

Estimación del contenido total de electrones en la ionosfera usando datos del Sistema de Posicionamiento Global

E. SARDON¹, A. RIUS¹ y N. ZARRAOA^{1,2}

¹Instituto de Astronomía y Geodesia (U.C.M.-C.S.I.C.)

Facultad de Ciencias Matemáticas, Universidad Complutense, 28040 Madrid

² Geodetic Institute, Statens Kartverk. 3500 Honefoss (Noruega)

1. INTRODUCCION

La ionosfera juega un papel muy importante en el terreno de las comunicaciones a larga distancia mediante ondas radio. Pero, la ionosfera también aparece como un medio que perturba las señales electromagnéticas que la atraviesan y cuyo efecto deberá ser eliminado de las observaciones hechas con ciertas técnicas, como son las técnicas geodésicas espaciales, si se quiere obtener resultados precisos.

Una de las principales técnicas geodésicas espaciales de posicionamiento utilizadas actualmente es el Sistema de Posicionamiento Global, que denotamos por sus siglas en inglés, GPS (*Global Positioning System*). La ionosfera actúa como un medio dispersivo. Este efecto, que es directamente proporcional al contenido total de electrones (TEC, *Total Electron Content*) e inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia, es una de las principales fuentes de error en GPS.

En este artículo se describe el método que hemos desarrollado para la estimación del contenido total de electrones a partir de observaciones GPS. El proceso de ajuste se basará en la técnica del filtro de Kalman.

Otros autores han realizado estudios del TEC en la ionosfera usando datos GPS. Lanyi y Roth (1988) y Coco et al. (1991) basan su análisis en datos tomados en una sola estación, preferiblemente durante horas nocturnas locales (cuando el efecto ionosférico es menor) y modelan el TEC mediante un polinomio de segundo orden. Wilson et al. (1992) usan datos de una red global de receptores GPS para modelar el TEC mediante un desarrollo en armónicos esféricos de grado 8. En el método que se presenta, hemos usado datos GPS de varias estaciones tomados durante periodos de más de 24 horas y, para cada uno de estos periodos hemos estimado modelos locales, estocásticos e independientes para cada una de las estaciones.

2. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL

El sistema de posicionamiento global fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos como un sistema de navegación y transferencia de tiempo. Este sistema consta de tres elementos principales: a) un conjunto de satélites que emiten señales electromagnéticas, b) los receptores que reciben dichas señales y c) una serie de estaciones de control. A partir de las señales recibidas de al menos cuatro satélites simultáneamente y conocida la posición de éstos es posible estimar (x, y, z, t) para el receptor.

2.1. Satélites GPS

La constelación de satélites GPS consta de 21 satélites (enero 1993) distribuidos en 6 planos orbitales. Las órbitas, con excentricidades entre 10^{-4} y 10^{-2} , tienen un semieje mayor de unos 26500 km y un periodo orbital de 12 horas de tiempo sidéreo.

Estos satélites emiten dos señales portadoras con frecuencias 1575.42 MHz (L1) y 1227.60 MHz (L2) moduladas por dos códigos (C/A y P) y un mensaje de navegación. El uso de estos códigos, que consisten en una serie de 0 y 1, permite distinguir las señales procedentes de los distintos satélites.

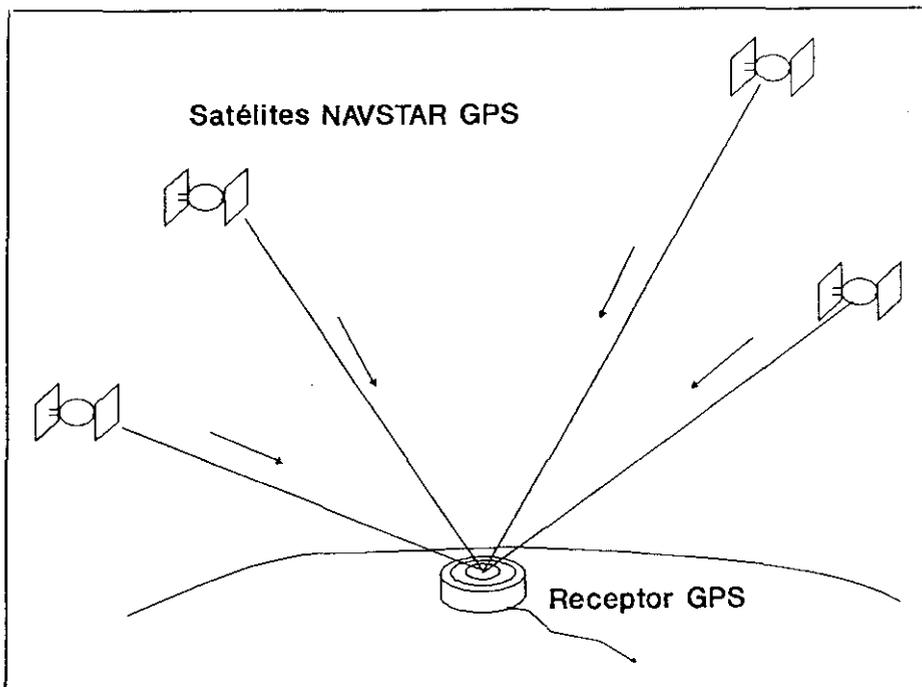


Figura 2.1. Representación básica de la técnica GPS.

El mensaje de navegación contiene información acerca del estado de los satélites, sus efemérides, sus relojes y el tiempo GPS. Se suele actualizar varias veces cada día.

2.2. Receptores GPS

Los receptores GPS son los encargados de recibir las señales procedentes de los satélites GPS (figura 2.1). Básicamente constan de:

- una antena
- un microprocesador
- un sistema para almacenar la información
- una unidad de control para comunicación con el usuario
- un reloj

2.3. Estaciones de control

Hay cinco estaciones de control (Hawai, Colorado Springs, Ascensión, Diego García y Kwajalein) cuya principal misión es la de recoger continuamente las señales procedentes de los satélites visibles en ellas para obtener las efemérides y las correcciones a los relojes de los satélites.

