



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE GEOCIENCIAS
FÍSICA ESPACIAL

**EL CLIMA ESPACIAL Y SU IMPACTO SOBRE LA IONOSFERA TERRESTRE A
LATITUDES MEDIAS**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:
REBECA LÓPEZ MONTES

TUTOR:
DR. HÉCTOR ROMÁN PÉREZ ENRÍQUEZ
CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM

CO-TUTOR:
DR. EDUARDO ARAUJO-PRADERE
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

MIEMBROS COMITÉ EVALUADOR:
DR. HÉCTOR PÉREZ DE TEJADA, IGF, UNAM
DRA. BLANCA MENDOZA ORTEGA, IGF, UNAM
DR. HÉCTOR ROMÁN PÉREZ ENRÍQUEZ, CGEO, UNAM
DR. ARMANDO CARRILLO VARGAS, IGF MORELIA, UNAM
DR. ALEJANDRO LARA SANCHEZ, IGF, UNAM

MÉXICO, D. F. ENERO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE GEOCIENCIAS
FÍSICA ESPACIAL

**EL CLIMA ESPACIAL Y SU IMPACTO SOBRE LA IONOSFERA TERRESTRE A
LATITUDES MEDIAS**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:
REBECA LÓPEZ MONTES

TUTOR:
DR. HÉCTOR ROMÁN PÉREZ ENRÍQUEZ
CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM

CO-TUTOR:
DR. EDUARDO ARAUJO-PRADERE
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

MIEMBROS COMITÉ EVALUADOR:
DR. HÉCTOR PÉREZ DE TEJADA, IGF, UNAM
DRA. BLANCA MENDOZA ORTEGA, IGF, UNAM
DR. HÉCTOR ROMÁN PÉREZ ENRÍQUEZ, CGEO, UNAM
DR. ARMANDO CARRILLO VARGAS, IGF MORELIA, UNAM
DR. ALEJANDRO LARA SANCHEZ, IGF, UNAM

MÉXICO, D. F. ENERO 2015

Índice general

1. Introducción	15
1.1. Antecedentes: Estructura de la ionosfera terrestre	17
1.1.1. Capa <i>C</i>	18
1.1.2. Capa <i>D</i>	18
1.1.3. Capa <i>E</i>	18
1.1.4. Capa <i>F</i>	21
1.1.5. Aurora	21
1.1.6. Anomalía ecuatorial	21
1.2. Perturbaciones ionosféricas	22
1.2.1. Perturbaciones regulares	22
1.2.1.1. Variación Diaria	22
1.2.1.2. Variación estacional	23
1.2.1.3. Variación con el Ciclo Solar (11 años)	23
1.2.1.4. Variación con el Ciclo de Rotación del Sol (27 días)	23
1.2.2. Perturbaciones irregulares	23
1.2.2.1. Esporádica E_s	24
1.2.2.2. Perturbaciones ionosféricas súbitas	24
1.2.2.3. Tormentas ionosféricas	24
1.2.2.4. Efectos producidos desde abajo de la ionosfera	25
1.2.2.5. Alteraciones atmosféricas viajeras	25
1.3. Mecanismos de formación de una tormenta ionosférica	26
1.3.1. Circulación de gran escala	26
1.3.2. Penetración de campos eléctricos interplanetarios y sus efectos en la ionosfera	27

1.3.3. Origen de las tormentas ionosféricas positivas y/o negativas	27
1.3.3.1. Tormentas ionosféricas negativas	28
1.3.3.1.1. Cambios en la composición neutral:	29
1.3.3.2. Tormentas ionosféricas positivas de corta duración . .	30
1.3.3.3. Tormentas ionosféricas positivas de larga duración . . .	31
1.4. Hipótesis	31
1.5. Objetivo general	31
1.6. Meta específicas	31
2. Metodología	33
2.1. Cálculo del TEC	33
2.2. Exponente de Hurst	34
2.2.1. Cálculo del exponente de Hurst por ondeletas	36
2.3. Ondeletas del TEC	37
3. Resultados publicados y aceptados	39
3.1. El impacto de grandes eventos solares sobre el contenido total de elec- trones de la ionosfera a latitudes medias	39
3.2. Análisis fractal y ondeletas de perturbaciones ionosféricas a latitudes medias asociadas con tormentas geomagnéticas	53
3.3. Perturbaciones ionosféricas detectadas por MEXART	65
3.4. Perturbaciones ionosféricas y su impacto sobre IPS usando observaciones del MEXART	77
4. Discusión y Conclusiones	97
4.1. Perturbaciones ionosféricas debidas a eventos solares de alta energía . .	97
4.2. Perturbaciones ionosféricas debidas a tormentas geomagnéticas	103
4.2.1. Perturbaciones ionosféricas asociadas a la tormenta geomagnética	103
4.2.2. Perturbaciones ionosféricas que ocurren antes del inicio de la tor- menta geomagnética	105
4.2.3. Tormenta ionosférica negativa	106
4.3. Señales de IPS contaminadas por la presencia de una tormenta ionosférica	108
4.3.1. Perturbaciones ionosféricas detectadas por MEXART	108

4.3.2. Perturbaciones ionosféricas y su impacto sobre IPS
usando observaciones del MEXART 109

Índice de figuras

1.1.	Perfil ionosférico tradicional por <i>Anderson y Fuller-Rowell</i> (1999). . . .	19
1.2.	Perfil ionosférico donde se incluye a la capa <i>C</i> por <i>Davies</i> (1990). . . .	20
4.1.	Panel superior; series de tiempo de TEC durante los días 13, 14 y 15 de julio del 2000, para 6 estaciones GPS analizadas. Panel inferior; comportamiento del índice geomagnético Dst durante el mismo periodo de tiempo.	101
4.2.	Análisis de ondeletas sobre la series de tiempo de la estación Huat, periodo del 13 al 15 de julio del 2000.	102

Índice de tablas

4.1. Variación de amplitud del TEC en sigmas y la diferencia porcentual del TEC, respecto a un periodo tranquilo.	98
4.2. Eventos solares analizados	100

Agradecimientos

Muchas gracias a las siguientes personas:

A mi asesor el Dr. Román Pérez Enríquez, por aceptarme como su estudiante, por su paciencia, apoyo y por todas sus enseñanzas, tal vez no recuerde todo, pero se que me cambió y para bien. Lamento todas las canas que le salieron por mi culpa, sé que fueron muchas.

A mi familia: Loïc, mamá y hermanas, por siempre estar ahí en las buenas y en las malas, por aguantar todas mis crisis y sobrellevarlas conmigo. Los quiero.

A mi comité tutor, en especial a mi co-asesor el Dr. Eduardo Araujo-Pradere por todo su apoyo y tiempo de dedicación, aún con todas tus ocupaciones tuviste tiempo para mi, gracias Eduardo.

A mis amigos y compañeros del CGeo por acompañarme en este camino que no es fácil para nadie.

A la coordinación del posgrado: Marta, los tres responsables que me han tocado, Dr. Ramón Zuñiga, Dr. Carlos Mendoza y Dr. Mariano Cerca, porque se que han hecho todo lo que pueden por apoyarnos a todos nosotros. También a Araceli Chaman y al Dr. Tolson, por toda su ayuda en el agobiante proceso de titulación.

A mis sinodales, la Dra. Blanca Mendoza, Dr. Armando Carrillo, Dr. Alejandro Lara y Dr. Héctor Pérez de Tejada, por tomarse el tiempo de revisar mi trabajo y mejorarlo en gran medida, muchas gracias por todas sus sugerencias y observaciones, que sin duda hicieron que este trabajo sea mejor.

A CONACyT por la beca que me otorgó para realizar mi doctorado, sin ella esto no hubiera sido posible.

Y finalmente a todas aquellas personas que de una u otra forma pasaron por mi vida a lo largo de estos años y han dejado una huella en mi, muchas gracias a todos.

Resumen

El clima espacial tiene que ver con la variación diaria del plasma espacial solar, la Tierra y el espacio que la rodea. En la actualidad, una de las técnicas más utilizadas para conocer el estado del clima espacial es el cálculo del TEC ionosférico por medio del sistema GPS, ya que nos brinda una visión aproximada de lo que está ocurriendo en el medio interplanetario y la Tierra.

La ionosfera terrestre es generada por la ionización producida por la radiación solar UVE y rayos cósmicos que llegan a la parte superior de la atmósfera, por lo tanto, cualquier cambio significativo en la actividad solar, se verá reflejada en el comportamiento ionosférico. Sin embargo, a pesar de que la radiación electromagnética se intensifica durante las explosiones solares, su impacto en la variación diaria de TEC se considera de poca importancia y por lo tanto, es poco estudiado. Por otra parte, las variaciones en el TEC asociadas a tormentas geomagnéticas, son las que se consideran de mayor relevancia, por lo que son más estudiadas, pero principalmente a latitudes polares y ecuatoriales.

El propósito de este trabajo es mostrar los resultados de los análisis realizados sobre los efectos de eventos solares de alta energía y grandes tormentas geomagnéticas en la ionosfera terrestre a latitudes medias, específicamente sobre México. También, se analiza la influencia de éstos eventos sobre instrumentos en tierra, como el radiotelescopio MEXART. Se estudian los eventos solares de mayor energía y las grandes tormentas geomagnéticas que ocurrieron del año 2000 a la fecha. El análisis consiste en estudiar cambios en la amplitud de la variación de TEC calculado antes, durante y después de la ocurrencia del evento de interés. Posteriormente, medimos cambios en la rugosidad de las series de tiempo de TEC y finalizamos con un análisis de ondeletas de dichas series, para observar las periodicidades asociadas a una perturbación ionosférica.

Durante esta investigación se encontró que ráfagas intensas, pueden afectar la ionosfera de latitudes medias. De hecho, durante los eventos solares del 14 de julio de 2000 y abril de 2001, se observaron perturbaciones ionosféricas con incrementos de hasta 138 y 150 uTEC, respectivamente, debido a fotones UVE. También, durante las tormentas geomagnéticas del 7 de abril de 2000, 16 de julio 2000, 30 de octubre de 2003, noviembre 20, 2003 y el 8 de noviembre de 2004, la ionosfera presentó cambios en amplitud de TEC desde 3.29 a 8.82 sigmas. Por otro lado, durante cuatro tormentas geomagnéticas (2 de agosto de 2000, 31 de marzo 2001, 11 de abril de 2001 y 15 de mayo de 2005), se observaron tormentas ionosféricas negativas. Además, en algunos casos durante los días perturbados, la rugosidad de las series de tiempo de TEC aumentó. El análisis de ondeletas mostró una fuerte influencia de la variación diaria en los valores de TEC, además, se observan periodicidades características de las perturbaciones ionosféricas

de 1 a 8 horas. También, se encontró que las perturbaciones ionosféricas pueden contaminar las señales de instrumentos en tierra, como el radiotelescopio MEXART.

Con los resultados de esta investigación se puede concluir, que los grandes eventos solares de alta energía y las grandes tormentas geomagnéticas pueden producir perturbaciones ionosféricas importantes a latitudes medias. Además, éstas perturbaciones pueden contaminar las señales de instrumentos en tierra. De igual forma, los resultados de este trabajo demuestran que además de justificar y comprobar la importancia de realizar este tipo de estudios en México, las teorías existentes sobre el comportamiento de la ionosfera durante un evento específico, así como los mecanismos iniciadores de dicho comportamiento, no pueden explicar al 100 % los resultados de esta investigación. Por lo tanto, es necesario realizar un análisis más detallado de la ionosfera a diferentes latitudes, con el fin de intentar comprender mejor los mecanismos que producen los diferentes tipos de perturbaciones ionosféricas y así en un futuro llegar a la predicción de perturbaciones, según como se encuentre el estado del clima espacial.

Abstract

Space weather is related to the daily variations of the space solar plasma, the Earth and the surrounding space. Nowadays, one of the most common techniques to evaluate space weather state is the calculation of the ionospheric TEC by means of GPS systems, which allows having an approximated view of what is occurring in the interplanetary medium.

The Earth's ionosphere is generated by the ionization produced by the EUV solar radiation and cosmic rays which reaches the upper part of the atmosphere. Therefore, any significant change in the solar activity will be reflected in the ionosphere behavior. However, despite the fact that electromagnetic radiation becomes more intense during solar explosions, its impact on the TEC diurnal variation is considered as not relevant and therefore it is not studied. On the other hand, TEC variations related to geomagnetic storms are considered as more important, and they are thus more studied, but mainly at polar and equatorial latitudes.

The objective of this work is to show the performed analysis on high energy solar events and major geomagnetic storms, and to discuss the effects of these events on the Earth's ionosphere at mid latitudes, especially over Mexico. The impact of these events on instruments installed on Earth's surface such as the radiotelescope MEXART is also discussed. Throughout this work, we focused on solar events of major energy and on the most important geomagnetic storms which occurred from the year 2000 to date. The analysis consisted in study the changes in amplitude of the TEC variation calculated before, during and after the event in question. Then, we measured the changes in

roughness of the TEC time series and, finally, we performed a wavelet analysis of these time series in order to observe periodicities associated to the ionospheric disturbances.

During this study, we observed that intense flares can affect the ionosphere at mid-latitude. In fact, during the July 14, 2000 and April 2001 solar events we observed ionospheric disturbances with increments up to 138 and 150 TECu, respectively, due to EUV photons. Furthermore, during the geomagnetic storms which occurred on the April 7, 2000, July 16, 2000, October 30, 2003, November 20, 2003 and November 8, 2004, the ionosphere presented changes in TEC amplitudes from 3.29 to 8.82 sigmas. On the other hand, negative ionospheric storms were observed during four geomagnetic storms (August 2, 2000, March 31, 2001, April 11, 2001 and May 15, 2005). Furthermore, for some cases, the TEC time series roughness increased during the disturbed days. The wavelet analysis showed a strong influence of the diurnal variation on the TEC values. Characteristic periodicities of the ionospheric perturbations were 1 to 8 hours. We also concluded that ionospheric disturbances may contaminate the signals of instruments installed at around level Earth, such as the radiotelescope MEXART.

With the present results, it can be concluded that high energy solar events and significant geomagnetic storms can produce important ionospheric disturbances at mid latitudes. Furthermore, these disturbances can contaminate signals of instruments installed on Earth.

Similarly, the results demonstrate not only the importance of such studies in Mexico, but also that existing theories about the behavior of the ionosphere during a specific event, as well as initiating mechanisms of such behavior, can not fully explain the results of this research. Therefore, it is necessary to conduct a more detailed analysis of the ionosphere at different latitudes, in order to better understand the mechanisms producing different types of ionospheric disturbances, and so in the future being able to predict such disturbances, regarding the space weather state.

Capítulo 1

Introducción

El clima espacial tiene que ver con la variación del plasma espacial solar, la Tierra y el espacio que la rodea. Gracias al reciente progreso que se ha alcanzado en el estudio sobre tormentas solares, así como tormentas y subtormentas geomagnéticas, es posible juntar todos estos fenómenos en un mismo campo de estudio del estado del tiempo en el espacio, que se denomina así, clima espacial.

En la actualidad, una de las técnicas más utilizadas para conocer el estado del clima espacial es el cálculo del contenido total de electrones (TEC, por sus siglas en inglés) en la ionosfera por medio del sistema de posicionamiento global, GPS por sus siglas en inglés (*Sardón et al.*, 1994; *Eftaxiadis et al.*, 1999; *Arikan et al.*, 2003; *Stankov et al.*, 2003; *Blanch et al.*, 2005; *Afraimovich et al.*, 2008; *Rothkaehl et al.*, 2008; *Bishop et al.*, 2009), debido a que nos brinda una visión aproximada de lo que está ocurriendo en el medio interplanetario y la Tierra, de manera relativamente fácil y accesible económicamente. Hoy en día, en todos los países del mundo existen redes de estaciones permanentes o temporales de GPS, cuya información se encuentra a menudo disponible para el público en general, lo que para el ámbito científico constituyen bases de datos globales vitales para la investigación del clima espacial, entre otras áreas.

Para el estudio del clima espacial, la ionosfera terrestre es uno de los componentes más importantes, al ser la zona de transición entre los fenómenos que ocurren en el medio interplanetario y la parte baja de la atmósfera terrestre, lo que la convierte en uno de los escudos naturales de la Tierra; en ella se deposita gran parte de la radiación electromagnética y partículas energéticas que provienen del exterior. La ionosfera terrestre es generada principalmente por la ionización producida por la radiación solar ultravioleta que llega a la parte superior de la atmósfera (*Appleton y Barnett*, 1925; *Ratcliffe y Ashworth*, 1972; *Anderson y Fuller-Rowell*, 1999; *Tsurutani et al.*, 2009). Por lo tanto, cualquier cambio significativo en la actividad solar, se verá reflejada en

el comportamiento ionosférico regular.

A pesar del hecho de que la radiación electromagnética de alta energía, como rayos ultravioleta y los rayos X, se intensifica durante las grandes erupciones solares, su impacto en la variación diurna de TEC suele ser considerado de poca importancia y por lo tanto, es poco estudiado. Por otra parte, las variaciones en el TEC ionosférico asociadas a tormentas geomagnéticas, que se producen con la llegada de las eyecciones de masa coronal (EMC) al entorno terrestre (ver *Mendillo (1973)*, *Fuller-Rowell et al. (1994)*, *Tsurutani et al. (2004)*, *Mannucci et al. (2005)* y *Tsurutani et al. (2008)*), son las que se consideran de mayor relevancia, tanto por las grandes perturbaciones que puede producir, como por su gran tiempo de duración. Es por ello que son las más estudiadas, principalmente a latitudes polares y ecuatoriales.

Durante una tormenta geomagnéticas, los campos eléctricos magnetosféricos penetran en la ionosfera causando variaciones ionosféricas. De hecho, durante tormentas geomagnéticas intensas (asociadas con la componente sur del campo magnético interplanetario), las tormentas ionosféricas de fase positiva en el lado diurno, están asociadas con la penetración de campos eléctricos hacia el este y vientos neutrales ecuatoriales (*Lin et al., 2005*; *Lu et al., 2008*; *Tsurutani et al., 2008*; *Balan et al., 2010*) y las tormentas ionosféricas fase negativa, a cambios en la composición neutral de los vientos ecuatoriales (*Prölss, 1991, 1993a*; *Fuller-Rowell et al., 1994*). Otros mecanismos importantes en la formación de las perturbaciones ionosféricas durante una tormenta geomagnética, son la energía térmica obtenida por calentamiento Joule y el impacto de partículas aurorales que pueden crear perturbaciones polares, las cuales son modificadas en densidad, altura y latitud por condiciones atmosféricas locales, vientos termosféricos, hora local, entre otros. Además, son transportadas a gran velocidad hacia latitudes medias (*Prölss, 1991, 1993a*; *Millward et al., 1993*; *Fuller-Rowell et al., 1994*).

El propósito de este trabajo es mostrar los resultados de los análisis realizados sobre los efectos de grandes tormentas geomagnéticas y eventos solares de alta energía en el comportamiento de la ionosfera terrestre a latitudes medias, específicamente sobre México, además de analizar la influencia de estos eventos sobre instrumentos en tierra como lo es el radiotelescopio MEXART. Se estudian los eventos solares de mayor energía (clasificación en rayos X) y todas las grandes tormentas geomagnéticas ($Dst_{min} < -200nT$, tomado del Centro Mundial de Datos de Geomagnetismo, Kyoto:<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>) que se hayan producido desde el año 2000 a la fecha. Este análisis consiste en estudiar los cambios en la amplitud de la variación en las series de tiempo de TEC, calculadas con datos de estaciones GPS, antes, durante y después de la ocurrencia del evento de interés, posteriormente medimos cambios en la rugosidad de las series de tiempo de TEC por medio del índice de Hurst y finalizamos con un análisis de ondeltas de dichas series, para tratar de observar

las periodicidades asociadas a una perturbación ionosférica.

La presente tesis consta de cuatro capítulos, en el primero (introducción) se describen los conocimientos actuales sobre el clima espacial y sus efectos sobre la ionosfera terrestre, haciendo incapié en las condiciones ionosféricas normales y perturbadas conocidas, además de aquellos mecanismos motores que impulsan este comportamiento y así, contextualizar las condiciones actuales sobre el estudio del clima espacial en el mundo y más específicamente sobre México. Por lo tanto, este primer capítulo termina con el planteamiento de nuestra hipótesis, objetivo y metas específicas. En el segundo capítulo se describe la metodología con la cual se realiza el análisis de esta investigación, que consiste en el cálculo del TEC, medición de la rugosidad de las series de tiempo de TEC, por medio del exponente de Hurst y finalmente, un análisis de ondeletas. El tercer capítulo (resultados) muestra los trabajos relacionados con y publicados sobre esta investigación. Finalmente, el capítulo cuatro presenta una discusión y conclusiones sobre cada uno de los temas centrales de esta investigación acerca del efecto del clima espacial sobre la ionosfera terrestre, específicamente la influencia de eventos solares de alta energía y de tormentas geomagnéticas sobre la ionosfera y su impacto sobre dispositivos en tierra, como el MEXART, medido por cambios en el TEC.

1.1. Antecedentes: Estructura de la ionosfera terrestre

A pesar de que la ionosfera sólo contiene una pequeña fracción del material total que compone la atmósfera (1 %), es muy importante debido a la influencia que tiene sobre el paso de las ondas de radio en el medio. La mayor parte de la ionosfera es eléctricamente neutra. Sin embargo, cuando la radiación solar incide sobre los constituyentes químicos de la atmósfera, los electrones del medio son desprendidos de los átomos y las moléculas para producir el plasma ionosférico. Este proceso ocurre en el lado día de la Tierra, siendo solo la radiación solar de longitudes de onda corta (ultravioleta extremo y rayos X), las que tienen la suficiente energía para producir esta ionización. La presencia de estas partículas cargadas hacen de la atmósfera superior un conductor eléctrico que soporta grandes corrientes eléctricas y afecta a las ondas de radio.

Históricamente la ionosfera se ha dividido en tres regiones: D , E y F , refiriéndose a cada una como “capas o regiones” según el grado de ionización de cada zona. La región D abarca altitudes que van desde los 50 hasta los 90 km, la capa E varía entre los 90 y 150 km y, finalmente, la capa F se subdivide en la $F1$ y la $F2$, las cuales se ubican entre los 150 y 500 km de altitud (Figura 1.1). En todos los casos, estas alturas varían

en función de los cambios diurnos así como del comportamiento de la actividad solar (*Anderson y Fuller-Rowell, 1999*). En los últimos años se ha hablado de la existencia de una nueva capa a altitudes por debajo de la capa *D*, por lo que la llaman capa *C* (Figura 1.2). La siguiente descripción de las capas ionosféricas *D*, *E* y *F* corresponde al libro “An introduction to the ionosphere and magnetosphere” de *Ratcliffe y Ashworth (1972)*.

1.1.1. Capa *C*

La capa *C*, es la región más densa de la ionosfera y aparece sólo en el lado diurno (a veces solo un par de horas al día) a altitudes inferiores a la Capa *D*. La presencia de esta capa se atribuye a los efectos de la radiación cósmica. Algunos autores la ubican entre 60 y 70 km de altura (ver *Rasmussen et al. (1980)*) y otros por debajo de los 50 km (*Davies, 1990*). A estas alturas los átomos son más numerosos y por lo tanto, la tasa de ionización es más grande, lo que hace que la tasa de recombinación sea mayor que en otras capas, por lo que desaparece rápidamente. Según el modelo de *Rasmussen et al. (1980)* la región *C* presenta una conductividad de $1.8 \times 10^{-7} \text{S/m}$, lo que corresponde a una densidad electrónica estimada entre los 60 y 160 electrones/cm³ a una altura que va desde los 63 a los 69 km de la ionosfera durante el día.

1.1.2. Capa *D*

La ionización en esta capa se debe principalmente a la radiación *Lyman - (α)* del Hidrógeno que tiene una longitud de onda de 121.5nm, ionizando el óxido nítrico (*NO*). Además, con actividad solar alta, los rayos X de longitud de onda entre 0.2 y 0.8nm, pueden ionizar los componentes *N₂* y *O₂*. Durante la noche los rayos cósmicos producen una cantidad residual de ionización. En esta capa, la recombinación es alta, por lo que el efecto neto de ionización es bajo, así que las ondas de radio de alta frecuencia (en particular a 10 MHz y más) son absorbidas por la capa *D*. La absorción disminuye por la noche y tiene su máximo alrededor del mediodía.

1.1.3. Capa *E*

Esta región también es conocida como la capa de Kennelly-Heaviside o simplemente la capa de Heaviside. Su existencia fue predicha en 1902 de forma independiente y casi simultáneamente por Kennelly y por Heaviside. Sin embargo, no fue sino hasta 1924 que su existencia fue comprobada por Appleton. La ionización de esta capa se debe a rayos X (1-10nm) y a los rayos ultravioleta (*UV*) que ionizan principalmente al oxígeno

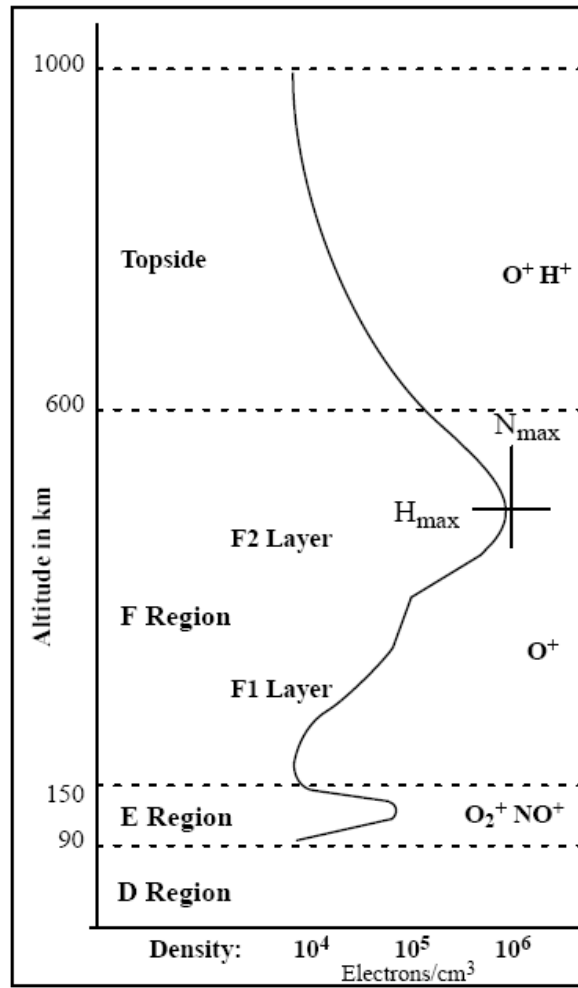


Figura 1.1: Perfil ionosférico tradicional por *Anderson y Fuller-Rowell* (1999).

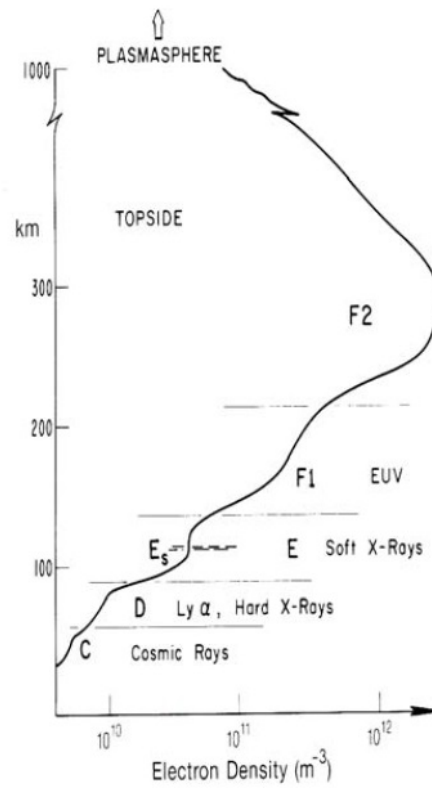


Figura 1.2: Perfil ionosférico donde se incluye a la capa *C* por *Davies* (1990).

molecular (O_2). Normalmente, en incidencia oblicua, esta capa sólo puede reflejar las ondas de radio con frecuencias inferiores a 10 MHz y puede contribuir un poco a la absorción de frecuencias superiores. Sin embargo, durante eventos solares intensos, aparece la capa E esporádica (E_s) la cual puede reflejar frecuencias de hasta 50 MHz. La estructura vertical de la capa E está determinada principalmente por los efectos de la ionización y la recombinación. Por la noche la capa E_s desaparece rápidamente, debido a que la principal fuente de ionización ya no está presente (la radiación solar).

