

Efectos de tormentas geomagnéticas sobre la ionosfera de las estaciones El Cerrillo (Toluca, México) y Boulder (Colorado, EUA)

Elsy Carolina Cipagauta-Lara* y Héctor Javier Durand-Manterola

Departamento de Física Espacial, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 México D.F., México.

** carocipa@gmail.com*

RESUMEN

En este trabajo estudiamos tres eventos individuales de tormentas magnéticas, con datos obtenidos en las estaciones ionosféricas de El Cerrillo de Toluca (México) y Boulder (Colorado), en las cuales se pueden observar ambos efectos de tormenta, positiva y negativa. También se ha hecho un análisis descriptivo de 35 tormentas magnéticas intensas, es decir con $Dst < -100$ nT, que han sido reportadas durante el periodo de enero de 1972 a diciembre de 1982. Los resultados muestran que, en promedio durante un ciclo solar, las tormentas magnéticas parecen no afectar la ionosfera sobre Toluca, ya que el intervalo de desviación de la frecuencia crítica, δf_oF2 , es ~ 10 %. Por el contrario, la ionosfera sobre Boulder tiene un claro efecto de fase negativa. Si tenemos en cuenta la actividad solar y la hora local, se puede observar un efecto de fase positiva en la ionosfera de Toluca y un efecto de fase negativa en la ionosfera de Boulder.

Palabras clave: ionosfera, tormentas geomagnéticas, fase positiva, fase negativa, El Cerrillo, Boulder.

ABSTRACT

In this work we studied three individual magnetic storm events, with data collected in the ionospheric stations of El Cerrillo Toluca (Mexico) and Boulder (Colorado), in which both positive and negative storm effects can be observed. A descriptive analysis of 35 intense magnetic storms ($Dst < -100$ nT), reported for the period of January of 1972 to December of 1982 was also performed. The results show that in average, during a solar cycle, the storms seem not to affect the ionosphere on Toluca, since the interval of critical frequency deviation, δf_oF2 , is ~ 10 %. On the contrary, the ionosphere on Boulder have a clear effect on the negative phase. If we have in mind the solar activity and the local time, an effect of positive phase on Toluca and an effect of negative phase on Boulder can be observed.

Keywords: ionosphere, geomagnetic storm, positive and negative phase, El Cerrillo, Boulder.

INTRODUCCIÓN

La ionosfera, una región de la alta atmósfera, es un plasma parcialmente ionizado caracterizado por sus propiedades y efectos sobre la propagación de ondas electromagnéticas. Los fenómenos aeronómicos más importantes son aquellos que alteran las condiciones medias de la ionosfera de manera significativa, como las tormentas ionosféricas que afectan la capa F2 con cambios en la densidad electrónica, y que son importantes por su extensión geográfica y su impacto. Estas perturbaciones ocurren en la ionosfera después del comienzo súbito de las tormentas geomagnéticas y pueden durar varias horas e incluso días (Radicella, 2000).

La principal característica de una tormenta magnética es un decrecimiento en la intensidad horizontal del campo geomagnético y su subsiguiente recuperación. Actualmente, se sabe que este decrecimiento es debido a un aumento en la población de partículas magnetosféricas atrapadas. Para poder medir la intensidad de la tormenta magnética actualmente se usan varios índices, refiriéndose cada uno de ellos a alguna región del globo terrestre. Para el presente trabajo nosotros usaremos únicamente el índice Dst, que es una medida de actividad geomagnética para determinar la severidad de las tormentas magnéticas, a latitudes medias y ecuatoriales.

El objetivo de este trabajo es estudiar el efecto de las tormentas magnéticas sobre la ionosfera, en particular sobre la estación de El Cerrillo ubicada en Toluca, México (Lat. Geo. 19.3N; Long. Geo. 260E) y la estación de Boulder, Colorado (Lat. Geo. 40N; Long. Geo. 254.7E), las cuales tienen una longitud muy cercana y por lo tanto podemos comparar el efecto a la misma hora local.

Los datos de la frecuencia crítica $foF2$ de la ionosfera de la estación de Toluca fueron digitados de archivos de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), México. Los datos de la frecuencia crítica $foF2$ de la ionosfera de la estación de Boulder, fueron obtenidos de la base de datos *UK Solar System Data Centre* (UKSSDC, 2006). Los datos de variación del índice geomagnético Dst se tomaron de la base de datos del *World Data Center (WDC)-C2 for Geomagnetism, Kyoto* (WDC, 2006).

MECANISMOS DE FORMACIÓN DE TORMENTAS IONOSFÉRICAS DE FASE POSITIVA Y NEGATIVA

Las respuestas de la capa F2 a una tormenta geomagnética son llamadas tormentas ionosféricas. Estas consisten en un decremento o un incremento de la concentración electrónica con respecto a la concentración electrónica promedio. Los decrementos son llamados efectos de fase negativa y los incrementos son los denominados efectos de fase positiva de la tormenta. La morfología de las tormentas ionosféricas es complicada, ya que la respuesta de

la ionosfera para la misma tormenta depende del tiempo local del inicio de la tormenta geomagnética y de la latitud. Además, una respuesta global de los efectos de tormenta ionosférica, difiere bastante de una tormenta a otra (Danilov and Lastovicka, 2001; Agopyan, 2002; Pirog *et al.*, 2006). La respuesta de la capa F2 a una tormenta magnética, es usualmente descrita en términos de la desviación de la frecuencia crítica $foF2$ en el día de la tormenta magnética con respecto a la mediana mensual de la frecuencia crítica $foF2_{med}$ así:

