden eliminar la desincronización del tiempo.



El ejemplo posterior explicará como se resuelve la sincronización del tiempo, los diagramas están hechos en dos dimensiones a los fines explicativos, para entender como pasa en la realidad (tres dimensiones) solo hay que agregar una medida más.



Normalmente se habla de la distancia a los satélites en kilómetros o millas, que son deducidas a partir del tiempo de viaje de las ondas, para simplificar la explicación nos referiremos a las distancias en segundos. Supongamos que el reloj de un receptor adelanta 1 segundo, entonces si nos encontramos a una distancia real de dos satélites A y B de 4 y 6 segundos respectivamente (punto X), el receptor interpretará que está a 5 y 7 segundos de distancia de ambos satélites A y B respectivamente, lo que resulta en una posición distinta que llamaremos XX. Esta posición sería incorrecta pero nada en el receptor haría sospechar que así fuera. Si agregamos un tercer satélite C (recuerde que el ejemplo es en dos dimensiones, sería el **cuarto** trabajando en tres dimensiones como es en la realidad), que se encuentra a una distancia real de 8 segundos, entonces el círculo con centro en el satélite y radio de 8 segundos pasa exactamente por el punto X, pero el receptor cree que se encuentra a 9 segundos del satélite. Estas tres distancias a los satélites no tienen forma de coincidir en un punto, pero si definen un área posible.

Las computadoras en los receptores están programadas para que en el caso que obtengan una serie de medidas que no puedan intersectar en un único punto, reconozcan que hay algún error y asuman que su reloj interno está desfasado. Entonces las computadoras comienzan a sumar o a restar la misma cantidad de

tiempo a cada medida hasta encontrar un punto en el que todas coincidan. En el ejemplo la computadora descubrirá que restando un segundo a cada medida está el único punto en que estas coinciden y asume que su reloj está un segundo adelantado. De hecho las computadoras no utilizan el método de prueba y error sino utilizan un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas, pero en esencia el proceso es el mismo.

La conclusión es que para obtener medidas precisas en tres dimensiones se necesitan cuatro satélites.

Esto afecta el diseño de los receptores ya que si se necesitan medidas de posición precisas, continuas y en tiempo real, como en la Agricultura de Precisión, los receptores deben tener por lo menos cuatro canales para poder recibir cuatro satélites simultáneamente.

Fuentes de error

A pesar de que el desarrollo del GPS se basó en tecnología muy sofisticada y con gran inversión de dinero, su precisión se ve degradada por una serie de fuentes de error. Algunas fuentes de error son inherentes al sistema e inevitables y otras son manejables por el usuario. Estas son:

- **Relojes de los satélites**
- **Errores de órbita**
- **Atmósfera terrestre**
- **Multitrayectoria**
- **Geometría satelital**
- **Receptores de GPS**
- **Disponibilidad selectiva (S/A)**

Relojes de los satélites

Como se vio anteriormente los relojes atómicos de los satélites son unos de los más precisos, pero no son perfectos. Pequeños e insignificantes errores en el tiempo pueden crear grandes errores en las medidas de posición. Justamente la función del segmento de control terrestre es monitorear y ajustar los relojes para minimizar las pequeñas desviaciones.