1.1.4. Capa F

Conocida como la capa Appleton, es la capa superior de la ionosfera terrestre y su ionización es originada la radiación solar del ultravioleta extremo (UVE , 10-100nm), la cual ioniza el oxígeno atómico (O). La capa F presenta una deformación en su perfil de densidad durante el día, dando origen a las capas F_1 y F_2 . La primera se localiza a una altura de entre los 150 y los 200 km, presentando componentes ionizados de N_2 y O y la segunda, se presenta a altitudes que van desde los 200 hasta los 500 km, en donde su componente principal de ionización es el oxígeno atómico. La capa F_2 sigue siendo durante el día o la noche la capa responsable de la transmisión de ondas de alta frecuencia, facilitando las comunicaciones de radio a larga distancia.

1.1.5. Aurora

La aurora es una pantalla o cortina de luces causada por la llegada de electrones y protones que chocan con la atmósfera terrestre a alta velocidad. Estas partículas provienen de la magnetosfera y bajan con movimiento en espiral por las líneas del campo magnético de la Tierra. Cuando estas partículas golpean la atmósfera producen ionización, causando una gran variedad de luces espectaculares. El óvalo auroral se llama así debido a su forma y existe tanto en el hemisferio norte como en el sur, por encima de aproximadamente 60 grados de latitud geomagnética (ver *Combs y Viereck* (1996)).

1.1.6. Anomalía ecuatorial

En latitudes bajas, las mayores densidades electrónicas se encuentran en los picos a ambos lados del ecuador magnético, esta es una característica conocida como la anomalía ecuatorial. Las concentraciones máximas de la ionosfera no se producen en el ecuador, como debería esperarse a partir de que el máximo de la radiación solar ionizante incide en esta zona, sino que el pico del máximo esta desplazado hacia ambos

lados del ecuador. Esta particularidad se debe a la geometría del campo magnético y la presencia de campos eléctricos. Estos campos eléctricos transportan el plasma hacia latitudes mas altas, los cuales son causados por un efecto de polarización de vientos termosféricos.

1.2. Perturbaciones ionosféricas

Las perturbaciones en la ionosfera se producen por la relación de ésta con la emisión de radiación electromagnética y plasma desde el Sol y las variaciones de flujo de los mismos, lo cual está relacionado con la actividad solar, así como a los movimientos de rotación y traslación de la Tierra. De esta manera las perturbaciones de la ionosfera terrestre se pueden dividir en dos grupos principales:

1. Regulares: Son las ocasionadas por el movimiento de la Tierra y por los ciclos solares. Su aparición puede ser predicha aproximadamente.
2. Irregulares: Son el resultado del comportamiento aleatorio del Sol y por lo tanto es imposible conocer cuándo se presentará una de ellas.

En ambos casos, estas perturbaciones tienen efectos importantes sobre las morfología ionosférica y por lo tanto, en la propagación de ondas de radio.

1.2.1. Perturbaciones regulares

Estas perturbaciones pueden ser subdivididas en cuatro tipos:

1.2.1.1. Variación Diaria

Las variaciones diarias en la ionosfera son el resultado de la rotación de la Tierra alrededor de su eje. Los procesos físicos que controlan la variación diurna de la densidad electrónica cambian con la hora local y la altitud. En el amanecer, la densidad electrónica comienza a incrementarse rápidamente debido a la fotoionización y la densidad sigue aumentando a lo largo de todo el día. Posteriormente decae con el atardecer conforme la fuente de ionización desaparece. La ionización en las regiones *D* y *E* depende de la radiación solar a lo largo del ciclo solar y del ángulo cenital sobre la localización, alcanzando el máximo valor cerca del medio día cuando el ángulo cenital solar es más pequeño, y luego comienza a decrecer hasta desaparecer en la noche. La región *F1* es una capa separada sólo durante el día, ya que desaparece al atardecer dejando sólo una región *F* que se localizada a una altura mayor (*Zou et al.*, 2000).

1.2.1.2. Variación estacional

Las variaciones estacionales son el resultado de la rotación de la Tierra alrededor del Sol. Las capas D , E y $F1$ corresponden a los ángulos cenitales más grandes al Sol, por lo que la densidad de ionización de estas capas es más grande durante el verano que en invierno. Sin embargo, la capa $F2$ no sigue este patrón, su ionización es más grande en invierno y menor en verano, aun cuando el ángulo cenital al Sol es más pequeño en verano. Este fenómeno es conocido como “la anomalía estacional”, que ocurre debido a cambios en la atmósfera neutra, es decir, la circulación de la atmósfera neutra de verano a invierno resulta en un incremento del cociente $O/N2$ en el hemisferio de invierno y un decrecimiento en el hemisferio de verano. El incremento de la densidad de O y el decrecimiento de la densidad de $N2$ en invierno hace que se incremente el $O+$, por lo que la densidad de $O+$ en invierno es mayor que en verano en la capa F (Zou et al., 2000).

1.2.1.3. Variación con el Ciclo Solar (11 años)

Uno de los fenómenos más notables sobre la superficie del Sol es la aparición y desaparición de las manchas solares. Esto provoca que la radiación solar cambie a lo largo del ciclo solar, lo que induce cambios en el nivel de ionización de la ionosfera. Durante los períodos de máxima actividad solar, la densidad de ionización de todas las capas aumenta considerablemente.

1.2.1.4. Variación con el Ciclo de Rotación del Sol (27 días)

El sol tiene un periodo de rotación aproximado de 27 días, por lo que las manchas solares son visibles en la superficie en la mitad de tiempo de éste intervalo. Por lo tanto, el ciclo de rotación del sol de 27 días causa variaciones en la densidad de ionización de todas las capas de la ionosfera, siendo mayores en la capa $F2$.

1.2.2. Perturbaciones irregulares

Las variaciones irregulares tienen un importante efecto sobre la propagación de ondas de radio, debido a que estas variaciones, como su nombre lo indica, son impredecibles, pudiendo afectar drásticamente la capacidad de comunicación sin ninguna advertencia. Las perturbaciones irregulares más comunes son:

1.2.2.1. Esporádica E_s

Consiste en un aumento muy marcado, pero irregular y rápidamente variable de la densidad de electrones en la región E . Cuando se presenta el fenómeno esporádico E_s , es posible la recepción de ondas de mayor frecuencia que normalmente no son percibidas (50 MHz) en esta capa y puede ocurrir durante el día y la noche, variando considerablemente con la latitud. La E_s está asociada con tormentas, meteoritos, actividad solar y actividad geomagnética.

1.2.2.2. Perturbaciones ionosféricas súbitas

Estas perturbaciones pueden ocurrir sin previo aviso y pueden prevalecer por diferentes intervalos de tiempo, desde unos cuantos minutos hasta varias horas. Cuando las perturbaciones ionosféricas súbitas ocurren, se caracterizan por un marcado decremento en las radiocomunicaciones de onda corta. Este decremento es debido al aumento de la densidad electrónica en la capa D y en la parte más baja de la capa E . Como resultado de este fenómeno, las ondas de radio de alta frecuencia que normalmente pasarían a través de la capa D y se reflejarían en los niveles más altos, son absorbidas. Por lo tanto, las comunicaciones por radio a larga distancia, que dependen de la reflexión en la ionosfera, quedan interrumpidas súbitamente durante periodos de tiempo que van de 15 minutos a una hora.

1.2.2.3. Tormentas ionosféricas

Las tormentas ionosféricas son variaciones en la densidad electrónica de la ionosfera y están relacionadas con tormentas geomagnéticas, las cuales resultan de una compresión de la magnetosfera debida a una perturbación en el viento solar. Las tormentas ionosféricas están asociadas con las erupciones solares y el ciclo de rotación de 27 días del Sol. Estas perturbaciones se caracterizan por una ionización más gradual y por una mayor duración que las perturbaciones súbitas. En éstas, las frecuencias críticas son más bajas que las normales, particularmente para la capa F_2 , ya que las tormentas ionosféricas afectan esta región reduciendo su concentración de iones. Por otro lado, las regiones ionosféricas más bajas no son afectadas apreciablemente por las tormentas, a menos que la perturbación sea muy grande. Un efecto práctico de las tormentas ionosféricas es que el rango de frecuencias que pueden ser utilizadas es mucho más reducido que el normal.

1.2.2.4. Efectos producidos desde abajo de la ionosfera

Existen fenómenos que ocurren en la atmósfera que pueden producir cambios en la concentración electrónica de la ionosfera como lo son las mareas y ondas de gravedad, las cuales juegan un papel importante en la dinámica de la termosfera, particularmente entre los 100 y 250 km de altitud. Dichas ondas son generadas *insitu* por calentamiento solar *UV* y *UVE*, procesos aurorales que varían temporalmente como precipitación de partículas, corrientes eléctricas, rayos, sprites, convección del plasma, etc. Las mareas y las ondas de gravedad también pueden ser generadas en la baja atmósfera y propagarse hacia alturas ionosféricas. Las mareas atmosféricas son oscilaciones de escala global producidas principalmente por el calentamiento asociado con la absorción de la radiación solar por vapor de agua en la troposfera, por ozono en la estratosfera y por el oxígeno molecular en la baja termosfera. Finalmente, las ondas de gravedad internas son perturbaciones que se propagan por fuerzas de flotación en la atmósfera; la temperatura y el viento determinan las características de propagación de estas ondas. Algunas fuentes de variación estacional y latitudinal de las ondas de gravedad son los ciclones, movimientos turbulentos a diferentes escalas y tormentas (*Taylor y Nagy, 2000*).

1.2.2.5. Alteraciones atmosféricas viajeras

Las alteraciones atmosféricas viajeras (TADs, por sus siglas en inglés) se originan durante una subtormenta, cuando la energía disipada se deposita parcialmente en la magnetosfera interior, creándose un cinturón de corriente. Otra parte de esta energía es depositada en la ionosfera auroral en forma de energía calorífica obtenida por calentamiento Joule originado por el impacto de partículas aurorales. Los TADs se propagan a altas velocidades de latitudes polares a latitudes ecuatoriales (*Fuller-Rowell et al., 1994*), en donde todos los elementos presentan un incremento de densidad, debido a la expansión térmica de la atmósfera que provoca que el aire más denso sea trasladado a mayores alturas (*Burrage et al., 1992*). Por esto, a los TADs provenientes de ambas regiones polares, se les atribuye la perturbación de densidad inicial en latitudes ecuatoriales, ya que causan un trasiente comprensivo y calentamiento de la atmósfera a bajas latitudes.

1.3. Mecanismos de formación de una tormenta ionosférica

La ionosfera es muy variable debido a cambios en las fuentes de ionización y porque además responde a los cambios que ocurren en la atmósfera neutra superior en la que está incrustada (termosfera). El mecanismo de perturbación más corto en escalas de tiempo, es al aumento del flujo de radiación de alta energía cuando se produce una ráfaga solar, lo que aumenta la ionización de las capas *D* y *E* (*Thome y Wagner, 1971; Prölss, 2004*).

Otro mecanismo de variaciones ionosféricas es debido a la presencia de una tormenta geomagnética, la cual causa la aparición de grandes tormentas ionosféricas y como consecuencia fenómenos como la ionización auroral son mucho más intensos y variables, llegando a expandirse a latitudes más bajas. Esto puede llevar a casos extremos como el avistamiento de auroras hasta el sur de México (*Anderson y Fuller-Rowell, 1999*). Durante una tormenta geomagnética, la energía que entra a latitudes altas produce ondas y cambios en los vientos y composición de la termosfera, lo que produce tanto aumentos (“fases positivas”) como disminuciones (“fases negativas”) en la concentración de electrones de la ionosfera.

Otra fuente principal de variabilidad en la ionosfera proviene de las partículas cargadas que interactúan con la atmósfera neutra de la termosfera (*Cohen, 1976*), ya que la ionosfera responde a los vientos termosféricos que pueden empujarla hacia una altura diferente, a lo largo de las líneas de campo magnético inclinadas. Además, la ionosfera también responde a la composición de la termosfera, que afecta directamente la tasa de recombinación de los iones y electrones.

1.3.1. Circulación de gran escala

Después de iniciada la subtormenta, la actividad puede continuar como ocurre durante una tormenta geomagnética, por lo tanto, la prolongada inyección de energía provoca cambios en los vientos de gran escala. Por ejemplo, durante horas diurnas, el área de presión alta que se crea en los polos, frena los vientos dirigidos hacia esta región, lo que disminuye la transferencia de energía hacia esta zona, provocando un incremento de temperatura en latitudes medias y bajas (*Burns et al., 1992*). Durante el lado noche, la misma zona de presión alta refuerza los vientos regulares dirigidos hacia el ecuador y estos vientos arrastran la masa de aire de composición alterada desde los polos hacia latitudes medias, generando una zona extendida de perturbación. Ya generada esta perturbación en latitudes medias, comienza a ser desplazada por los vientos al

mismo tiempo que corrota la Tierra (*Fuller-Rowell et al.*, 1994). Así, las perturbaciones surgen en el lado diurno (*Prölss*, 1991).

1.3.2. Penetración de campos eléctricos interplanetarios y sus efectos en la ionosfera

Con la llegada de una EMC a las inmediaciones de la Tierra, acompañada de un campo magnético interplanetario con dirección sur, se crean tormentas geomagnéticas a través de una reconexión magnética (*Gonzalez et al.*, 1994), afectando los procesos debidos al mediodía y medianoche local en la ionosfera ecuatorial. La convección del viento solar con un campo magnético hacia el sur, más allá de la magnetosfera, representa un movimiento del campo eléctrico interplanetario del lado noche hacia el amanecer, y si una parte de este campo eléctrico entra en el sistema magnetosfera/ionosfera (a través de la reconexión magnética u otros procesos), el campo eléctrico elevará la ionosfera ecuatorial en el lado diurno y la suprimirá en el lado noche. En el ecuador del mediodía, la ionosfera se elevará a mayor altura, donde los tiempos de recombinación son más prolongados. Por lo tanto, la fotoionización solar crea una nueva ionosfera a altitudes más bajas, aumentando los valores de TEC de la ionosfera. A esto último se le llama una tormenta ionosférica positiva (*Tsurutani et al.*, 2004, 2008; *Mannucci et al.*, 2005; *Manucci et al.*, 2008). Durante la noche, el campo eléctrico convectivo **EXB** de la ionosfera a altitudes más bajas, donde la recombinación química se lleva a cabo, reducirá el TEC de la ionosfera; A esto se le llama tormenta ionosférica negativa.

1.3.3. Origen de las tormentas ionosféricas positivas y/o negativas

Para la atmósfera superior las partículas cargadas son sólo constituyentes secundarios y están dentro de un ambiente neutro. Sin embargo, cualquier perturbación de la atmósfera neutra se transmitirá inmediatamente a la ionosfera, por lo que se debe observar una gama de efectos sobre diferentes parámetros y regiones de la ionosfera. En condiciones perturbadas, la densidad de ionización puede aumentar o disminuir, y es lo que se conoce como tormentas ionosféricas positivas o negativas, lo cual se puede observar claramente en el cálculo del TEC, como lo muestran las observaciones de *Mendillo y Klobuchar* (1975); *Blanch et al.* (2005), en donde concluyen que las diferencias observadas no pueden ser sólo atribuidas a simples diferencias de altura.

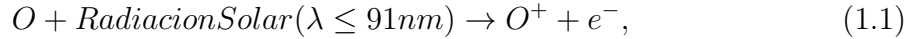
A continuación se describe una ionosfera perturbada, basada en una relación entre los efectos termosféricos y los debidos a las tormentas ionosféricas. En este modelo

los efectos positivos, durante el lado día, son atribuidos a los TADs y a cambios en la circulación a gran escala. Los efectos negativos, son atribuidos a alteraciones de la composición del gas neutral.

1.3.3.1. Tormentas ionosféricas negativas

Durante condiciones magneto-tranquilas, la energía suministrada por el viento solar puede ser suficientemente grande como para generar una zona permanentemente perturbada. Esta zona se caracteriza por un incremento en la concentración de gases pesados y una disminución en los ligeros. Bajo condiciones perturbadas, estas alteraciones se extienden hasta latitudes medias.

Cuando existe una zona de perturbación que se extiende de latitudes altas a medias, se puede observar un incremento de la densidad del nitrógeno molecular y una disminución del oxígeno atómico, siendo ambos muy importantes para la ionosfera. Ahora bien, considerando que la producción de ionización en la capa F se basa en la fotoionización del O:



se puede suponer que en esta región la atmósfera es ópticamente delgada, por lo que la razón de producción es directamente proporcional a la densidad del oxígeno atómico [O]:

$$q = Jo[O], \quad (1.2)$$

donde Jo es la frecuencia de ionización de este constituyente. lo que significa que una disminución en la densidad del oxígeno atómico implicará directamente una disminución en la razón de producción de ionización. Considerando ahora la pérdida de ionización, en la región F , este proceso se debe fundamentalmente a las reacciones de transferencia de cargas tipo:



que respectivamente tienen asociadas constantes de razón de reacción (k_1 y K_2). Los iones moleculares restantes (O_2^+ y NO^+) son rápidamente destruidos por recombinación disociativa. Sin embargo, la razón de pérdida se reduce a:

$$I(N) = \beta[O^+] \quad (1.5)$$

donde $\beta = k_1[N_2]$ y $K_2[O_2]$, representa la densidad de los gases moleculares N_2 y O_2 , respectivamente. Esto indica que un aumento en la densidad de los gases implicará un incremento de la razón de pérdida de la ionización. De lo anterior se puede decir que la combinación de disminución de densidad del oxígeno atómico y del incremento de densidad del nitrógeno molecular, ocurrirá una reducción de densidad de ionización a la altura de la región F y cualquier método de observación podría percatarse de los efectos de una tormenta ionosférica negativa. Además, se pueden derivar pruebas adicionales sobre la estrecha vinculación entre los cambios de composición de la atmósfera neutra y las tormentas ionosféricas negativas a partir del hecho de que ambos fenómenos presentan el mismo tipo de variaciones regulares que incluyen cambios en la densidad de perturbación, el tiempo local, así como la estación del año (*Prölss*, 1980).

1.3.3.1.1. Cambios en la composición neutral: La ocurrencia de una tormenta ionosférica negativa puede ser explicada por el modelo teórico de acoplamiento termosfera-ionosfera, desarrollado por *Prölss* (1993a) y extendido por *Fuller-Rowell et al.* (1996), donde proponen que la fase negativa de la tormenta ionosférica se desarrolla en regiones con cambios en la composición neutral. Estas zonas, llamadas bolsas de composición, surgen en latitudes aurorales y a una altura aproximada de 100 km, como resultado del calentamiento del aire neutral debido a la transferencia de energía magnetosférica (principalmente por calentamiento Joule). En consecuencia, el aire neutro asciende hasta regiones ionosféricas alterando la composición y por consiguiente los procesos de producción y pérdida. Posteriormente, estas bolsas son trasladadas por los vientos nocturnos dirigidos hacia la zona ecuatorial y llevadas al lado diurno por la rotación terrestre. Además, por medio de un modelo empírico *Araujo-Pradere et al.* (2002a); *Araujo-Pradere y Fuller-Rowell* (2002); *Araujo-Pradere et al.* (2005) proponen una dependencia estacional y latitudinal durante una tormenta geomagnética de la región ionosférica F , en donde debido a la circulación verano-invierno de los vientos, se transporta el gas rico en moléculas a latitudes medias y bajas del hemisferio de verano, durante los primeros dos días de la tormenta, mientras que en el hemisferio invierno los vientos dirigidos hacia el ecuador obstaculizan el movimiento de esta bolsa de composición. Por lo tanto, la alteración en composición para verano provoca una disminución en la concentración de la región F a latitudes medias, produciéndose una fase negativa ionosférica, mientras que en zonas de latitudes medias invernales se observa una fase positiva debida a la disminución de especies moleculares.

1.3.3.2. Tormentas ionosféricas positivas de corta duración

La idea de que los efectos de las tormentas positivas pueden deberse al transporte de ionización cuenta con el apoyo de múltiples observaciones, las que muestran que en respuesta a un incremento súbito de inyección de energía en latitudes polares (medido por índices geomagnéticos), se desarrolla una bien definida tormenta ionosférica positiva en latitudes medias. En respuesta de este incremento de energía, tiene lugar una elevación repentina del máximo de concentración de la capa $F2$ ($\Delta h(N_{max})$) y posteriormente un incremento en la densidad de ionización.

Deducir que un incremento en la altura de la capa conlleva una tormenta positiva es fácilmente aceptado si se tiene en cuenta la dependencia de la producción de ionización y de la razón de pérdida con la altura. De acuerdo con la ecuación 1.5, la razón de pérdida de ionización cerca del máximo de concentración de la ionosfera es controlada por las densidades del nitrógeno y del oxígeno moleculares (*Rishbeth y Garriot, 1969*), las que decrecen más rápido con el incremento de altura que la razón de producción, la cual es proporcional a la densidad del oxígeno atómico (ecuación 1.2). Por lo tanto, un desplazamiento hacia arriba de la capa F provocará un incremento final de la densidad de ionización.

El movimiento de la región F hacia arriba puede ser causado tanto por los campos eléctricos como por los vientos termosféricos. El primero, es discutido por *Mendillo et al. (1992)* y *Pi et al. (1993)*, donde su argumento fundamental es que las perturbaciones ionosféricas están estrechamente asociadas con el aumento o disminución de la actividad de las subtormentas y además, que los cambios observados ocurren casi simultáneamente en todas latitudes. Esto último a sido debatido por *Prölss (1993b)*, quien argumenta que las perturbaciones ionosféricas frecuentemente están desfasadas con respecto a la actividad de subtormenta y que este desfase aumenta con el decremento en la latitud (*Prölss, 1995*).

Con respecto a los vientos termosféricos, durante una subtormenta geomagnética una cantidad importante de energía es inyectada en la atmósfera polar, lo que da lugar al surgimiento de los TADs, es decir, perturbaciones atmosféricas tipo pulso que están conformadas por la superposición de ondas gravitatorias que se propagan a alta velocidad ($\approx 600 \text{ m s}^{-1}$) hacia el ecuador arrastrando vientos de magnitud moderada ($\approx 150 \text{ m s}^{-1}$). En latitudes medias estos vientos provocarán una elevación de la capa $F2$ y por consiguiente, un incremento de la densidad de ionización (*Millward et al., 1993*). Esto sólo ocurre en el lado diurno, ya que durante la noche, la falta de producción de ionización impedirá la formación de grandes efectos de tormentas positivas.

1.3.3.3. Tormentas ionosféricas positivas de larga duración

Se les conoce como tormentas ionosféricas positivas de larga duración a aquellas que pueden durar varias horas y que son precedidas por una elevación de la capa F . Estos desplazamientos hacia arriba son también atribuidos a los vientos meridionales. Así que mientras es poco probable que la magnetosfera pueda mantener un campo eléctrico de gran escala que se extienda a bajas latitudes y con una duración de varias horas, se prevé una inyección continua de energía a altas latitudes que provoque cambios en el patrón global de circulación. Para eso es suficiente que la zona de presión alta polar reduzca la intensidad de los vientos diurnos dirigidos hacia los polos, permitiendo un crecimiento más regular de la densidad de ionización.

1.4. Hipótesis

Los eventos solares de alta energía y las grandes tormentas geomagnéticas pueden causar perturbaciones ionosféricas importantes a latitudes medias, específicamente sobre México.

1.5. Objetivo general

Cálculo del contenido total de electrones (TEC) en la ionosfera y el tiempo de respuesta de ésta, para estudiar el impacto sobre la Tierra de eventos solares de alta energía y grandes tormentas geomagnéticas.

1.6. Meta específicas

1. Localizar eventos intensos de origen interno y externo a la Tierra que puedan generar impacto sobre la ionosfera.
2. Analizar el impacto sobre la ionosfera terrestre de eventos específicos, utilizando el cálculo del contenido total de electrones (TEC), a partir de datos de GPS.
3. Buscar señales características de la influencia de los eventos sobre las series de tiempo de TEC por medio de análisis fractal y ondeletas.
4. Realizar comparaciones del TEC en la ionosfera con el centelleo interplanetario (IPS) durante eventos de eyección de masa coronal (EMC) de gran escala, observadas con datos del radiotelescopio MEXART.

Capítulo 2

Metodología

En esta tesis se analiza la influencia de eventos terrestres y externos, como son grandes tormentas geomagnéticas, ráfagas solares, y EMC, sobre la ionosfera a latitudes medias. Para llevar a cabo este análisis se calculó TEC (*Araujo-Pradere, 2005*) antes, durante y después de la ocurrencia de dichos eventos. Además, por medio del programa Benoit 1.3 (*TruSoft, 1999*) se calcularon exponentes de Hurst sobre las series de tiempo de TEC, en intervalos de 256 valores, con una superposición de 12 horas, para medir cambios en la rugosidad de las series de tiempo. Finalmente, se realiza un análisis de ondeletas sobre las series de tiempo de TEC en la que se ha eliminado la tendencia para eliminar la variación diurna y así, por medio del espectro obtenido, observar las periodicidades asociadas a las perturbaciones ionosféricas analizadas.

2.1. Cálculo del TEC

El sistema GPS es un sistema de frecuencia dual, lo que le permite ser un medio para verificar el efecto de la ionosfera en las señales del mismo sistema. De esta manera se puede medir el grado de ionización a lo largo de la línea de visión del satélite al receptor GPS. Al operar en dos frecuencias al mismo tiempo ($L1$ y $L2$), es posible medir el retraso de fase relativo entre las dos señales, con lo que se determina el TEC (*Eftaxiadis et al., 1999*).

Básicamente el TEC se obtiene por medio de la medida de los códigos de pseudorange o por las mediciones de fase de la señal del GPS. La ecuación para determinar el TEC por medio de los pseudoranges observados es:

$$TEC_R = 9.52 (R_2 - R_1), \quad (2.1)$$

donde 9.52 es la refracción ionosférica y R_1 y R_2 son los pseudorángos observados de $L1$ y $L2$, respectivamente. Esta ecuación es inambigua pero con ruido, es decir, los códigos de pseudorango son inambiguos ya que su medida es básicamente la distancia entre el satélite y el receptor, sin embargo, son afectados por diferentes fuentes como efectos multitrayectos, condiciones ionosféricas y troposféricas locales, efectos relativistas, etc., por lo que presentan un nivel de ruido significativo (*Sardón y Zarraoa, 1997*).

Por otro lado, la ecuación para determinar el TEC por medio de la fase de la señal observada es:

$$TEC_{\Phi} = 9.52 (\lambda_1 \Phi_1 - \lambda_2 \Phi_2), \quad (2.2)$$

donde λ_1 y λ_2 son la longitud de onda de $L1$ y $L2$, respectivamente y Φ_1 y Φ_2 , son la fase de la señal de $L1$ y $L2$. Esta ecuación es precisa pero con ambigüedades, es decir, la fase es ambigua debido al hecho de que el número inicial de ciclos entre el satélite y el receptor es desconocido, pero tiene 100 veces menos ruido que los pseudorángos observados (*Larson y Levine, 1999*).

Según *Eftaxiadis et al. (1999)* el cálculo del TEC por medio de la fase nos provee de una excelente determinación de la variación del contenido de electrones como función del tiempo y el cálculo por medio de los pseudorángos nos da valores absolutos.

Para mitigar los efectos negativos de ambas ecuaciones y aumentar la precisión en el cálculo del TEC, se incorporan ambas ecuaciones, la muy precisa pero ambigua (ecuación 2.2), y la inambigua pero menos precisa (ecuación 2.1), para obtener una nueva observación de la ionosfera por medio del cálculo de electrones, el TEC combinado (TEC_{comb} , se llama combinado debido al hecho de que ambos parámetros, seudodistancia y fase, se utilizan en su derivación), el cual se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$TEC_{comb_i} = TEC_{\Phi_i} - \left(\frac{\sum_{j=i-n}^{i+n} (j \neq 1) p_j (TEC_{\Phi_j} - TEC_{R_j})}{\sum_{j=i-n}^{i+n} (j \neq 1) p_j} \right), \quad (2.3)$$

en donde 1 unidad de TEC (uTEC) es igual a $10^{16} m^{-2}$ electrones. A partir de éste método, se ha demostrado que los resultados obtenidos en el cálculo del TEC tienen una precisión de 2 uTEC (*Araujo-Pradere et al., 2007; Minter et al., 2007*).