$$\delta foF2 = \frac{foF2_{obs} - foF2_{med}}{foF2_{med}} \times 100$$

El comportamiento temporal de la frecuencia crítica $foF2$ durante una tormenta ionosférica consta de períodos de valores positivos (fase positiva de la tormenta) y valores negativos (fase negativa de la tormenta). Se cree que los mecanismos físicos responsables para la formación de cada una de estas fases son diferentes. El efecto de la fase negativa de una tormenta ionosférica es causado por los cambios de la razón $[O]/[N_2]$ en la composición termosférica, la cual es proporcional a la concentración electrónica en la altura de la capa F2. La morfología de la tormenta ionosférica positiva es más complicada, pero se ha observado que la fase positiva aparece varias horas antes del comienzo de la tormenta magnética. Algunas veces la tormenta consiste de un efecto de sólo fase positiva, es decir $\delta foF2$ nunca se vuelve negativa. También la existencia de “zonas muertas” puede ser mencionada cuando en la mitad de una tormenta, la desviación de la mediana no excede el 10 % por varias horas.

Una de las características más significativas de la fase negativa es su arrastre de latitudes aurales a latitudes medias. La amplitud de este efecto decrece durante este arrastre. Esto es debido a que la disipación de la energía del viento solar continuamente afecta la atmósfera polar más alta. Aún durante condiciones magnéticamente quietas, esta adición de energía es suficientemente grande para generar una zona perturbada permanentemente. Los cambios característicos observados en esta región son incrementos en los gases más pesados y un decremento en los gases más ligeros. Además, durante una tormenta geomagnética hay un calentamiento de la parte baja de la termosfera (100–140 km) en la región auroral. La principal fuente de este calentamiento es la disipación de Joule por corrientes eléctricas, aunque también hay energía que es depositada por precipitación de partículas. Así, los cambios de composición de la termosfera no quedan restringidos a la región polar, sino que se expanden a latitudes medias, ya que el calentamiento induce su propia circulación, que puede estar o no en oposición a la circulación regular. Este calentamiento en la capa F2 tiende a llevar el aire hacia el ecuador, a bajas latitudes, es decir, la fase negativa es arrastrada a bajas latitudes. La distribución latitudinal de la fase negativa puede ser diferente en los sectores día y noche, en invierno y en verano, y depende

de la circulación regular del viento. La penetración hacia el ecuador de la fase negativa demuestra un comportamiento estacional. En el hemisferio de verano, durante la misma tormenta, la fase negativa es más desarrollada y el arrastre va hacia latitudes más bajas (Prölss, 1995; Tsagouri *et al.*, 2000; Danilov and Lastovicka, 2001; Agopyan, 2002; Perrone *et al.*, 2007).

Varios mecanismos han sido considerados como una fuente probable de las tormentas ionosféricas de fase positiva. Al principio se sugirió que los efectos de tormenta positiva eran causados también por cambios en la composición neutra, pero hasta ahora no hay evidencia observada que sustente esta suposición. Por tanto, se cree que los efectos de las tormentas ionosféricas en bajas latitudes son observados cuando se produce una modificación en la anomalía ecuatorial por cambios en campos eléctricos, vientos y composición neutra. Los cambios en los campos eléctricos pueden ser causados por una superposición de campos eléctricos externos de origen polar y magnetosféricos o por modificaciones de los campos eléctricos dinamo por vientos de tormenta. Por ejemplo, cambios repentinos en la capa polar, o en la corriente de anillo, causan un cambio temporal en el campo eléctrico zonal en dirección hacia el este. Este incremento aumentará el arrastre hacia arriba del plasma y por tanto, la difusión de plasma hacia los trópicos. El efecto de tormenta negativa será observado en latitudes ecuatoriales y efectos de tormenta positiva en latitudes del trópico. Las perturbaciones del campo eléctrico pueden ser producidas también por una modificación de los vientos dinamo. Por tanto, la anomalía ecuatorial tiende a ser más pronunciada siguiendo la tormenta magnética, indicando una intensificación de los vientos dinamo durante este tiempo (Prölss, 1995; Danilov and Lastovicka, 2001).

EFFECTOS DE TORMENTAS MAGNÉTICAS SOBRE LA IONOSFERA DE TOLUCA Y BOULDER

Se analizaron tres eventos individuales y 35 promediados de tormentas magnéticas intensas ($Dst < -100$ nT), que ocurrieron en el periodo de enero de 1972 a diciembre de 1982. Para el análisis se emplearon datos de frecuencia crítica de la capa F2 de la ionosfera (f_oF2) de las estaciones El Cerrillo (Toluca, México) y Boulder (Colorado, EUA).