Errores de órbita

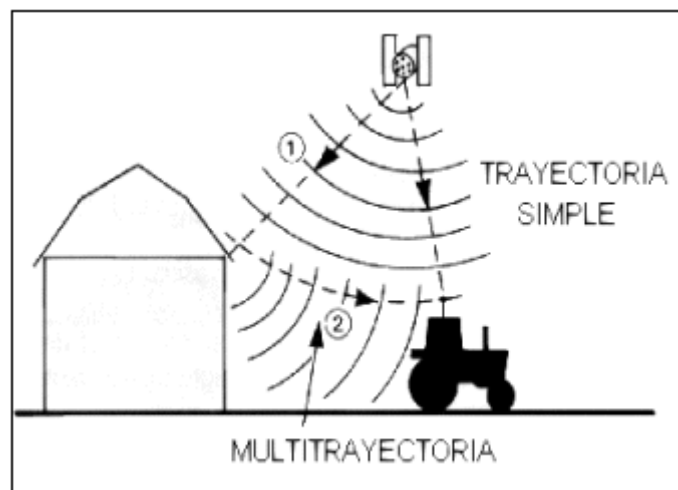
Las órbitas de los satélites son tan altas que la atmósfera terrestre no las afecta, sin embargo, algunos fenómenos naturales como las fuerzas gravitacionales de la luna y el sol, como así también la presión de la radiación solar, generan pequeños errores en la altitud, posición y velocidad de los satélites. Estos errores se acumulan acrecentando su efecto. Nuevamente el segmento de control terrestre ajusta las señales de los satélites para corregir los errores de órbita.

Atmósfera terrestre

Las ondas de radio viajan a una velocidad constante en el vacío, sin embargo al entrar en la atmósfera terrestre se encuentran con la **ionosfera**, que es una capa de partículas cargadas que se encuentra de 80 a 400 km sobre la superficie terrestre. Esta demora en el tiempo de llegada de las ondas inducen un error en los cálculos de distancia ya que este asume una velocidad constante de la luz. Las demoras producidas en esta capa dependen de la cantidad de iones/m³ y la actividad o perturbación ionosférica en dicho momento.

Después de pasar a través de la ionosfera, las señales de los satélites deben pasar por la atmósfera baja, la troposfera, donde el vapor de agua incrementa un poco más las demoras. **La porción de error debida a esta capa de la atmósfera ha sido simulada con un alto grado de precisión, permitiendo de esta manera que los receptores lo tengan en cuenta y puedan minimizarlo.**

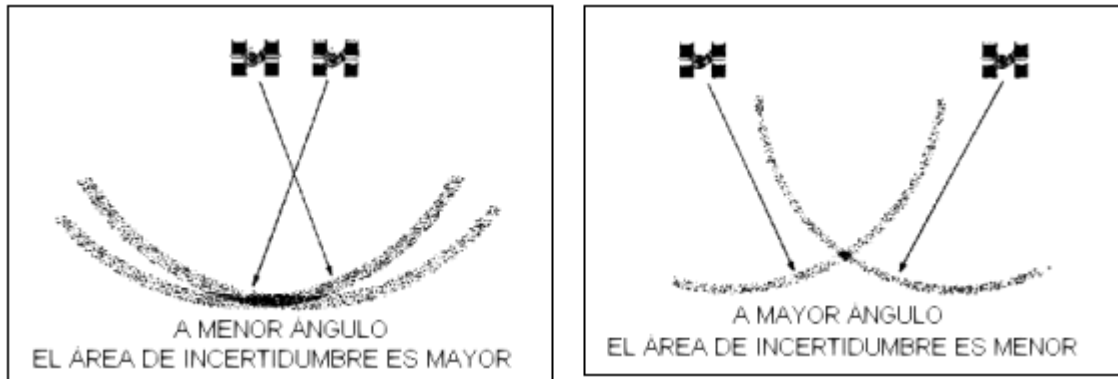
Multitrayectoria



Los errores debido a la multitrayectoria aparecen cuando la señal "rebota" antes de llegar al receptor, o sea que la señal llega a la antena del receptor por más de una trayectoria o camino. Parte de la onda llega en forma directa y parte realiza una trayectoria diferente, por ende causando diferencias en el tiempo de viaje. **Hoy en día hay algunas antenas diseñadas para minimizar este efecto.**

Geometría satelital

Con todos los errores mencionados anteriormente, se puede imaginar que el círculo que define la distancia a cada satélite no se tiene un perímetro bien marcado sino es una línea difusa (figura). Dónde coinciden las distancias de dos satélites, en vez de ser un punto es una pequeña área. Como lo indica la figura cuanto más juntos estén los satélites mayor será el área de incertidumbre donde podemos estar ubicados y por ende aumenta el error. Esto significa que cuanto más desparrramados estén los satélites sobre el receptor mayor será la precisión.



