

Variaciones en los retardos transionosféricos de señales GPS como consecuencia de tormentas geomagnéticas

Gustavo A. Mansilla

Laboratorio de Ionosfera-Universidad Nacional de Tucumán
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Av. Independencia 1800 - 4000 San Miguel de Tucumán ARGENTINA
e-mail: gmansilla@herrera.unt.edu.ar

En este trabajo se muestra el comportamiento que presenta el tiempo de propagación transionosférico de señales de satélites, durante las tormentas geomagnéticas. Se observan desviaciones significativas respecto de los valores normales que, en promedio, se mantienen durante los dos días posteriores al comienzo de la perturbación. Estos resultados indican que durante estos eventos la calidad del posicionamiento resultaría seriamente afectada, principalmente para el caso de receptores que utilizan una sola frecuencia ya que se encuentran cambios en longitud que están en el orden de los metros. Esto hace necesario que se tengan en cuenta estos efectos en los modelados.

In this paper the behavior of transionospheric delay time of radio waves during geomagnetic storms is presented. Significant deviations from "average" behavior are observed, which remain around two days after the commencement of storms. These results indicate that the quality of positioning may be affected, mainly when receivers with a single frequency are used. The conclusion is that the disturbance effects must be considered when accuracy geodetic or navigational positionings are needed.

I. INTRODUCCIÓN

El Sistema de satélites GPS (Global Positioning System) es ampliamente usado para navegación y con fines geodésicos.

Se presentan varias fuentes de error en el posicionamiento geodésico, entre las cuales se destaca el producido por el tiempo de propagación de las señales emitidas por los satélites al atravesar la atmósfera terrestre (troposfera e ionosfera). La razón física de este retardo es la variación del índice de refracción de la atmósfera.

Cuando se efectúa un posicionamiento relativo entre dos estaciones, los efectos ionosféricos en cada extremo de la base (con una distancia menor a 40 km) son prácticamente los mismos, ya que desde ambas estaciones se observa el mismo satélite en idénticas condiciones ionosféricas siendo el efecto resultante prácticamente nulo; esta situación se degrada con el aumento de la distancia entre las estaciones.

En la determinación de posiciones absolutas, el término principal del retardo ionosférico en la propagación puede ser eliminado usando las dos frecuencias transmitidas por los satélites ($L_1 = 1575.42$ MHz y $L_2 = 1227.6$ MHz). Sin embargo, con un receptor de una sola frecuencia, el error debido a la ionosfera puede ser significativo para determinados requerimientos de precisión esperados.

Los retardos debidos a la refracción troposférica son generalmente más pequeños que los ionosféricos. En la ionosfera, el primer término de este tiempo de propagación es proporcional al llamado contenido electrónico total e inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia emitida por el satélite. El contenido electrónico total es función de la latitud, hora del día, estación del año y del ciclo solar. A estas variaciones, se agrega además la fuerte fluctuación que presenta durante las tormentas geomagnéticas, que altera considerablemente el patrón regular de comportamiento del tiempo de retardo.

Durante una tormenta geomagnética se produce un sustancial incremento de energía en la atmósfera superior de altas latitudes, siendo la región F2 de la ionosfera mayormente afectada, la que responde de maneras muy diferentes.

El objetivo de este trabajo es mostrar las significativas variaciones que presenta el tiempo de propagación ionosférico durante algunas tormentas geomagnéticas seleccionadas, a partir de valores del contenido electrónico total medidos en Tucumán (26.9° S; 64.4° O), con el propósito que los modelos de ionosfera utilizados para el posicionamiento consideren este tipo de eventos, y se efectúen las correspondientes correcciones necesarias en los cálculos.

Para indicar el grado de perturbación que se observa durante las tormentas geomagnéticas, se presentan en este trabajo las desviaciones relativas del retardo ionosférico respecto a los valores medios mensuales.

Despreciando la curvatura en el camino de propagación de una señal, el retardo ionosférico está dado por la expresión (Mansilla y Ríos⁽¹⁾):

$$t_i = 40.3 \text{ CET} / (c f^2 \cos \chi)$$

donde CET es el contenido electrónico total (elec/m^2), f es la frecuencia emitida por el satélite, c es la velocidad de la luz en el vacío y χ es el ángulo cenital.

La desviación relativa del retardo ionosférico es:

$$Dt = (t_i - t_{im}) / t_{im} \cong (CET - CE_m) / CET_m$$

donde t_{im} y CET_m representan los valores medios mensuales.

II. OBSERVACIONES

Las tormentas magnéticas que se consideran en este trabajo ocurrieron: 12 de junio de 1982 (1443 TU; Dst máx= 69 nT), 16 de julio de 1982 (1518 TU; Dst máx= 106 nT), 6 de agosto de 1982 (1636 TU; Dst máx= 173 nT), 10 de diciembre de 1982 (0722 TU; Dst máx= 80 nT) y 4 de febrero de 1983 (1615 TU; Dst máx= 169 nT).

Todas las figuras muestran las desviaciones relativas el día que comienza la tormenta y los dos días subsiguientes, en tiempo universal (TU).