Efecto de tormenta de fase positiva

La tormenta del 21 de febrero de 1973 (Figura 1), cuya fase inicial comienza después de las 0TL, presenta una caída en el índice geomagnético Dst a -121 nT a las 17 TL y luego una segunda caída del índice Dst a -97 nT el 22 de febrero a las 16TL. Se puede observar que el efecto de la tormenta magnética es positiva para ambas estaciones, Toluca y Boulder. El máximo de δf_oF2 se tiene

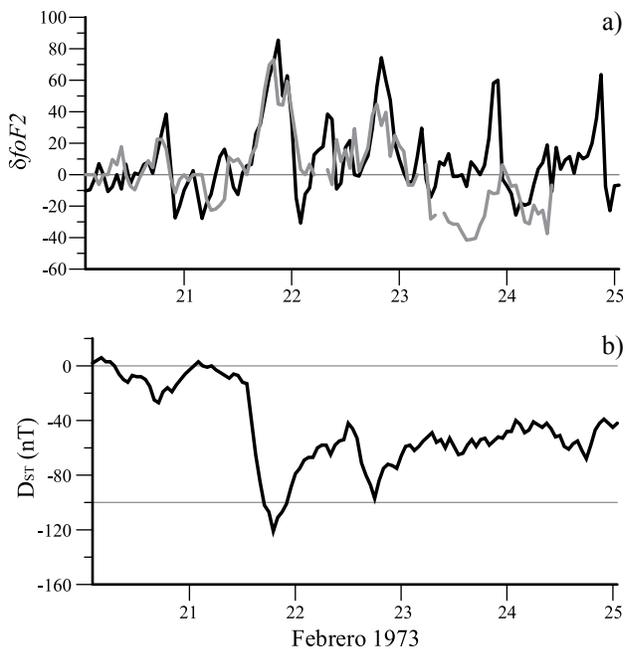


Figura 1. Tormenta magnética de febrero 21 de 1973. a) Desviación de la frecuencia crítica δf_oF2 de la ionosfera en la estación de Toluca (línea negra) y en la estación de Boulder (línea gris). b) Índice geomagnético Dst. En el eje x se representan los días del mes en que ocurrió la tormenta.

a las 19TL en la estación de Toluca (85.4 %) y a las 18TL en la estación de Boulder (73.1 %). Luego hay un efecto de tormenta negativa, más notable en la estación de Toluca, con un δf_oF2 de -30.8 % a las 0 TL. En la segunda caída del Dst también se observa un efecto de tormenta positiva, con un máximo de δf_oF2 de 74.3 % a las 18TL para la estación de Toluca y de 44.7 % a las 17TL para la estación de Boulder. En la fase de recuperación, nuevamente se observa un efecto de tormenta negativa, pero esta vez es más notorio en la estación de Boulder con un $\delta f_oF2 = -41.6$ % a las 13TL del 23 de febrero.

Efecto de tormenta de fase negativa

La tormenta del 9 de mayo de 1978 (Figura 2) presenta el incremento súbito el 8 de mayo a las 18TL y la fase principal comienza después de la 1TL del día 9 de mayo, al producirse una caída en el índice geomagnético Dst a -132 nT a las 4TL; su fase de recuperación dura aproximadamente dos días cuando vuelve a haber una caída del índice Dst a -78 nT el 11 de mayo a las 3TL. Se puede observar que el efecto de la tormenta magnética es positivo para ambas estaciones, antes de que el índice comience a decrecer, con $\delta f_oF2 = 37.1$ % y $\delta f_oF2 = 20.8$ % para las estaciones de Toluca y Boulder, respectivamente. Cuando el índice Dst comienza a decrecer, el efecto de la tormenta cambia a fase negativa, con el mínimo en $\delta f_oF2 = -22.4$ % a las 5TL para la estación de Toluca y $\delta f_oF2 = -44.4$ % a las 9TL

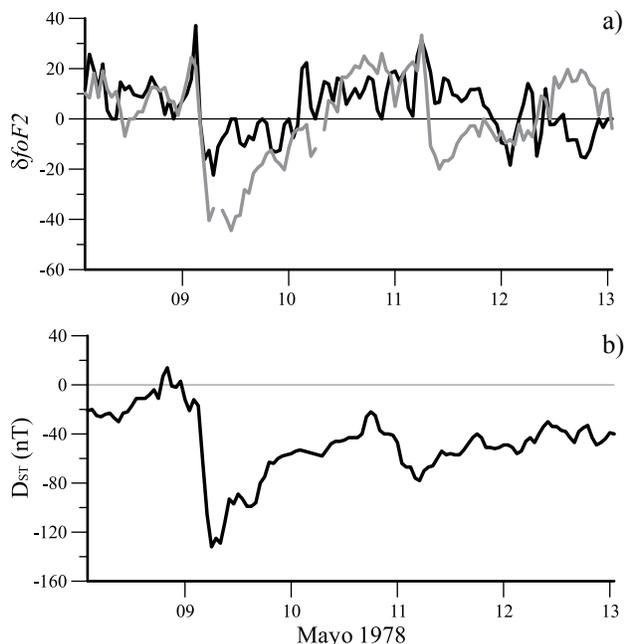


Figura 2. Tormenta magnética de mayo 9 de 1978. a) Desviación de la frecuencia crítica $\delta foF2$ de la ionosfera en la estación de Toluca (línea negra) y en la estación de Boulder (línea gris). b) Índice geomagnético Dst. En el eje x se representan los días del mes en que ocurrió la tormenta.

para la estación de Boulder. En la fase de recuperación de la tormenta, la $\delta foF2$ en la estación de Toluca se observa muy fluctuante, mientras que en la estación de Boulder la $\delta foF2$ sigue la tormenta, es decir, después del mínimo de la $\delta foF2$, cambia otra vez a una fase positiva. En la segunda caída del índice se observa que en ambas estaciones hay un máximo de la $\delta foF2 = 33.2\%$ a las 4TL del día 11 de mayo, luego en la estación de Boulder hay un efecto de tormenta negativa con un $\delta foF2 = -20\%$ a las 8TL del mismo día, mientras que en la de Toluca persiste una fase positiva hasta aproximadamente un día después de la tormenta.