2.4. Observables GPS

2.4.1. Pseudodistancia

En los receptores denominados **de correlación de código o con código** se genera una réplica de los códigos C/A, P o ambos. El código recibido del satélite es correlado con el generado por el receptor, de forma que este último se desplaza en tiempo hasta que se produce la máxima correlación. Ese estado es fácilmente identificable y corresponde al caso en que las dos copias del código están alineadas en tiempo.

El desplazamiento que ha tenido que sufrir la copia del receptor para que coincida con el código procedente del satélite (Δt en la figura 2.2), multiplicado por la velocidad de la luz es lo que se conoce como **pseudodistancia**. No es la distancia real entre satélite y receptor porque la propagación de la señal se ha visto afectada por los efectos de la troposfera y la ionosfera, entre otros; y porque, además, el código se genera en el satélite a partir del reloj de éste y la réplica de este código en el receptor se basa en el reloj del receptor, y estos relojes puede no estar perfectamente sincronizados.

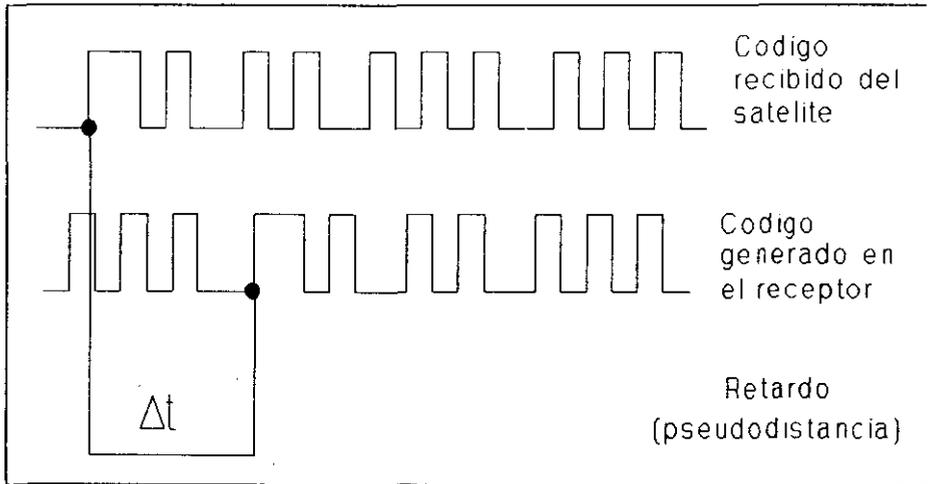


Figura 2.2. Pseudodistancia (Wells et al., 1986).

2.4.2. Fase

El segundo observable GPS, es la fase de la señal que se obtiene al multiplicar la señal procedente del satélite con la que se genera en el receptor.

Al estar midiendo fases, hay una ambigüedad de un número entero de ciclos asociado a cada medida, que no es posible conocer. Este problema, que solo aparece en la primera medida puesto que a partir de aquí se hace un seguimiento continuado de la señal, se conoce como **ambigüedad inicial**. Si por alguna causa hay una pérdida momentánea de señal, vuelve a aparecer la ambigüedad en la primera fase medida una vez recuperada ésta. A la diferencia entre esta nueva ambigüedad y la ambigüedad anterior se la conoce como **salto de ciclo**, y corresponde a un número entero de ciclos. Hay una ambigüedad inicial para cada par satélite - receptor. No forzamos que este número sea entero, porque hay unos retardos instrumentales en los satélites y en los receptores que pueden superponerse a este término. Agruparemos estos términos en lo que denominaremos **constantes de inicialización**.

2.5. Ecuaciones de observación

Las medidas GPS se ven afectadas por una serie de errores: errores introducidos por la diferencia entre el tiempo dado por los relojes de los satélites y de los receptores con un tiempo ideal conocido como tiempo GPS, retardo troposférico, retardo ionosférico, ambigüedades, saltos de ciclo, multitrayectoria (interferencia que se produce en la antena cuando la señal llega a ella por varios caminos, debido, por ejemplo, a reflexiones en estructuras metálicas cercanas a la antena), retardos introducidos por el equipo que tienen que atravesar las señales

GPS (tanto en los satélites como en los receptores), etc. Además, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos puede degradar la precisión del sistema para los usuarios en general. Esto se puede hacer principalmente de dos formas: **anti-spoofing** (un código de acceso restringido sustituye al código P), **disponibilidad selectiva** (se introducen errores en los relojes de los satélites y se degrada el mensaje de navegación).

Las ecuaciones de observación a las que se llega para la fase L y la pseudodistancia P, expresadas en unidades de distancia son:

$$\begin{aligned} L_{1j}^i &= \rho_j^i + c \cdot (dt^i - dt_j) + d_{trop_j}^i - d_{ion_{1j}}^i + \lambda_1 \cdot b_{1j}^i \\ L_{2j}^i &= \rho_j^i + c \cdot (dt^i - dt_j) + d_{trop_j}^i - d_{ion_{2j}}^i + \lambda_2 \cdot b_{2j}^i \\ P_{1j}^i &= \rho_j^i + c \cdot (dt^i - dt_j) + d_{trop_j}^i + d_{ion_{1j}}^i + dq_{1j} + dq_{1j}^i \\ P_{2j}^i &= \rho_j^i + c \cdot (dt^i - dt_j) + d_{trop_j}^i + d_{ion_{2j}}^i + dq_{2j} + dq_{2j}^i \end{aligned} \quad (2.1)$$

donde el superíndice i representa el satélite i, el subíndice j representa el receptor j, el subíndice 1 se refiere a la frecuencia f_1 y el 2 a la f_2 ,

ρ_j^i es la distancia entre las posiciones del satélite i, en el instante de emisión, y el receptor j, en el instante de recepción,

c es la velocidad de la luz en el vacío,

dt^i es la diferencia entre el tiempo GPS y el del satélite i,

dt_j es la diferencia entre el tiempo GPS y el del receptor j,

$d_{trop_j}^i$ es el retardo troposférico,

$d_{ion_{kj}}^i$ es el retardo ionosférico para la frecuencia k,

λ_k es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia k,

b_{kj}^i es la constante de inicialización para la frecuencia k,

dq_k^i es el retardo instrumental de grupo para el satélite i,

dq_{kj} es el retardo instrumental de grupo para el receptor j.