2.2. Exponente de Hurst

La dimensión de un objeto es la medida topológica del tamaño de sus atributos. En términos generales, son las coordenadas que permiten especificar un punto sobre el objeto embebido en el espacio común; por ejemplo, un rectángulo es bidimensional

mientras que un cubo es tridimensional (*Weisstein*, 2008). El concepto de dimensión es aplicable a cantidades derivadas, tales como altura, ancho, profundidad, longitud de onda, radio y distancia, las cuales tienen dimensión de longitud, es decir, todas las cantidades que se derivan de la misma base se definen de la misma forma (*Emerson*, 2005).

La dimensión fractal (Dimensión D) es la medida numérica de la rugosidad de un objeto (*Salmasi y Modarres-Hashemi*, 2009), es decir, la dimensión fractal es una medida útil que proporciona información sobre la geometría del conjunto, así como de los procesos que ocurren en los sistemas complejos dentro del espacio en el cual está embebido. La medida de la dimensión fractal no necesariamente tiene que ser entera; de hecho, según Mandelbrot, puede ser un número no mayor que la dimensión del espacio euclidiano E , pero sí estrictamente mayor que la dimensión topológica T (*Fujii-Oleschko*, 2007).

El origen del concepto de “exponente de Hurst” se encuentra en los trabajos de Harold Edwin Hurst, de 1907. En este trabajo estudió el comportamiento aleatorio del agua en presas y su afluencia, por medio del análisis de la distribución de precipitaciones utilizando datos que habían sido registrados durante mil años (*Tapiero y Vallois*, 1996). En el transcurso de esta investigación Hurst desarrolló un nuevo método estadístico para calcular el exponente H al cual llamó Análisis de Rango Re-escalado (R/S o Re-scaled Range analysis).

La extracción del Exponente de Hurst (H), a partir de las series de tiempo se basa en la conjetura de Hardy (1916), donde es una medida insesgada de la rugosidad de las imágenes, series de tiempo y bases de datos, donde se relaciona H con la dimensión fractal (D) por:

$$H = 2 - D, \quad (2.4)$$

donde D es la dimensión fractal, 2 es la dimensión del espacio euclidiano dentro del cual está embebido el fractal, y H es el exponente de Hurst.

La apariencia de rugosidad de una superficie depende en gran medida del valor de su exponente de Hurst y es por eso que H es considerada como una herramienta eficiente para expresar la rugosidad de sistemas complejos en términos cuantitativos, adimensionales y normalizados. Para un rango de valores: $0 < H < 0.5$ el comportamiento del sistema es anti-persistente (correlaciones negativas a largo plazo), de $0.5 < H < 1$ es persistente (correlaciones positivas a largo plazo) y si $H = 0.5$ el exponente describe ruido blanco (movimiento Browniano). En otras palabras, cuando los valores de H tienden a cero, la rugosidad de la serie de tiempo crece (*Mandelbrot*, 1986).

El exponente de Hurst se calculó, por medio del método de ondeletas del programa

Benoit 1.3 (*TruSoft*, 1999), ya que dicho método resulto muy útil para el análisis de series de tiempo de TEC.

2.2.1. Cálculo del exponente de Hurst por ondeletas

La transformada de ondeleta tiene un carácter fractal y es especialmente útil cuando se aplica a series de tiempo multiescalares no periódicas y no estacionarias (*Malamud y Turcote*, 1999).

La ondeleta provee información tanto en el espacio como en la frecuencia sobre una serie de tiempo (*Malamud y Turcote*, 1999). La idea básica que respalda la transformada de ondeleta es la transferencia de un análisis de frecuencia compleja a un análisis escalar simple (*Jian et al.*, 2006). Algunos métodos usan la transformada de ondeleta discreta y otros están basados en la transformada de ondeleta continua (*Lopes y Betrouni*, 2009). La ondeleta opera mediante la generación de una serie de coeficientes que trazan los detalles de las características importantes, tanto a escalas pequeñas como grandes (*Jones y Jelinek*, 2001).

Una ondeleta es una forma ondulada que tiene un soporte compacto, tanto en el espacio como en la frecuencia y cuya integral espacial es igual a cero. En el análisis de ondeletas, la señal se divide en la versión re-escalada y la que se cambia con respecto de la onda original recibe el nombre de ondeleta madre.

Por definición la ondeleta es una función utilizada para localizar una determinada función en el espacio y describir su escalado (*Weisstein*, 2008). Una familia de ondeletas puede construirse a partir de la función $\psi(x)$ (ondeleta madre), que se limita a un intervalo finito. La ondeleta hija $\psi^{a,b}(x)$ es entonces formada por los procesos de traslación b y contracción a . Una transformada de ondeleta individual se define como (*Weisstein*, 2008):

$$\psi^{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \psi \left(\frac{x-b}{a} \right) dt \quad (2.5)$$

Entonces

$$W_\psi(f(a,b)) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2.6)$$

La técnica de ondeletas es una herramienta útil para determinar tanto la tendencia de la variabilidad dominante, como su variación en el tiempo. Este método es apropiado para análisis de series de tiempo no estacionarias.

En el programa Benoit 1.3 este método se describe a partir de considerar n transformadas de ondeleta, cada una con diferente coeficiente de escala a_i , donde S_1, S_2, \dots, S_n

son las desviaciones estándar de cero para los respectivos coeficientes de escala a_i . El radio de las desviaciones estándar se define como G_1, G_2, \dots, G_{n-1} , donde $G_1 = S_1/S_2, G_2 = S_2/S_3, \dots, G_{n-1} = S_{n-1}/S_n$ y se estima el valor promedio de G_i como:

$$G_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} G_i}{n-1} \quad (2.7)$$

El exponente de Hurst es $H = f(G_{avg})$, donde f es una función heurística que se aproxima a H a través de G_{avg} para las trazas estocásticas auto-afines (*Torres-Argüelles*, 2010).

2.3. Ondeletas del TEC

Una transformada ondeleta puede asignar la potencia de una frecuencia particular en tiempos diferentes, dando una expansión de la señal en tiempo y frecuencia. Por otra parte, la transformada ondeleta no sólo nos dice que pueden existir frecuencias en la señal, sino que también nos permite ver si una determinada escala varía con el tiempo.

Para ver el comportamiento de las irregularidades de TEC asociadas con un evento solar y/o tormentas geomagnéticas, se grafica primero la serie de tiempo de TEC, se elimina la variación diurna quitando la tendencia de la serie de tiempo y se obtiene el espectro de potencias de las series de tiempo sin tendencia. El análisis de ondeletas utilizado en este trabajo se basa principalmente en el software “wavelet” proporcionada por C. Torrence y G. Compo (Wavelet Software: <http://atoc.colorado.edu/research/wavelets/>), el cual fue programado en MatLab. Los gráficos muestran cuatro paneles (a, b, c y d), donde el panel a) se subdivide en dos, superior e inferior, el panel superior muestra la series de tiempo de TEC original y en el panel inferior se grafica la serie de TEC sin tendencia; el panel b) muestra el espectrograma calculado sobre la serie de tiempo sin tendencia; el panel c) el espectro de potencia para todo el intervalo y el panel d) la varianza. La ventana del espectrograma representa las periodicidades asociados con las observaciones. Las líneas negras en el espectro de potencia representa el nivel de significancia del 95 %.

Capítulo 3

Resultados publicados y aceptados

3.1. El impacto de grandes eventos solares sobre el contenido total de electrones de la ionosfera a latitudes medias

López-Montes, R., Pérez-Enríquez R., Araujo-Pradere E. A. 2012. The impact of large solar events on the total electron content of the ionosphere at mid latitudes. Advances in space research, 49, 1167-1179.

Las perturbaciones ionosféricas asociadas con la actividad solar pueden ocurrir a través de dos mecanismos básicos. El primero está relacionado con el impacto directo sobre la ionosfera de los fotones UVE originados en una ráfaga solar, y el segundo, a la penetración rápida de campo eléctrico en la magnetosfera durante una tormenta geomagnética. En este trabajo se examina la posibilidad de que estos dos mecanismos pueden tener un impacto a latitudes medias, calculando el contenido total de electrones (TEC) sobre estaciones GPS en México, durante ráfagas intensas de rayos X. Encontramos que las ráfagas intensas, que están bien ubicadas, pueden afectar la ionosfera a latitudes medias. De hecho, en los eventos solares del 14 de julio de 2000 y abril de 2001, se observaron perturbaciones ionosféricas con incrementos de hasta 138 y 150 uTEC, respectivamente, debido a la influencia de los fotones de UVE. También, durante los eventos solares de julio de 2000, abril de 2001, de Halloween de 2003, enero de 2005 y de diciembre de 2006, ocurrieron grandes perturbaciones ionosféricas (hasta 393 uTEC en las tormentas de Halloween), debido a la penetración rápida de campo eléctrico, asociado con la EMC que produce una tormenta geomagnética.

The impact of large solar events on the total electron content of the ionosphere at mid latitudes [☆]

Rebeca López-Montes ^a, Román Pérez-Enríquez ^{a,*}, Eduardo A. Araujo-Pradere ^b

^a Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Queretaro 76230, Mexico

^b CIRES, University of Colorado, Boulder, 325 Broadway W1NP9, CO, United States

Received 12 July 2011; received in revised form 12 January 2012; accepted 13 January 2012

Available online 25 January 2012

Abstract

Ionospheric disturbances associated with solar activity may occur via two basic mechanisms. The first is related to the direct impact on the ionosphere of EUV photons from a flare, and the second by prompt electric field penetration into the magnetosphere during geomagnetic storms. In this paper we examine the possibility that these two mechanisms may have an impact at mid latitudes by calculating the total electron content (TEC) from GPS stations in Mexico during several large X-ray flares. We have found that indeed large, complex flares, which are well located, may affect the mid latitude ionosphere. In fact, in the solar events of July 14, 2000 and April 2001 storms, ionospheric disturbances were observed to increase up to 138 and 150 TECu, respectively, due to the influence of EUV photons. Also, during the solar events of July 2000, April 2001, Halloween 2003, January 2005 and December 2006, there are large ionospheric disturbances (up to 393 TECu in the Halloween Storms), due to prompt penetration electric field, associated with CME producing geomagnetic storm.

© 2012 COSPAR. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Total electron content (TEC); X-ray flares; Ionospheric disturbances

1. Introduction

The ionosphere is a very important part to understand in any space weather study. While the magnetosphere constitutes a natural shield to the impact of the solar wind and energetic charged particles (Gonzalez et al., 1994; Patel and Desai, 1973; Lyatsky and Tan, 2005), the high energy electromagnetic radiation (EUV) reaches the upper atmo-

sphere to excite local molecular and produce variations in the ionosphere electron concentration Tsurutani et al. (2009). Furthermore, during geomagnetic storms, magnetospheric electric fields penetrate to the ionospheric causing other ionospheric variations (Mannucci et al., 2005; Tsurutani et al., 2004, 2008). Therefore, the ionosphere is very sensitive to the variations of these parameters along the solar cycle.

Currently, one of the most frequently used techniques to explore the plasma behavior of the Earth's ionosphere is the use of the global position (GPS) data to calculate the total electron content (TEC) (Sardón et al., 1994; Eftaxiadis et al., 1999; Arikan et al., 2003; Stankov et al., 2003; Blagoveshchensky et al., 2005; Afraimovich et al., 2008; Rothkaehl et al., 2008; Bishop et al., 2009). This technique gives an approximate vision of what is happening in the near Earth's environment in a relatively easy and comprehensible manner, covering large areas of land with a

[☆] We thank CORS, SOPAC and UNAVCO for putting their data on their respective websites from where the GPS data can be freely downloaded. We also thank the National Seismological Service, as well as E. Cabral for providing us with some Mexican GPS data. The paper was made possible thanks to PAPIIT, UNAM project IN111509.

* Corresponding author. Tel.: +52 442 238 1104; fax: +52 442 238 1101.

E-mail addresses: rebeca@geociencias.unam.mx (R. López-Montes), roman@geociencias.unam.mx (R. Pérez-Enríquez), Eduardo.Araujo@noaa.gov (E.A. Araujo-Pradere).

high number of receivers. The ocean surface however, remains a problem, although several solutions to this problems have been proposed, from the full ionospheric profile obtain from COSMIC, to the use of buoys.

The motivation of the present research comes from the fact that during the so called “Halloween Storms” of October–November 2003 (e.g. Tsurutani et al., 2005; Zhang and Xiao, 2005; Kane, 2009), very intense impact on the ionosphere occurred at midlatitudes, including over the Mexican territory (see the NOAA report for this series of events:

<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/IONO/USTEC/>). In fact, on October 29, vTEC over Mexican territory reached values of 200 TECu, lasting several hours.

In the present work, the calculation of TEC from GPS data over several Mexican stations is presented for the most intense X-ray class solar flares that occur during seven years of the past solar cycle 23. We chose X-ray class flares since they are the most powerful, and according to Hudson (2011) CMEs occur preferentially in the most energetic events, so that they are the most likely to affect Earth’s environment. In fact, Yashiro et al. (2006) found that virtually all X-class flares have accompanying CMEs. The presence in the interplanetary medium of a CME warrants that the probability of an interplanetary Bz south, which according to Gonzalez et al. (1994) makes them most geoeffective, is at least 50%. This period was selected considering that there were practically no GPS stations in Mexico before 2000, and that no large flares occurred after the event of December 2006. There were a total of 15 such events from 2000 to 2006, which include the so-called “Halloween Storms” of 2003, when values of TEC were found to reach 200 TECu ($1 \text{ TECu} = 10^{16} \text{ m}^{-2}$), on October 29. Unfortunately, the number of stations used for the analysis was small, since only data from very few stations were accessible (mainly due to the absence of a Mexican national network and sometimes due to damaged equipment). The TEC was calculated with a program called “tequis” developed at NOAA, using RINEX format data from CORS, UNAVCO, SOPAC, the SSN (National Seismological Service) and from E. Cabral (ecabral@geofisica.unam.mx). It has been proved that the results obtained from “tequis” have an accuracy of around 2.00 TECu for vTEC (Minter et al., 2007; Araujo-Pradere et al., 2007).

The resulting time series of vertical TEC (vTEC) were plotted for each station and were compared against the behavior of the geomagnetic field as given by the indexes Ap and Dst, with the purpose of giving a quantitative estimation of the impact the high frequency electromagnetic radiation, high energy corpuscular radiation, and coronal mass ejections, during solar flares at mid geomagnetic latitudes (such as is the case of Mexico).

Section 2 presents the data analyzed, followed by the results of the statistical analysis, and in Section 3 the results are compared with the global geomagnetic activity, as given by the Ap and Dst indexes. The paper finishes with a discussion and the conclusions in which a possible

explanation is presented as to why the hypothesis cannot yet be put to the test with the amount of data available.

2. Data analysis

Even though X class flares are very energetic, if the flare does not occur near the subsolar point or the accompanying CME misses the Earth, either the EUV photons nor the CME plasma could be considered our space weather agents (Wang et al., 2002; Zhang et al., 2003; Xie et al., 2004). The fifteen X-ray flares chosen for the analysis are shown in Table 1.

For the present analysis data from 44 Mexican permanent GPS stations were retrieved. The GPS measures the time it takes the signal from the satellites to reach the receiver. Here, we are basically using L1 and L2, ($L1 = 1575.42 \text{ MHz}$, and $L2 = 1227.6 \text{ MHz}$). Using the phase of the signal it is possible to calculate the value of TEC with the expression

$$TEC_{\phi} = 9.52(\lambda_1 \Phi_1 - \lambda_2 \Phi_2).$$

where λ_1 and λ_2 are the wavelength of L1 and L2, respectively; Φ_1 and Φ_2 are signal phase of L1 and L2 (Araujo-Pradere, 2005).

According to Erickson et al. (2001), the TEC can also be obtained using the pseudoranges, which provide absolute values but using the phase provides a good determination of the time variation of the electron content. There are different approaches to calculate TEC from GPS observations, the pros and cons are described in detail by Smith et al. (2008).

3. Calculus of TEC from GPS stations in Mexico during specific solar events

Before year 2000, only a few GPS stations were installed in Mexico, and their data was difficult to obtain. And because no large flares have occurred after 2006, the period of analysis was restricted to 2000–2006. Furthermore, only

Table 1
Intense solar X-ray flares for which TEC is calculated.

Date	Beginning	Maximum	End	Location	Intensity
14/07/2000	10:03	10:24	10:43	N22W07	5.7X
02/04/2001	21:32	21:51	22:03	N19W72	20X
06/04/2001	19:10	19:21	19:31	S21W31	5.6X
15/04/2001	13:19	13:50	13:55	S20W85	14.4X
28/10/2003	09:51	11:10	11:24	S16W08	17.2X
29/10/2003	20:37	20:49	21:01	S15W02	10X
02/11/2003	17:07	17:25	17:39	S14W56	8.3X
04/11/2003	19:29	19:50	20:06	S19W83	28X
20/01/2005	06:36	07:01	07:26	N14W61	7.1X
07/09/2005	17:17	17:40	18:03	S11E77	17X
08/09/2005	20:52	21:06	21:17	S12E75	5.4X
09/09/2005	19:13	20:04	20:36	S12W67	6.2X
05/12/2006	10:18	10:35	10:45	S07E68	9X
06/12/2006	18:29	18:47	19:00	S05E64	6.5X
13/12/2006	02:14	02:40	02:57	S06W23	3.4X

solar flare events with intensities greater than X-ray class were considered for the analysis, finally resulting in 15 solar storms considered to define the periods for the calculation of TEC. The map of Mexico showing the available stations is shown in Fig. 1.

Table 2 shows the geographic characteristics of the station used.

The TEC data were first plotted as a function of time for all stations for which data were available, for the whole time of analysis. From the maximum values for each day, the amplitude of the peak variation in terms of the standard deviation was obtained, using the relation

$$Z = \frac{X_{max} - X_{mean}}{\sigma}, \tag{1}$$

where X_{max} is the maximum value of the amplitude, X_{mean} is the mean value of the series and σ is the standard deviation of the mean. These values Z were plotted for each station as a function of time, for the period analyzed.

Considering that the days being analyzed correspond to active days, a comparison is made with a similar period of the following year and the percentage difference of TEC is obtained by

$$D = \left(\frac{DA - DQ}{DQ} \right) \times 100, \tag{2}$$

where D is the percent deviation of TEC, DA is the value of TEC during the active days and DQ is the value of the quiet days.

3.1. July 14, 2000 (“Bastille Day Solar Flare”)

The “Bastille Day” event has been analyzed by a number of authors (see for instance, Caroubalos (2001), Immel et al. (2003), Zhang et al. (2003), Huba et al. (2005)). The flare, with an intensity of 5.7X has been classified as one of the most geoeffective ever detected, perhaps because it occurred at the center of the solar disk, with the possible impact of solar EUV photons directly on the ionosphere, and was accompanied by a CME that was visible at 1054 UT, reaching a speed of 1175 Km/s. It arrived at Earth at 1500 UT and produced a severe geomagnetic storm (−300 nT) and several aurorae (see CME halo catalog ftp://ares.nrl.navy.mil/pub/lasco/halo/).

The 14 July 2000 storm has been reported by Araujo-Pradere (2005) to have produced considerable variations of $vTEC$, reaching up to 250% higher than a typical quiet day for a given location. This study used data from station ccv3, Cape Cañaveral, Florida (28.46 N latitude, 279.45 E longitude). There was also a geomagnetic storm associated with a maximum fall in Dst of −287.6. The maximum A_p was 400.

The analysis performed here shows that this event had very strong influence on TEC over Mexican stations. The first variation observed was on the day of the solar flare, thus implying direct EUV photon excitation of the ionosphere, with the strongest variation occurring over huat and popn stations (Table 2), with a maximum value of 137.82 TEC units over Huat (see Fig. 2). The second

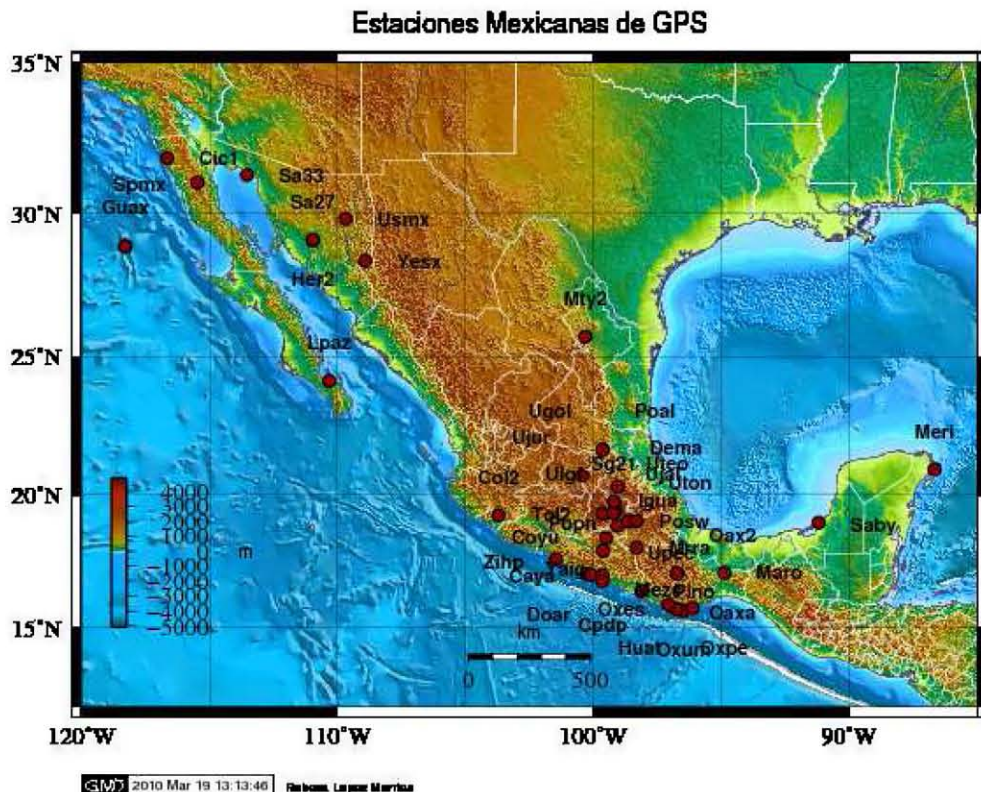


Fig. 1. Mexican GPS stations whose data were analyzed for the years 2000 and 2006.

Table 2
Mexican GPS stations used in the analysis.

Monument name	Monument code	Latitude (deg)	Longitude (deg)
Cayaco	caya	17.05	−100.27
Cerro de Piedra	cpdp	16.78	−99.63
Cicese	cic1	31.87	−116.67
Colima	col2	19.24	−103.70
Coyuca	coyu	17.01	−100.08
Demacu	dema	20.3	−99.04
Dos Arroyos	doar	17.02	−99.65
Hermosillo	her2	29.09	−110.97
Huatulco	huat	15.77	−96.11
Iguala	igua	18.39	−99.5
Isla Guadalupe	guax	28.88	−118.29
Juriquilla	ujur	20.70	−100.45
La Paz	lpaz	24.14	−110.32
Matias Romero	maro	17.09	−94.88
Merida	meri	20.93	−86.66
Mezcala	mezc	17.93	−99.62
Monterrey	mt2	25.72	−100.31
Oaxaca	oax2	17.09	−96.77
Oaxaca	oaxa	17.07	−96.73
Playa la escobilla	oxes	15.73	−96.75
Oxum	oxum	15.66	−96.5
Pantitlan	mpaa	19.41	−99.07
Pinotepa Nacional	pino	16.39	−98.13
Popocatepetl North	popn	19.06	−98.64
Popo South West	posw	19.01	−98.66
Puerto Escondido	oxpe	15.88	−97.08
Puerto Peñasco	sa33	31.3	−113.53
Sabancuy	saby	18.97	−91.19
San Pedro Martir	spm	31.05	−115.47
Teoloyucan	uteo	19.74	−99.19
Toluca	tol2	19.29	−99.64
Tonantzintla	uton	19.03	−98.32
UIGF-UNAM	uigf	19.33	−99.18
Universidad de Sonora	sa27	29.08	−110.96
Universidad de la Sierra	usmx	29.82	−109.68
UTEO	sg21	19.74	−99.19
Yautepec	yaig	18.86	−99.07
Yecora	yesx	28.38	−108.92
Zihuatanejo	zihp	17.61	−101.47
Centro Historico	upec	19.43	−99.13
Golondrinas	ugol	21.65	−99.63
Metro Remedios	mrria	18.03	−98.3
Contreras	ujal	19.31	−99.23
Altzomoni	poal	21.65	−99.63

variation took place on July 14, when the CME arrived to Earth and produced the geomagnetic storm, probably associated with a prompt penetration electric field as analyzed by Tsurutani et al. (2008) when studying the Halloween Storms. Fig. 2 shows the behavior of TEC over each one of the stations along with the geomagnetic indexes Ap and Dst for several days around the time of the event. A relation between the different parameters during the day of the event is clearly seen. It is important to note that after the event, the Ap index returned to normal values but TEC remained altered for some days, well in agreement with results previously published Araujo-Pradere et al. (2006). The graph also shows that the vTEC background is quite

active (with an average value for the days prior to the event of approximately 60 TECu).

The plot, corresponding to the Z values per station (Fig. 3a) shows values of around one to two sigmas before the event, but in July 14 these values go to up to 5 sigmas (huat station), whereas the percent deviation from active days with respect to quiet days, D, for the period analyzed, reached values of 321.7% on July 14 (Fig. 3b).

3.2. Solar storms of April 2, 6 and 15, 2001

The values obtained from the analysis of TEC during the events of April 2, 6 and 15, 2001 are presented next. The event of April 2, with an intensity of 20X had, because of its location, no impact on both the TEC or the geomagnetic indexes. In fact, a CME was indeed detected on April 4, no Bz was observed (Gonzalez et al., 1994) and therefore no geomagnetic storm could be produced. The other two solar events were analyzed by Zhang et al. (2011), in terms of the possible relation between the solar irradiance and the ionospheric response. In this sense, they argue that the reason for a better relation during the event of April 6, compared to that of April 15, is the better location of the former in the solar disk.

The event of April 6 had an intensity of 5.6X starting at 1910 UT, with an approximate duration of 20 min, and with a maximum at 1921 UT (Table 1). For this particular event there was a CME associated on the same day at 1930 UT, reaching a speed of about 1103 Km/s (see the Halo catalogue) but noeffect on the ionosphere. The storm of 15 April had an intensity of 14.4X, starting at 1319 UT, with the maximum at 1350UT, and no CME could be associated.

For the whole period analyzed, the values of vTEC are quite high (around 100 TECu) (Fig. 4). Peaks of April 5 and 6 seem to be related to a shock arriving on April 4 (see <http://www.spaceweather.com>). Another peak was observed on April 10 but that was probably associated with a 2.3X flare not considered for this analysis (see the introduction). Of the two peaks on April 15 and 16 only the latter could be associated with the April 15 flare.

When comparing with the Ap and Dst geomagnetic indexes, these show a very small response when a shock arrived at Earth on April 4, with a larger response on April 8, probably due to the CME associated with the April 6 flare. The strong response on April 11 and 12 was related to the CME mentioned above. Finally, no peaks were observed related to the April 15 flare.

These unusually high values of TEC for a perturbed period of activity have been reported by Shagimuratov et al. (2003), who analyzed the period of March 18 to April 4. They found that the high TEC values were produced by two CME producing geomagnetic storms (days 19 and 31 of March). According to these authors, in both cases the TEC reached values of around 150% higher respect to quiet conditions.