Efectos de tormenta positiva, negativa y zonas muertas

La tormenta del 2 de marzo de 1982 (Figura 3) presenta el incremento súbito el 1 de marzo a las 8 TL y tiene una duración aproximada de 3 horas, cuando inicia la fase principal después de la 11TL de este día para producir una caída en el índice geomagnético Dst a -211 nT a las 0TL del 2 de marzo. Se puede observar que el efecto de la tormenta magnética es de fase positiva para la estación de Toluca, con un máximo en $\delta foF2$ de 66.9% tres horas después del mínimo Dst. Para la estación de Boulder el efecto de la tormenta es de fase negativa, con $\delta foF2 = -64.3\%$ dos horas antes del mínimo Dst, y sigue siendo negativa aproximadamente por un día más. En la estación de Toluca, una vez alcanzado el valor máximo, el $\delta foF2$

decrece y se mantiene casi por doce horas sin aumentar en un 10% , es decir, alcanza una zona muerta.

Análisis de eventos promediados

Como se puede observar de los tres casos analizados, es muy complicado decir cómo es el comportamiento de la ionosfera sobre México durante una tormenta magnética. Por ello se ha hecho un análisis descriptivo de 35 tormentas magnéticas intensas, es decir $Dst < -100$ nT, que han sido reportadas durante el mismo periodo. Para esto hemos tenido en cuenta que no todas las tormentas presentan fase inicial o comienzo súbito y que la hora origen es variable. Así, el valor del $\delta foF2$ para el valor mínimo del Dst de cada tormenta se ha tomado como el punto de referencia, y se han considerado tres días antes y tres días después de este punto de referencia, sin tener en cuenta la hora local de la tormenta. Esto se hizo con el fin de conservar únicamente los efectos producidos por las tormentas magnéticas. Se obtuvo un promedio de los valores de $\delta foF2$ para los datos de tormenta de las estaciones de Toluca y de Boulder. Si este promedio es tomado para todas las tormentas, como se muestra en la Figura 4, podemos decir que, en promedio, las tormentas afectan poco la ionosfera sobre Toluca, ya que $|\delta foF2| \sim 10\%$, sin embargo, se puede observar un efecto de fase positiva en el punto de referencia. Por el contrario, en promedio, se puede observar un claro efecto de fase negativa

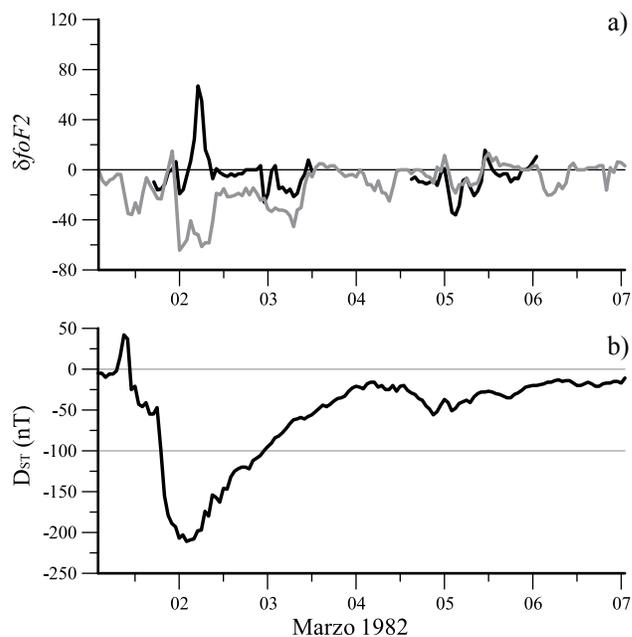


Figura 3. Tormenta magnética de marzo 2 de 1982. a) Desviación de la frecuencia crítica $\delta foF2$ de la ionosfera. Se observa el efecto de tormenta ionosférica de fase positiva en la estación de Toluca (línea negra) y efecto de tormenta ionosférica negativa en la estación de Boulder (línea gris). b) Índice geomagnético Dst. En el eje x se representan los días del mes en que ocurrió la tormenta.