Receptores de GPS

El ruido debido a interferencias eléctricas o el redondeo de las operaciones matemáticas llevan a errores en la medición de la posición. Los receptores de mayor calidad, y por lo tanto más caros, están diseñados para disminuir el ruido interno y maximizar la precisión matemática.

Otro elemento constitutivo importante de los receptores es el número de canales que poseen. **Los hay de un solo canal hasta de 12. Para el trabajo que se realiza en la agricultura de precisión son necesarios aquellos que tengan por lo menos 4 canales simultáneos, uno para cada uno de los cuatro satélites indispensables para tomar una posición en tres dimensiones, siendo ideales los de 12 canales.**

Cuantos más satélites se estén recibiendo más precisa será la posición dada, debido a que el área de incertidumbre se disminuye sustancialmente y se minimiza el error. Esto está también ligado a la geometría satelital explicada anteriormente.

Disponibilidad selectiva (Selective Availability S/A)

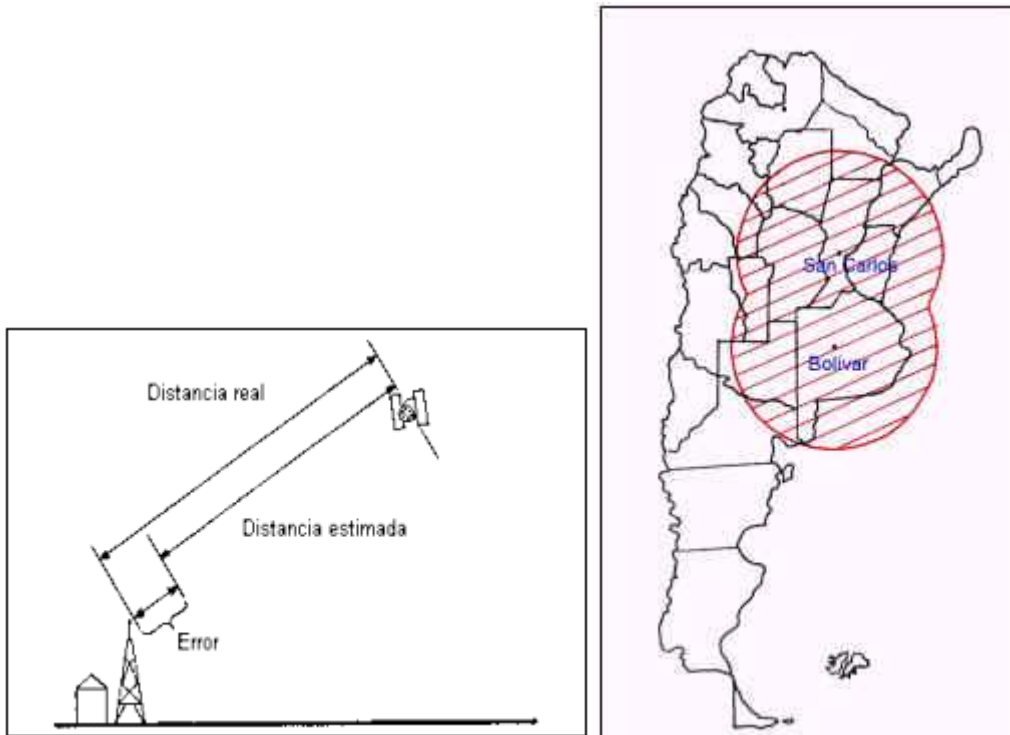
El Departamento de Defensa de los Estados Unidos agregaba un error intencional al sistema para restringir el uso a fuerzas hostiles en tiempo de guerra. Esto lo lograban introduciendo ruido digital a los relojes de los satélites. Esta disponibilidad selectiva no afecta la precisión de los receptores militares de GPS pero sí a los de uso civil. Los errores introducidos cambian constantemente en magnitud y dirección. Esta era la mayor fuente de error de los receptores de uso común.