En estas expresiones no aparecen de forma explícita términos debidos a errores residuales, al retardo diferencial entre los centros de fase de la antena para L1 y L2 o a la «disponibilidad selectiva».

3. RETARDO IONOSFERICO

La ionosfera es aquella región de la atmósfera terrestre que se extiende desde los 60 km de altura y que se caracteriza por tener electrones libres e iones en cantidad suficiente como para afectar la propagación de ondas radio. La ionización es causada, principalmente, por la radiación ultravioleta procedente del Sol.

La ionosfera refleja las señales electromagnéticas con frecuencias menores que 30 MHz y para frecuencias mayores introduce un retraso que (en m) en primera aproximación viene dado por:

$$d_{ion} = \alpha_f \cdot I \quad (3.1)$$

donde I es el TEC en la dirección de observación (en electrones por metro cuadrado, e/m^2) y $\alpha_r = 40.3/f^2$ (en m^3/e).

Los términos despreciados en esta aproximación son menores que 3.6 cm y 7.6 cm para L1 y L2, respectivamente, para valores extremos del TEC de $2 \times 10^{18} e/m^2$ (Kleusberg, 1986).

El retardo ionosférico correspondiente a las medidas de fase es $-d_{ion}$ y el correspondiente a las medidas de pseudodistancia es $+d_{ion}$, es decir, las medidas de fase experimentan un «avance» al atravesar la ionosfera y las medidas de pseudodistancia un retardo.

Frecuencia	TEC nocturno $10^{16} e/m^2$	TEC diurno $10^{18} e/m^2$
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

Tabla 3.1: Retardos ionosféricos.

En la tabla 3.1 puede verse el retardo ionosférico en el cénit para valores máximos (diurnos) y mínimos (nocturnos) del TEC para distintas frecuencias. El retardo ionosférico es mayor cuanto menor sea la elevación correspondiente a la observación, de tal forma que para elevaciones de 10° es casi tres veces mayor que en el cénit.

La dependencia del retardo ionosférico de la frecuencia de la señal permite corregir este efecto utilizando dos frecuencias distintas. Pero este acercamiento no puede ser usado para los receptores de una sola frecuencia. En este caso, se tiene que usar un modelo de predicción ionosférica. En el mensaje de navegación se transmiten los parámetros correspondientes a uno de estos modelos (Klobuchar, 1986).

Puesto que el retardo ionosférico es directamente proporcional al TEC, nuestro principal objetivo será estimar el TEC a partir de los datos GPS.

3.1. Contenido total de electrones

Se define el contenido total de electrones TEC entre el punto A y el punto B como el número total de electrones libres contenidos en una columna (de sección $1 m^2$) que une A y B. Es decir:

$$TEC = \int_A^B N dh \quad (3.2)$$

donde N es la densidad electrónica (en e/m^3), dh es el incremento en altura (en m) y la integral se calcula a lo largo del camino que une los puntos A y B . En el caso de ser una columna vertical tendremos el TEC vertical, es decir, en la dirección del cénit.

Los valores para el TEC suelen variar entre 10^{16} y 10^{19} e/m^2 , dependiendo de la hora del día, la estación de año, la actividad solar (ciclo solar), la actividad magnética, la latitud geomagnética, etc. Además se observa una importante variación de un día para otro, lo que hace muy difícil su predicción.

4. ESTIMACION DEL TEC EN LA IONOSFERA USANDO DATOS GPS

4.1. Estimación del término ionosférico modificado

En las expresiones obtenidas para los observables GPS (2.1) vemos que hay términos que dependen de la frecuencia y términos que no dependen. Agrupamos estos últimos en:

$$p_j^i = \varrho_j^i + c \cdot (dt^i - dt_j) + d_{trop_j}^i \quad (4.1)$$

Este término también incluiría cualquier otro efecto común a todos los tipos de observables, como por ejemplo el efecto de la «disponibilidad selectiva» (Blewitt, 1990).

Si además consideramos la expresión (3.1) para el retardo ionosférico, las ecuaciones de observación (2.1) se convierten en:

$$\begin{aligned} L_{1j}^i &= p_j^i - \alpha_1 \cdot I_j^i + \lambda_1 \cdot b_{1j}^i \\ L_{2j}^i &= p_j^i - \alpha_2 \cdot I_j^i + \lambda_2 \cdot b_{2j}^i \\ P_{1j}^i &= p_j^i + \alpha_1 \cdot I_j^i + q_{1j}^i \\ P_{2j}^i &= p_j^i + \alpha_2 \cdot I_j^i + q_{2j}^i \end{aligned} \quad (4.2)$$

donde $\alpha_k \equiv \alpha_{f_k}$ y $q_{kj}^i = dq_{kj}^i + dq_{kj}^i$ agrupa los retardos instrumentales del satélite y del receptor.

Para minimizar los efectos de la multitrayectoria, que dependen de la frecuencia, solo consideramos observaciones correspondientes a elevaciones mayores de 20 grados.