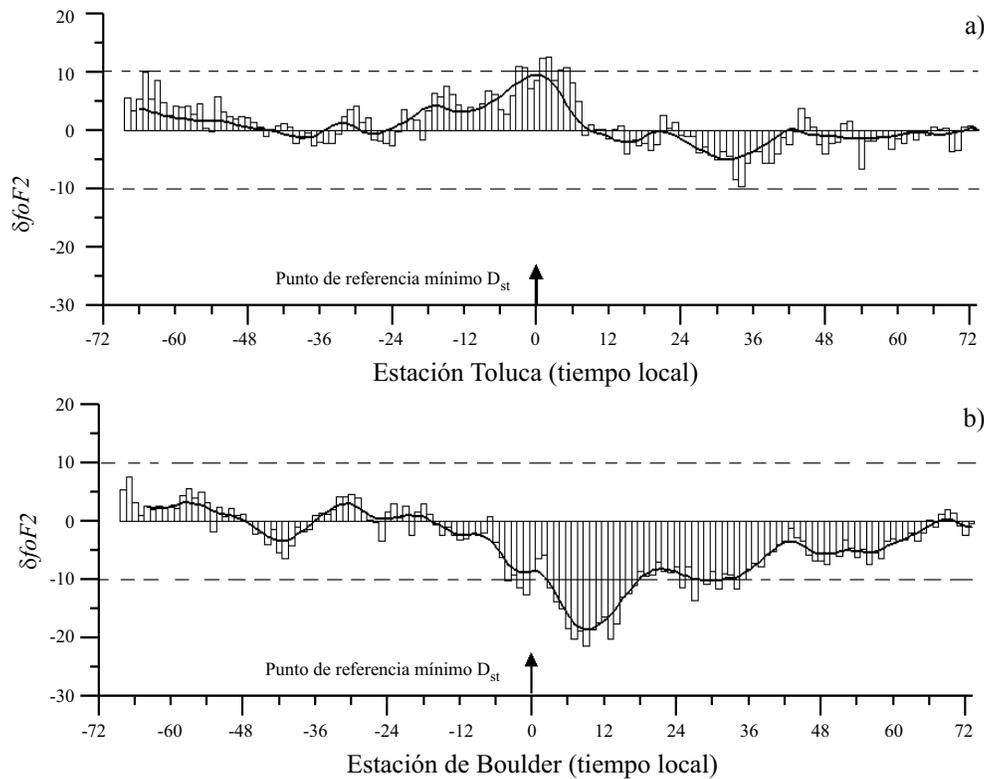


Figura 4. Promedio de la desviación de la frecuencia crítica $\delta foF2$ de las 35 tormentas en las estaciones de (a) Toluca y (b) Boulder. Cada barra representa el promedio de la $\delta foF2$ para cada hora y la línea continua representa una media móvil de cinco puntos para estos promedios.

sobre Boulder, que inicia aproximadamente unas 12 horas antes del mínimo Dst y continúa siendo negativa durante los tres días siguientes.

Ahora, separando las tormentas para los años de actividad solar baja (1973–1976) y actividad solar alta (1979–1981) para ambas estaciones (Figura 5), podemos ver que, para baja actividad solar, en la estación de Toluca aparece un efecto de tormenta de fase positiva, con un máximo aproximadamente seis horas antes del mínimo Dst, es decir en la fase principal de la tormenta. En la estación de Boulder, hay muchas fluctuaciones, y en promedio el $|\delta foF2|$ es $\sim 10\%$, excepto para aproximadamente 12 horas después del mínimo Dst, donde se puede observar un efecto de fase negativa. Lo contrario ocurre para actividad solar alta (Figura 5); en la estación de Toluca se observa que la capa F2 de la ionosfera parece no ser afectada por estar en un $|\delta foF2| \sim 10\%$, mientras que en la estación de Boulder se ve un claro efecto de fase negativa, con el mínimo aproximadamente tres horas después del mínimo Dst.

Así, la capa F2 de la ionosfera en Toluca es más afectada por las tormentas geomagnéticas en época de actividad solar baja que en época de actividad solar alta y con un efecto de tormenta positivo. Lo contrario ocurre en Boulder, donde la capa F2 de la ionosfera es más afectada por las tormentas geomagnéticas en época de actividad solar alta que en época de actividad solar baja y con un efecto de tormenta negativo.

Las tormentas se separaron en dos grupos: las tormentas que tienen un mínimo Dst durante el día entre las 6-18 TL y las tormentas que tienen el mínimo Dst durante la noche entre las 18-6 TL (Figura 6). Podemos observar que, en promedio durante el ciclo solar, en la estación de Toluca el efecto no es mayor que $|\delta foF2| \sim 10\%$ durante el día y la noche. Sin embargo, para la noche se observa un efecto positivo durante aproximadamente 18 horas antes del punto de referencia y el valor máximo justo en este punto; el efecto positivo continúa aproximadamente 12 horas después, cuando cambia su fase a ser negativa. En la estación de Boulder se observa un efecto negativo tanto de día como de noche; en el día el mínimo $\delta foF2$ se encuentra cerca del punto de referencia y en la noche aproximadamente 7 horas después de este punto.

Además, los dos grupos de tormentas anteriores se separaron en años de actividad solar baja y alta. Durante actividad solar baja en la estación de Toluca se observa, en horas diurnas, un efecto positivo, antes, durante y después del punto de referencia (Figura 7), mientras que durante la noche ($|\delta foF2| \sim 10\%$), el efecto positivo es máximo en el punto de referencia. En la estación de Boulder, durante el día no hay cambios apreciables en $\delta foF2$ hasta 12 horas después del mínimo Dst, cuando existe un pequeño efecto de tormenta negativa y un cambio a fase positiva. Durante la noche el efecto es negativo antes y después del mínimo Dst.