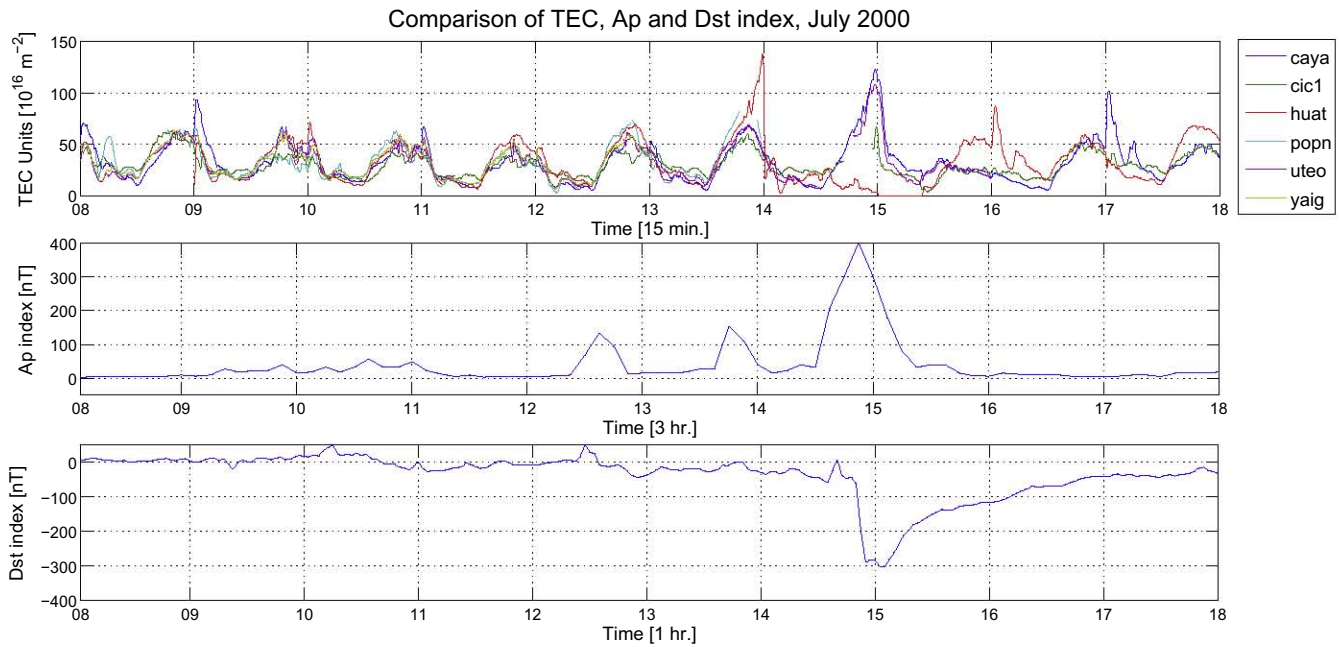


Fig. 2. Comparison of TEC values with Ap and Dst geomagnetic indexes, during the July 14, 2000 storm.

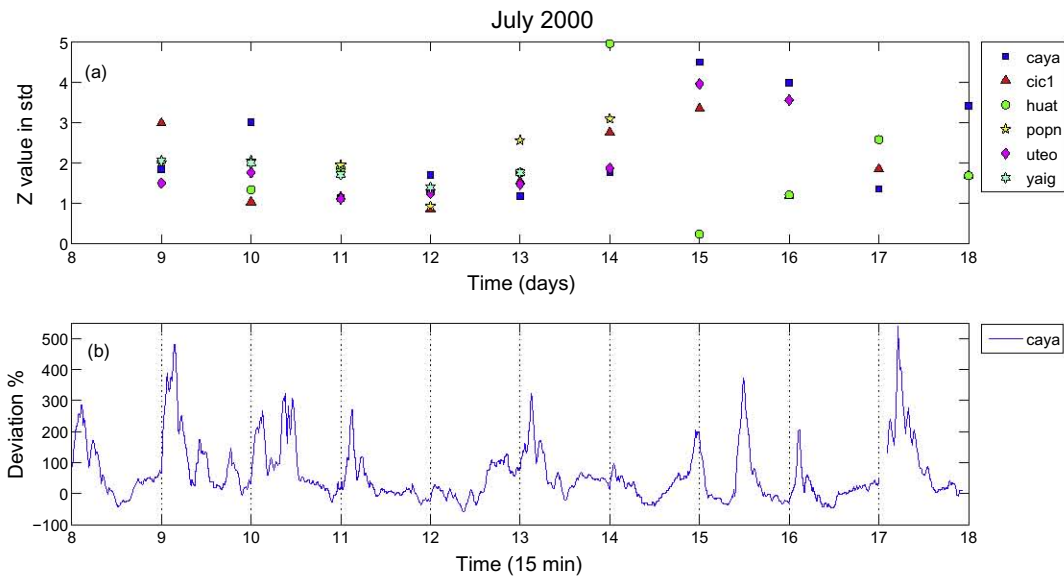


Fig. 3. (a) Plot of the values of Z in standard deviations per station per day for the July 14, 2000 storm (Eq. 1). (b) Percent deviation of TEC during the active days with respect to quiet days corresponding to one year later (Eq. 2).

As shown in Fig. 5a, the deviations of Z ranged from 0.5 to 3.5 along the period of analysis, reaching a value of 3.6 and 3.4 sigmas for 6 and 15 April, respectively, whereas the percent deviation from active days with respect to quiet days reached values of 228.9% for April 6 and 206.6% for April 15 (Fig. 7b).

3.3. Solar storms of October–November 2003 (“Halloween Storms”)

The Halloween Storms, so called because 4 X-class flares occurred during the period October 28–November 4, 2003, have been some of largest events reported with a strong

influence on the Earth’s environment. All of them had intensities above the threshold value we have chosen (X class flares) and were accompanied by CMEs producing geomagnetic storms. Several authors have analyzed these events (Tsurutani et al., 2005; Mannucci et al., 2005; Sutton et al., 2006; Liu et al., 2007), in which they report on the strong geomagnetic storms that resulted in the corresponding auroral activity (Kane, 2009. Regarding TEC, Zhang and Xiao (2005)) have reported increases of up to 300% in the electronic concentration.

The solar storm of October 28, the first of the series, took place at 0951 UT, had a duration of 1 h and 35 min, and an intensity of 17.2X. Thus it constituted the

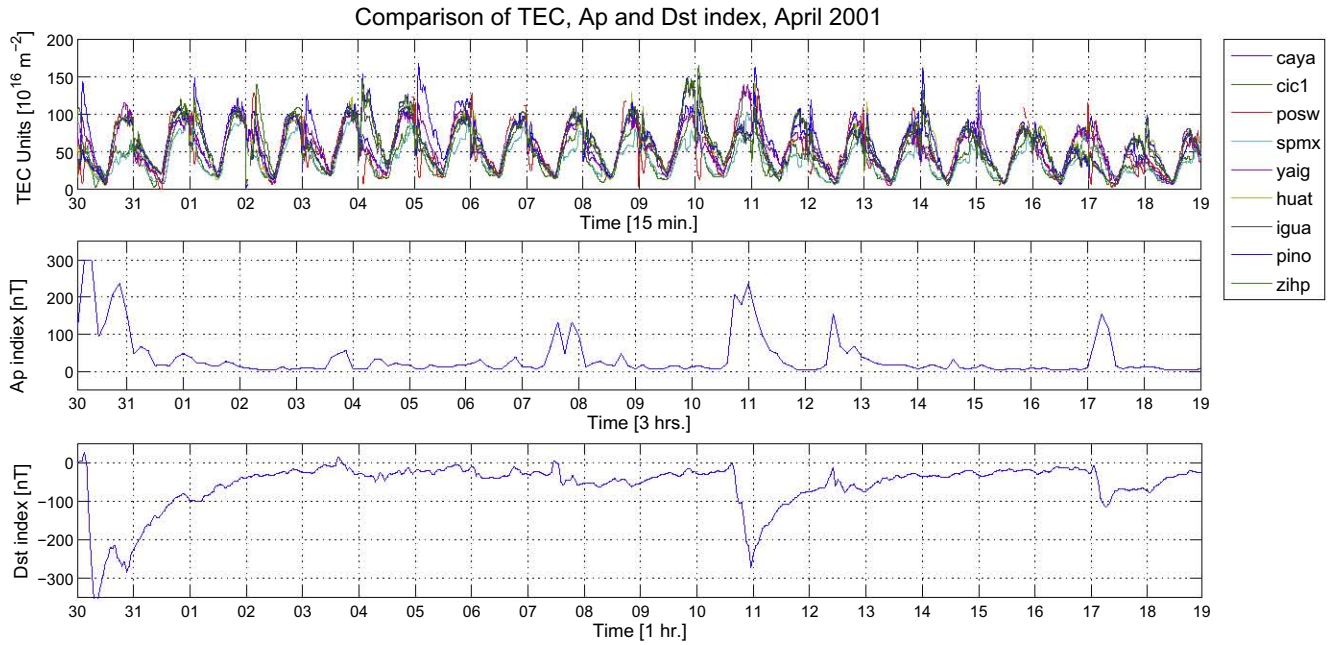


Fig. 4. Comparison of TEC values with those of Ap and Dst geomagnetic indexes, during the April 2, 6 and 15, 2001 storms.

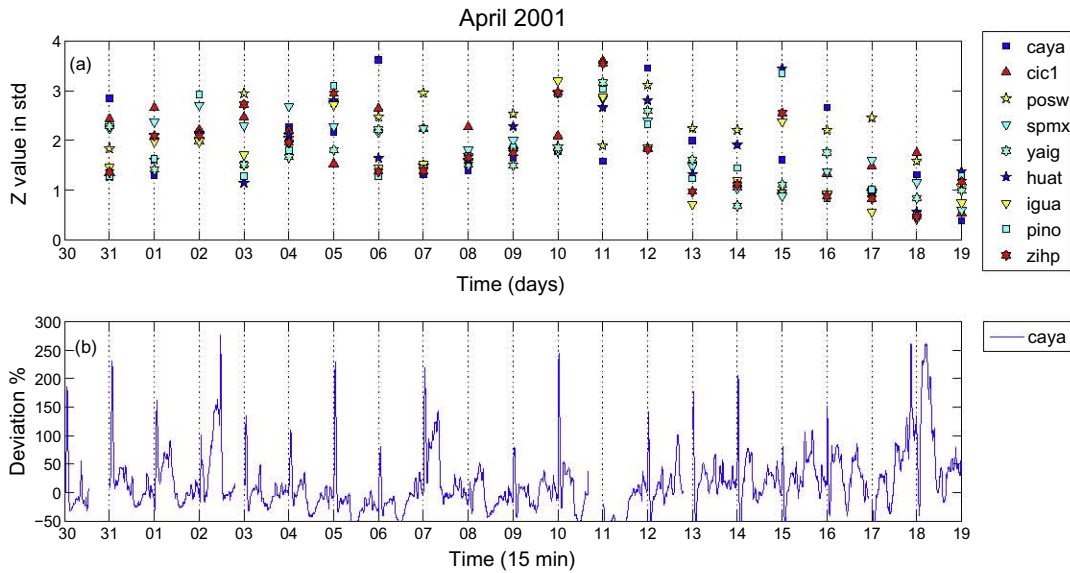


Fig. 5. (a) Plot of the values of Z in standard deviations per station per day for the April 2, 6 and 15, 2001 storms (Eq. 1). (b) Percent deviation of TEC during the active days with respect to quiet days corresponding to one year later (Eq. 2).

second most intense event in the catalogue of IPS Radio and Space Services (Australia) top X flares. This event was accompanied by a CME that traveled in the direction of the Earth and reached a speed of 2125 Km/s, when leaving the sun. The second one occurred on October 29 at 2037 UT, with an approximate duration of 24 min and an intensity of 10X. This flare was also associated with a CME, whose speed was 1948 Km/s. The third flare of intensity 8.3X occurred on November 2 at 1703 UT, with a duration of 36 min. The CME associated with this flare had a speed of 1948 Km/s. According to the Halo CMEs

catalogue (<ftp://ares.nrl.navy.mil/pub/lasco/halo/>) this particular CME underwent a strong deceleration. The last of the series, November 4, the most intense X-class flare ever recorded, had an intensity of 28X. As this flare took place at the west limb no CME affecting the Earth environment was associated.

The analysis of these flares shows that TEC behavior at midlatitudes was highly active (see Fig. 6). The greatest effect occurred on October 29, with GPS stations popn and yaig reaching values of 393 and 345 TECu, respectively. This agrees with Mannucci et al. (2005), Tsurutani

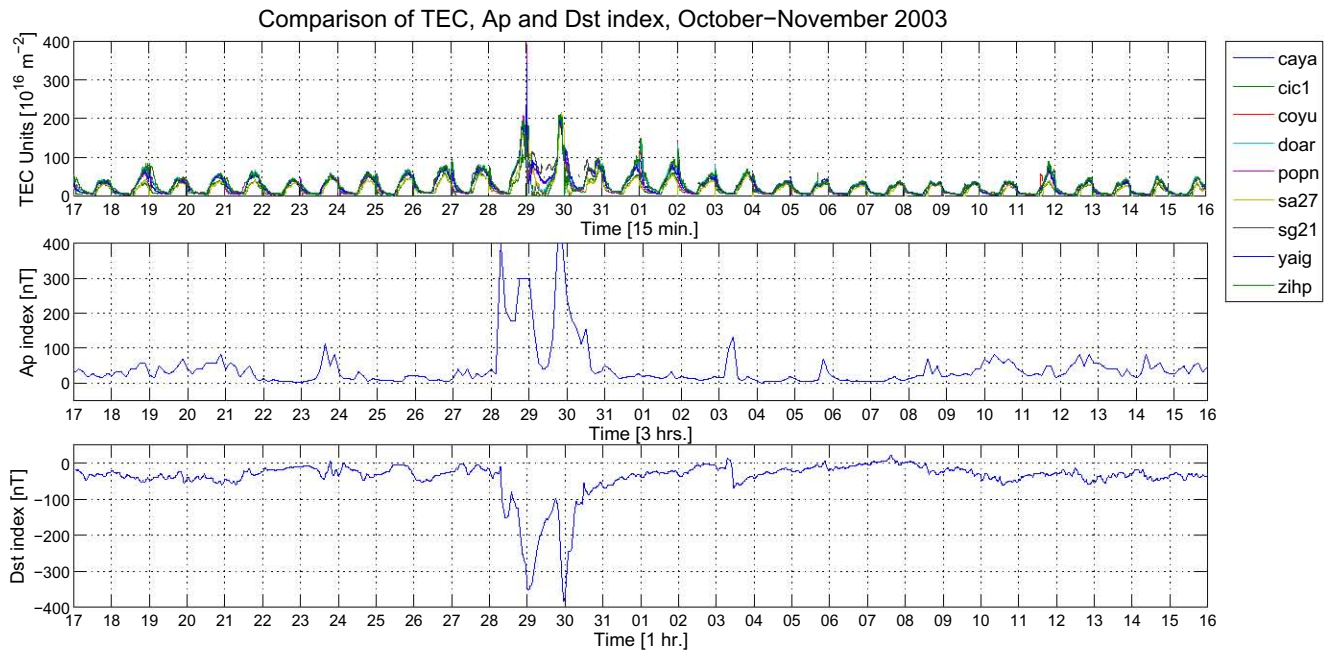


Fig. 6. Comparison of TEC values with those of Ap and Dst geomagnetic indexes, during the “Halloween Storms”

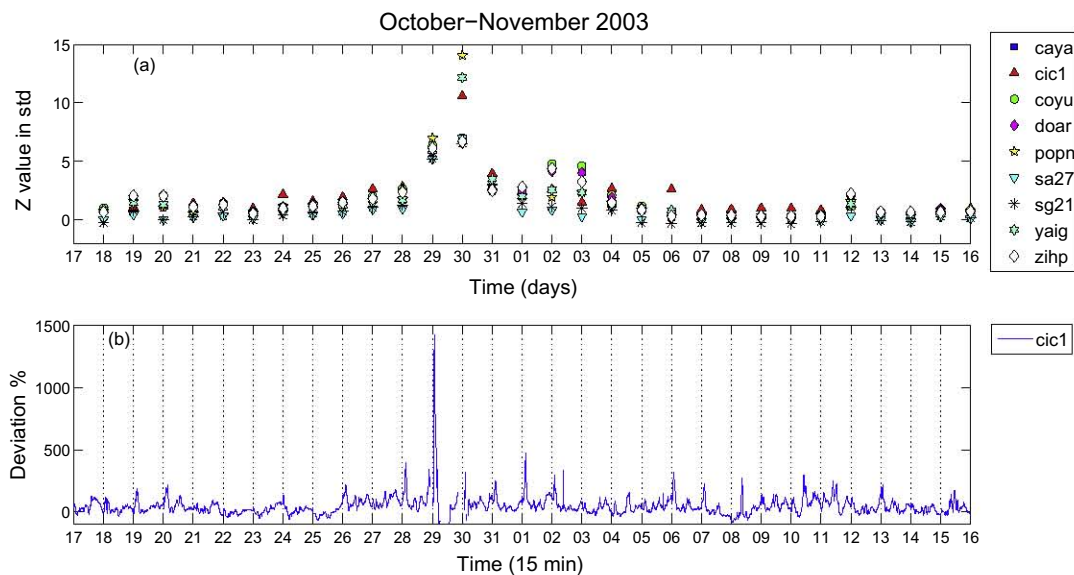


Fig. 7. (a) Plot of the values of Z in standard deviations per station per day for the “Halloween Storms” (Eq. 1). (b) Percent deviation of TEC during the active days with respect to quiet days corresponding to one year late (Eq. 2).

et al. (2004), who argue that the October 29 effect comes from the CME produced during the October 28 event. This means that in terms of latitudes like those of Mexico, this particular event has been the one with the strongest ionospheric response. As seen in the same graph, the Ap and Dst indexes show corresponding high values, specially on 29 and 30 October.

The plot corresponding to the deviation of the peak values of TEC (Z) (see Fig. 7a) show deviations of 10 to 14 sigmas for stations popn, yaig, and cic1, which were the ones with higher responses on October 28. Likewise, in

Fig. 7b, it is observed that the deviation from active days respect to quiet days, for the period analyzed, reached values of 1423%.

3.4. Solar storm of January 20, 2005

A whole period going from the beginning of 2005 to the end of 2006 was analyzed by Lei et al. (2008) looking for a relation between ionosphere perturbations caused either by EUV photons, geomagnetic storms producing CMEs (Tsurutani et al., 2005) and geomagnetic storms associated

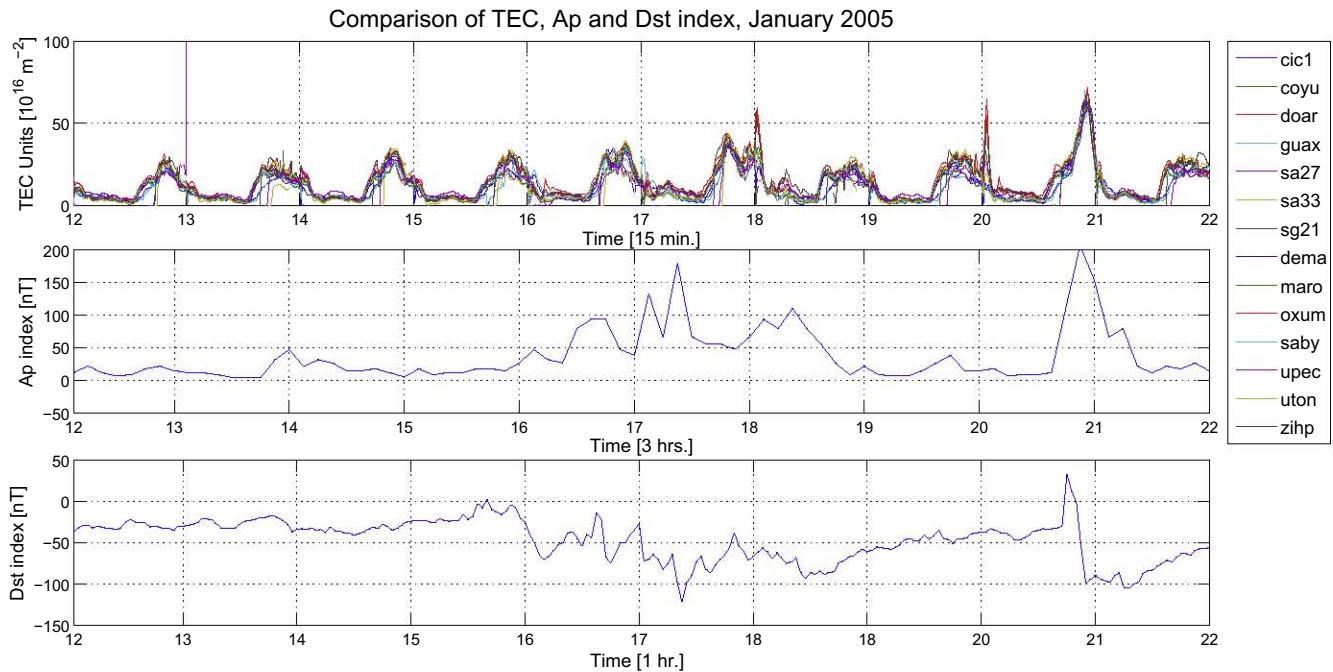


Fig. 8. Comparison of TEC values with Ap and Dst geomagnetic indexes, during the January 20, 2005 storm.

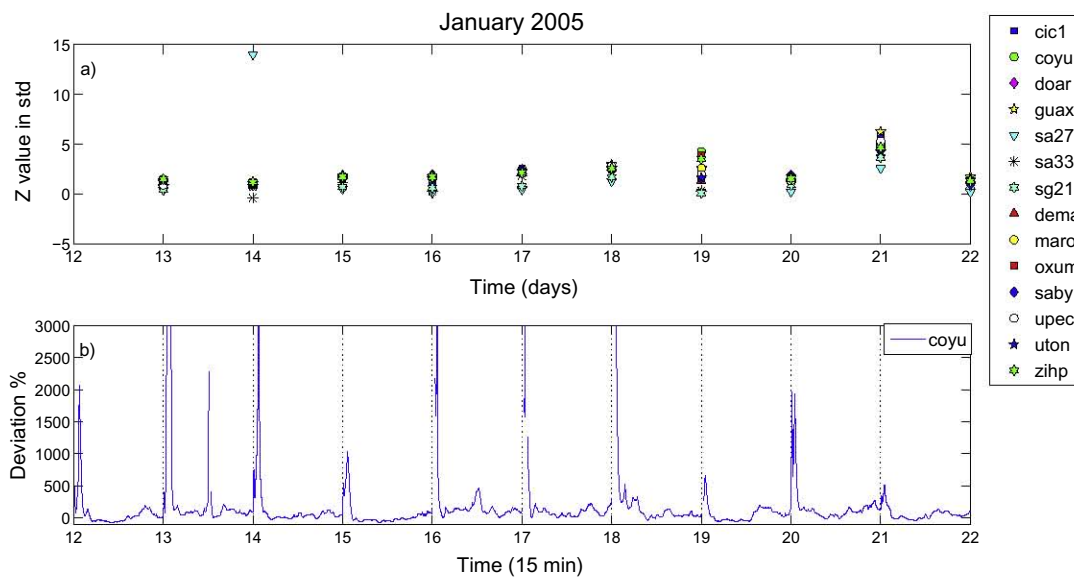


Fig. 9. (a) Plot of the values of Z in standard deviations per station per day for the January 20, 2005 storm (Eq. 1). (b) Percent deviation of TEC during the active days with respect to quiet days corresponding to one year later (Eq. 2).

to high speed streams. Considering our TEC calculations, in January 2005, between the 15 and 19, four flares were produced from active region 720. After January 20, a CME associated with a fifth flare reached a speed of 571 Km/s (see the Halo catalogue <ftp://ares.nrl.navy.mil/pub/lasco/halo/>). Even though it usually takes more than 24 hrs for the charged plasma particles from a solar storm to reach the Earth, in this case the impact on the Earth's environment supposedly occurred only hours after the explosion in the Sun. So, according to McKenna-Lawlor

et al. (2010) this particular case constitutes one of the strongest solar proton event in decades. Furthermore, the authors state that the fact that when the storm took place the active region 720 was located at a longitude 60° west, was an important clue to understand this event, as the region was “magnetically connected” to the Earth.

After calculating vTEC for the period, two peaks of about 70 TECu were obtained (Fig. 8), one at the beginning of January 21 and one at the end of that day. The Ap and Dst indexes correlate well only with the second

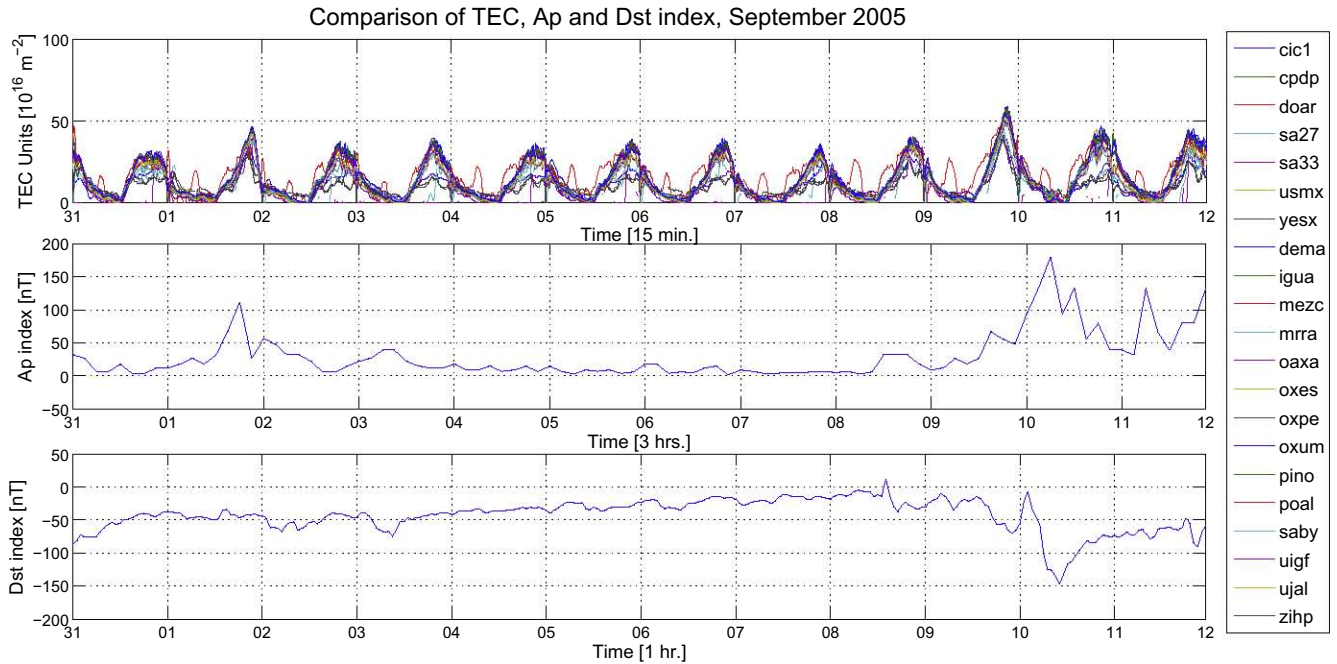


Fig. 10. Comparison of TEC values with those of Ap and Dst geomagnetic indexes, during the September 7, 8 and 9, 2005 storms.

peak in vTEC, probably related to the presence of a CME. Although no clear explanation could be found for the first peak, it seems that this peaks is related to the EUV photons from the flare, similar to what has been proposed for the “Bastille” even of July 14, 2000 (Tsurutani et al., 2005)

With respect to the Z values, a significant change can be appreciated in Fig. 9a that the peak values go from 2 to 6 sigmas, so more as the solar activity cycle was well into its declining phase; whereas the percent deviation from active days with respect to quiet days, for the period analyzed, reached values of about 1956% (Fig. 9b).

3.5. Storms of September 7, 8 and 9, 2005

Three consecutive solar storms occurred at days 7, 8 and 9 of September 2005. They reached intensities of 17X, 5.4X and 6.2X, respectively. Only the last flare, September 9, was found to be associated with a CME, which produced a prompt penetration electric field, that was first observed at 1948 UT and reached a speed of 2300 Km/s (see Halo catalogue <ftp://ares.nrl.navy.mil/pub/lasco/halo/>). The geomagnetic storm of September 11 was studied among others by Rodger et al. (2007) and Klimenko et al.