Nosotros estamos interesados en el efecto ionosférico en la dirección de observación, I_j^i , pero en el sistema (4.2) tenemos más incógnitas que ecuaciones. Para solventar este problema distribuimos el efecto de los retardos instrumentales entre las demás incógnitas definiendo las siguientes variables:

$$\begin{aligned}
I_j^i &\equiv I_j^i + k_j + k^i \\
\bar{p}_j^i &\equiv p_j^i + \frac{\alpha_2 \cdot q_{1j}^i - \alpha_1 \cdot q_{2j}^i}{\alpha_2 - \alpha_1} \\
\bar{b}_{1j}^i &\equiv b_{1j}^i + \frac{[-(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot q_{1j}^i + 2 \cdot \alpha_1 \cdot q_{2j}^i]}{\lambda_1 \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)} \\
\bar{b}_{2j}^i &\equiv b_{2j}^i \frac{[(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot q_{2j}^i - 2 \cdot \alpha_2 \cdot q_{1j}^i]}{\lambda_2 \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)} \\
k_j &\equiv \frac{dq_{2j} - dq_{1j}}{\alpha_2 - \alpha_1} \\
k^i &\equiv \frac{dq_{2j}^i - dq_{1j}^i}{\alpha_2 - \alpha_1}
\end{aligned} \tag{4.3}$$

y (4.2) se reduce a

$$\begin{aligned}
L_{kj}^i &= \bar{p}_j^i - \alpha_k \cdot \bar{I}_j^i + \lambda_k \cdot \bar{b}_{kj}^i \\
P_{kj}^i &= \bar{p}_j^i + \alpha_k \cdot \bar{I}_j^i
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Las nuevas variables definidas en (4.3) son básicamente las antiguas variables más un término que es una combinación lineal de los retardos instrumentales. En concreto, el término \bar{I}_j^i al que llamaremos **término ionosférico modificado**, contiene el retardo ionosférico y los retardos instrumentales diferenciales k_j , k^i (en unidades de e/m^2) y nuestro objetivo será estimar dicho término.

En el sistema (4.4) tenemos igual número de ecuaciones que de incógnitas, podemos, por lo tanto, resolverlo para obtener el término ionosférico modificado. Sin embargo, para obtener una mejor estimación de este término usaremos la información de que las ambigüedades son constantes en periodos sin saltos de ciclo y que un salto de ciclo corresponde a un número entero de ciclos. De esta forma, determinamos las constantes de inicialización modificadas \bar{b}_{kj}^i a partir de observaciones de pseudodistancia usando el método desarrollado por Blewitt (1990). Ya que las medidas de pseudodistancia pueden llegar a ser hasta dos órdenes de magnitud más ruidosas que las de fase, consideramos solo estas últimas:

$$\begin{aligned}
\hat{L}_{1j}^i &= \bar{p}_j^i - \alpha_1 \cdot \bar{I}_j^i \\
\hat{L}_{2j}^i &= \bar{p}_j^i - \alpha_2 \cdot \bar{I}_j^i
\end{aligned} \tag{4.5}$$

donde \hat{L}_{kj}^i son las medidas de fase corregidas por las constantes de inicialización modificadas.

Resolvemos el sistema (4.5) para obtener $\bar{I}_j^i(t)$ para cada tiempo de observación, y el siguiente paso es separar el TEC en la dirección de observación, $I_j^i(t)$, de los retardos instrumentales diferenciales k_j , k^i .

4.2. Sistema de referencia ionosférico-solar

Como ya se dijo anteriormente, el principal causante de la producción de iones en la ionosfera es la radiación solar. Basándonos en esto definimos el siguiente sistema de referencia geocéntrico:

- eje z: hacia el centro solar
- eje x: intersección del ecuador terrestre con el plano perpendicular al eje z.
- eje y: formando un triedro directo.

De las dos posibilidades para el eje x elegimos aquella para la que el eje y está más próximo al Polo Norte.

En este sistema de referencia definimos las coordenadas (ψ, χ) (figura 4.1):
 ψ : ángulo medido en el plano xy desde el eje x en sentido directo.
 χ : distancia angular del Sol al punto.

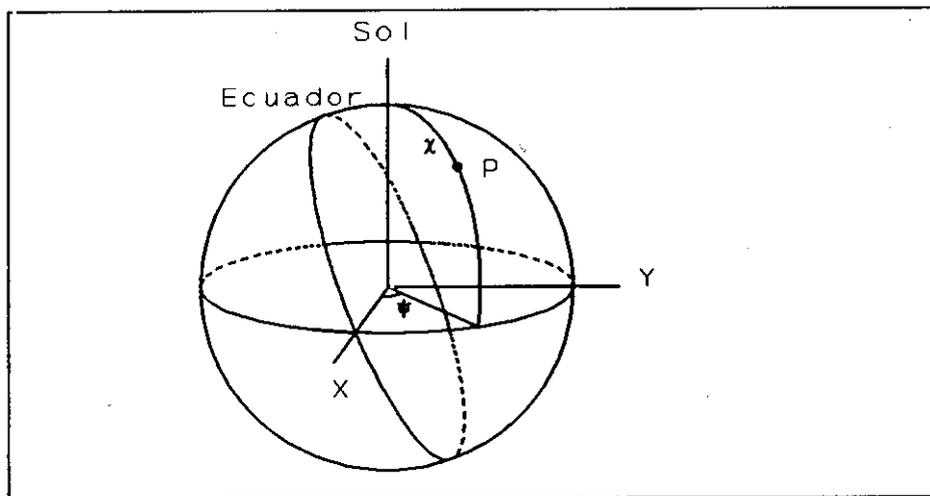


Figura 4.1. Coordenadas del punto P en el sistema ionosférico-solar.

La figura 4.2 representa la configuración local de la ionosfera que tendríamos en un instante dado para la estación j. Hemos considerado una altura media de la ionosfera $h_m = 355$ km, que corresponde a una altura media del máximo de densidad electrónica. En este dibujo, el punto S representa el **punto subionosférico** del satélite i visto desde la estación j. Se define este punto como la intersección de la dirección de observación con la superficie media de la ionosfera. Z representa el punto subionosférico del cenit de la estación j. Las coordenadas (ψ, χ) se referirán a puntos subionosféricos (más detalles en Sardón, 1993).