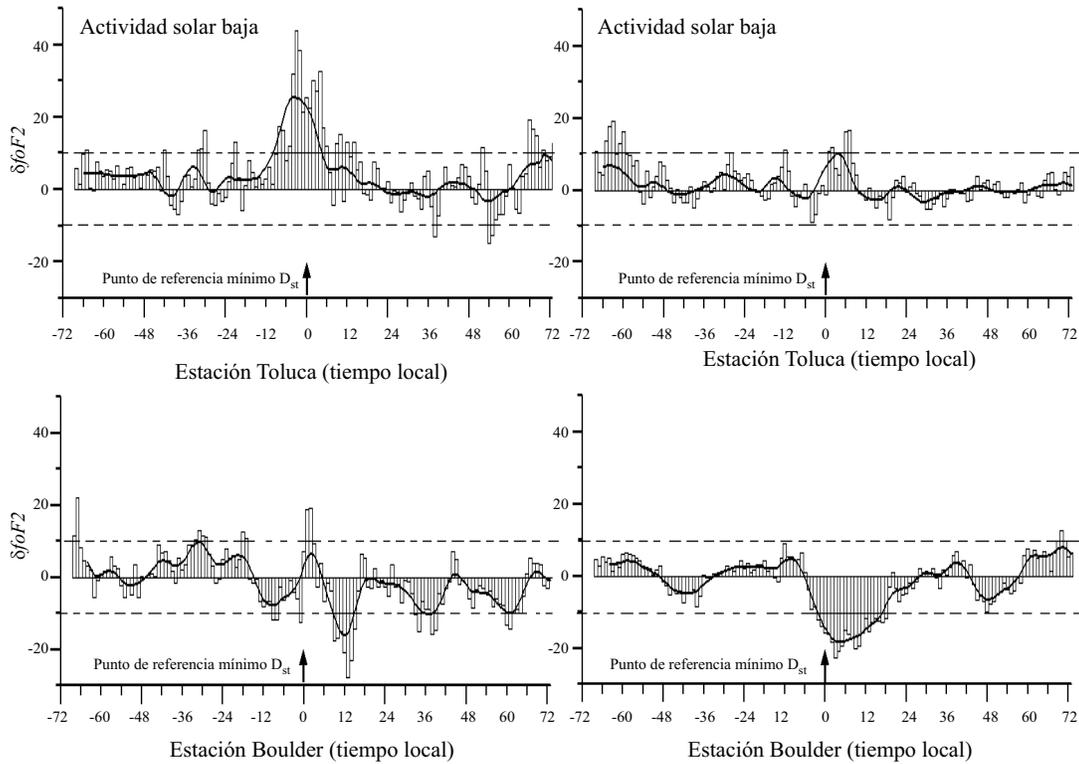


Figura 5. Promedio de la desviación de la frecuencia crítica $\delta foF2$, para años con actividad solar baja o alta, de 35 tormentas reportadas para el periodo de enero de 1972 a diciembre de 1982 por las estaciones de Toluca y Boulder. Cada barra representa el promedio de la $\delta foF2$ para cada hora y la línea continua representa una media móvil de cinco puntos para estos promedios.

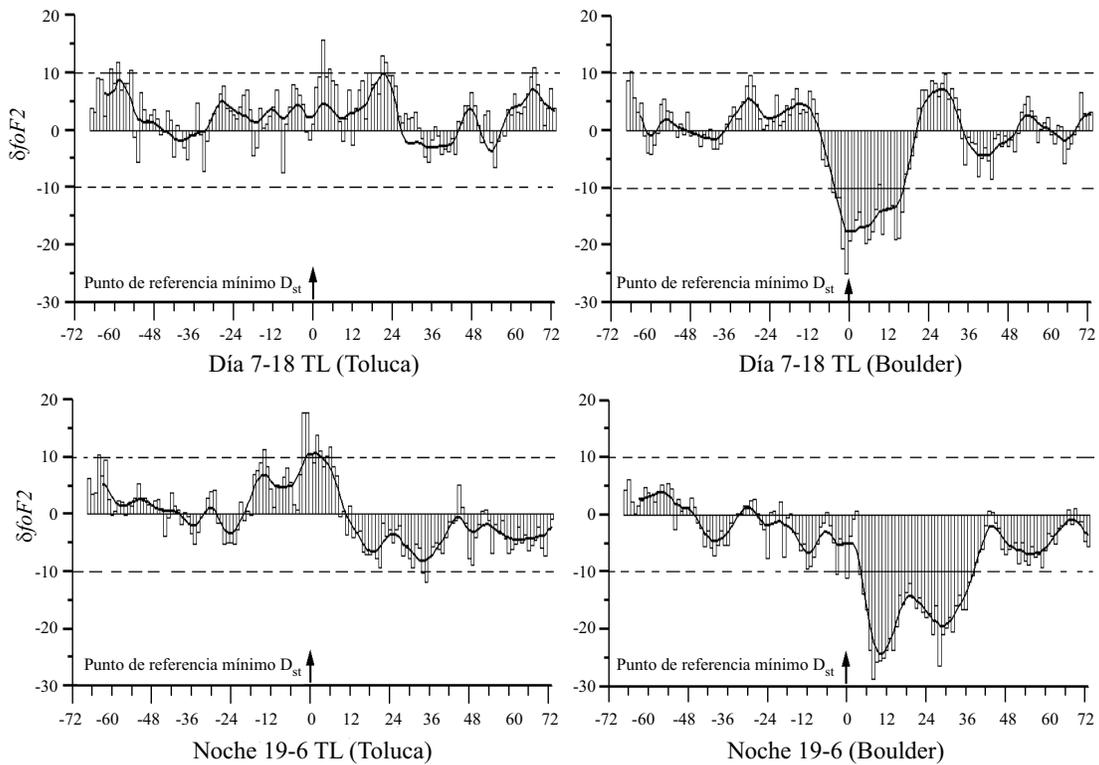


Figura 6. Promedio de la desviación de la frecuencia crítica $\delta foF2$, durante el día y la noche, de 35 tormentas reportadas para el periodo de enero de 1972 a diciembre de 1982 por las estaciones de Toluca y Boulder. Cada barra representa el promedio de la $\delta foF2$ para cada hora y la línea continua representa una media móvil de cinco puntos para estos promedios.