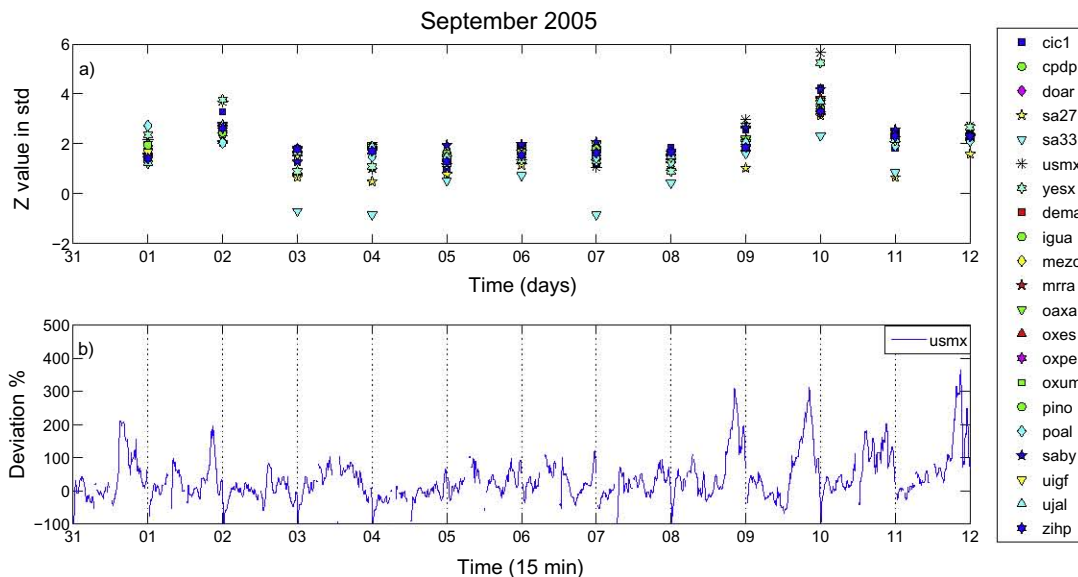


Fig. 11. (a) Plot of the values of Z in standard deviations per station per day for the September 7, 8, and 9, 2005 storms (Eq. 1). (b) Percent deviation of TEC during the active days with respect to quiet days corresponding to one year later (Eq. 2).

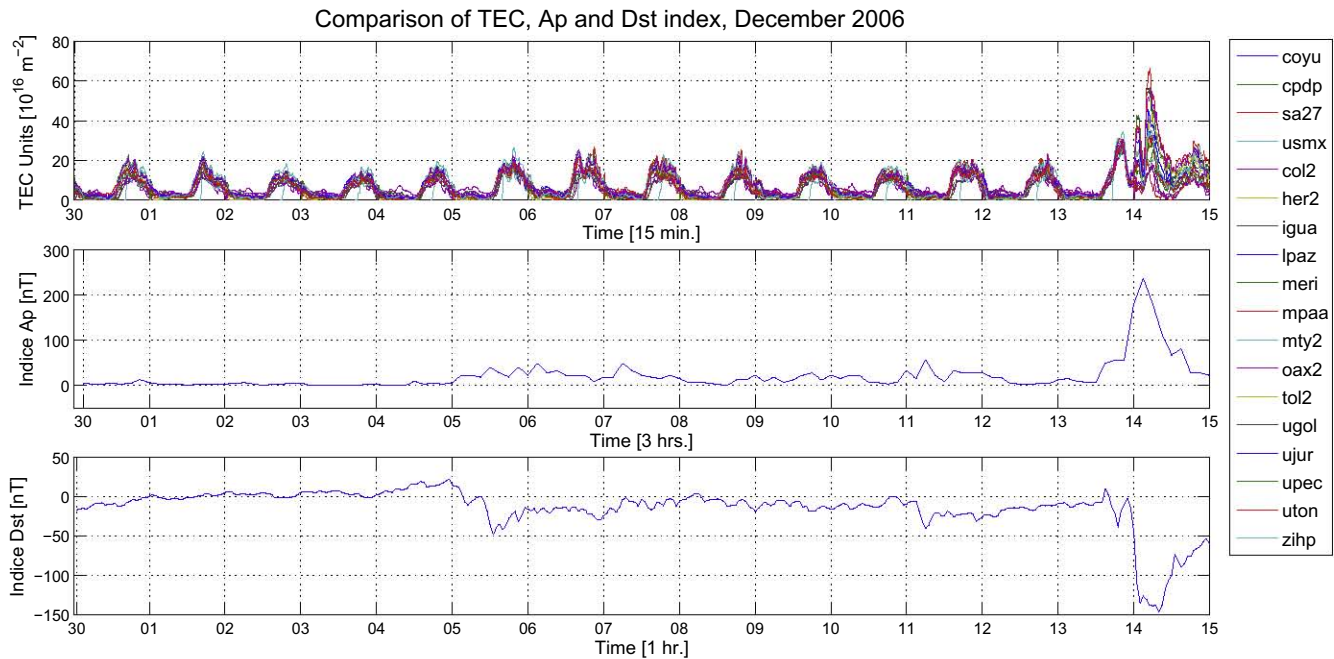


Fig. 12. Comparison of TEC values with those of Ap and Dst geomagnetic indexes, during the December 5, 6 and 13, 2006 storms.

(2010). Concerning the flare of September 7, the TEC reached values of about 47 TECu in just a single station, bogt (Zhang et al., 2011). This is about the same value that we found, but is not very relevant, as the period was relatively active. No reference was found for the event of September 8. During the period analyzed, TEC presented some activity, specially at cpdp and doar stations with a peak value of around 55 TECu (Fig. 10), which is significant considering that the flares occurred well to the east, thus probably ruling out any photon or plasma effect. However, the peak values of this period occurred associated with the

September 9 flare, the only one accompanied by a CME involving a prompt penetration electric field generated geomagnetic storm. Regarding the behavior of Ap and Dst indexes, the same graph shows good correlation with the geomagnetic storm that go below -150 nT, as expected.

The Z values shown in Fig. 11a show peaks after the September 9 event that go from 3 to 6 sigmas. It should be noticed that there was also a peak value of Z during September 2 of 2 and 4 sigmas. Meanwhile, the deviation from active days with respect to quiet days, for the period analyzed, reached values of 308.2% (Fig. 11b).

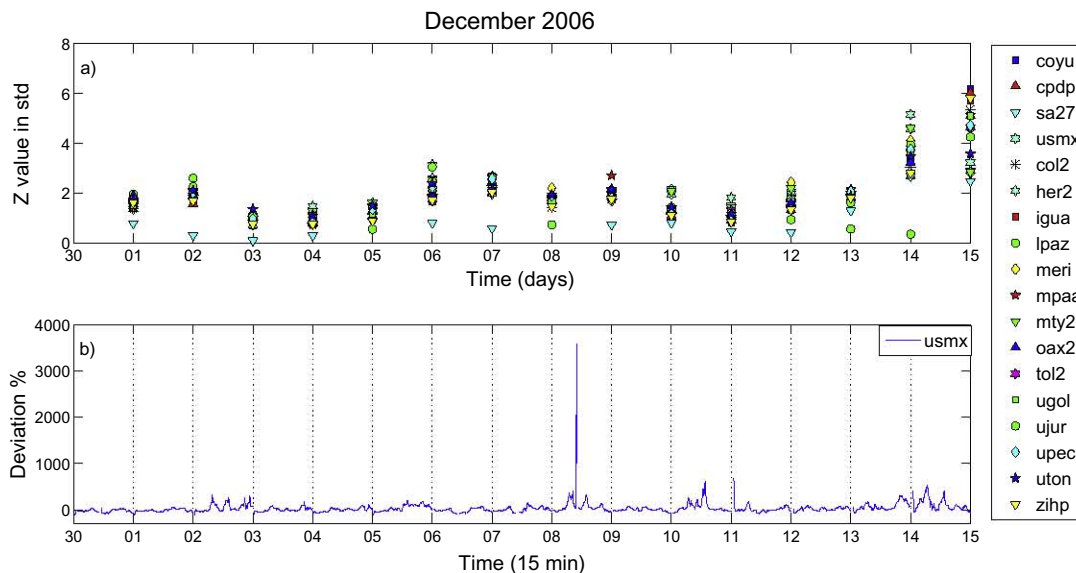


Fig. 13. (a) Plot of the values of Z in standard deviations per station per day for the December 5, 6 and 13, 2006 storms (Eq. 1). (b) Percent deviation of TEC during the active days with respect to quiet days corresponding to one year later (Eq. 2).

3.6. Solar storms of December 5, 6 and 13, 2006

The event of December 6 was reported by Zhang et al. (2011). They calculated TEC for only one station (ispa). The peak value was 40 TECu. The period we analyzed goes from December 1 to 15. The three flares reached intensities of 9X, 6.5X and 3.4X, respectively. The first event started at 1018 UT, and finished at 1045 UT, from an active region at S07 E68. The second one started at 1829 UT and finished at 1900 UT, from the same region at S05 E64. Even though no CME has been associated with these flares, there was a small geomagnetic storm probably associated with a magnetospheric electric field as proposed by Tsurutani et al. (2008) for the “Halloween Storm”.

In general, v TEC for the period was quiet. However, there was an unrelated peak that can be associated with the third event on December 13, a 3.4X class flare. Both the ionospheric and geomagnetic storms were analyzed by Lei et al. (2008), Pedatella et al. (2009). For the ionosphere, they found increases of TEC of around 50%. In fact, the geomagnetic indexes Ap and Dst presented a geomagnetic storm associated the CME on December 13.

As shown in Fig. 12 the TEC values go from 40 to 65 TECu, approximately, probably associated with a geomagnetic storm producing CME. Although these values are not extremely high (probably because the event occurred much to the east) they are the only ones significant enough during the period of analysis.

Regarding the Z values for the period, no appreciable peak values were observed corresponding to 5 and 6 of December, but around 13 December, peak values of 3 and 6 sigmas were observed (Fig. 13a). Fig. 13b shows that the deviation from active days with respect to quiet days, for the period analyzed, reached values of 542.4%.

4. Discussion and conclusions

In this work, we have presented the results of the analysis of v TEC calculated using GPS data from several Mexican stations, during 15 large X-ray events that occurred between 2000 and 2006, with the purpose of testing the hypothesis that such events can have an impact at mid latitudes. In this context, the peak variation for all the events is shown in Table 3, where it can be seen that, in general, this peak variation is not large, but not negligible. The exception occurred during the “Halloween Storms”, where the variation reached 14 sigmas. So the question is whether we are talking about an “outlier”, that is, something that rarely happens, or whether this is a real possibility. In other words, we should consider space weather both in terms of the largest events, namely, super-storms, and of the less intense ones along the solar cycle. Furthermore, some of the events that have been analyzed were found to be related to flare photons not associated to CMEs. Therefore, in a future paper, we shall analyze v TEC with respect to flares for which the influence of CMEs has been eliminated, in order to determine the cause-effect relation, if any exists.

Table 3

Peak variation values of TEC in sigmas, Z, and percent difference of TEC, D, respect to a quiet period for the twelve events analyzed.

Fecha	Peak value	Percent difference
14/07/2000	5	321.7
02/04/2001	2.9	162.3
06/04/2001	3.6	228.9
15/04/2001	3.4	206.6
28/10/2003	6.9	399.7
29/10/2003	14	1423
02/11/2003	4.8	475.8
04/11/2003	2.6	116.9
20/01/2005	6.2	1956
07/09/2005	2.2	120.5
08/09/2005	1.8	94.2
09/09/2005	5.6	312.9
05/12/2006	1.6	115.1
06/12/2006	3.1	202.3
13/12/2006	6.2	542.4

It is generally recognized that space weather has a significant impact at all latitudes, with the most marked effects mainly observed at high latitudes. From this investigation it is possible to conclude that there exists a considerable influence of solar flare photons or CME related geomagnetic storms on the behavior of total electron content over Mexico. Some other conclusions are given as follows:

1. For some events like those of April 2001, occurring during plain solar maximum, the ionosphere was highly altered. However, in some stations the increment in TEC is clearly visible.
2. In spite of the fact that for some of the analyzed events the Dst index shows no geomagnetic storm, there is an appreciable TEC variation. In fact, for the events of July 14, 2000 and those of April 2001, the peak variation reaches values of more than 4 sigmas. A possible interpretation of this is that the EUV flare radiation can also be involved in the ionospheric anomaly.
3. It is very important to point out that in the storms of December 2006, a flare of magnitude 3.4X was included in the analysis, which being accompanied by a coronal mass ejection, was cause of appreciable increases in the daily maximum values of TEC that go from almost 3 sigmas to more than 5 sigmas (see Fig. 12). That is to say, seemingly even relatively small events well situated with respect to the Earth can produce effects on the ionosphere.
4. It is also clear that even intense flares, well localized in the solar disk, occurring at an adequate time, do not always produce appreciable effects on the ionosphere. This was the case of the events of December 5 and 6, 2006 with magnitudes 9X and 6.5X, that occurred at 10:18 y 18:29, respectively, that produced neither geomagnetic nor ionospheric activity.
5. All July 2000, April 2001 and “Halloween Storms” of October–November, 2003 had big EUV photon and storm effects with a the maximum values of TEC, some of which occurred in lower latitude Mexican stations.

This implies that prompt penetration electric field ionospheric effects at mid geomagnetic latitudes (as studied by Mannucci et al. (2005)) should be studied further.

References

- Afraimovich, E.L., Astafyeva, E.I., Oinats, A.V., Yasukevich, Y.V., Zhivetiev, I.V. Global electron content: a new conception to track solar activity. *Ann. Geophys.* 26, 335–344, 2008.
- Araujo-Pradere, E.A. GPS-derived total electron content response for the Bastille Day magnetic storm of 2000 at a low mid-latitude station. *Geophys. Int.* 44 (2), 211–218, 2005.
- Araujo-Pradere, E.A., Fuller-Rowell, T.J., Spencer, P.S.J. Consistent features of the TEC changes during ionospheric storms. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 68 (16), 2006.
- Araujo-Pradere, E.A., Fuller-Rowell, T.J., Spencer, P.S.J., Minter, C.F. Differential validation of the USTEC model. *Radio Sci.* 42, RS3016, 2007.
- Arikan, F., Erol, C.B., Arikan, O. Regularized estimation of vertical total electron content from global positioning system data. *J. Geophys. Res.* 108, 1469, 2003.
- Bishop, G.J., McNamara, L.F., Welsh, J., Decker, D.T. On the Relative Utilities of Data Types for Assimilation by Global Ionospheric Models. AGU Fall Meeting Abstracts A1614, 2009.
- Blagoveshchensky, D.V., Lester, M., Kornienko, V.A., Shagimuratov, I.I., Stocker, A.J., Warrington, E.M. Observations by the CUTLASS radar, HF Doppler, oblique ionospheric sounding, and TEC from GPS during a magnetic storm. *Ann. Geophys.* 23, 1697–1709, 2005.
- Caroubalos, C., and 15 colleagues 2001. ARTEMIS IV Radio Observations of the 14 July 2000 Large Solar Event. *Sol. Phys.* 204, 165–177.
- Rodger, C.J., Clilverd, M.A., Thomson, N.R., Gamble, R.J., Seppala, A., Turunen, E., Meredith, N.P., Parrot, M., Sauvaud, J.-A., Berthelier, J.-J. Radiation belt electron precipitation into the atmosphere: Recovery from a geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.* 112, A11307, 2007.
- Eftaxiadias, K., Cervera, M.A., Thomas, R.M. A Global Positioning System Receiver for Monitoring Ionospheric Total Electron Content. Defense Science and Technology Organization. DSTO-TR-0742, 1999.
- Erickson, W.C., Perley, R.A., Flatters, C., Kassim, N.E. Ionospheric corrections for VLA observations using Local GPS data. *Astron. Astrophys.* 366, 1071–1080, 2001.
- Gonzalez, W.D., Joselyn, J.A., Kamide, Y., Kroehl, H.W., Rostoker, G., Tsurutani, B.T., Vasyliunas, V.M. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.* 99, 5771–5792, 1994.
- Huba, J.D., Warren, H.P., Joyce, G., Pi, X., Iijima, B., Coker, C. Global response of the low-latitude to midlatitude ionosphere due to the Bastille Day flare. *Geophys. Res. Lett.* 32, 15103, 2005.
- Hudson, H.S. Global properties of solar flares. *Space Sci. Rev.* 158, 5, doi:10.1007/s11214-010-9721-4, 2011.
- Immel, T.J., Mende, S.B., Frey, H.U., Østgaard, N., Gladstone, G.R. Effect of the 14 July 2000 solar flare on Earth's FUV emissions. *J. Geophys. Res.* 108, 1155, 2003.
- Kane, R.P. Variations of geomagnetic Dst, auroral indices and cosmic ray intensity during 28–31 Oct 2003 Halloween events. *Indian J. Radio Space* 38, 245–253, 2009.
- Klimenko, M.V., Klimenko, V.V., Zakharenkova, I.E. Ionospheric effects in TEC during geomagnetic storm sequence on September 9–14, 2005. In: Doherty, P., Hernandez-Pajares, M., Juan, J.M., Sanz, J., Aragon-Angel, A. (Eds.), *The international Beacon Satellite Symposium*, 2010.
- Lei, J., Thayer, J.P., Forbes, J.M., Wu, Q., She, C., Wan, W., Wang, W. Ionosphere response to solar wind high-speed streams. *Geophys. Res. Lett.* 35, 19105, 2008.
- Lei, J., Wang, W., Burns, A.G., Solomon, S.C., Richmond, A.D., Wiltberger, M., Goncharenko, L.P., Coster, A., Reinisch, B.W. Observations and simulations of the ionospheric and thermospheric response to the December 2006 geomagnetic storm: Initial phase. *J. Geophys. Res.* 113, A01314, 2008.
- Liu, H., Lüthi, H., Watanabe, S., Köhler, W., Manoj, C. Contrasting behavior of the thermosphere and ionosphere in response to the 28 October 2003 solar flare. *J. Geophys. Res.* 112, 7305, 2007.
- Lyatsky, W., Tan, A. A Statistical Study of IMF Bz Generation in the Solar Wind. AGU Spring Meeting Abstracts A8, 2005.
- Mannucci, A.J., Tsurutani, B.T., Iijima, B.A., Komjathy, A., Saito, A., Gonzalez, W.D., Guarnieri, F.L., Kozyra, J.U., Skoug, R. Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29–30, 2003 “Halloween Storms”. *Geophys. Res. Lett.* 32, 12, 2005.
- McKenna-Lawlor, S., Li, L., Dandouras, I., Brandt, P.C., Zheng, Y., Barabash, S., Bucik, R., Kudela, K., Balaz, J., Strharsky, I. Moderate geomagnetic storm (21–22 January 2005) triggered by an outstanding coronal mass ejection viewed via energetic neutral atoms. *J. Geophys. Res.* 115, A08213, doi:10.1029/2009JA014663, 2010.
- Minter, C.F., Robertson, D.S., Spencer, P.S.J., Jacobsen, A.R., Fuller-Rowell, T.J., Araujo-Pradere, E.A., Moses, R.W. A comparison of MAGIC and FORTE ionospheric measurements. *Radio Sci.* 42, RS3026, doi:10.1029/2006RS003460, 2007.
- Patel, V.L., Desai, U.D. Interplanetary magnetic field and geomagnetic DST variations. *Astrophys. Space Sci.* 20, 431–437, 1973.
- Pedatella, N.M., Lei, J., Larson, K.M., Forbes, J.M. Observations of the ionospheric response to the 15 December 2006 geomagnetic storm: Long-duration positive storm effect. *J. Geophys. Res.* 114, A12313, 2009.
- Rothkaehl, H., Krakowski, A., Stanislawski, I., Blecki, J., Parrot, M., Berthelier, J.-J., Lebreton, J.-P. Wave and plasma measurements and GPS diagnostics of the main ionospheric trough as a hybrid method used for Space Weather purposes. *Ann. Geophys.* 26, 295–304, 2008.
- Sardón, E., Rius, A., Zarraoa, N. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from global positioning system observations. *Radio Sci.* 29 (3), 577–586, 1994.
- Shagimuratov, I.I., Krankowski, A., Baran, L.W., Cisak, J., Yakimova, G. Storm-Time Structure and Dynamics of the Ionosphere obtained from GPS observations. Report 23 of the Fifth Antarctic Geodesy Symp. Lviv, Ukraine, 2003.
- Smith, D., Araujo-Pradere, E.A., Minter, C.V., Fuller-Rowell, T.J. A Comprehensive evaluation of the errors inherent in the use of a 2-dimensional shell for modeling the ionosphere. *Radio Sci.* 43, RS6008, doi:10.1029/2007RS003769, 2008.
- Stankov, S.M., Stankov, S.M., Jakowski, N., Heise, S., Muhtarov, P., Kutiev, I., Warnant, R. A new method for reconstruction of the vertical electron density distribution in the upper ionosphere and plasmasphere. *J. Geophys. Res.* 108 (A5), 1164, 2003.
- Sutton, E.K., Forbes, J.M., Nerem, R.S., Woods, T.N. Neutral density response to the solar flares of October and November, 2003. *Geophys. Res. Lett.* 33, 22101, 2006.
- Tsurutani, B.T., Mannucci, A., Iijima, B., Abdu, M.A., Sobral, J.H.A., Gonzalez, W.D., Guarnieri, F., Tsuda, T., Saito, A., Yumoto, K., Fejer, B., Fuller-Rowell, T.J., Kozyra, J., Foster, J.C., Coster, A., Vasyliunas, V.M. Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields. *J. Geophys. Res.* 109, A08302, doi:10.1029/2003JA010342, 2004, 2004.
- Tsurutani, B.T., Judge, D.L., Guarnieri, F.L., and 16 colleagues. The October 28, 2003 extreme EUV solar flare and resultant extreme ionospheric effects: Comparison to other Halloween events and the Bastille Day event. *Geophys. Res. Lett.* 32, 3, 2005.
- Tsurutani, B.T., Verkhoglyadova, O.P., Mannucci, A.J., Saito, A., Araki, T., Yumoto, K., Tsuda, T., Abdu, M.A., Sobral, J.H.A., Gonzalez, W.D., McCreadie, H., Lakhina, G.S., Vasyliunas, V.M. Prompt penetration electric fields (PPEFs) and their ionospheric effects during the great magnetic storm of October 30–31, 2003. *J. Geophys. Res.* 113, A5, A05311, doi:10.1029/2007HA012879, 2008.
- Tsurutani, B.T., Verkhoglyadova, O.P., Mannucci, A.J., Lakhina, G.S., Li, G., Zank, G.P. A brief review of “solar flare effects” on the ionosphere. *Radio Sci.* 44, RS0A17, doi:10.1029/2008RS004029, 2009.

- Wang, Y.M., Ye, P.Z., Wang, S., Zhou, G.P., Wang, J.X. A statistical study on the geoeffectiveness of Earth-directed coronal mass ejections from March 1997 to December 2000. *J. Geophys. Res.* 107, 1340, 2002.
- Xie, H., Ofman, L., Lawrence, G. Cone model for halo CMEs: Application to space weather forecasting. *J. Geophys. Res.* 109, 3109, 2004.
- Yashiro, S., Akiyama, S., Gopalswamy, N., Howard, R.A. Different power-law indices in the frequency distributions of flares with and without coronal mass ejections. *Ap. J.* 650, L143–L146, 2006.
- Zhang, D.H., Xiao, Z. Study of ionospheric response to the 4B flare on 28 October 2003 using international GPS Service network data. *J. Geophys. Res.* 110, 3307, 2005.
- Zhang, D.H., Mo, X.H., Cai, L., Zhang, W., Feng, M., Hao, Y.Q., Xiao, Z. Impact factor for the ionospheric total electron content response to solar flare irradiation. *J. Geophys. Res.* 116, A04311, doi:10.1029/2010JA016089, 2011.
- Zhang, J., Dere, K.P., Howard, R.A., Bothmer, V. Identification of solar sources of major geomagnetic storms between 1996 and 2000. *Ap J.* 582, 520–533, 2003.
- Zhang, M., McKibben, R.B., Lopate, C., Jokipii, J.R., Giacalone, J., Kallenrode, M.-B., Rassoul, H.K. Ulysses observations of solar energetic particles from the 14 July 2000 event at high heliographic latitudes. *J. Geophys. Res.* 108, 1154, 2003.

3.2. Análisis fractal y ondeletas de perturbaciones ionosféricas a latitudes medias asociadas con tormentas geomagnéticas

López-Montes, R., Pérez-Enríquez R., Araujo-Pradere E. A, López Cruz-abeyro, J. A. 2014. Fractal and wavelet analysis evaluation of the mid latitude ionospheric disturbances associated with major geomagnetic storms. Advances in space research.

Las variaciones del contenido total de electrones (TEC) de la ionosfera están principalmente asociadas a las grandes tormentas geomagnéticas que se producen con la llegada de las eyecciones de masa coronal (EMC) al medio ambiente terrestre. El propósito de este trabajo es mostrar los resultados del análisis que hemos hecho de los efectos de todas las grandes tormentas geomagnéticas ($Dst < -200nT$) sobre la ionosfera a latitudes medias, que se hayan producido desde el año 2000. El análisis consiste en el cálculo de TEC ionosférico con datos de varias estaciones GPS en México, con el fin de cuantificar el impacto en la ionosfera a estas latitudes, a través de variaciones en la amplitud, índice de Hurst, que es la rugosidad, y en la transformada ondeleta de las series de tiempo de TEC. Durante las tormentas geomagnéticas del 7 de abril de 2000, 16 de julio 2000, 30 de octubre de 2003, noviembre 20, 2003 y el 8 de noviembre de 2004, las principales perturbaciones de la ionosfera en latitudes medias, presentaron cambios en la amplitud del TEC desde 3.29 a 8.82 sigmas. Estas perturbaciones ionosféricas están probablemente asociadas con el PPEF, y los vientos ecuatoriales neutros. Por otro lado, durante cuatro tormentas geomagnéticas (2 de agosto de 2000, 31 de marzo 2001, 11 de abril de 2001 y 15 de mayo de 2005), se observaron tormentas ionosféricas negativas que empujaron al TEC a valores significativamente más bajos. Esto ha sido interpretado como la presencia de regiones donde la composición neutral atmosférica cambió. También, en algunos casos durante los días perturbados, los valores de Hurst fueron menores que durante los días tranquilos, es decir, durante estas tormentas geomagnéticas, la rugosidad de las series de tiempo de TEC aumenta. El análisis de ondeletas mostró una fuerte influencia de la variación diurna en los valores de TEC (periodicidades de 12 horas), además, las periodicidades características de las perturbaciones de la ionosfera de 1 a 8 horas. se encontró que las grandes tormentas geomagnéticas producen perturbaciones ionosféricas significativas a latitudes medias, y que el exponente de Hurst puede mostrar anomalías en las series de tiempo de TEC no detectadas por el análisis de ondeletas.



Fractal and wavelet analysis evaluation of the mid latitude ionospheric disturbances associated with major geomagnetic storms

Rebeca López-Montes^a, Román Pérez-Enríquez^{a,*}, Eduardo A. Araujo-Pradere^b,
Jose Antonio López Cruz-Abeyro^a

^a Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico

^b CIRES, University of Colorado, Boulder, CO, United States

Received 1 September 2014; received in revised form 24 October 2014; accepted 29 October 2014
Available online 4 November 2014

Abstract

Variations of the total electron content (TEC) of the ionosphere are mainly associated with major geomagnetic storms occurring with the arrival of coronal mass ejections (CMEs) to the Earth environment. The purpose of this paper is to show results of the analysis we made of the impact of all major geomagnetic storms ($Dst < -200$ nT) on the ionosphere at mid latitudes, which have occurred since 2000. The analysis consists in the calculation of TEC of the ionosphere using data from several Mexican GPS stations, with the purpose of quantifying the impact into the ionosphere to these latitudes, through the variations in amplitude, Hurst index, that is roughness, and wavelet transform of the time series of TEC. Indeed, during the geomagnetic storms of April 7, 2000, July 16, 2000, October 30, 2003, November 20, 2003 and November 8, 2004, major ionospheric disturbances at mid latitudes took place with changes in amplitude of TEC going from 3.29 to 8.82 sigmas. These ionospheric disturbances were probably associated with prompt penetration electric fields (PPEFs) and equatorward neutral winds. On the other hand, during four geomagnetic storms (August 12, 2000, March 31, 2001, April 11, 2001 and May 15, 2005), there were negative ionospheric storms that pushed the TEC to significantly lower values. This has been interpreted as the presence of regions in which the neutral composition is changed. Also, in some cases during the disturbed days, the Hurst values were smaller than during the undisturbed days, i.e. during these geomagnetic storms, the roughness of the time series of TEC increased. The wavelet analysis showed a strong influence of the diurnal variation on TEC values (periodicities of 12 h), and periodicities characteristics of ionospheric disturbances of 1–8 h. It is found that large geomagnetic storms produce significant ionospheric disturbances at mid latitudes, as shown by the wavelet analysis and, in some cases, changes in the roughness of the time series of TEC as shown by the Hurst exponent.

