

Las tormentas magnéticas son perturbaciones temporales de la magnetósfera terrestre asociadas a las Eyecciones de Masa Coronal (EMC) generadas por el sol. Las auroras polares son efectos luminosos debido al retorno de electrones a los átomos y moléculas generados por la colisión de partículas altamente energéticas con las especies presentes en la alta atmósfera. La anomalía de Appleton o anomalía Ecuatorial es una desviación del máximo de la densidad de plasma en la ionosfera que no se encuentra sobre el ecuador magnético sino que se divide en dos máximos, constituyendo dos franjas paralelas, distribuidas entre unos 10 a 20 grados al norte y sur de éste. la figura 2.3 muestra el Contenido Total de Electrones global para las 19 horas (UT) destacando la presencia de mayor concentración de electrones en regiones al norte y al sur del ecuador magnético para la zona de Sur América. Esta anomalía se genera por un fenómeno conocido como efecto fuente, donde la interacción del plasma con los campos eléctrico y magnético de la Tierra hace que las partículas asciendan en el día y desciendan en la noche [34]. El electrojet ecuatorial es una gran corriente eléctrica en la región E de la ionosfera terrestre dando como resultado un campo eléctrico este-oeste en la zona iluminada de la ionosfera. Esta corriente se extiende  $\pm 3$  grados al norte y sur del ecuador magnético [31, 41].

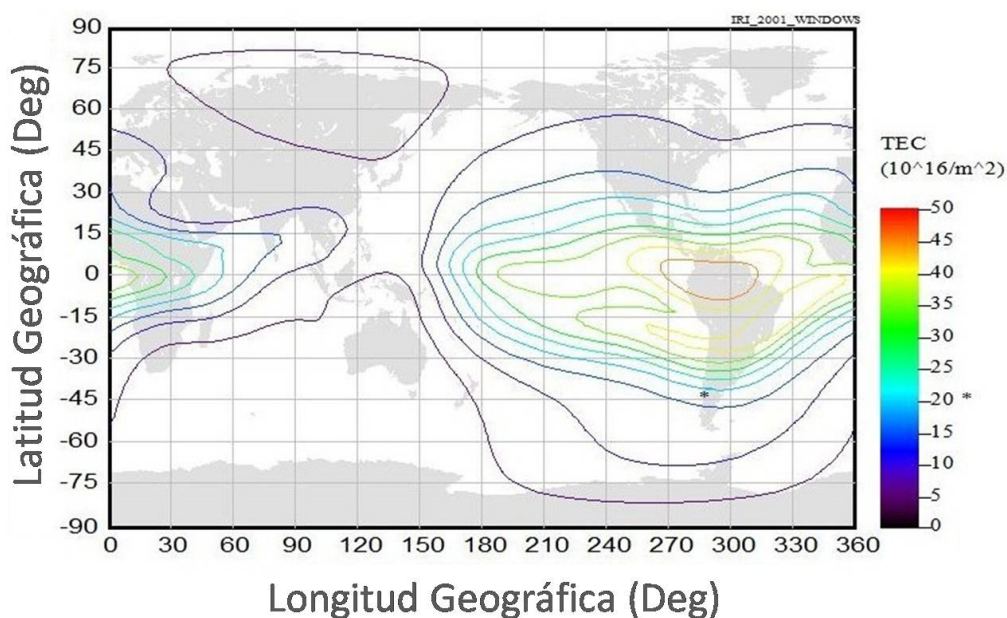


Figura 2.3: Modelo Ionosférico Global calculado con IRI para el día 3 de septiembre de 2007 a las 19:00 UT y una altitud de 10000 km

## 2.6. Propagación de señales electromagnéticas por la Ionosfera

La atmósfera terrestre influye directamente sobre la propagación de las señales electromagnéticas, modificando su velocidad y su trayectoria. Suponiendo un observador  $i$  que recibe una señal de un satélite  $k$  (figura 2.4), la relación entre  $dr$  y  $dt$  sería:

$$v = \frac{dr}{dt} \quad dt = \frac{dr}{v(r)} \quad (2.1)$$

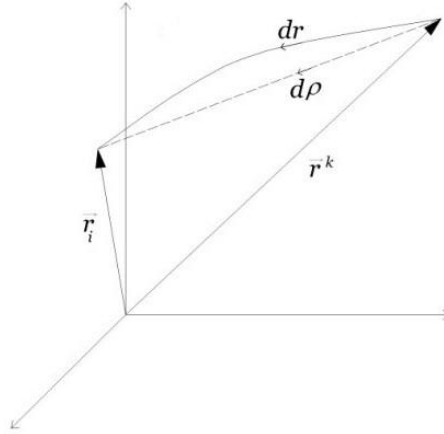


Figura 2.4: vector receptor satélite

Integrando se puede calcular el tiempo de retardo total satélite-receptor:

$$t_i^k = \int_{r_i}^{r^k} \frac{dr}{v(r)} \quad (2.2)$$

Definiendo el índice de refracción  $n$  de una onda electromagnética como la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en la ionosfera:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.3)$$