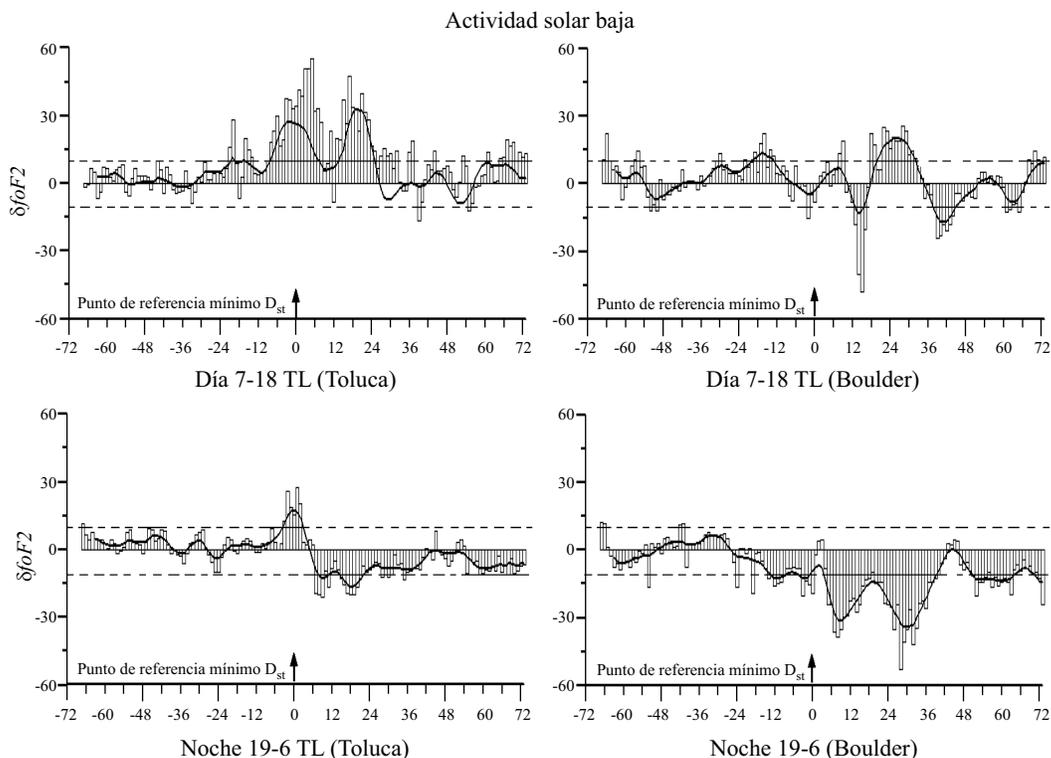


Figura 7. Promedio de la desviación de la frecuencia crítica $\delta foF2$ de tormentas en años de baja actividad solar, separadas en las que tienen mínimo Dst durante el día o la noche (estaciones de Toluca y Boulder). Cada barra representa el promedio de la $\delta foF2$ para cada hora y la línea continua representa una media móvil de cinco puntos para estos promedios.

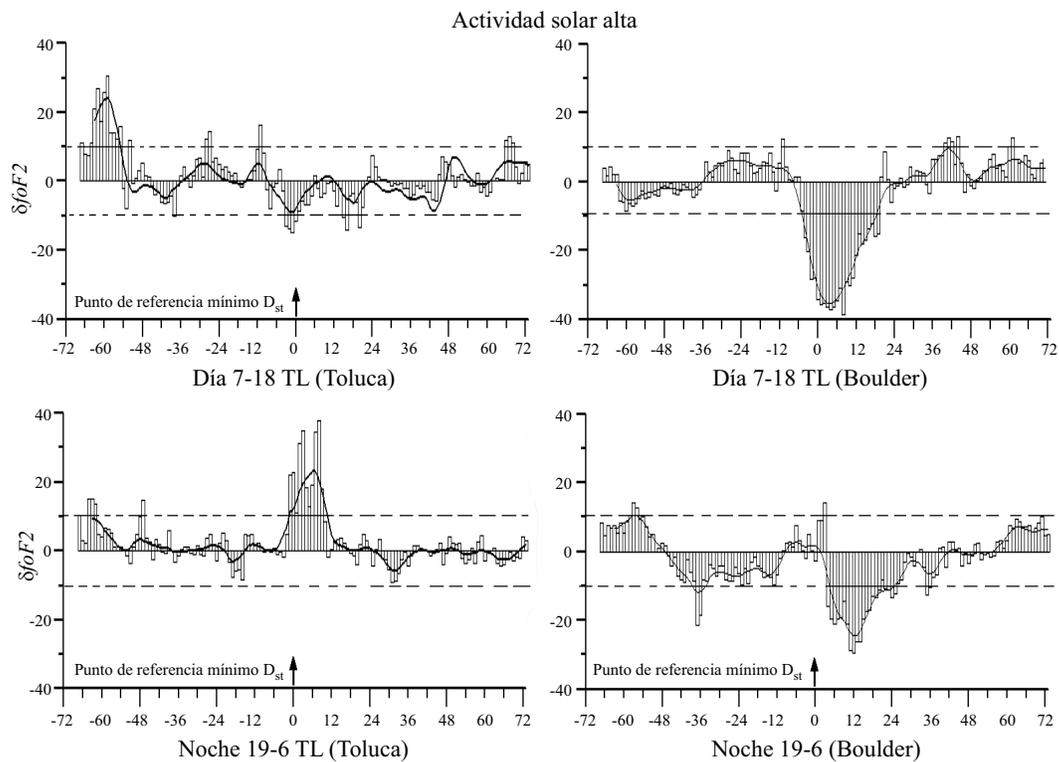


Figura 8. Promedio de la desviación de la frecuencia crítica $\delta foF2$ de las tormentas en años de alta actividad solar, separadas en las que tienen mínimo Dst durante el día o la noche (estaciones de Toluca y Boulder). Cada barra representa el promedio de la $\delta foF2$ para cada hora y la línea continua representa una media móvil de cinco puntos para estos promedios.