A partir del 1° de Mayo de 2000, el gobierno estadounidense eliminó la disponibilidad selectiva, aumentando considerablemente la precisión de los receptores de uso común.

CORRECCIÓN DIFERENCIAL

Todos estos errores enunciados anteriormente reducen la precisión del GPS, resultando en un error de entre 5 y 20 m (previo a la eliminación de la disponibilidad selectiva el error ascendía hasta los 100 m). Esto puede resultar útil

para algunas actividades pero no para algunos usos en la agricultura por la precisión que se requiere en las posiciones. Por ende se requiere un método para mejorar sustancialmente la precisión. El método más usado hoy en día es la corrección diferencial (**DGPS Sistema de Posicionamiento Global Diferencial**).



El sistema funciona usando un receptor de referencia (que puede ser una antena Beacon o un satélite geostacionario) ubicado en un lugar de coordenadas exactamente conocidas. Esta estación de referencia recibe las mismas señales que los receptores comunes, pero al conocer su posición exacta puede calcular el error que transmite cada satélite en magnitud y sentido, en ese momento. **La diferencia entre la distancia real desde el receptor de referencia y cada satélite se denomina distancia de corrección diferencial.**

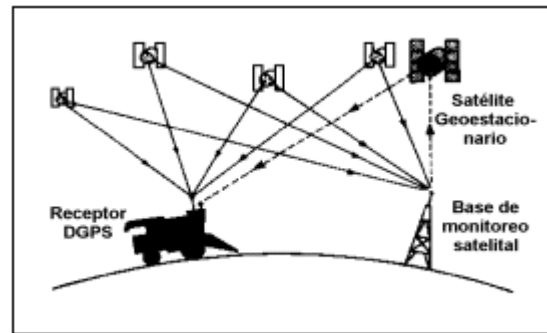
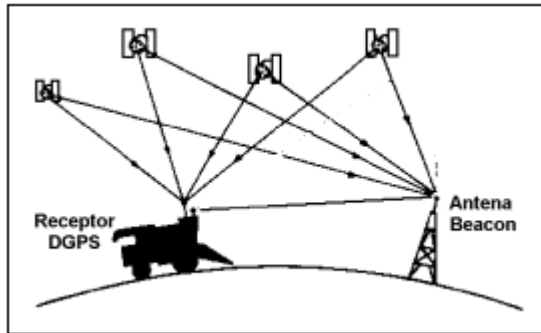
Este error es transmitido a través de señales de radio al móvil en tiempo real.

Las señales de corrección diferencial pueden provenir de antenas Beacon o de satélites geostacionarios (Omnistar y Racal). En nuestro país hay que pagar un abono para recibir estas señales. La señal Beacon proviene de antenas fijas de las cuales hay dos en nuestro país, cada una que cubre un área comprendida dentro de un radio de 450 Km. En cambio la corrección satelital está disponible en todo Sudamérica. Mediante este sistema de corrección se logran precisiones submétricas, que oscilan en los 30 cm. Esta precisión ya es suficiente para su aplicación en la Agricultura de Precisión.

En nuestro país el abono a pagar por la corrección Beacon es de 1300 U\$S por tres años y para la señal satelital es de 2000 U\$S por un año, aunque se estima que el valor irá disminuyendo en la medida que se generalice su utilización.

Señal correctora Beacon

Señal correctora Omnistal y Racal



Precisión del DGPS

Número de satélites visibles

Como ya se explicó anteriormente **cuantos mas satélites esté recibiendo un receptor más precisa será su posición** ya que se disminuye el área de incertidumbre de su posición posible. **El mínimo de satélites** para ubicar un receptor en tres dimensiones **es de 4**, cada satélite que se agregue a las mediciones mejora la precisión. El máximo teórico de satélites que se pueden recibir es 12, pero generalmente los que se encuentran demasiado cerca del horizonte no se reciben. En la práctica se suele trabajar con un máximo de 8, lo que resulta en una muy buena precisión, se recomienda trabajar con por lo menos 5 o más.