Sustituyendo en 2.2:

$$t_i^k = \int_{r_i}^{r^k} \frac{n}{c} dr \quad (2.4)$$

Organizando términos para obtener una relación entre la distancia geométrica y la distancia real:

$$\begin{aligned}
t_i^k &= \int_{r_i}^{r^k} \frac{n}{c} dr = \int_{r_i}^{r^k} \left[ \frac{1}{c} + \frac{(n-1)}{c} \right] d\rho + \left[ \int_{r_i}^{r^k} \frac{n}{c} dr - \int_{r_i}^{r^k} \frac{n}{c} d\rho \right] \\
&= \frac{\rho_i^k}{c} + \int_{r_i}^{r^k} \frac{(n-1)}{c} d\rho + \left[ \int_{r_i}^{r^k} \frac{n}{c} dr - \int_{r_i}^{r^k} \frac{n}{c} d\rho \right] = \frac{\rho_i^k}{c} + \frac{\delta\rho_{atm}}{c}
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Donde  $dr$  es el diferencial de distancia en la trayectoria y  $d\rho$  es el diferencial de distancia geométrico (figura 2.4). El término  $\rho_i^k$  representa la distancia geométrica entre satélite y receptor mientras que el término  $\delta\rho_{atm}$  representa los errores generados por la atmósfera terrestre. De la ecuación 2.5 se tiene que el error atmosférico es:

$$\delta\rho_{atm} = \int_{r_i}^{r^k} (n-1)d\rho + \left[ \int_{r_i}^{r^k} ndr - \int_{r_i}^{r^k} nd\rho \right] \tag{2.6}$$

En la cual, el primer término indica el error generado al suponer que la onda viaja en el vacío. El segundo termino, que contiene las dos integrales restantes, está relacionado con la curvatura del rayo debido a la refracción del medio; este término es muy pequeño, comparado con el primer termino por lo cual, se desprecia [21]. El término calculado en la ecuación 2.6 equivale al delta de distancia para una onda monocromática. Si se tiene una onda modulada, se debe tener en cuenta la velocidad de grupo  $v_G$  que está relacionada con la velocidad de fase  $v$  a través de la frecuencia  $\omega$  y el vector de onda  $k$ :

$$v_G = \frac{d\omega}{dk} = v + \frac{dv}{dk} \tag{2.7}$$

Ahora, el índice de refracción del grupo  $n_G$  se relaciona con el índice de refracción de fase como:

$$n_G = \frac{c}{v_G} = c \frac{dk}{d\omega} = n - c\omega \frac{1}{v^2} \frac{dv}{d\omega} = n + \omega \frac{dn}{d\omega} \tag{2.8}$$

Estos dos índices sólo serán iguales cuando  $\frac{dn}{d\omega}$  sea cero, es decir, en medios en los que el índice de refracción sea independiente de la frecuencia (medios no dispersivos).

Para propagación de ondas en gases ionizados, generalmente se usa la ecuación de Appleton-Hartree [16]:

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - Zi - \left[ \frac{Y_T^2}{2(1-X-Zi)} \right] \pm \sqrt{\frac{Y_T^4}{4(1-X-Zi)} + Y_L^2}} \tag{2.9}$$

Donde  $i$  representa parte compleja y los parámetros adimensionales  $X, Y, Y_L, Y_T$  y  $Z$  están definidos como:

$$X = \frac{\omega_N^2}{\omega^2} \quad Y = \frac{\omega_B}{\omega} \quad Z = \frac{\nu}{\omega} \quad Y_L = \frac{\omega_L}{\omega} \quad Y_T = \frac{\omega_T}{\omega} \quad (2.10)$$

Siendo  $\omega_N$  la frecuencia del plasma,  $\omega_B$  la girofrecuencia del electrón,  $\nu$  la frecuencia de colisión de los electrones con partículas pesadas,  $Y_L = Y \cos \theta$  y  $Y_T = Y \sin \theta$  con  $\theta$  el ángulo formado entre la dirección de propagación de la onda y el campo magnético.  $\omega_N$  y  $\omega_B$  se definen como:

$$\omega_N = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m}} \quad \omega_B = \frac{Be}{m} \quad (2.11)$$

Con  $N$  la concentración electrónica,  $m$  y  $e$  la masa y la carga del electrón,  $c$  la velocidad de la luz en el vacío,  $\epsilon$  la permitividad eléctrica en el vacío y  $B$  la densidad de flujo de campo magnético terrestre.