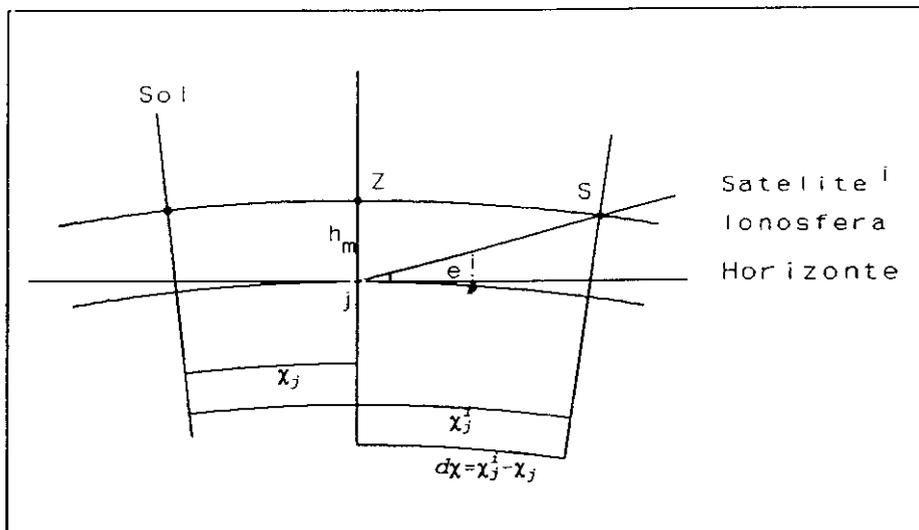


Figura 4.2. Ionosfera local alrededor del cenit de la estación j.

4.3. Estimación del TEC y de los retardos instrumentales diferenciales

En este apartado pretendemos separar en $\vec{I}_j^i(t)$ el TEC en la dirección de observación de los retardos instrumentales diferenciales. Esto lo conseguiremos modelando el TEC en la ionosfera. En primer lugar, hay que tener en cuenta que las observaciones GPS se realizan a distintas elevaciones y cuanto menores sean éstas mayor será la porción de ionosfera que atraviesa la señal, siendo mayor el efecto ionosférico. Por ello, el término ionosférico modificado depende de la elevación de la observación. Para modelar esta dependencia expresamos el TEC en la dirección de observación como:

$$\vec{I}_j^i(t) = S(e_j^i) \cdot F(\vec{d}_j^i, t) \quad (4.6)$$

donde e_j^i es la elevación del satélite i visto desde el receptor j, \vec{d}_j^i es la dirección geocéntrica del punto subionosférico del satélite i (punto S en la figura 4.2), el factor de oblicuidad S transforma el TEC vertical, correspondiente al cenit del punto subionosférico de la observación, en el TEC correspondiente a la dirección \vec{d}_j^i y F es una función describiendo el TEC vertical.

El factor de oblicuidad en primera aproximación corresponde a la cosecante de la elevación en el punto subionosférico. Una expresión más elaborada puede encontrarse en Sovers (1991):

$$S(e) = \frac{\sqrt{R_E^2 \sin^2 e + 2 \cdot R_E \cdot h_2 + h_2^2} - \sqrt{R_E^2 \sin^2 e + 2 \cdot R_E \cdot h_1 + h_1^2}}{h_2 - h_1} \quad (4.7)$$

donde e es la elevación (en superficie) y h_1 y h_2 son las «alturas» mínima y máxima de la ionosfera, respectivamente. Esta expresión es estrictamente correcta para una tierra esférica de radio R_E . Nosotros hemos aproximado R_E por el radio medio terrestre y hemos considerado, en general, $h_1 = 350$ km y $h_2 = 360$ km.

Para satélites con elevaciones mayores que 20° , en cada instante t , la región observable de la ionosfera es un casquete esférico de 7° de semiángulo. Así pues, podemos considerar una aproximación lineal espacial de F alrededor de la dirección del cénit de la estación. Y, considerando el sistema de referencia ionosférico-solar previamente definido (ver figura 4.2), modelamos el término ionosférico modificado como:

$$\bar{I}_j(t) = S(e_j) \cdot [A_j(t) + B_j(t) \cdot d\psi + C_j(t) \cdot d\chi] + k_j + k^i \quad (4.8)$$

donde $d\psi = \psi_j^i - \psi_j$, $d\chi = \chi_j^i - \chi_j$ y $A_j(t)$, $B_j(t)$, $C_j(t)$ representan los coeficientes de la aproximación local lineal de la función F . $A_j(t)$ es el TEC correspondiente al cénit de la estación j o TEC vertical para la estación j .

Los parámetros a resolver en (4.8) son los retardos instrumentales diferenciales y , para cada estación j y cada tiempo t , los valores $A_j(t)$, $B_j(t)$, $C_j(t)$. Pero a partir de esta ecuación no se pueden estimar simultáneamente todos los retardos instrumentales, por lo que, se fija arbitrariamente uno de ellos a cero y el resto se refieren a él.

El método usado para obtener una estimación de estos parámetros ha sido el filtro de Kalman (ver por ejemplo, Herring et al., 1990 o Sardón, 1993), en el que k_j y k^i se han considerado constantes durante cada experimento (hasta 48 horas) y, para modelar las variaciones de la ionosfera, hemos considerado los coeficientes A , B , C como procesos estocásticos tipo camino aleatorio con desviación típica en 2 minutos dada por:

$$\begin{aligned} \sigma_A &= 3 \cdot 10^{15} \text{ (e/m}^2\text{)} \\ \sigma_{B,C} &= 3 \cdot 10^{14} \text{ (e/m}^2 \cdot \text{grado)} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Dada la variabilidad de la ionosfera, los coeficientes ionosféricos pueden ser modelados en términos de procesos estocásticos tipo camino aleatorio.