© 2014 COSPAR. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Total electron content; Geomagnetic storms; Ionospheric disturbances; Fractal analysis; Wavelet analysis

1. Introduction

The Earth's ionosphere is generated by the ionization produced by the solar ultraviolet radiation upon arriving

to the top of the atmosphere (Appleton and Barnett, 1925; Ratcliffe and Ashworth, 1972). However, the variations of the total electron content (TEC) of the ionosphere are mainly associated with geomagnetic storms occurring with the arrival of coronal mass ejections (CMEs) to the Earth environment (see Mendillo (1973) and Fuller-Rowell et al. (1994)). Furthermore, during geomagnetic storms, magnetospheric electric fields penetrate into the ionospheric causing ionospheric variations. In fact, during major geomagnetic storms, associated with southward

* Corresponding author.

E-mail addresses: rebecamont@gmail.com, rebeca@geociencias.unam.mx (R. López-Montes), roman@geociencias.unam.mx (R. Pérez-Enríquez), Eduardo.Araujo@noaa.gov (E.A. Araujo-Pradere), lcabeyro@geociencias.unam.mx (J.A. López Cruz-Abeyro).

interplanetary magnetic field (IMF), dayside positive ionospheric storms are caused by eastward prompt penetration electric fields (PPEFs) and equatorward neutral wind (Lin et al., 2005; Lu et al., 2008; Tsurutani et al., 2008; Balan et al., 2010) and the negative ionospheric storms are caused by the composition change effect of equatorward neutral winds (Prölss, 1991; Prölss, 1993; Fuller-Rowell et al., 1994). Other important mechanisms in the formation of the ionospheric disturbances during a geomagnetic storm, are the heat energy obtained from joule heating and the impact of auroral particles. These polar disturbances are modified in density, height and latitude by local atmospheric conditions, thermospheric winds, local time, among others, and they are transported at high speeds toward mid latitudes (Prölss, 1991, 1993; Millward et al., 1993; Fuller-Rowell et al., 1994). In spite of the fact that the high energy electromagnetic radiation like ultraviolet and X-rays intensifies during large solar flares, their impact on the diurnal variation of TEC is usually of little importance.

Currently, one of the most frequently used techniques to explore the ionospheric behavior changes due to the influence of space weather, is the calculation of TEC from Global Positioning System (GPS) data (Sardón et al., 1994; Eftaxiadis et al., 1999; Arikani et al., 2003; Stankov et al., 2003; Blagoveshchensky et al., 2005; Afraimovich et al., 2008; Rothkaehl et al., 2008; Bishop et al., 2009). This is a relatively low-cost system consisting of a large global network of GPS devices, with a good spatial distribution and with a virtually free access to the data.

In fact, in López-Montes et al. (2012), when large X-ray class flares were analyzed using TEC, a clear relationship of ionospheric disturbances associated with PPEFs and equatorward neutral winds during geomagnetic storms was found. Examples of this were the storms of July 2000, April 2001, Halloween 2003, January 2005 and December 2006.

The purpose of this paper is to show results of the analysis we made of the impact of all major geomagnetic storms ($Dst < -200$ nT) on the ionosphere at mid latitudes, which have occurred since 2000 (taken from World Data Center for Geomagnetism, Kyoto¹), regardless of whether there is any previous geomagnetic activity. Such analysis consists on studying variations of the amplitude, Hurst index, and the wavelet transform of the time series of TEC using data from several GPS Mexican stations, during these periods.

In the next section we show the storms chosen for the analysis, and the GPS stations used for calculating the TEC (in units of 10^{16} electrons m^{-2}) for each storm. We also describe the fractal method used to measure changes in the roughness and the wavelet analysis performed on the TEC series. In Section 3 we show the results of the analysis storm by storm. Finally, in Section 4 we discuss the results obtained and give a possible explanation of them in the contest of the present literature.

2. Data analysis

For this analysis, a total of 11 geomagnetic storms were analyzed (see Table 1) where the Dst_{Min} and ap index maximum values are given, together with the time and speed of the first associated CME (The CME catalog used is generated and maintained at the CDAW Data Center by NASA and The Catholic University of America in cooperation with the Naval Research Laboratory. SOHO is a project of international cooperation between ESA and NASA) and, when it was the case, the flare intensity that could be associated. TEC was calculated (see Erickson et al. (2001) and Araujo-Pradere (2005)) for eight days around the event, and we use one of the 6 GPS Mexican stations in Table 2 for which we could find data for the events considered. For each storm we took for the analysis the one with more data.

In Table 3, the maximum Dst fall, the maximum, mean and variation of TEC with respect to the mean in standard deviations as given by the formula $Var = \frac{(TEC)_{max} - (TEC)_{mean}}{std(TEC)}$, as well as the maximum and minimum values of Hurst index for each storm are shown. To calculate the Hurst index, we used the Benoit 1.3 program (TruSoft Intern, 1999). This we did for 256 points in the series so that a total of 12 values are given for every event.

We also calculated the wavelet transform of the detrended TEC time series for the same periods to eliminate the diurnal variations. The calculation of the wavelet is important because it provides information about the frequencies at which variations occur, as well as the times where they occur.

2.1. Hurst exponent

The Hurst exponent was proposed by the hydrologist Harold Edwin Hurst in 1951 with the technique of Rescaled range analysis (R/S) (Hurst, 1951). The Hurst exponent measures the growth of the standardized range of the partial sum of deviations of a data set from its mean (Ellis, 2007) for the time series. If we have a function $h(x)$, of one variable, i.e., fractional Brownian motion (Falconer, 1990), where x is the horizontal variable and h , the vertical, the self-affinity is defined by (Simonsen et al., 1998)

$$x \rightarrow \lambda x, \quad (1)$$

$$h \rightarrow \lambda^H h, \quad (2)$$

where H is the Hurst exponent, and if both are combined, can create the affine group. In fact, Therefore, the self-affine surfaces are invariant under the affine group. This invariance can be expressed by

$$h(x) \simeq \lambda^{-H} h(\lambda x), \quad (3)$$

where \simeq represents the statistical equality. The Hurst exponent, is limited to the range $0 \leq H \leq 1$ and is associated with the fractal dimension with a simple expression:

¹ WDC for Geomagnetism, Kyoto: <<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst-dir/>>.

Table 1
Geomagnetic storms analyzed with first associated CME.

Date	Dst _{Min} (nT)	ap	Date of first CME	CME speed(km/s)
07/04/2000	–288	300	04/04	1188
16/07/2000	–301	400	14/07	1674
12/08/2000	–235	179	11/08	1071
31/03/2001	–387	300	29/03	942 ^a
11/04/2001	–271	236	09/04	1192 ^b
06/11/2001	–292	300	04/11	1810
24/11/2001	–221	236	22/11	1443 ^c
30/10/2003	–383	400	28/10	2459 ^d
20/11/2003	–422	300	18/11	1660 ^e
08/11/2004	–374	300	06/11	1759
15/05/2005	–247	236	13/05	1689

^a There was a narrow (38 deg) CME on 30/03 with a speed of 1072 km/s.

^b Four Halo CMEs were reported from 09/04 including one with a speed of 2411 km/s on 10/04.

^c There were two nearly simultaneous Halo VMEs, the second with a speed of 1437 km/s.

^d There was a second Halo CME on 29/10 with a speed of 2029 km/s.

^e There was a second CME of > 197 deg, also on 18/11, with a speed of 1824 km/s.

Table 2
Mexican GPS stations used in the analysis.

Monument name	Monument code	Geogr. Coord. (deg)	Geomagn. Lat. (deg)
Cayaco	Caya	17.05N 100.27W	26.04N
Cicese	Cic1	31.87N 116.67W	39.87N
La Palma	Oxlp	16.14N 97.05W	25.05N
Pinotepa Nacional	Pino	16.39N 98.13W	25.24N
Popocatepetl North	Popn	19.06N 98.64W	28.82N
San Pedro Martir	Spmx	31.05N 115.47W	38.18N

Table 3
Variation of the TEC during geomagnetic storms.

Date	Maximum TEC	Mean	Std. dev.	Variation	H _{max}	H _{min}
07/04/2000	215.99	69.82	33.83	4.32	0.952	0.654
16/07/2000	123.07	32.50	21.43	4.23	0.927	0.684
12/08/2000	69.19	31.57	16.87	2.23	0.903	0.657
31/03/2001	113.05	44.12	24.82	2.78	0.991	0.859
11/04/2001	161.63	60.08	30.89	3.29	0.861	0.628
06/11/2001	111.7	38.28	28.77	2.55	0.988	0.709
24/11/2001	84.5	29.93	23.24	2.35	0.954	0.679
30/10/2003	393.57	41.89	39.86	8.82	0.992	0.204
20/11/2003	140.69	27.54	24.72	4.58	0.888	0.757
08/11/2004	72.91	11.21	10.51	5.87	0.964	0.870
15/05/2005	57.72	18.88	10.92	3.56	0.937	0.550

$$D = 2 - H,$$

where D is the fractal dimension, H is the Hurst exponent and 2 is the Euclidean dimension. When the value of the Hurst exponent is $H > 0.5$ we have a persistent behavior (positive correlations to long-term); if the value is $H < 0.5$ then the process is considered antipersistent (negative correlations to long-term); and if $H = 0.5$ it means that the process is considered to be “white noise” (Brownian motion). In other words, when the values of H moves toward zero, it means that the roughness of the time series grows (Mandelbrot, 1986).

The Hurst exponent of TEC was calculated with Benoit 1.3 program, using the wavelet method. The wavelet transform has a fractal character and is especially useful when applied to multi-scale time series not periodic and non-stationary and provides information of the time series in space and frequency (Malamud and Turcote, 1999). It is also useful to determine both the trend and the dominant variability, as well as its variation in time.

The wavelet is given by

$$W_{\psi}(f(a, b)) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (4)$$

where ψ is the wavelet, a is the translation and b is the dilation (Weisstein, 2008).

In the software package Benoit 1.3 (TruSoft Intern, 1999), this method considers n step function wavelet transforms, each one presenting a different scale coefficient a_i , where S_1, S_2, \dots, S_n are the zero standard deviation for the respective scale coefficient a_i . The standard deviation ratio is defined as G_1, G_2, \dots, G_{n-1} , where $G_1 = S_1/S_2$, $G_2 = S_2/S_3, \dots, G_{n-1} = S_{n-1}/S_n$, and can be estimated as:

$$G_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} G_i}{n-1},$$

where $n = 4$ and $a_i = 2^i$ for $i = 0, 1, 2, 3$. The Hurst exponent is defined as $H = f(G_{avg})$, where f is a heuristic function that is approximated to H using G_{avg} for the stochastic self-affine traces (Torres-Argüelles et al., 2010). The Hurst exponent was calculated for the whole period with a running window of 256 values (2^8) and a time lag of 12 h. This give us a total of 12 points for event.

2.2. Wavelet of TEC

While the Hurst exponent gives the roughness of the time series, the wavelet transform can map the power of a particular frequency at different times, giving an expansion of the signal in both time and frequency. Furthermore, the wavelet transform not only tells us which frequencies can exist in the signal, but also allows us to see whether a particular scale varies in time.

To see the behavior of the irregularities of TEC associated with a geomagnetic storm, we plot the time series of TEC and then, we remove the diurnal variation using a discrete wavelet transform that separates the approximate and detail components of the time series, and then, the wavelet spectrum is obtained. The wavelet analysis used in this work was based mainly on the wavelet software provided by Torrence and Compo,² which was programmed in MatLab.

3. Results of the analysis of 11 major geomagnetic storms from 2000 to 2005

We analyzed a total of 11 geomagnetic storms, through the calculation of TEC, a GPS station per event, for eight days around the time of the storm. We obtained the values of variation and mean of the time series of TEC and the Hurst exponents calculated for each time series of TEC, as mentioned above (see Table 3). Fig. 1 shows the results of TEC and Hurst exponent for the geomagnetic storm of 16 July 2000, and the Dst and ap indexes. This is an example of a case in which there was a positive ionospheric storm. Fig. 2 on the other hand, shows the geomagnetic storm of 15 May 2005, which corresponds to a negative ionospheric storm.

Concerning the wavelet analysis, plots showing the TEC series, the detrended TEC series, the wavelet spectrogram, the power spectrum for the whole interval and the variance were constructed. The power spectrum shows the 12-h semi-diurnal variation, whereas the variance shows that the maximum variation coincides with the time of the disturbance. The wavelet spectrogram window depicts the periodicities associated with the observations. The black lines here and in the power spectrum represents the 95% significance level. This is shown in Figs. 3 and 4 where, again, the geomagnetic storm of 16 July 2000, and 15 May 2005 were used. Fig. 3 shows the 12-h periodicity corresponding to semi-diurnal variation; a disturbance of about 3–4 h; and a smaller one of less than 1 h on the 16th and 18th, corresponding to the time of the geomagnetic storm and recovery time, respectively. Fig. 4 shows a highly perturbed period during the days May 12–14, with 1.5, 4, and 6 h periodicities. Also, during May 18 we observed periodicities of 4 and 6 h, but no appreciable disturbances are visible during the storm proper.

Fig. 5 shows the results obtained for each one of the events, except those corresponding to July 2000 and May 2005 (see above). The variations observed for the remaining 9 geomagnetic storms in Fig. 5 are summarized as follows: Fig. 5(a) for the April 7, 2000, the wavelet shows disturbances of about 2 h on April 5, and variations of 1 and 2 h on April 7; Fig. 5(b) for 12 August, 2000, the wavelet shows a variation of 6 h around the 10th, and on the 12th a 4 h and a 1 h periodicity; Fig. 5(c) for March 31, 2000, the wavelet shows disturbances of 1 and 4 h on March 28, smaller ones of 1 and 3 h on the 31st, and a 4 h periodicity on April 2; Fig. 5(d) for April 11, 2001, the wavelet shows a highly perturbed period with disturbances of about 1.5, 3, 4, and 6 h, especially during April 11 and 15; Fig. 5(e) for November 6, 2001, the wavelet shows no appreciable disturbances, except for a small one from November 5 to 7; Fig. 5(f) for November 24, 2001, the wavelet barely shows a 6 h periodicity; Fig. 5(g) for October 30, 2003, the wavelet shows a maximum power at a 1 h periodicity on October 30, but disturbances of 1–8 h are present on October 30 and 31; Fig. 5(h) for November 20, 2003, the wavelet shows disturbances of 1, 2, and 6 h during November 20 and 22, and a 3 h periodicity on November 19; Fig. 5(i) for November 8, 2004, the wavelet shows disturbances of 1 and 3 h on November 8.

4. Discussion

In this paper 11 large geomagnetic storms (-200 nT) that occurred from 2000 to date, were analyzed using the time series of the total electron content in the ionosphere at mid latitudes, with data from GPS stations located in Mexico. The parameters studied were the amplitude of TEC during geomagnetic storms, the fractal behavior of TEC (Hurst exponent), which corresponds to measured changes of the roughness of the time series, and the wavelet

² Wavelet software: <<http://atoc.colorado.edu/research/wavelets/>>.

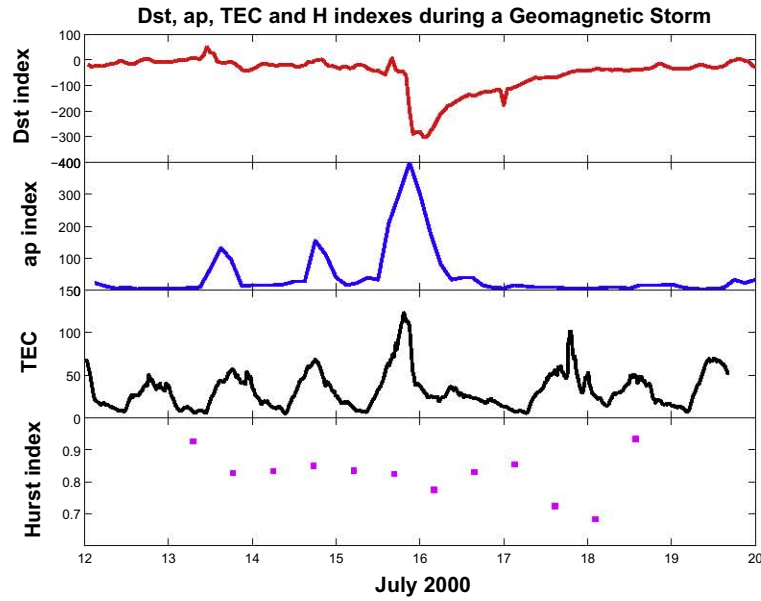


Fig. 1. Comparison between TEC and Hurst exponent, during the period July 12–19, 2000. In the tow upper panels the behavior of ap and Dst indexes for the days analyzed are shown. Then in the third panel the time series of TEC (station Caya) is shown, and in the fourth panel the calculated Hurst exponent is shown, obtained every 256 points in the time series of TEC, for a total of 12 points per event.

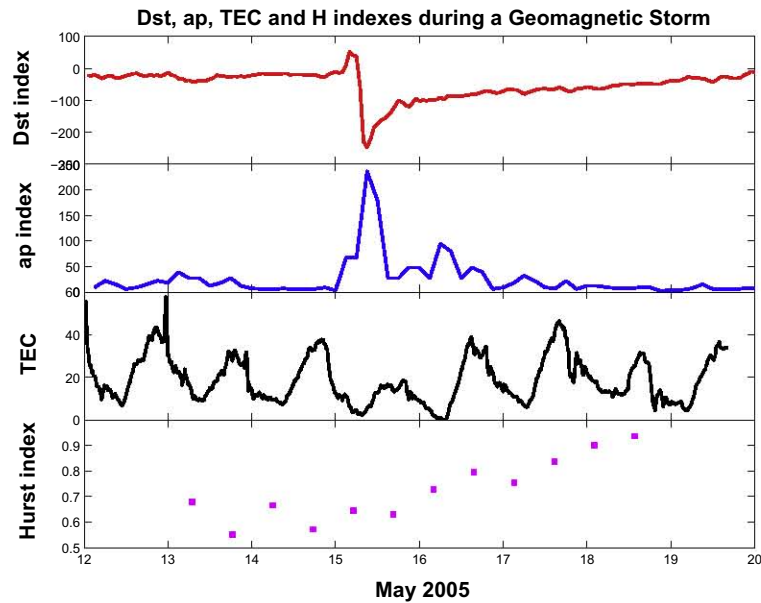


Fig. 2. Comparison between TEC and Hurst exponent, during the period May 12–19, 2005. In the tow upper panels the behavior of ap and Dst indexes for the days analyzed are shown. Then in the third panel the time series of TEC (station Oxp) is shown, and in the fourth panel the calculated Hurst exponent is shown, obtained every 256 points in the time series of TEC, for a total of 12 points per event.

spectrogram to seek for periodicity characteristics of ionospheric perturbations.

In general, one would expect the ionosphere to be perturbed by the occurrence of a geomagnetic storm. However, as shown below this is not always the case when considerations such as the geographic location of the stations or local atmospheric conditions are taken into account:

4.1. Ionospheric disturbances associated with the geomagnetic storm

In this paper it was found that several of the geomagnetic storms analyzed had a great influence on the ionosphere at mid latitudes. The results obtained can be summarized as follow:

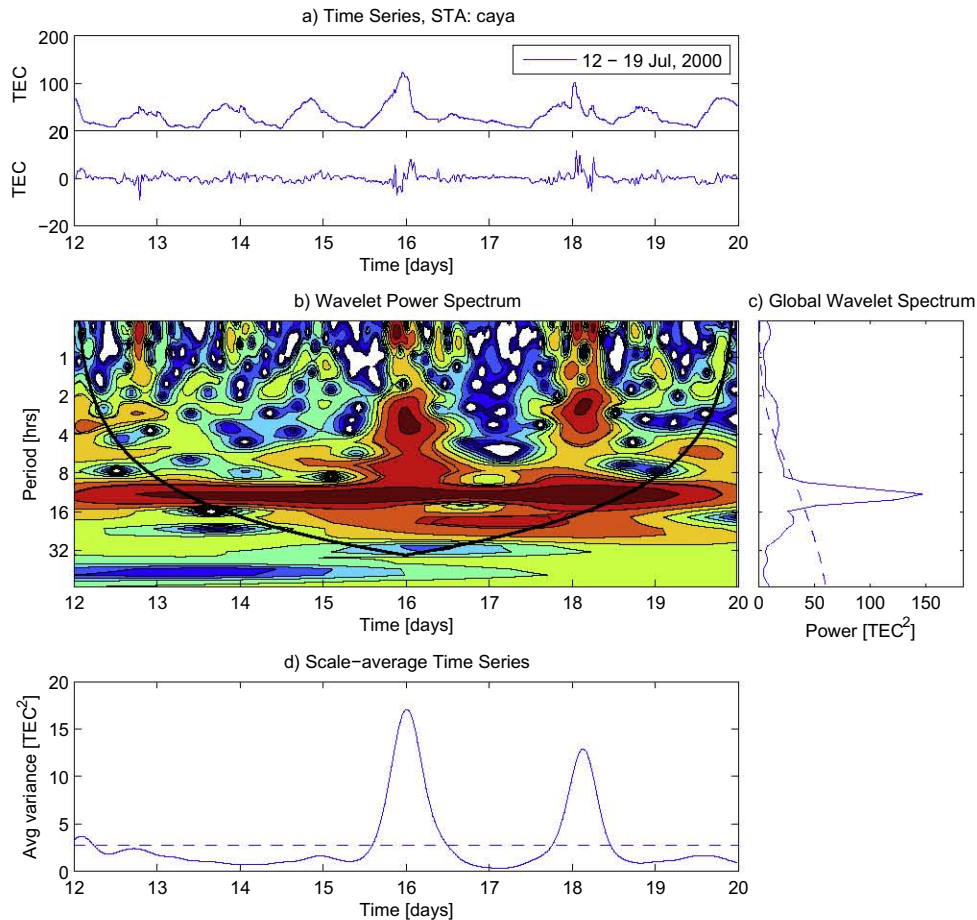


Fig. 3. Wavelet analysis for the period July 12–19, 2000, for the time series of TEC (station Caya). The figure is divided into four panels. (a) Trended and non-trended time series of TEC; (b) wavelet transform window depicting the periodicities associated with the observations, applied directly to the detrended time series; (c) power spectrum for the whole interval; and (d) the average variance.

1. The geomagnetic storms of April 7, 2000, July 16, 2000, October 30, 2003, November 20, 2003 and November 8, 2004, caused major ionospheric disturbances at mid-latitudes. The time series of TEC showed amplitude changes going from 3.29 to 8.82 sigmas, where the storm of October 30, 2003 (Halloween storms), caused the greatest affection (8.82 sigmas, Table 3). These ionospheric disturbances were probably associated with the PPEFs and equatorward neutral winds. These events have been analyzed by several authors (see for instance, Caroubalos (2001), Immel et al. (2003), Zhang et al. (2003), Araujo-Pradere (2005), Blanch et al. (2005), Huba et al. (2005), Tsurutani and 18 (2005), Zhang and Xiao (2005), Mannucci et al. (2005), Sutton et al. (2006), Liu et al. (2007), Kane (2009), Rao et al. (2009)), who also found large ionospheric disturbances at different latitudes. For example, for the storm of July 16 2000, Araujo-Pradere (2005) reported ionospheric disturbances of TEC, reaching up to 250 percent higher than a typical quiet day fASR-D-14-00545 or a given location (28.46N latitude). Also for the Halloween storms, Zhang and Xiao (2005) reported increases of up to 300 percent in the TEC. Furthermore, for the storm of November 20, 2003, Blanch et al. (2005) reported the existence of a thin latitudinal belt (55–45N) with depressed TEC (negative effect) and an additional latitudinal belt (45–30N), with enhanced TEC (positive effect).
2. During most storms (except November 20, 2003 and November 8, 2004), the Hurst exponent values showed increases in roughness. During the disturbed days, the H values tended to 0.5 and, during undisturbed days the H values are close to 1 (see the last two columns of Table 3). Therefore, during these geomagnetic storms, the roughness of the time series of TEC increases, but retaining a persistent behavior.
3. During the storm of October 30, 2003 (Halloween storms), H values of 0.2 and 0.4 were obtained, so that the roughness of the time series of TEC increases considerably, which means that the time series behavior is anti-persistent (see Fig. 6).
4. In the wavelet analysis, a strong influence of the semidiurnal variation of TEC (periodicities of 12 h) is observed, but also, periodicities characteristic of ionospheric disturbances (1–6 and 8 h) are clearly visible. These are probably due to the presence of the geomagnetic storm.

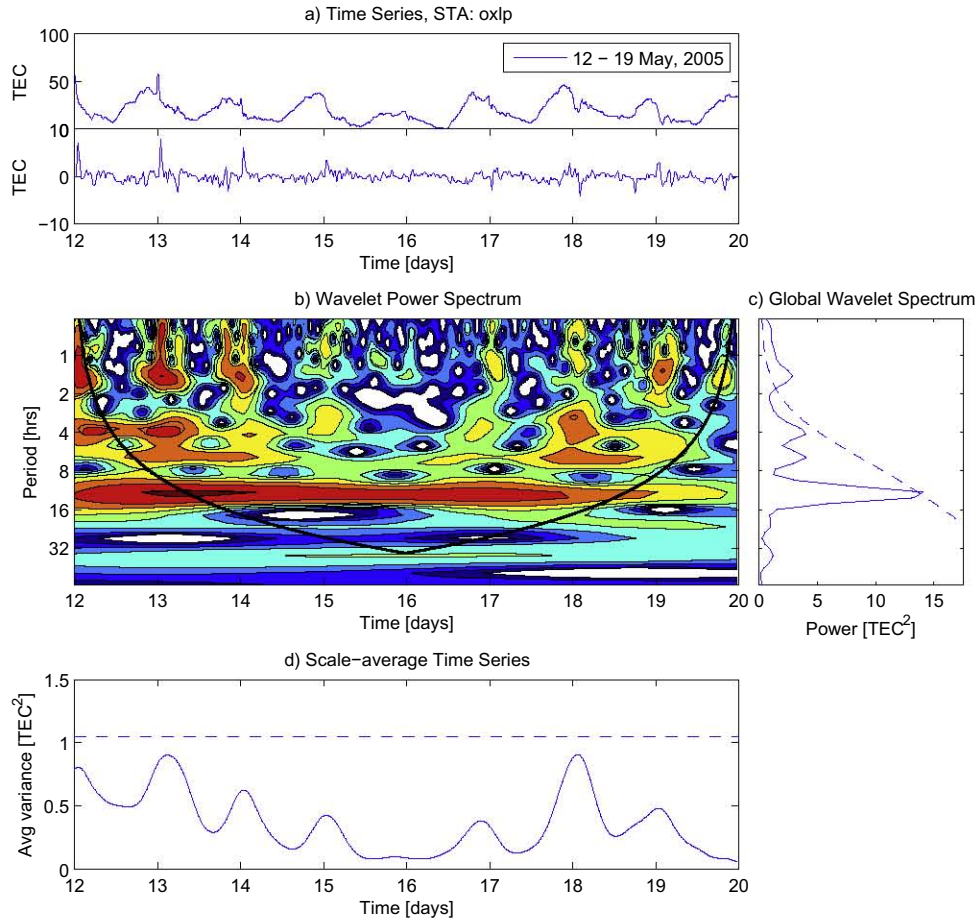


Fig. 4. Wavelet analysis for the period May 12–19, 2005, for the time series of TEC (station Oxlp). The figure is divided into four panels. (a) Trended and non trended time series of TEC; (b) wavelet transform window depicting the periodicities associated with the observations, applied directly to the detrended time series; (c) power spectrum for the whole interval; and (d) the average variance.