A partir de la ecuación 2.9 se puede deducir que la ionosfera es un medio inhomogéneo (n depende de la posición), dispersivo (n depende de la frecuencia), anisótropo (n depende de la dirección de propagación por la presencia del campo magnético) y absorbente (debido al término dependiente de la frecuencia de colisión). El signo  $\pm$  de la expresión 2.9 se debe a que la ionosfera es un medio birrefringente, esto es, un medio en el que los rayos con diferentes polarizaciones viajan a velocidades distintas [21].

Asumiendo el caso en que  $Z \ll 1$  (bajas frecuencias de colisión) y considerando que el campo magnético de la Tierra es del orden de  $10^5 T$ , la giro-frecuencia sería del orden de los  $MHz$ , entonces, podemos despreciar  $Y, Y_L, Y_T$  y  $Z$  en 2.9. Tomando las consideraciones anteriores, dicha ecuación se reduce a:

$$n = \sqrt{1 - X} \approx 1 - \frac{X}{2} = 1 - \frac{\omega_N^2}{2\omega^2} \quad (2.12)$$

Después de realizar la expansión de Taylor y tomando los primeros dos términos. Ya que la ionosfera es un medio dispersivo, el índice de refracción de la fase no coincide con el índice de refracción de grupo que calculándolo de 2.8 se obtiene:

$$n_G = 1 + \frac{\omega_N^2}{2\omega^2} \quad (2.13)$$

El retardo para el grupo se puede escribir sustituyendo 2.13 en 2.6 para una onda con frecuencia  $f = \frac{\omega}{2\pi}$ :

$$\begin{aligned}
\delta\rho_{ion} &= \int_{r_i}^{r_k} \frac{N(\rho) e^2}{2\epsilon_0 m f^2} d\rho = \frac{e^2}{2\epsilon_0 m f^2} \int_{r_i}^{r_k} N(\rho) d\rho \\
&= \frac{e^2}{2\epsilon_0 m f^2} sTEC = \frac{\alpha}{f^2} sTEC
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Donde sTEC es el contenido oblicuo de electrones dado en Unidades de TEC (TECu). Un TECu se define como  $10^{16} m^{-2}$ . El valor de  $\alpha$  es  $40,3 m^3 s^{-2}$  [17]. El cálculo para la onda portadora (monocromática) da como resultado el mismo retardo pero con signo negativo, esto expresa que mientras la ionosfera genera un retraso al grupo, adelanta la fase de la señal portadora.

<b>Frecuencia</b>	<b>TEC Nocturno <math>10^{16} e/m^2</math></b>	<b>TEC Diurno <math>10^{18} e/m^2</math></b>
100 MHz	40.3 m	4030 m
1227.6 MHz (L2)	26.7 cm	26.7 m
1575.42 MHz (L1)	16.2 cm	16.2 m
10 GHz	4 mm	40 cm
100 GHz	0.04 mm	4 mm

Cuadro 2.1: Retardos ionosféricos en el cenit para diferentes frecuencias

En el cuadro 2.1 se puede observar el retardo ionosférico en el cenit para valores máximos (diurnos) y mínimos (nocturnos) generado por el TEC en diferentes frecuencias. El retardo ionosférico varía dependiendo del ángulo de elevación generado entre satélite y receptor [32], siendo los valores mayores sobre el horizonte que sobre el cenit.

## Capítulo 3

# Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

Los Sistemas Globales de Navegación Satelital (Global Navigation Satelital System GNSS) son un conjunto de elementos cuyo objetivo es la ubicación en tiempo real de un usuario sobre cualquier punto en el ámbito terrestre. Actualmente existen tres sistemas pertenecientes a este grupo: el sistema GPS Americano, el sistema GLONASS Ruso y el futuro sistema GALILEO Europeo.

Ya que el sistema GPS es el único completamente operativo, este trabajo está dirigido a este sistema aunque el método aquí presentado puede ser aplicado a cualquier GNSS.

Dirigido por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD), el sistema de posicionamiento global NAVSTAR GPS (NAVigation System Time and Ranging-Global Position System) se creó en 1973 teniendo un funcionamiento global en 1995. Este sistema fue diseñado básicamente para reducir los problemas relacionados con el posicionamiento y la navegación.