La Figura 1 presenta el comportamiento de los cambios relativos para la tormenta magnética del 12 de junio de 1982. Antes del comienzo de la misma se pueden ver incrementos significativos. En respuesta a la tormenta se produce un pequeño efecto negativo (descenso de los valores de contenido electrónico total) de corta duración, hasta las primeras horas de la noche local. Luego comienza una fase positiva (incremento en los valores de contenido electrónico total) de gran amplitud inicialmente, que permanece aproximadamente 24 horas. Los mayores incrementos del tiempo de retardo se producen en horas de la noche, con variaciones de más del 150 %. El día 14 de junio persisten las perturbaciones, con menor amplitud. Una tendencia a la recuperación se observa hacia el final de este día.

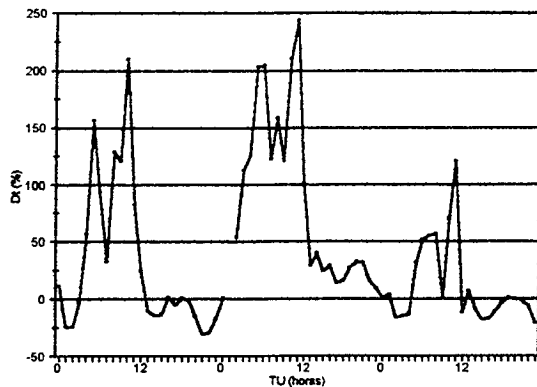


Figura 1: Comportamiento de Dt en Tucumán durante los días 12, 13 y 14 de junio de 1982.

La Figura 2 corresponde a la tormenta geomagnética del 16 de julio de 1982. Como se puede ver, efectos positivos de irregular amplitud se presentan durante todo el período considerado, sin que se pueda observar una tendencia a la recuperación. Las mayores desviaciones del tiempo de retardo se producen en horas de la noche local del día de comienzo de la tormenta magnética.

En la Figura 3 se muestran las variaciones relativas para la tormenta magnética del 6 de agosto de 1982. Se presentan valores negativos de comportamiento irregular desde antes del inicio de la tormenta, los que se mantienen durante aproximadamente las 48 horas posteriores al comienzo de la misma.

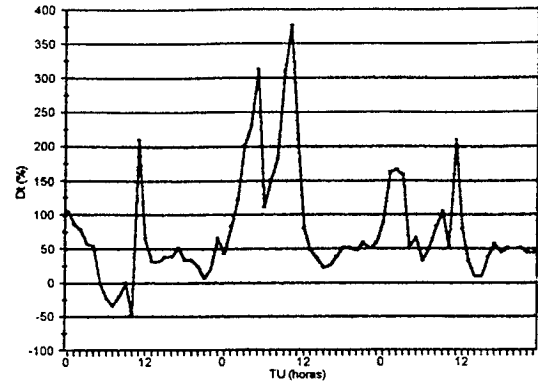


Figura 2: Idem a la Figura 1, pero durante los días 16, 17 y 18 de julio de 1982.

En las primeras horas del día posterior al del comienzo de la tormenta, los Dt alcanzan -80%. Hacia el final del día 8 de agosto comenzaría la recuperación..

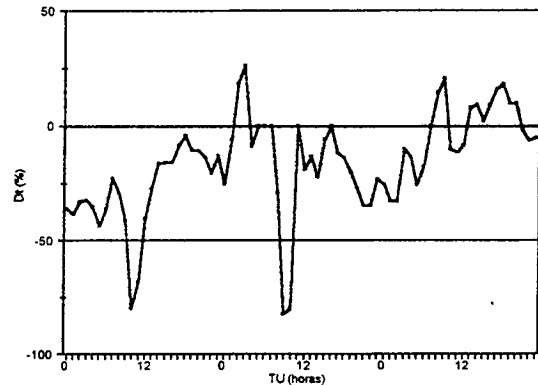


Figura 3: Idem a la Figura 1, pero durante los días 6, 7 y 8 de agosto de 1982.

Los valores Dt para la tormenta del 10 de diciembre de 1982 se presentan en la Figura 4. A pesar de los cortes de los datos, se puede ver inicialmente un descenso brusco. Se presenta un efecto negativo que alcanza valores de aproximadamente el -40% desde la media mañana del día 11 hasta la media mañana del día siguiente.

La Figura 5 muestra los Dt para la tormenta del 4 de febrero de 1983. Considerables efectos positivos se presentan previos al comienzo de la tormenta. En respuesta al comienzo de la misma, se observa un acrecentamiento de corta duración y amplitud. En horas de la tarde se inicia un efecto negativo irregular, llegándose a desviaciones de más del 50% en horas de la noche, y se prolonga hasta la recuperación, alrededor del anochecer local del día 6.

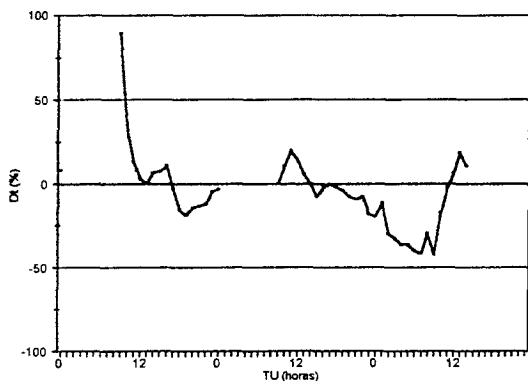


Figura 4: Idem a la Figura 1, pero durante los días 10, 11 y 12 de diciembre de 1982.