Durante actividad solar alta (Figura 8), para la estación de Toluca, el $|\delta foF2|$ es $\sim 10\%$ durante el día y durante la noche hay un efecto de tormenta positivo, con un máximo seis horas después del punto de referencia. En la estación de Boulder se puede observar un efecto de tormenta negativo tanto para el día como para la noche; en el día se observa que el mínimo se encuentra aproximadamente tres horas después del punto de referencia, y en la noche aproximadamente 12 horas después de este punto.

CONCLUSIONES

Se estudiaron tres eventos individuales de tormentas magnéticas con datos obtenidos en las estaciones de El Cerrillo (Toluca, México) y Boulder (Colorado, EUA), en las cuales se pueden observar tanto efectos de tormenta positiva como negativa. También, se hizo un análisis descriptivo de 35 tormentas magnéticas intensas ($Dst < -100$ nT), que han sido reportadas durante el periodo de enero de 1972 a diciembre de 1982.

En general, en la estación de Toluca se obtuvieron los siguientes resultados:

1) En promedio, las tormentas aparentemente afectan poco la ionosfera en esta zona, ya que el intervalo del $|\delta foF2|$ es $\sim 10\%$ alrededor de la mediana. Sin embargo se puede observar un efecto de fase positiva.

2) El efecto de tormenta positiva es mayor en años con actividad solar baja que en aquéllos con actividad solar alta.

3) Durante actividad solar baja, el efecto de tormenta es positivo e irregular durante el día y más pequeño durante la noche.

4) Para actividad solar alta, durante la noche hay un efecto de tormenta positivo, mientras que durante el día es pequeño y no se observa ninguna tendencia definida.

Por otra parte, los resultados para la estación de Boulder indican lo siguiente:

1) En promedio hay un claro efecto de fase negativa.

2) El efecto de tormenta negativa es mayor en años con actividad solar alta que en aquéllos con actividad solar baja.

3) En actividad solar baja, el efecto de tormenta es negativo e irregular durante la noche y más pequeño durante el día.

4) En actividad solar alta, el efecto de la tormenta es de fase negativa durante el día y la noche.

Para finalizar, queremos mencionar la importancia que tendría continuar con la construcción de una base de datos ionosféricos, ya que la ubicación geográfica de la estación El Cerrillo, en la anomalía ecuatorial, ofrece una oportunidad única para futuras investigaciones, tanto de tipo descriptivo como teórico. Además permitiría hacer más adelante un estudio estacional del efecto de tormentas magnéticas sobre la ionosfera en Toluca, así como continuar las investigaciones para conocer el efecto físico responsable de que las frecuencias críticas, $foF2$, de las tormentas magnéticas sobre la estación El Cerrillo sean pequeñas comparadas con las de otras estaciones.

REFERENCIAS

- Agopyan, H., 2002, Severe magnetic storm effects in the ionosphere over Istanbul: a case study: *Annals of geophysics*, 45(5), 621-628.
- Danilov, A., Lastovicka, J., 2001, Effects of geomagnetic on the ionosphere and atmosphere: *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*, 2(3), 209-224.
- WDC (World Data Center), 2006, Dst index (en línea): Kyoto, Japón, Kyoto University, World Data Center for Geomagnetism, Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Graduate School of Science, Geomagnetic Data Services, <<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>>, consulta: agosto 2006]
- Perrone, L., Pietrella, M., Zolesi, B., 2007, A prediction model of foF2 over periods of severe geomagnetic activity: *Advances in Space Research*, 39, 674-680.
- Pirog, O., Polekh, N., Zherebtsov, G., Smirnov, V., Shi, J., Wang, X., 2006, Seasonal variations of the ionospheric effects of geomagnetic storm at different latitudes of East Asia: *Advances in Space Research*, 37, 1075-1080.
- Prolss, G., 1995, Ionospheric F-region storms, *en* Volland, H. (ed.), *Handbook of atmospheric electrodynamics*: Boca Raton, Florida, CRS Press, v. 2., 195-284.
- Radicella, S., 2000, Space weather: La meteorología ionosférica y sus efectos: *Física de la Tierra*, 12, 189-204.
- UKSSDC (United Kingdom Solar System Data Centre) 2006, Ionospheric data [en línea]: Chilton, UK, Rutherford Appleton Laboratory, <http://www.ukssdc.ac.uk/wdcc1/iono_menu.html>, consulta: agosto, 2006.
- Tsagouri, I., Belehaki, A., Moraitis, G., Mavromichalaki, H., 2000, Positive and negative ionospheric disturbances at middle latitudes during geomagnetic storms: *Geophysical Research Letters*, 27(21), 3579-3582.

Manuscrito aceptado: Septiembre 25, 2007

Manuscrito corregido recibido: Febrero 19, 2009

Manuscrito aceptado: Noviembre 23, 2009