El sistema GPS funciona mediante una red básica de 24 satélites en órbita sobre el globo terráqueo a un radio medio de 26560 km sobre el centro de la Tierra, con trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie (figura 3.1). Es un sistema de radio navegación que provee posiciones tridimensionales precisas. Actualmente el sistema GPS excede los 24 satélites.

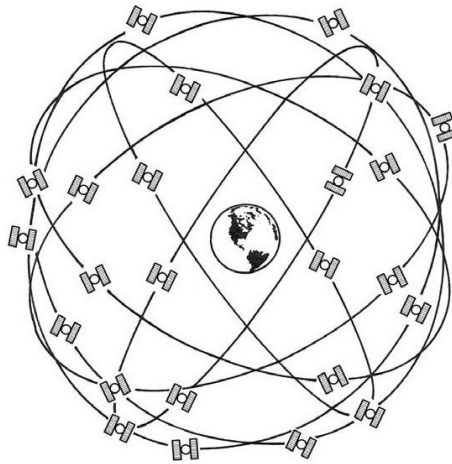


Figura 3.1: Configuración orbital para satélites GPS

### 3.1. Descripción del Sistema

GPS es principalmente un sistema de posicionamiento orientado a la navegación y el transporte en todas sus modalidades. Dividido en tres subsistemas: El Segmento Espacial, el Segmento de Control y el Segmento de los Usuarios.

La constelación de satélites representa el segmento espacial (cuadro 3.1) , con una distribución de 6 planos orbitales, con un período de 12 horas y una separación orbital de  $60^\circ$ . Cada satélite emite dos señales en dos frecuencias diferentes, la portadora L1 cuyo valor fundamental es 1575.42 MHz y con longitud de onda de 19.05 cm y la portadora L2 cuya frecuencia es 1227.60 MHz con longitud de onda de 24.45 cm.

El segmento de control está conformado por una red de estaciones terrestres distribuidas alrededor del planeta, dirigidas por una estación de control ubicada

Características	GPS
Altura Orbital	20200 km
Período	12 h
Frecuencia L1	1575.42 MHz
Frecuencia L2	1227.60 MHz
Disponibilidad	Continua
Precisión	15 m, 0.1 m/s
Relojes Satelitales	rubidio, Cesio

Cuadro 3.1: Características básicas de los satélites GPS

en Colorado Springs (USA). Este segmento se encarga de administrar y operar los satélites, prediciendo y corrigiendo las órbitas, actualizando su información y verificando su estado.

El segmento de usuarios consiste en el conjunto de receptores que son capaces de recibir las señales de los satélites, decodificarlas y emplearlas para encontrar su posición y velocidad. Hace referencia a las aplicaciones que se pueden tener con este sistema aprovechando la información proveniente de estos satélites.

Al ser éste un sistema que supera las limitaciones de la mayoría de los sistemas de navegación existentes, el GPS consiguió gran aceptación entre la mayoría de los usuarios. Desde los primeros satélites enviados, se ha probado con éxito el funcionamiento de los GPS en las aplicaciones de navegación habituales. Además puede accederse a sus funciones de forma sencilla con equipos pequeños y económicos. Este sistema ha fomentado muchas aplicaciones nuevas como la influencia de la ionosfera y el movimiento de placas tectónicas.

## 3.2. Ubicación por GPS

Cuando se desea determinar la posición de un objeto sobre la superficie de la Tierra, el receptor GPS que se utiliza para ello localiza automáticamente, cuatro, o mas, satélites de la red. Para una localización geométrica, con tres señales satelitales sería suficiente (figura 3.2).