El modelo estocástico considerado viene dado por el modelo dinámico:

$$\begin{aligned} A_j(t_2) &= A_j(t_1) + B_j(t_1) [\psi_j(t_2) - \psi_j(t_1)] + \\ &\quad + C_j(t_1) [\chi_j(t_2) - \chi_j(t_1)] \\ B_j(t_2) &= B_j(t_1) \\ C_j(t_2) &= C_j(t_1) \end{aligned} \quad (4.10)$$

cuya matriz de varianzas-covarianzas es diagonal y sus elementos son de la forma:

$$Q = \frac{\sigma^2}{120 \text{ seg}} \cdot (t_2 - t_1) \quad (4.11)$$

donde σ viene dada por (4.9). Como matriz de varianza-covarianza de los datos hemos considerado una matriz diagonal teniendo sus elementos la siguiente expresión:

$$C_D = \frac{1}{r_z^2} \quad (4.12)$$

donde r_z es un peso que asignamos a cada experimento y que suele ser del orden de 0.1. Al final de cada proceso, si es necesario, modificamos r_z para que la varianza a posteriori $\hat{\sigma}_0^2$ sea próxima a 1, ya que $\hat{\sigma}_0^2 \cdot m$ se distribuye como una χ^2 con m (número de observaciones) grados de libertad.

5. RESULTADOS

Con este método hemos analizado datos GPS tomados en distintas épocas en las estaciones que pueden verse en la figura 5.1. Los datos fueron obtenidos del *National Geodetic Survey*, Maryland (red CIGNET), del *Jet Propulsion Laboratory*, California, y del *Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt* (DLR), Alemania. Todas las estaciones cuentan con receptores GPS tipo ROGUE (Onsala desde mayo de 1991, anteriormente tenía un TI4100) o TURBO-ROGUE (por ejemplo, Harvest). Tenemos varios conjuntos de datos (de 24 a 48 horas, tomados cada 15 segundos, 30 segundos o 2 minutos) a lo largo de más de dos años, por lo que, podemos estudiar la variación en tiempo de los retardos instrumentales y el comportamiento del TEC en distintas estaciones.

Al tener datos de estaciones tan distantes como Madrid, Goldstone y Tidbinbilla podemos tener para periodos de 24 horas datos diurnos y nocturnos para todos los satélites, pudiendo, por tanto, disminuir la correlación entre los retardos

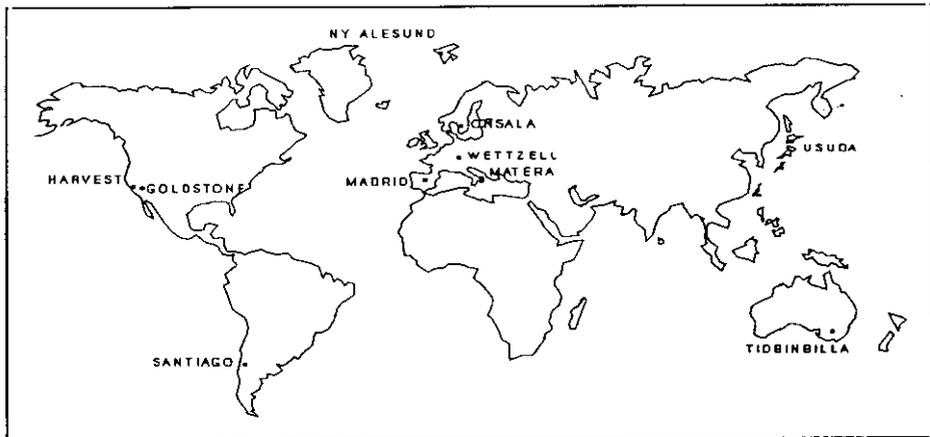


Figura 5.1. Estaciones GPS usadas.

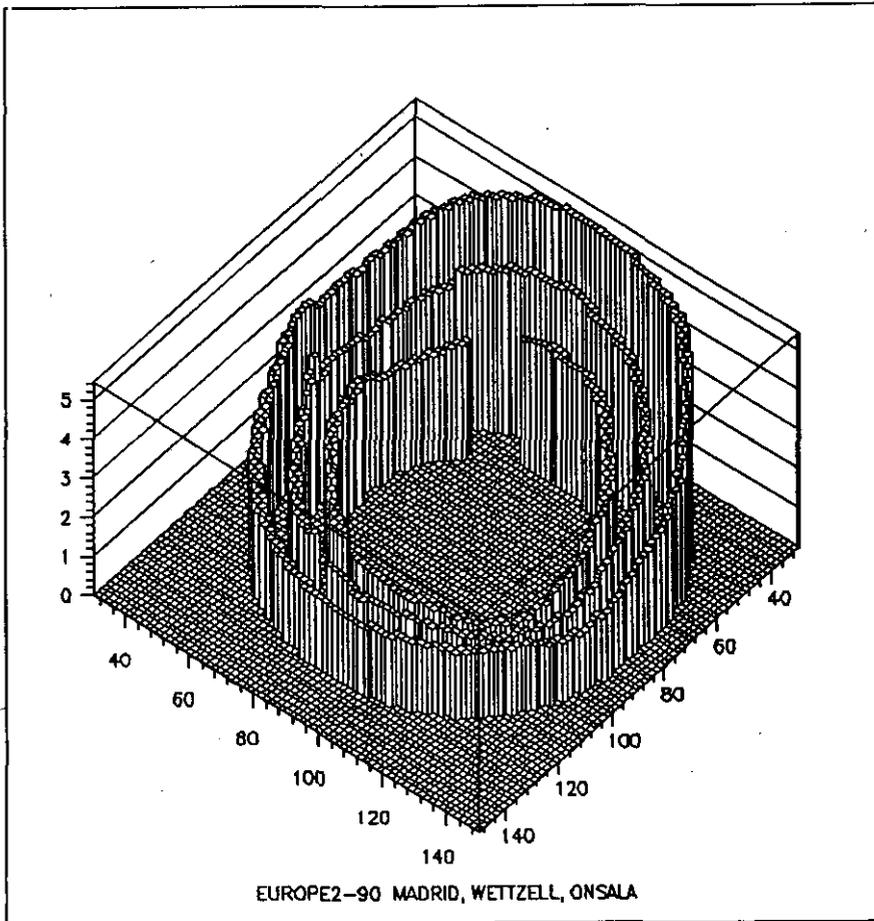


Figura 5.2. TEC vertical (10^{17} e/m^2) para Madrid (curva exterior), Wettzell (Curva media) y Onsala (Curva interior).

instrumentales y el TEC en las distintas estaciones, que es relativamente estable de noche pero varía muy rápidamente durante las horas diurnas (tiempo local).