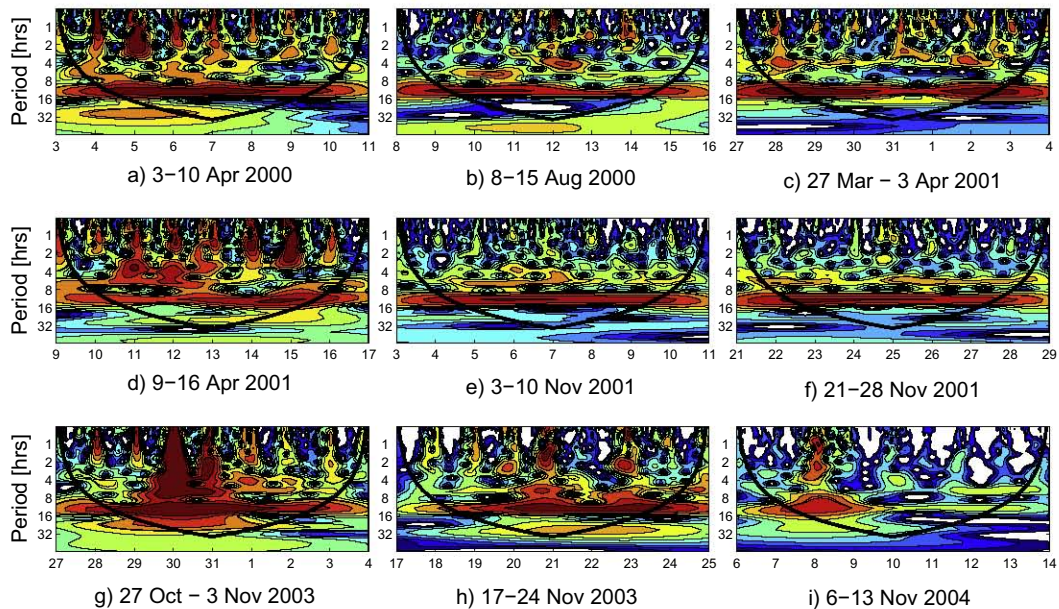


Fig. 5. Wavelet analysis for 8 geomagnetic storms. All periods show the 12-h semi-diurnal variation. For the other variations see text.

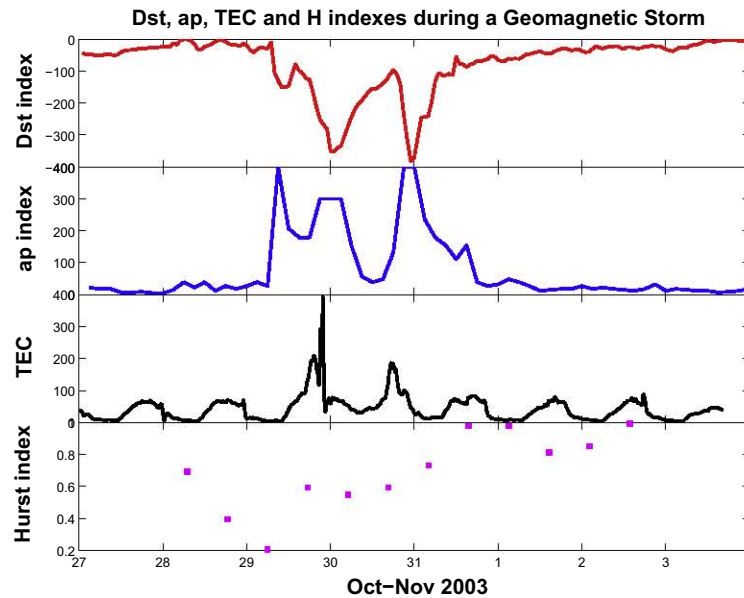


Fig. 6. Comparison between TEC and Hurst exponent, during the period October 27–November 3, 2003. In the two upper panels the behavior of ap and Dst indexes for the days analyzed are shown. Then in the third panel the time series of TEC (station Popn) is shown, and in the fourth panel the calculated Hurst exponent is shown, obtained every 256 points in the time series of TEC, for a total of 12 points per event.

5. Again, in the wavelet analysis, the Halloween storms present a different behavior from the other storms. In this case, both the wavelet and the power spectrum show that the periodicities associated with the ionospheric disturbances are more important than the semi-diurnal periodicities (see Fig. 7). This is not surprising considering that there were several events and they constituted some of the most intense ever registered, making the whole period very complex. Then, either by the high values of TEC, by the great increase in roughness or by the large periodicities, the Halloween storms are an important example of the great influence of the geomagnetic storms on the ionosphere at mid latitudes.
6. It is important to point out that for the event of 16 July 2000 where both the wavelet and the variance show that the most important perturbations occur during the beginning of the storm, the Hurst exponent shows a tendency toward smaller values during the recovery time. This implies a greater roughness in the time series, which means that there is an anomaly otherwise not considered.

4.2. Ionospheric disturbances occurring before the geomagnetic storm

In the analysis it was found that some of the storms showed ionospheric disturbances before the onset of the actual geomagnetic storm. This is the case of the storms of April 7, 2000, March 31, 2001, April 11, 2001 and May 15, 2005, where there were significant TEC disturbances before the onset of the geomagnetic storm. Furthermore, in

two cases, the April 5, 2000 and May 13, 2005, the TEC perturbations observed are the largest in all the period analyzed (4.32 and 3.56 sigma, respectively).

Also, during these disturbed days (except during storm March 31, 2001), the values of H are lower than in the undisturbed days. Therefore, the roughness of the time series increases during the ionospheric disturbances. In the wavelet analysis, periodicities associated with these ionospheric disturbances of 1–6 h were observed.

One possible explanation for the occurrence of these disturbances before the onset of the storm is that the geomagnetic field is highly perturbed during the periods analyzed, showing variations going from -30 nT to -100 nT in Dst index. We believe that all this activity is directly related to the solar flares taking place.

4.3. Negative ionospheric storms

In this paper it was found that several of the geomagnetic storms analyzed had no apparent influence or caused a negative ionospheric storm on the ionosphere at mid latitudes. The results obtained can be summarized as follow:

1. The storms of November 6 and 24, 2001, showed no disturbance of the TEC values, possibly due to the influence of the local weather conditions (composition), thermospheric winds, and local time. However, both periods of analysis are highly altered, showing maximum values of TEC per day of about 100 TECu and values of 2.55 and 2.35 sigmas, respectively, due to the high solar activity at the time. Unlike these results, Maruyama and Ma (2004) reported that during the

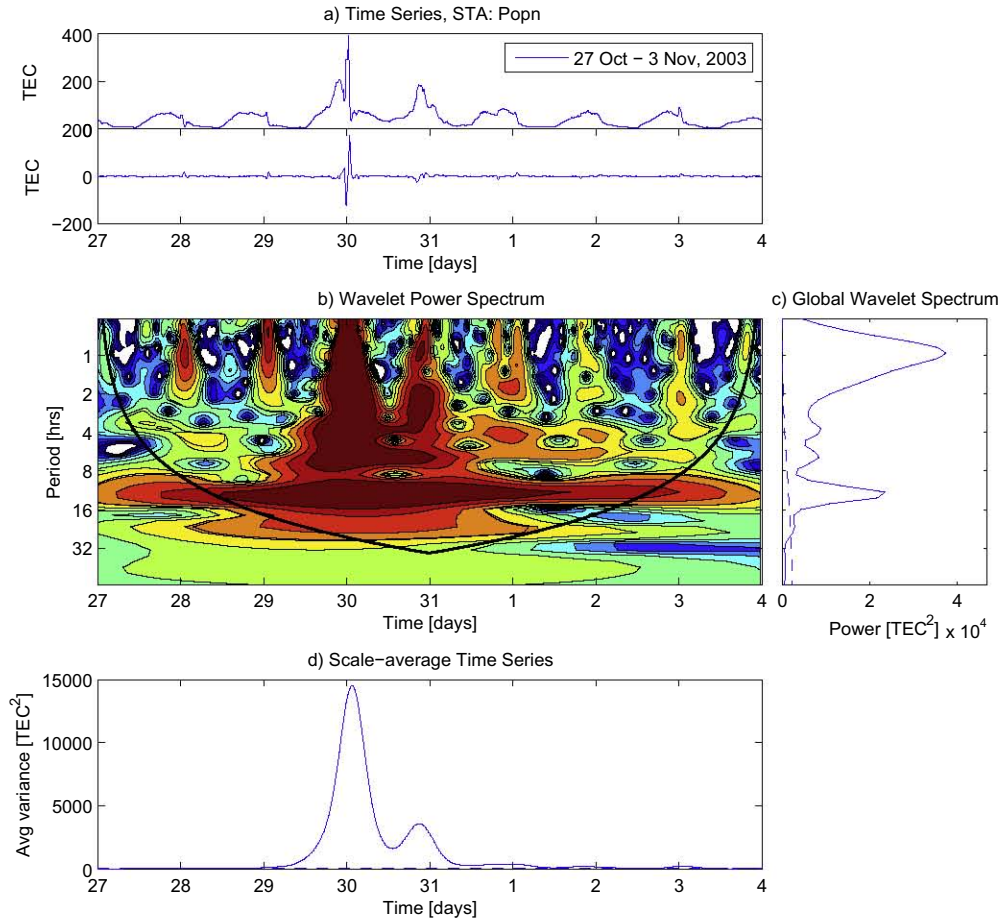


Fig. 7. Wavelet analysis for the period October 27–November 3, 2003, for the time series of TEC (station Popn). The figure is divided into four panels. (a) Trended and non trended time series of TEC; (b) wavelet transform window depicting the periodicities associated with the observations, applied directly to the detrended time series; (c) power spectrum for the whole interval; and (d) the average variance.

storm of November 6, 2001 there was a weak to moderate ionospheric positive storm in terms of foF2 and the TEC was nearly doubled in Japan during the daytime.

2. During four geomagnetic storms analyzed (August 12, 2000, March 31, 2001, April 11, 2001 and May 15, 2005), the TEC had an anomalous behavior, while the diurnal variation is significantly lower than the rest of the days of the analysis, that is, a negative ionospheric storm occurs at mid latitudes (see Fig. 2). The presence of these negative ionospheric storms, is probably due to regions in which the neutral composition is changed (Prölss, 1993). The neutral “composition bulge” is produced through heating by the magnetospheric energy input at auroral levels, causing upwelling of air that can then be moved to mid latitudes by nighttime equatorward winds, and brought into the dayside as the Earth rotates, such as it has been described by Prölss (1993) and extended by Fuller-Rowell et al. (1996). In addition, empirical models by Araujo-Pradere et al. (2002) show the dependence of the estimated variability of foF2 on latitude, season and geomagnetic activity. The storms of March 31, 2001 and May 15, 2005, have been studied by several authors (Shagimuratov et al.,

2003; Dashora et al., 2009; Jain et al., 2010). These works sample a strong positive ionospheric storm, but these works were made at different latitudes. For the storm of March 31, 2001, Shagimuratov et al. (2003) analyzed GPS stations located at high latitudes, whereas during the storm of May 15, 2005, Dashora et al. (2009) and Jain et al. (2010) studied GPS stations on the equatorial anomaly. This explains the different results due to the influence of local atmospheric conditions.

3. During the storm of August 12, 2000, despite the low values of TEC, due to the negative ionospheric storm, had a disturbed behavior. This anomalous behavior causes an increase of the roughness of the time series of TEC, and also, periodicities of 1 and 4 h during the storm (on the 12th).

A possible explanation of why geomagnetic storms of similar intensity caused both positive or negative ionospheric storms at mid-latitudes, is that according to Araujo-Pradere et al. (2006) in the cases where the ionosphere has a positive phase, this depends on the timing of the peak of the perturbation. Furthermore, when the peak occurs near midnight UT, the American continent is in the

afternoon/early evening sector, so it is highly affected by the prompt penetration of the eastward electric field, which will push the plasma up and poleward producing the positive phase. On the other hand, the negative effect will be seen in stations located in the post-midnight and forenoon sectors (Tsagouri et al., 2000). This coincides with most of the geomagnetic storms studied in this paper, where the geomagnetic storms that caused a positive ionospheric storm began near midnight UT (afternoon/early evening, local time) and the geomagnetic storms that caused a negative ionospheric storm, began after midnight or in the morning, local time.

In summary, it was found that large geomagnetic storms produce significant ionospheric disturbances at mid latitudes over Mexico. Large ionospheric disturbances are observed (positive phase), probably associated with the PPEFs and equatorward neutral wind. In addition, some events produced negative ionospheric storms (negative phase), probably due to changes in the neutral composition. It was also observed that during some of the disturbed days, the roughness of the time series of TEC, calculated by the Hurst exponent, increases with respect to the undisturbed days. The wavelet analysis showed a strong influence of the diurnal variation on TEC values, and periodicities characteristics of ionospheric disturbances. However, it has been shown that the Hurst exponent can detect changes in the roughness of the time series like those on 16 and 18 July 2000, with the latter presenting greater roughness, a fact that may be overlooked if considering only wavelet analysis. Therefore, this two methods are complementary to each other. Finally, concerning occurrence of the positive and negative phases during an ionospheric storm, it has been found that it is necessary to make a more detailed analysis of the ionosphere at different latitudes. Such analysis may be performed using global assimilation models such as NOAA's program MAGIC.

Acknowledgments

We thank the NOAA-SWPC for access to TEC calculation program. We also thank CORS, SOPAC and UNAVCO for putting their data on their respective websites from where the GPS data can be freely downloaded, as well as K. Oleschko for providing the program to the fractal analysis. The research has been made possible thanks to PAPIIT project IN 102913. RLM thanks CONACYT for her scholarship.

References

Afraimovich, E.L., Astafyeva, E.I., Oinats, A.V., Yasukevich, Y.V., Zhivetiev, I.V., 2008. Global electron content: a new conception to track solar activity. *Ann. Geophys.* 26, 335–344.

Appleton, E.V., Barnett, M.A.F., 1925. Local reflection of wireless waves from the upper atmosphere. *Nature* 115, 333.

Araujo-Pradere, E.A., 2005. GPS-derived total electron content response for the Bastille Day magnetic storm of 2000 at a low mid-latitude station. *Geofis. Int.* 44 (2), 211–218.

Araujo-Pradere, E.A., Fuller-Rowell, T.J., Codrescu, M.V., 2002. STORM: an empirical storm-time ionospheric correction model, 1. Model description. *Radio Sci.* 37 (5), 1070. <http://dx.doi.org/10.1029/2001RS002467>.

Araujo-Pradere, E.A., Fuller-Rowell, T.J., Spencer, P.S.J., 2006. Consistent features of TEC changes during ionospheric storms. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 68 (16).

Arikan, F., Erol, C.B., Arikan, O., 2003. Regularized estimation of vertical total electron content from global positioning system data. *J. Geophys. Res.* 108, 1469.

Balan, N., Shiokawa, K., Otsuka, Y., Kikuchi, T., Vijaya Lekshmi, D., Kawamura, S., Yamamoto, M., Bailey, G.J., 2010. A physical mechanism of positive ionospheric storms at low latitudes and midlatitudes. *J. Geophys. Res.* 115, A02304. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JA014515>.

Bishop, G.J., McNamara, L.F., Welsh, J., Decker, D.T., 2009. On the Relative Utilities of Data Types For Assimilation by Global Ionospheric Models. AGU Fall Meeting Abstracts (A1614).

Blagoveshchensky, D.V., Lester, M., Kornienko, V.A., Shagimuratov, I.I., Stocker, A.J., Warrington, E.M., 2005. Observations by the CUTLASS radar, HF Doppler, oblique ionospheric sounding, and TEC from GPS during a magnetic storm. *Ann. Geophys.* 23, 1697–1709.

Blanch, E., Altadill, D., Boška, J., Burešová, D., Hernández-Pajares, M., 2005. November 2003 event: effects on the Earth's ionosphere observed from ground-based ionosonde and GPS data. *Ann. Geophys.* 23, 30273034.

Caroubalos, C., 2001. ARTEMIS IV radio observations of the 14 July 2000 large solar event. *Sol. Phys.* 204, 165–177 (15 colleagues).

Dashora, N., Sharma, S., Dabas, R.S., Alex, S., Pandey, R., 2009. Large enhancements in low latitude total electron content during 15 May 2005 geomagnetic storm in Indian zone. *Ann. Geophys.* 27, 18031820.

Eftaxiadi, K., Cervera, M.A., Thomas, R.M. 1999. A Global Positioning System Receiver for Monitoring Ionospheric Total Electron Content. Defense Science and Technology Organization. DSTO-TR-0742.

Ellis, C., 2007. The sampling properties of Hurst exponent estimates. *Phys. A: Stat. Mech. Appl.* 375, 159–173.

Erickson, W.C., Perley, R.A., Flatters, C., Kassim, N.E., 2001. Ionospheric corrections for VLA observations using local GPS data. *Astron. Astrophys.* 366, 1071–1080.

Falconer, K., 1990. *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*. John Wiley & Sons Ltd.

Fuller-Rowell, T.J., Codrescu, M.V., Moffett, R.J., Quegan, S., 1994. Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 99, 3893–3914.

Fuller-Rowell, T.J., Rees, D., Quegan, S., Moffett, R.J., Codrescu, M.V., Millward, G.H. 1996. A coupled thermosphere–ionosphere model (CTIM). In: R.W. Schunk (Ed.), *STEP: Handbook of Ionospheric Models*, Sci. Comm. on Sol.-Terr. Phys., Boulder, Colo. pp. 239–279.

Huba, J.D., Warren, H.P., Joyce, G., Pi, X., Iijima, B., Coker, C., 2005. Global response of the low-latitude to midlatitude ionosphere due to the Bastille day flare. *Geophys. Res. Lett.* 32, 15103.

Hurst, H.E., 1951. Long-term storage capacity of reservoirs. *Am. Soc. Civil Eng.* 116, 770–808.

Immel, T.J., Mende, S.B., Frey, H.U., Østgaard, N., Gladstone, G.R., 2003. Effect of the 14 July 2000 solar flare on Earth's FUV emissions. *J. Geophys. Res.* 108, 1155.

Jain, A., Tiwari, S., Jain, S., Gwal, A.K., 2010. TEC response during severe geomagnetic storms near the crest of equatorial ionization anomaly. *Indian J. Radio Space* 39, 11–24.

Kane, R.P., 2009. Variations of geomagnetic Dst, auroral indices and cosmic ray intensity during 28–31 Oct 2003 Halloween events. *Indian J. Radio Space* 38, 245–253.

Lin, C.H., Richmond, A.D., Heelis, R.A., Bailey, G.J., Lu, G., Liu, J.Y., Yeh, H.C., Su, S.Y., 2005. Theoretical study of the low and mid-latitude ionospheric electron density enhancement during the October 2003 storm: relative importance of the neutral wind and the electric

- field. *J. Geophys. Res.* 110, A12312. <http://dx.doi.org/10.1029/2005JA011304>.
- Liu, H., Lühr, H., Watanabe, S., Köhler, W., Manoj, C., 2007. Contrasting behavior of the thermosphere and ionosphere in response to the 28 October 2003 solar flare. *J. Geophys. Res.* 112, 7305.
- López-Montes, R., Pérez-Enríquez, R., Araujo-Pradere, E.A., 2012. The impact of large solar events on the total electron content of the ionosphere at mid latitudes. *Adv. Space Res.* 49, 1167–1179.
- Lu, G., Goncharenko, L.p., Richmond, A.D., Roble, R.G., Aponte, N., 2008. A dayside ionospheric positive storm phase driven by neutral winds. *J. Geophys. Res.* 113, A08304. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JA012895>.
- Malamud, B.D., Turcote, D.L., 1999. Self-affine time series: measures of weak and strong persistence. *J. Stat. Plann. Inference* 80, 173–196.
- Mandelbrot, B.B. 1986. Self-affine fractals and fractal dimension. *Fractals in Physics*. North-Holland, Amsterdam. pp. 3–28.
- Mannucci, A.J., Tsurutani, B.T., Iijima, B.A., Komjathy, A., Saito, A., Gonzalez, W.D., Guarnieri, F.L., Kozyra, J.U., Skoug, R., 2005. Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29–30, 2003 halloween storms. *Geophys. Res. Lett.* 32, L12S02.
- Maruyama, T., Ma, G., 2004. TEC Storm on November 6, 2001, derived from dense GPS receiver network and ionosonde chain over Japan. *Radio Sci. Conf. Proc. Asia–Pac.*, 359–362.
- Mendillo, M., 1973. A study of the relationship between geomagnetic storms and ionospheric disturbances at midlatitudes. *Planet. Space Sci.* 21, 349–358.
- Millward, G.H., Moffett, R.J., Quegan, S., Fuller-Rowell, T.J., 1993. Effects of an atmospheric gravity wave on the midlatitude ionospheric F layer. *J. Geophys. Res.* 98, 19173–19179.
- Pröls, G.W., 1991. Thermosphere–ionosphere coupling during disturbed conditions. *J. Geomag. Geoelectr.* 43, 537–549.
- Pröls, G.W., 1993. On explaining the local time variation of ionospheric storm effects. *Ann. Geophys.* 11, 1–9.
- Rama Rao, P.V.S., Gopi Krishna, S., Vara Prasad, J., Prasad, S.N.V.S., Prasad, D.S.V.V.D., Niranjan, K., 2009. Geomagnetic storm effects on GPS based navigation. *Ann. Geophys.* 27, 21012110.
- Ratcliffe, J.A., Ashworth, J., 1972. *An Introduction to the Ionosphere and Magnetosphere*. University Press.
- Rothkaehl, H., Krakowski, A., Stanislawski, I., Bcki, J., Parrot, M., Berthelier, J.-J., Lebreton, J.-P., 2008. Wave and plasma measurements and GPS diagnostics of the main ionospheric trough as a hybrid method used for space weather purposes. *Ann. Geophys.* 26, 295–304.
- Sardón, E., Rius, A., Zarraoa, N., 1994. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from global positioning system observations. *Radio Sci.* 29 (3), 577–586.
- Shagimuratov, I.I., Krankowski, A., Baran, L.W., Cisak, J., Yakimova, G., 2003. Storm-time structure and dynamics of the ionosphere obtained from GPS observations. Report 23 of the Fifth Antarctic Geodesy Symp. Lviv, Ukraine.
- Simonsen, I., Hansen, A., Nes, O.M., 1998. Determination of the Hurst exponent by use of wavelet transforms. *Phys. Rev. E* 58, 2779.
- Stankov, S.M., Stankov, S.M., Jakowski, N., Heise, S., Muhtarov, P., Kutiev, I., Warnant, R., 2003. A new method for reconstruction of the vertical electron density distribution in the upper ionosphere and plasmasphere. *J. Geophys. Res.* 108 (A5), 1164.
- Sutton, E.K., Forbes, J.M., Nerem, R.S., Woods, T.N., 2006. Neutral density response to the solar flares of October and November, 2003. *Geophys. Res. Lett.* 33, 22101.
- Torres-Argüelles, V., Oleschko, K., Tarquis, A.M., Korvin, G., Gaona, C., Parrot, J.F.-., Ventura-Ramos, E., 2010. Fractal metrology for biogeosystems analysis. *Biogeosciences* 7, 3799–3815.
- TruSoft Intern. Inc.: Benoit 1.3 Software, 1999.
- Tsagouri, I., Belehaki, A., Moraitis, G., Mavromichalaki, H., 2000. Positive and negative ionospheric disturbances at middle latitudes during geomagnetic storms. *Geophys. Res. Lett.* 27.
- Tsurutani, B.T., 2005. The October 28, 2003 extreme EUV solar flare and resultant extreme ionospheric effects: comparison to other halloween events and the Bastille day event. *Geophys. Res. Lett.* 32, 3 (18 colleagues).
- Tsurutani, B.t., Verkhoglyadova, O.P., Mannucci, A.J., Saito, A., Araki, T., Yumoto, K., Tsuda, T., Abdu, M.A., Sobral, J.H.A., Gonzalez, W.D., McCreddie, H., Lakhina, G.S., Vasyliunas, V.M., 2008. Prompt penetration electric fields (PPEFs) and their ionospheric effects during the great magnetic storm of 30–31 October 2003. *J. Geophys. Res.* 113, A05311.
- Weisstein, E.W. 2008. From mathworld. A Wolfram Web Resource.
- Zhang, D.H., Xiao, Z., 2005. Study of ionospheric response to the 4B flare on 28 October 2003 using international GPS service network data. *J. Geophys. Res.* 110, 3307.
- Zhang, M., McKibben, R.B., Lopate, C., Jokipii, J.R., Giacalone, J., Kallenrode, M.-B., Rassoul, H.K., 2003. Ulysses observations of solar energetic particles from the 14 July 2000 event at high heliographic latitudes. *J. Geophys. Res.* 108, 1154.

3.3. Perturbaciones ionosféricas detectadas por MEXART

A. Carrillo-Vargas, R. Pérez-Enríquez, M. Rodríguez-Martínez, R. López-Montes, G. A. Casillas-Pérez, E. A. Araujo-Pradere. 2012. Ionospheric disturbances detected by MEXART. Advances in space research.

El radiotelescopio MEXART fue desarrollado para hacer observaciones de centelleo interplanetario (IPS) producido por perturbaciones de gran escala asociadas a eventos solares. En este trabajo se muestra que en ocasiones, hay perturbaciones en la ionosfera que se relacionan con estos eventos y que no sólo pueden contaminar la señal de IPS, si no que pueden ser la fuente principal de las oscilaciones observadas. Esto fue el caso del evento del 15 de diciembre de 2006 observado por MEXART, el cual presentó un centelleo claro. Se calculó el contenido total de electrones (TEC) de la ionosfera en México, para el mismo periodo. Se encontró que las variaciones en el TEC se relacionan con el centelleo detectado por MEXART.

Ionospheric disturbances detected by MEXART

A. Carrillo-Vargas^a, R. Pérez-Enríquez^{b,*}, Mario Rodríguez-Martínez^b,
R. López-Montes^b, G.A. Casillas-Pérez^c, E.A. Araujo-Pradere^d

^a Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Mexico

^b Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Centro de Geociencias, Blvd Juriquilla 3001, Juriquilla, Querétaro 76230, Mexico

^c Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Unidad de Cómputo, Ciudad Universitaria C.P. 04510, México D.F., Mexico

^d CIRES-University of Colorado 325 Broadway W1NP9, Boulder, CO, USA

Received 14 June 2011; received in revised form 1 December 2011; accepted 4 December 2011

Available online 24 December 2011

Abstract

The radio telescope MEXART was developed to make observations of interplanetary scintillation (IPS) produced by large scale disturbances associated with solar events. In this work it is shown that on occasion there are disturbances in the ionosphere that are related with these events and which cannot only contaminate the IPS but actually be the main contribution to the observed oscillations. This was the case of the event of 15 December 2006 observed by MEXART, which presented clear scintillation. The total electron content (TEC) of the ionosphere above Mexico was calculated for the same period. It was found that the variations in TEC were associated with the scintillations detected by MEXART.

© 2011 COSPAR. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Interplanetary scintillation; Ionosphere disturbances; MEXART

1. Introduction

The first evidence of interplanetary scintillation was observed in the 1950s, when the diameter of stellar radio sources was measured using radio telescopes (Readhead and Hewish, 1974). Several years later, during a set of observations of stellar radio sources developed in the Cambridge's observatory by Hewish et al. (1964), unusual fluctuations were detected in the signal (at 178 MHz) of three sources: 3C119, 3C138 and 3C147. During the following days, these sources, in particular 3C138, showed an irregular registry which was interpreted as a contamination by ionospheric scintillation. A more detailed analysis showed that these intensity fluctuations contained a time scale in

the range of 1–2 s. Although ionospheric scintillation (IONS) had been known well enough at the time (Hewish, 1951; Little and Maxwell, 1952), this could not justify the rapid fluctuations observed in the intensity. Hewish et al. (1964) were the first to recognize that the radio signal from such sources presented ionospheric scintillation in addition to another scintillation associated with the plasma in the interplanetary medium, which is known as interplanetary scintillation (IPS) (Hewish et al., 1964; Readhead, 1971).

The IPS can be observed in a wide frequency from 20 MHz upto over 10 GHz. The temporal scale depends on the observed frequency and of the scale in the irregularities of electronic density in the solar wind. Radio sources with an angular diameter smaller to 1 arcsec present an interplanetary scintillation in the frequency range of 0.1–3 Hz (Hewish and Duffet-Smith, 1987). For instance, the observations of IPS with the Ooty radio telescope (at 327 MHz) presented a power spectrum in the range 0.1–5 Hz. The spectrum shows a knee at 1 Hz; and after this frequency the power falls faster until reaching the noise level at around 5 Hz (Manoharan and Ananthkrishnan,

* Corresponding author. Tel.: +52 442 238 1104; fax: +52 442 238 1101.