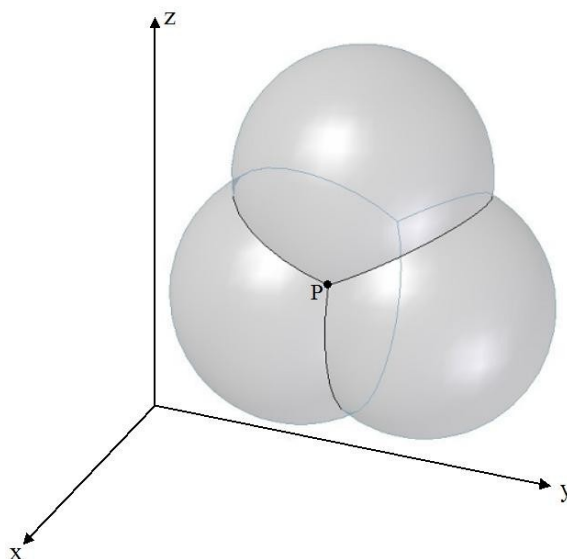


Figura 3.2: Intersección de tres esferas



De la interacción de tres esferas se obtiene dos puntos, de los cuales uno se puede despreciar ya que se encuentra alejado de la superficie terrestre. El cuarto satélite es necesario porque el reloj del receptor no está sincronizado con el reloj del satélite convirtiendo al tiempo en una variable más para el sistema. De cada satélite se recibe información indicando su posición y tiempo. Con base en estas señales, el equipo sincroniza el reloj del GPS y calcula el retraso de estas. Multiplicando por la velocidad de la luz, se obtiene la distancia al satélite y por trilateración calcula la posición en que éste se encuentra.

La trilateración en el caso del GPS, a diferencia de la triangulación en el caso 2-D que consiste en averiguar el ángulo con respecto a puntos conocidos, se basa en determinar la distancia de cada satélite respecto al punto de medición. Conocidas las distancias, se determina fácilmente la propia posición relativa usando tres satélites, conociendo además las coordenadas o posición de cada uno de ellos por la señal que emiten y así se obtiene la posición absoluta o coordenadas reales del punto de medición. También se consigue una exactitud extrema en el reloj del GPS, similar a la de los relojes atómicos que llevan a bordo cada uno de los satélites.

Para la ubicación del usuario, los GPS usan un sistema coordenado llamado WGS84 (World Geodetic System)(cuadro 3.2). Este sistema es el formato estándar usado en cartografía, Geodesia y Navegación. Este sistema de coordenadas usa un elipsoide de revolución que se aproxima fielmente al geoide Terrestre.

Parámetro	Nombre	WGS 84
Semieje mayor	a	6378137 m
Semieje menor	b	6356752.3142 m
Achatamiento	f	1/298.257223563
Velocidad angular	$\omega$	$7.292115 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$
Constante Gravitacional	GM	$398600.4418 \text{ km}^3 \text{ s}^{-2}$

Cuadro 3.2: Parámetros principales de WGS 84

### 3.3. Observables básicos

Las señales GPS proveen parámetros para determinar una posición en tiempo real. Esto se consigue modulando la fase de la señal portadora con un ruido pseudo aleatorio (Pseudorandom Noise PRN). PRN es una secuencia codificada de valores binarios que aparentemente tienen un comportamiento aleatorio, pero pueden ser

identificados inequívocamente. Este código se usa para identificar cada satélite. Dos diferentes códigos son usados, el código C/A que se modula sobre L1 y el código P que se modula sobre L1 y L2 (cuadro 3.3). La figura 3.3 muestra como el código y la fase de arrastre se combinan.

frecuencia fundamental Reloj Atómico (Cs,Rb)	10.23 MHz
Señal de arrastre L1	$154 \times 10.23$ MHz
Frecuencia L1	1575.42 MHz
Longitud de Onda L1	19 cm
Señal de arrastre L2	$120 \times 10.23$ MHz
Frecuencia L2	1227.60 MHz
Longitud de Onda L2	24.4 cm
Frecuencia de código P	10.23 MHz (Mbps)
Longitud de Onda código P	29.31 m
Frecuencia de código C/A	1.023 MHz (Mbps)
Longitud de Onda código C/A	293.1 m

Cuadro 3.3: Señales Satelitales GPS

**Pseudorange:** Las medidas realizadas sobre el código se conocen como *pseudorange* y se define como la diferencia en tiempo entre la hora de emisión de la señal y la hora de recepción, escalado por la velocidad de la luz en el vacío, obteniendo dimensiones de distancia. Esta distancia no es la real ya que se ve influenciada por la atmósfera terrestre mas los errores en los equipos.

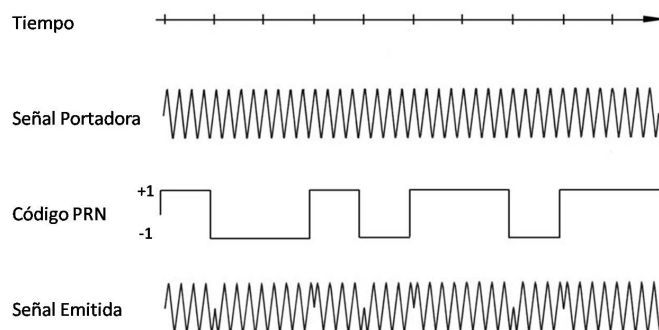


Figura 3.3: Estructura de una señal GPS