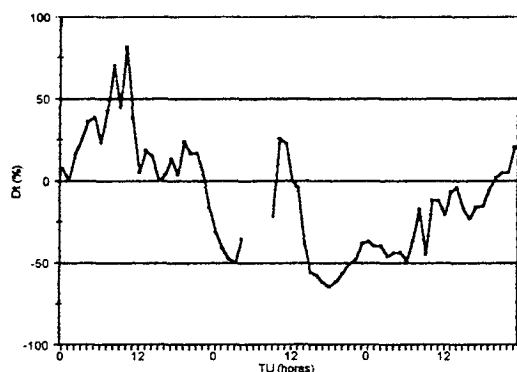


Figura 5: Idem a la Figura 1, pero durante los días 4, 5 y 6 de febrero de 1983.

III. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Como se muestra, las tormentas geomagnéticas pueden producir significativas variaciones en el contenido electrónico total y por consiguiente en el retardo ionosférico, lo que afecta considerablemente la calidad de las mediciones de posicionamiento.

En efecto, si se calcula la variación de la longitud de la trayectoria teniendo en cuenta el retardo debido al tiempo de propagación se encuentra, por ejemplo, para la frecuencia de 1575.42 Mhz, cambios en longitud del orden de 1,2 m cuando $Dt = 158,3 \%$ a las 08 TU del día 13 de junio de 1982; 1,3 m cuando $Dt = 48 \%$ a las 13 TU del día 17 de julio de 1982 y - 0,4 m cuando Dt toma el valor -82,3 % a las 09 TU del día 7 de agosto de 1982.

Existen varios mecanismos físicos que han sido propuestos para explicar los efectos positivos y negativos que se observan. Para los primeros se han sugerido campos eléctricos de origen magnetosférico y/o vientos neutros meridionales que se propagan al ecuador, asociados con perturbaciones atmosféricas viajeras (Mendillo et al.⁽²⁾,

Jakowsky et al.⁽³⁾; Prölss et al.⁽⁴⁾; Prölss⁽⁵⁾, entre otros). Los efectos negativos serían producidos por cambios de concentración de neutros (incrementos de N_2 y decrecimientos de O), producidos durante los períodos de tormenta y trasladados al ecuador por los vientos de tormenta (Prölss⁽⁶⁾; Mikhailov et al.⁽⁷⁾, entre otros).

El hecho que se observen efectos positivos o negativos depende en gran parte del tiempo local del comienzo de la tormenta geomagnética y de la estación del año. Sin embargo, en principio, la magnitud de estas desviaciones es independiente de la intensidad de las tormentas.

Como se dijo antes, estas fluctuaciones ionosféricas generadas como consecuencia de las tormentas geomagnéticas no son tenidas en cuenta en los modelos utilizados para la determinación de posiciones geodésicas. Conocer estas desviaciones es de suma importancia práctica, ya que en el posicionado se requieren conocimientos muy precisos del retardo ionosférico. Normalmente, durante estos períodos magnéticamente perturbados, aún entre estaciones próximas suelen observarse comportamientos ionosféricos diferentes, lo que sin duda hace que la aproximación de similitud en la estructura ionosférica resulte inadecuada.

En resumen, como se puede ver, valores considerablemente diferentes de los valores medios persisten generalmente durante dos días después de que se produce el comienzo de la tormenta geomagnética, lo que trae como consecuencia que puedan cometerse errores significativos en el cálculo de posicionamientos estáticos y dinámicos.

Aunque los modelos que cuantifican el comportamiento ionosférico durante las tormentas están aún pobremente definidos, estas variaciones de ninguna manera pueden ser ignoradas cuando se efectúa un posicionado relativo o absoluto usando receptores de una o dos frecuencias.

Referencias

- 1- Mansilla, G.A. y Rios, V., Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, 2, 105-118 (1996).
- 2- Mendillo, M; Xe, X. Q. y Rishbeth, H., Planet. Space Sci., 40, 595-606 (1992).
- 3- Jakowsky, N.; Jungstand, K.; Schlegel, K.; Kohl, H. y Rinnert, K., Can. J. Phys., 70, 575-581 (1992).
- 4- Prölss, G.W.; Brace, L.H.; Mayr, H.G.; Carignan, G.R. Killeen, T.L. y Klobuchar, J.A., J. Geophys. Res., 96, 1275-1288 (1991).
- 5- Prölss, G.W., J. Geophys. Res., 98, 5981-5991 (1993).
- 6- Prölss, G.W., Rev. Geophys. Space Phys., 18, 183-202 (1980).
- 7- Mikhailov, A.V.; Terekhin, L.; Skoblin, M.G. y Mikhailov, V.V., Adv. Space Res., 12, No. 10, 269-272 (1992).