El procedimiento general que hemos seguido ha sido partir de valores para los retardos instrumentales (generalmente, los obtenidos en el periodo inmediatamente anterior procesado) con una sigma a priori grande. De esta forma hemos obtenido al aplicar Kalman unos valores de los retardos instrumentales. En un segundo paso a estos valores se les asigna una sigma mucho más pequeña y se obtiene el modelo local de TEC para cada una de las estaciones participantes.

Presentamos aquí algunos resultados de TEC que hemos obtenido en distintas estaciones y en distintas épocas del año. El TEC se estimó cada dos minutos y se obtuvieron unos errores formales del orden de $0.2 \times 10^{16} \text{ e/m}^2$.

El TEC depende de varios factores, entre ellos la latitud. Esta dependencia puede verse en la figura 5.2, donde se ha dibujado el TEC vertical estimado para Madrid con latitud 40.4 N, Wettzell (Alemania) con latitud 49.1 N y Onsala (Suecia) con latitud 57.4 N, desde las 18:00 del 5 a las 18:00 del 6 de septiembre de 1990 en función de las coordenadas ionosférico-solares.

Aquí se ve que la diferencia entre el TEC para las tres estaciones es bastante suave, por lo que podría pensarse en una interpolación para puntos con latitudes entre dos de las estaciones. También puede verse que cuanto menor es la latitud mayores son los valores de TEC, salvo para las horas nocturnas ($\chi > 90^\circ$) en que los valores para las tres estaciones son muy similares.

En las figuras 5.3 y 5.4 puede verse el TEC vertical para los días 7 y 8 de octubre de 1992 para dos estaciones en zonas polares: Ny Alesund (Noruega) con una latitud de 78.9 N y Mc Murdo (Antártida) con una latitud de 77.8 S. Vemos que el TEC en estas estaciones es menor que para estaciones con latitudes medias, como las que consideradas en la figura 5.2, pero sin embargo es mucho más ruidoso.

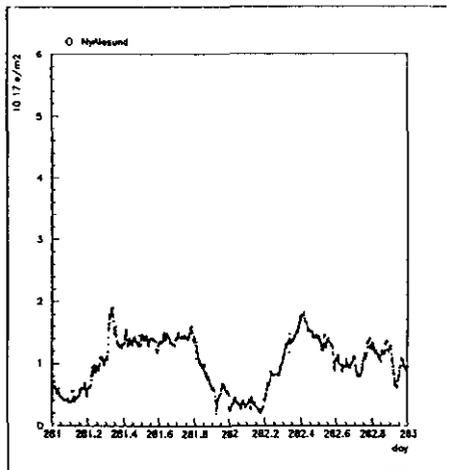


Figura 5.3. TEC vertical (10^{17} e/m^2) en Ny Alesund para el 7 y 8 de octubre de 1992 en función del tiempo (TU) expresado en día del año.

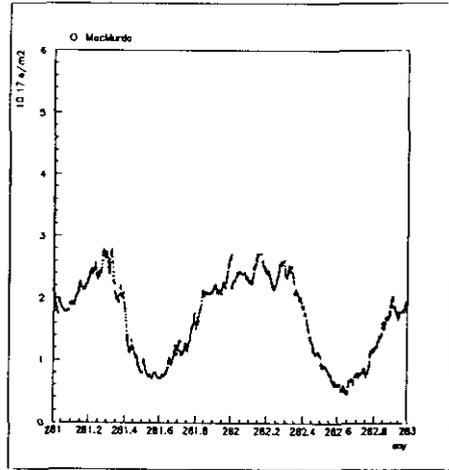


Figura 5.4. TEC vertical (10^{17} e/m^2) en Mc Murdo para el 7 y 8 de octubre de 1992 en función del tiempo (TU) expresado en día del año.

En las figuras 5.5 a 5.8 puede verse el TEC vertical estimado en distintas estaciones para las cuatro estaciones del año en función del tiempo (Tiempo Universal) expresado en día del año.

En las figuras 5.5 y 5.6, en las que aparece el TEC estimado para los días 6 y 7 de enero de 1991 para Madrid y Tidbinbilla, se puede ver como la parte correspondiente a la noche local es más extensa en Madrid (invierno) que en Tidbinbilla (verano). En todas estas figuras del TEC vertical puede verse la de-

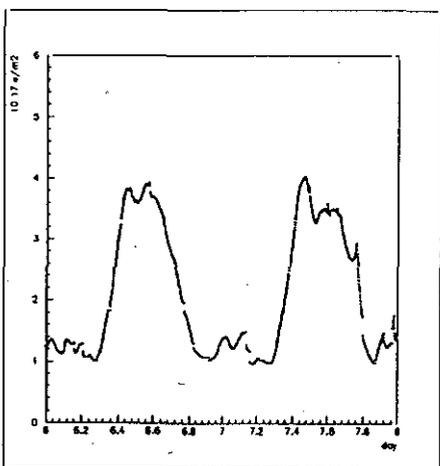


Figura 5.5. TEC vertical (10^{17} e/m^2) en Madrid para el 6 y 7 de enero de 1991 en función del tiempo (TU) expresado en día del año.