Dilución de la Precisión Posicional (PDOP)

PDOP es una medida sin unidades que indica cuando la geometría satelital provee los resultados mas precisos. Cuando los satélites están desparramados por el espacio, el valor PDOP es bajo y las posiciones computadas son más precisas. Cuando los satélites están agrupados el valor PDOP es alto y las posiciones imprecisas. Para obtener precisiones submétricas el PDOP debe ser de 4 o menos.

Relación señal- ruido (S/N)

La relación señal / ruido es una medida de la intensidad de la señal satelital. A medida que la intensidad aumenta la precisión también lo hace. A mayor señal y menor ruido la relación es mayor y la precisión aumenta. **Para obtener posiciones con precisión esta relación (S/N) debe ser mayor de 6, con un ideal entre 12 y 15.**

Elevación

Cuando un satélite está bajo en el horizonte, la señal que emite debe atravesar una gran distancia de atmósfera, demorando la llegada al receptor. Se pueden eliminar estos datos configurando los receptores para que eliminen las señales de los satélites que están debajo de cierto ángulo por sobre el horizonte. Los satélites que estén por debajo de este ángulo son excluidos del cómputo de la posición. Para la mayor precisión se recomienda utilizar un ángulo mínimo de 15° . Al ser muy elevado este ángulo puede que se pierdan las señales de algunos satélites y

no se obtenga operación continua. Por eso una solución de compromiso es configurar este ángulo en por lo menos $7,5^\circ$.

Factores ambientales

Como ya se sabe la señal GPS es reflejada por objetos cercanos, particularmente por objetos metálicos, creando resultados falsos o erróneos. Este fenómeno es conocido como multitrayectoria. La precisión óptima se obtiene recolectando datos lejos de superficies reflectoras, como edificios, galpones o árboles. Algunos receptores poseen distintas formas de minimizar el efecto de la multitrayectoria.

Para lograr precisiones menores a $1\text{ m} + 1\text{ppm}$ de la distancia entre el receptor y la estación de referencia se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Número de satélites usados: > 5
- PDOP: < 4
- Relación señal / ruido (S/N): > 6
- Elevación mínima: $> 7,5^\circ$
- Ambiente de reducida multitrayectoria

GPS y Agricultura de Precisión

Para los fines de la Agricultura de Precisión, no es necesario tener un conocimiento profundo del funcionamiento del GPS. Los conceptos básicos volcados en este capítulo ayudan a comprender las bases del sistema para poder diferenciar aquellos receptores que se adaptan a los requerimientos para el uso en la Agricultura de Precisión y además para entender los datos sobre precisión y funcionamiento que muestran los receptores en el display cuando están en uso.

A veces se presentan problemas con la correcta recepción de la señal y estos son atribuidos a una falla en el funcionamiento del sistema, sin embargo puede suceder que estas fallas se deban a problemas de conexión de los equipos o al mal estado de las fichas, enchufes o cables. Por lo tanto, cuando se presenten problemas de recepción de señal se debe inmediatamente verificar el estado de mantenimiento de toda la instalación.

Otro punto a tener en cuenta cuando se utiliza el GPS para el mapeo de rendimiento y sobre todo en banderilleros satelitales es **colocar la antena en el centro de la máquina** para que todas las pasadas contiguas se realicen a la misma distancia, y además ésta debe **estar ubicada en la parte más alta de la máquina** y lejos de toda fuente de ruido y vibración que puedan interferir con la recepción de la señal. Frecuentemente se ubica la antena sobre el aire acondicionado y cuando este es conectado, las vibraciones del mismo provocan una sensible disminución del cociente S/N y por ende se degrada la precisión del equipo.