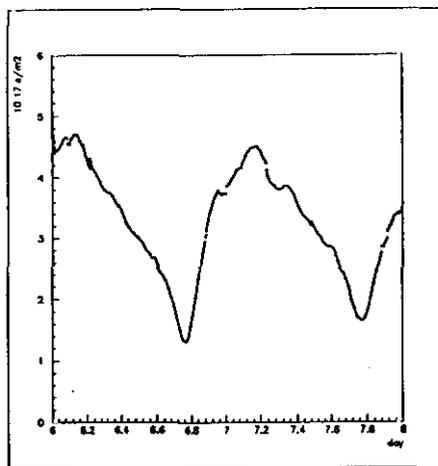


Figura 5.6. TEC vertical (10^{17} e/m^2) en Tidbinbilla para el 6 y 7 de enero de 1991 en función del tiempo (TU) expresado en día del año.

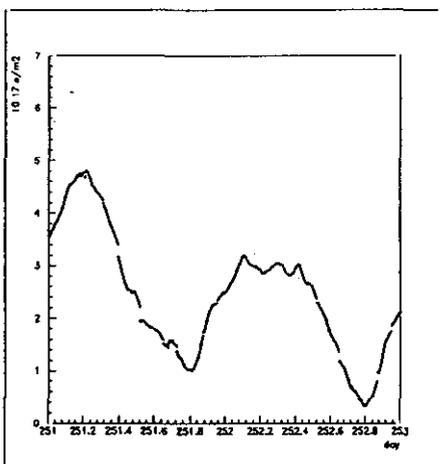


Figura 5.7. TEC vertical (10^{17} e/m^2) en Tidbinbilla para el 7 y 8 de septiembre de 1991 en función del tiempo (TU) expresado en día del año.

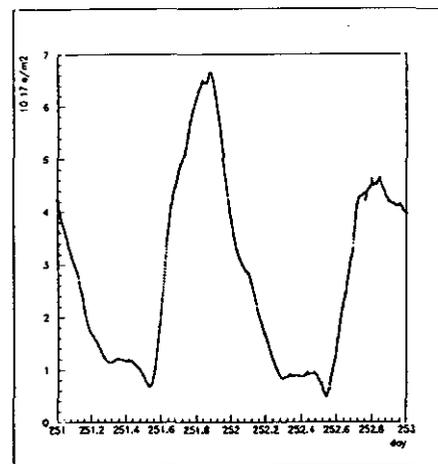


Figura 5.8. TEC vertical (10^{17} e/m^2) en Goldstone para el 7 y 8 de septiembre de 1991 en función del tiempo (TU) expresado en día del año.

pendencia de éste de la hora del día. Los valores mínimos corresponden a horas nocturnas locales, en las que, además, el TEC es relativamente estable. Los valores correspondientes a horas diurnas locales pueden llegar a ser hasta un orden de magnitud mayores que los nocturnos, alcanzándose el máximo alrededor de las 14 horas (tiempo local).

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se ha descrito el método que hemos desarrollado para la estimación del contenido total de electrones basado en el uso de datos duales GPS, tomados en una red de estaciones, que puede usar tanto datos diurnos como nocturnos (tiempo local). Estas dos características junto con el uso del filtro de Kalman para la estimación del TEC son las principales diferencias con otros métodos de estimación del TEC también basados en datos GPS (Lanyi y Roth, 1988, Coco et al., 1991). Además este método permite estimar los retardos instrumentales diferenciales de los satélites y receptores GPS. Los errores formales obtenidos son del orden de $0.2 \times 10^{16} \text{ e/m}^2$ para las estimaciones del TEC vertical y de 0.07 nanosegundos ($1 \text{ ns} \approx 2.86 \times 10^{16} \text{ e/m}^2$) para los retardos instrumentales diferenciales.

7. REFERENCIAS

- Blewitt, G.** (1990). «An automatic editing algorithm for GPS data». *Geophysical Research Letters*, Vol. 17, No. 3, 199-202.
- Coco, D.S., C. Coker, S.R. Dahlke y J.R. Clync.** (1991). «Variability of GPS satellite differential group delay biases». *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 27 (6), 931-938.
- Herring, T.A., J.L. Davis y I.I. Shapiro.** (1990). «Geodesy by radiointerferometry: the application of Kalman filtering to the analysis of VLBI data». *Journal of Geophysical Research*, 95 B8, 12561-12581.
- Kleusberg, A.** (1986). «Ionospheric propagation effects in geodetic relative GPS positioning». *Manuscripta Geodaetica*, 11, 256261.
- Klobuchar, J.A.** (1986). «Design and characteristics of the GPS ionospheric time delay algorithm for single frequency users». *Proceedings of the PLANS-86 conference*, Las Vegas, 280-286.
- Lanyi, G.E. y T. Roth.** (1988). «A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using Global Positioning System and beacon satellite observations». *Radio Science*, Vol. 23, No. 4, 483-492.
- Sardón, E.** (1993). «Calibración de efectos ionosféricos en geodesia espacial por medio de datos GPS». Tesis doctoral. Instituto de Astronomía y Geodesia, Madrid.
- Sovers, O.J.** (1991). «Observation model and parameter partials for the JPL VLBI parameter estimation software "MODEST"-1991». *JPL Publication* 83-39, Rev 4.
- Wells, D.E., N. Beck, D. Delikaraoglou, A. Leusberg, E.J. Krakiwsky, G. Lapachelle, R.B. Langley, M. Nakiboglu, K.P. Schwarz, J.M. Tranquila y P. Vanicek.** (1986). *Guide to GPS positioning*. Ed. Canadian GPS Associates.
- Wilson, D.B., A.J. Mannucci, C.D. Edwards y T. Roth** (1992). «Global ionospheric maps using a global network of GPS receivers». *International Beacon Satellite Symposium*.