E-mail addresses: armando@geofisica.unam.mx (A. Carrillo-Vargas), roman@geociencias.unam.mx (R. Pérez-Enríquez), mariorm@geociencias.unam.mx (M. Rodríguez-Martínez), rebeca@geociencias.unam.mx (R. López-Montes), gacp@geofisica.unam.mx (G.A. Casillas-Pérez), Eduardo.Araujo@noaa.gov (E.A. Araujo-Pradere).

1990). On the other hand, the IONS are characterized by periodicities going from 10 to 50 s, also showing a knee in its spectral density. After this peak (at 0.02 Hz), the power falls to noise level at about 0.8 Hz (Rufenach and Pope, 1975).

Before the advent of satellites, stellar radio sources provided the required signals for trans-ionospheric propagation studies (Lawrence et al., 1964; Aarons, 1997a), together with ionosond probing (Van Allen, 1984; Nicolet, 1984). These signals have been exploited by many researchers (Hewish, 1951). The development of new radio telescope observing in metric wavelengths, opened a new tool for studying ionospheric disturbances in the Earth's ionospheric plasma.

In the last three decades, several studies were carried out about the IPS technique emphasizing the importance of considering the ionospheric interference in the data analysis. These works have reported an apparent behavior of IPS that may actually be considered as ionospheric scintillations (Gapper et al., 1982; Purvis et al., 1987; Tappin et al., 1984; Woan, 1995; Lucek et al., 1996; Jackson et al., 1998; Pérez-Enrriquez et al., 2008; Shishov et al., 2010). The general conclusions of these works highlight that this contamination (ionospheric scintillation) is a main problem when the interpretation of IPS radio-data is carried out. The IONS is an added signal that can confuse the interpretation in the IPS analysis.

Radio astronomical measurements are very useful for the study of certain ionospheric phenomena. Ionospheric and radio astronomical measurements can be combined in two ways. First, since the ionosphere interferes with radio observations at less than 150 MHz (Cohen and Röttgering, 2009) it is necessary to reduce these data (e.g. Erickson et al., 2001) if the ionospheric signal can be eliminated. The second is that the radio data can be used to infer ionospheric structures (Rufenach, 1974; Rufenach and Pope, 1975; Cohen and Röttgering, 2009). The correction by ionospheric effects applied to radio astronomical measurements has some advantages: although ionospheric data of the required accuracy were simply not available in the 1970s, often the availability of ionospheric data pertained only to the direction of a single satellite, and the data were obtained from instruments separated geographically by hundreds of kilometers. The stellar radio sources observations are partially useful because they correspond to the specific direction of observation rather than to some other arbitrary direction in the sky.

The ionosphere is an important error source for the signals of the Navstar Global Positioning System (GPS) satellites. This error is proportional to the integrated electron density (TEC) along the signal path (Komjathy, 1997). The GPS satellites transmits on two L-band frequencies at 1575.42 MHz (L1) and 1227.60 MHz (L2). The time delay between the modulation of these frequencies, L1 and L2, can provide a measurement of TEC, where the TEC unit is $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ electrons m}^{-2}$ (Erickson et al., 2001). For this work, TEC was obtained from GPS

receivers part of a network close to the MEXART observatory.

The ionospheric scintillation occurs at higher frequencies and appears to be a phenomenon that takes place mainly near equatorial latitudes (Thomas et al., 2004; Basu et al., 2004). The TEC perturbations, since they correspond to an integrated measurement of the whole depth of the ionosphere, give information of greater scales than those identified with the ionospheric scintillation.

The Global Positioning System (GPS), (see Dixon, 1991; Logsdon, 1992; Hofmann-Wellenhof et al., 1993; Eftaxiadis et al., 1999; Araujo-Pradere, 2005) allows to obtain, conveniently and continuously, ionospheric Total Electron Content (TEC) with a relatively high accuracy of about 2 TEC units for vertical TEC (see Minter et al. (2007) and Araujo-Pradere et al. (2007) for details). These GPS observations can be used to perform ionospheric disturbance monitoring and generate a global image of the distributions and occurrence of these disturbances (Aarons, 1997b). For example Araujo-Pradere et al. (2006) have described in detail some of the consistent features of the TEC disturbances under different levels of geomagnetic activity.

Pryse et al. (1991) reported ionospheric scintillation detected in signals of artificial satellites. Other studies (Rodger et al., 2007; Lei et al., 2008; Pedatella et al., 2009) have shown that large scale disturbances in the ionosphere can occur during high magnetic activity. In addition, those studies also suggest that monitoring from satellite signals can help to reduce the uncertainty by contamination in the Cambridge IPS maps by ionospheric scintillation. Several papers have employed GPS data in order to study the behavior of the signal traveling through the Earth's ionosphere on their way to the GPS receivers (at 1575.42 MHz and 1227.60 MHz), for example: Very Long Baseline Interferometer VLBI sites at Fort Davis (TX), Pie Town (NM), Kitt Peak (AZ), and Los Alamos (NM) (Ros et al., 2000), and Very Large Array VLA (Erickson et al., 2001). They use only locally derived data obtained from GPS receivers located near the radio telescopes, where the GPS signals are measured to estimate the Total Electron Content (TEC) of the ionosphere.

The purpose of the paper is to test the hypothesis that disturbances in the ionosphere can contaminate the IPS signals provided by MEXART. To do this the solar event of 15 December 2006 was analyzed taking into account not only the actual radio source 3C144 but also the signal coming from six polar satellites crossing the sky at the same time. In Section 2, the observations of the source 3C144 and the satellites during three days in December 2006 are presented. The analysis of the data is given in Section 3, and the discussion of the results and the conclusions of the paper are given in Section 4.

2. Observations

MEXART observations were carried out on December of 2006 using a small section of MEXART's antenna.

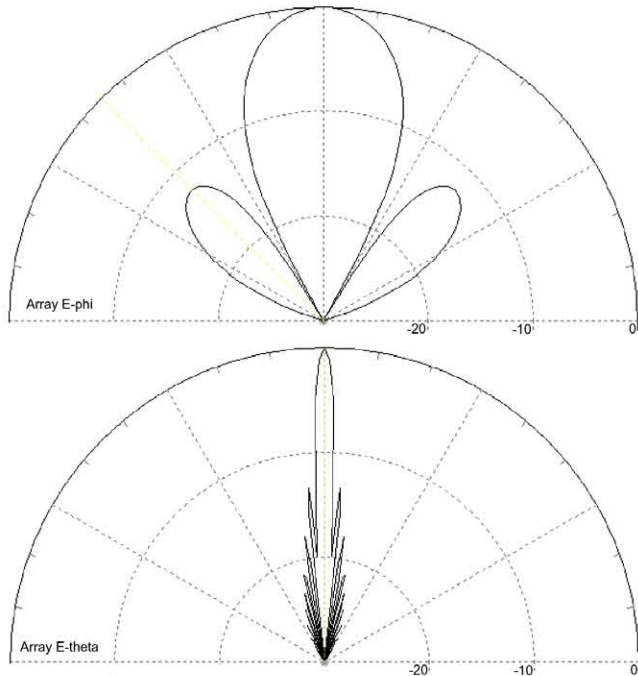


Fig. 1. The polar pattern of dipole array to E-theta (east–west) and E-phi (north–south).

We used a rectangular sub array conformed by four rows with 16 dipoles. Each row is polarized horizontally in the east–west direction, generating a main beam. The half-power width beam (HPWB) is about 5 degree in the east–west direction, while in the north–south direction, the HPWB is 26 degrees, with secondary beams at ± 47 degrees with -12.4 dB. Fig. 1 shows the polar pattern of dipole array to E-theta (east–west) and E-phi (north–south). The receiver is working at 139.65 MHz with 4 MHz bandwidth. The observations presented in this paper were taken with a total-power beam, using a 40-ms time constant. After detection, the output is fed to a 16-bit Analog-to-Digital Converter (ADC). The beam output is sampled by the computer every 7-ms and recorded on a PC. Further details of the radio telescope can be found elsewhere (González-Esparza et al., 2004; González-Esparza et al., 2006; Carrillo-Vargas, 2007). The daily MEXART observations of the tracking of the radio sky and transit of strong radio sources can be accessed in real time.¹

3C144 ($\alpha = 05^h34^m32^s$; $\delta = 22^\circ00^m52^s$) is an important source used for data calibration because its transit occurs very close to the zenith position of MEXART's place (lat. $19^\circ 48' N$, long. $101^\circ 41' W$) and has a strong flux around 1400 Jy.

From test observations of calibration radio source 3C144, we have detected that several times the typical flux of the calibrated source showed unusual and strong oscillations. This behavior has also been observed at the same time in radio-signal from polar satellites. Such fluctuations

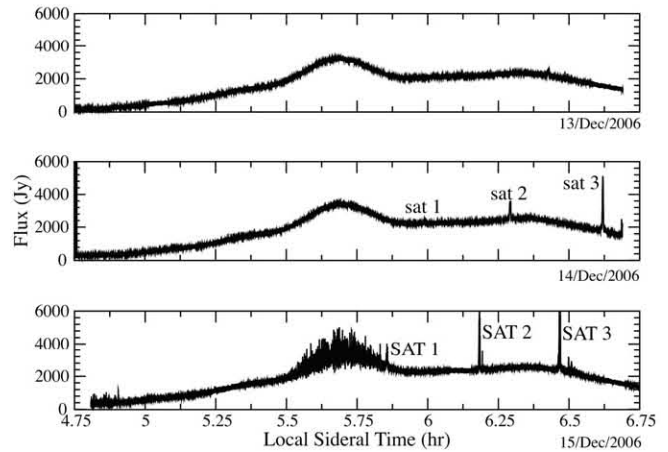


Fig. 2. Signals of 3C144 as observed on 13, 14 and 15 December 2006.

can severely affect the calibrations of MEXART since this radio telescope observe every day artificial satellites emitting at frequencies very close to the operating central frequency (139.65 MHz).

Fig. 2 shows the radio observations of 3C144 taken for 60 min before and after its transit. The upper panel shows non disturbed observations taken on December 13th 2006, with no satellites present. The middle panel shows observations associated with 3C144 and three satellites taken on December 14th 2006. The bottom panel shows the signals associated with 3C144 and three satellites crossing the meridian plane on December 15th 2006. The polar satellites detected on December 14th are: NOSS 3(G) (145.000 MHz), ANUSAT (144.998 MHz), ORBVVIEW 2 (145.002 MHz) were labeled sat 1, sat 2 and sat 3 respectively. The satellites observed on December 15th are NO-44 (145.827 MHz/FM), NOAA-11 (145.800 MHz), and LACROSSE-5 (144.997 MHz) were labeled SAT 1, SAT 2 and SAT 3, respectively.² Further details of the satellites are shown in Tables 1 and 2. We used the Orbitron software (<http://www.stoff.pl>) to tracking the satellites, the Fig. 3 shows how are the paths of the satellites through the MEXART beam in comparison with the east–west path followed by the source 3C144.

3. Data analysis

In order to obtain parameters such as the transit time, signal to noise (S/N) ratio, and average and root mean square (rms) for previous and later days associated with the event, we employed standard routines from numerical recipes³ and IDL.⁴

The presence of IONS can be quantified from the time series analysis measuring the power spectrum. In this way, when we analyzed the MEXART observations from

² AMSAT: <http://www.amsat.org/amsat-new/satellites/> and ZARYA: <http://www.zarya.info/Frequencies/>.

³ Numerical recipes web page: <http://www.nr.com/>.

⁴ IDL web page: <http://www.itervis.com/>.

¹ In: <http://www.mexart.unam.mx>.

Table 1
Main parameters for the source 3C144 and the satellites.

Parameter	3C144 12/13/06	3C144 12/14/06	3C144 12/15/06	sat1 12/14/06	sat2 12/14/06	sat3 12/14/06	SAT1 12/15/06	SAT2 12/15/06	SAT3 12/15/06
Amplitude (V)	0.122	0.126	0.116	0.015	0.076	0.245	0.151	0.513	2.650
RMS off-source (V)	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004
RMS on-source (V)	0.004	0.004	0.028	0.004	0.003	0.004	0.058	0.142	0.479
S/N	30.50	31.50	29.00	3.75	25.30	81.60	37.70	128.25	662.50

Table 2
Additional parameters for the satellites.

Parameter	sat1 12/14/06	sat2 12/14/06	sat3 12/14/06	SAT1 12/15/06	SAT2 12/15/06	SAT3 12/15/06
Amplitude (V)	0.02	0.08	0.25	0.13	0.44	2.20
Transit time (LST)	05:59:35	06:17:47	06:37:30	06:11:07	06:28:14	06:45:54
Detected time (s)	37.6	36.4	29.3	32.3	24.3	38.7
Frequency (MHz)	145.850	145.900	144.390	145.827	145.243	137.715
Period (min)	107.30	93.32	98.63	100.73	101.77	99.70
Altitude (Km)	7481	6815	7072	7172	7221	7093

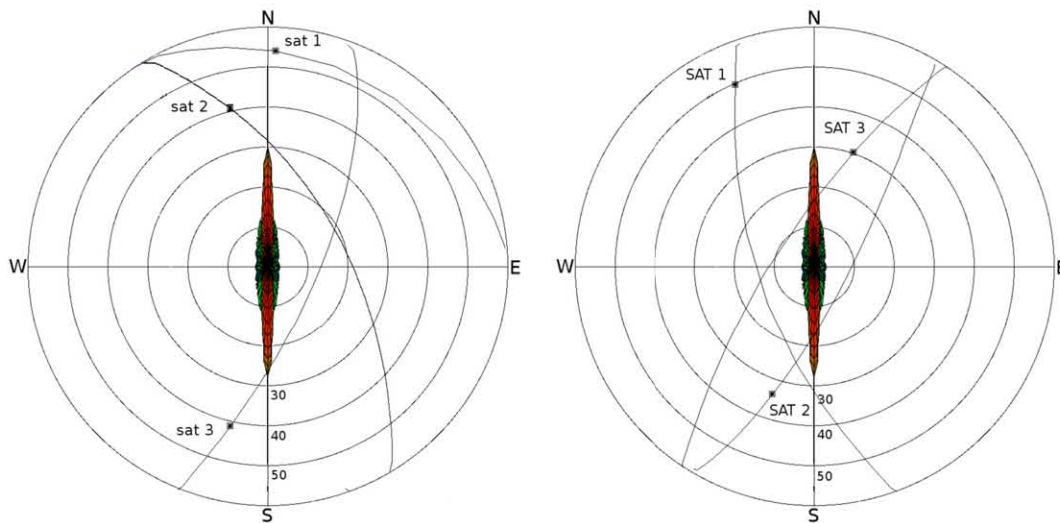


Fig. 3. The paths of the satellites through the MEXART beam observed on 14 and 15 December.

satellites sat 1, sat 2, sat 3 on December 14th and SAT 1, SAT 2 and SAT 3 on December 15th, we observed the presence of fluctuations in the radio-signal. In order to know the behavior of these fluctuations, we used the Fast Fourier transform (FFT) tool. As a first step, we applied a gaussian fit to the data set for each satellite. Then we removed the tendency generating a new data set. In the case of the fluctuations observed in SAT 3, it was necessary to iterate the data to better adjust a gaussian fit. Once we generated the detrended data, we proceeded to apply FFT.

3.1. 3C144

The basic parameters of 3C144 were obtained using intervals of 4096 samples and calculating the average of these quantities. For instance, the source flux was obtained

from 24 min of data, but only the six minutes around the peak are significant (3 dB of power). Fig. 2 shows the 3C144 observations for December 13th, 14th and 15th. The observation for December 15th shows large amplitude oscillations that had not been seen in the previous days, Fig. 4. The main parameters associated with the signal of 3C144 are shown in Table 1.

The power spectra measured from the radio-signal (off- and on-source), can give us a quantitative indication about the presence of those important frequencies. We proceeded in a similar way that Manoharan and Ananthkrishnan (1990) for our data analysis. First, the observed intensity fluctuations are displayed and the interferences were filtered out. After this, the data were manipulated to remove the tendency using a gaussian fit of the signal generated by the transit of the source through the pattern.

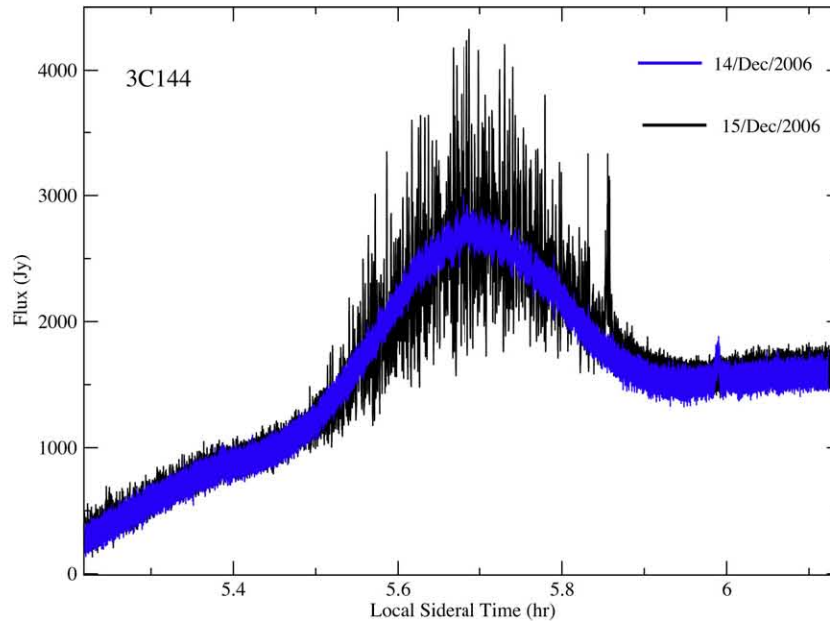


Fig. 4. Superposed signals of 3C144 as observed on 14 (blue) and 15 (black) December 2006.

We applied the FFT tool in two separately ways; (a) on-source and (b) off-source data. The spectral analysis of the off-source was obtained using data within the 4 min before and after the transit of the source. The off-source spectrum, or the spectrum of the receiver noise, is subtracted from the on-source spectrum to give the final spectrum of the intensity fluctuations. The spectral analysis showed that the signal associated to the background sky had similar conditions to those of white noise. However, the power spectrum shows a residual system noise at frequencies below 0.1 Hz.

Figs. 5 and 6 show the on-source spectra obtained for December 13th, 14th, and 15th and off-source spectrum for December 15th, respectively. The spectral analysis shows several interesting characteristics. The spectra for December 13th and 14th present typical properties that characterize a quiet source. However, the spectrum associated with data from December 15th, shows a maximum power of $3 \times 10^{-13} \text{ V}^2/\text{Hz}$ at 0.16 Hz. The profile of the spectrum shows a significant change for the observation on December 15th when compared against December 13th and 14th.

3.2. Satellites

The radio-signal from six satellites have operating frequencies which are very close to the MEXART's frequency. This suggests that both the radio wave fronts from a far cosmic radio source traveling through the interplanetary medium observed by MEXART and the radio-signal from the satellites can be studied together. The satellites cross the sky at an altitude of around 7000 Km above Earth's surface. Therefore, the satellites' signals emitted travel through several regions, from the exosphere to the troposphere, sensing a wide region

including the ionosphere. In addition, at almost the same line of sight, the radio-signal from a source (3C144 in this case) allows to include the component of the interplanetary medium. For the analysis applied to the satellites, we follow the same conditions applied for 3C144. Before the analysis, it was necessary to remove the tendency of the data. The transit time and power detected of the satellites depend on the crossing speed and path through the pattern antenna. The observed transit time are about 30–40 s, so we tested intervals of 4096 samples to obtain the average of the main statistical parameter of the satellites. The main parameters are also shown in Table 1 and additional information is shown in Table 2. Fig. 7 shows the time series for satellites with undisturbed radio-signal detected on December 14th, and Fig. 8 shows satellites with strong disturbances in the radio-signal for each satellite detected on December 15th.

The spectral analysis of the satellites showed different values. The satellites showed significant power in the range 0.227–4.286 Hz, with maximum power at different frequencies: SAT 1 had a maximum power of $10^{-10} \text{ V}^2/\text{Hz}$ at 1.323 Hz; SAT 2 had a maximum power of $10^{-9} \text{ V}^2/\text{Hz}$ at 0.735 Hz, and finally SAT 3 had a maximum power of $10^{-7} \text{ V}^2/\text{Hz}$ at 2.158 Hz. Fig. 9 shows the power spectra of the satellites on December 14th (left column) and 15th (right column).

3.3. TEC and Dst index

With the aim of evaluating the impact at the geomagnetic and ionospheric environments we include the Geomagnetic Equatorial Dst index (provisional from Kyoto)⁵

⁵ Dst index web page: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>.

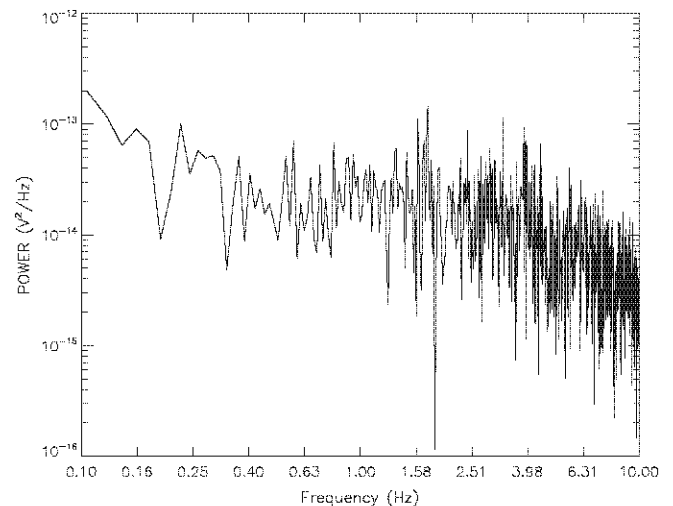
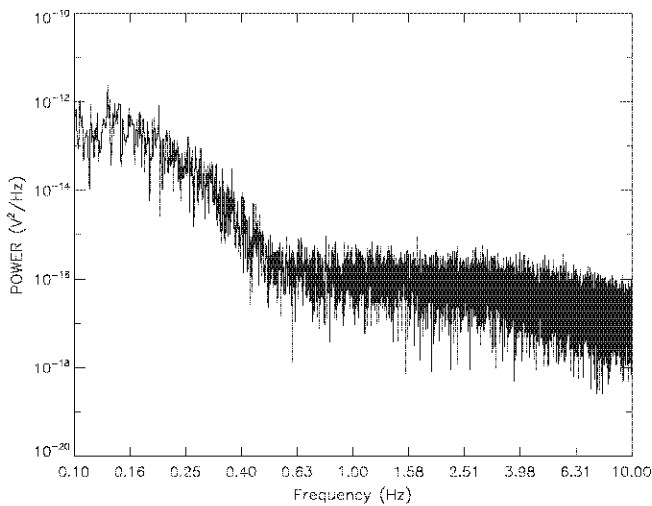
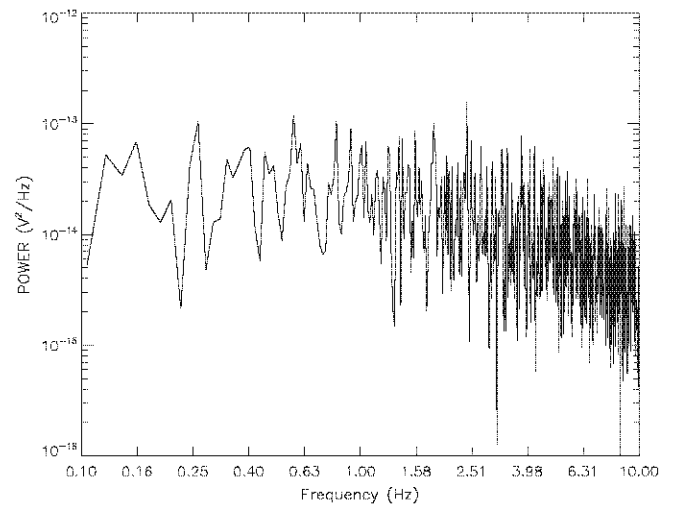
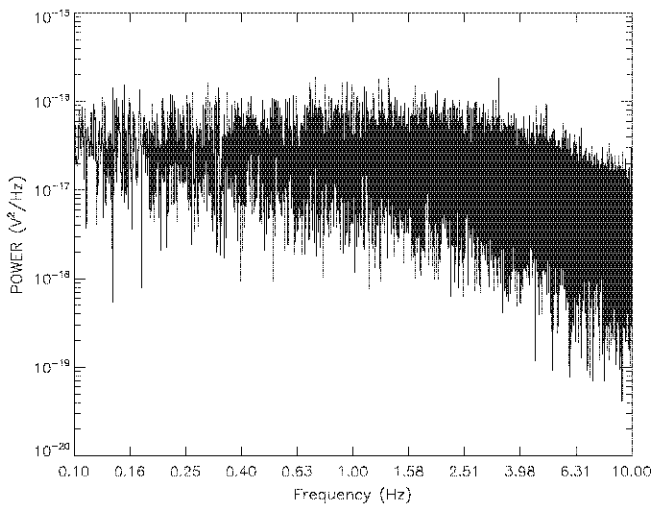
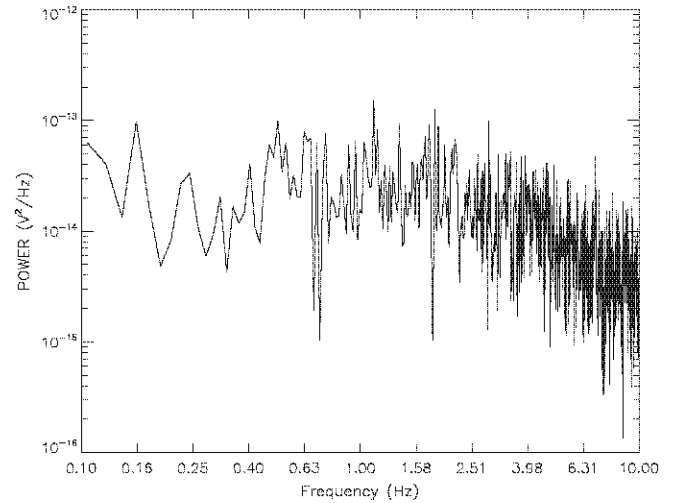
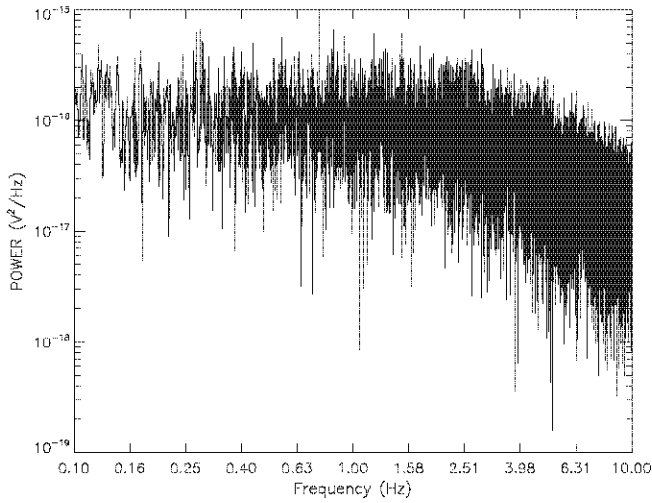


Fig. 5. FFT applied to the source 3C144 (on-source spectra) for December 13th (top panel), 14th (middle panel), and 15th (bottom panel).

Fig. 6. FFT applied to the cold sky (off-source) for December 13th (top panel), 14th (middle panel) and 15th (bottom panel).

and the vertical Total Electron Content (vTEC) parameters in order to support a potential correlation with geomagnetic storms and ionospheric disturbances.

The sudden commencement and Dst observed on 15 Dec 2006 are due to the shock and interplanetary CME arrival, and has been analyzed by other authors Zhang et al., 2011, e.g.,. They calculated TEC for only one station (ispa). The

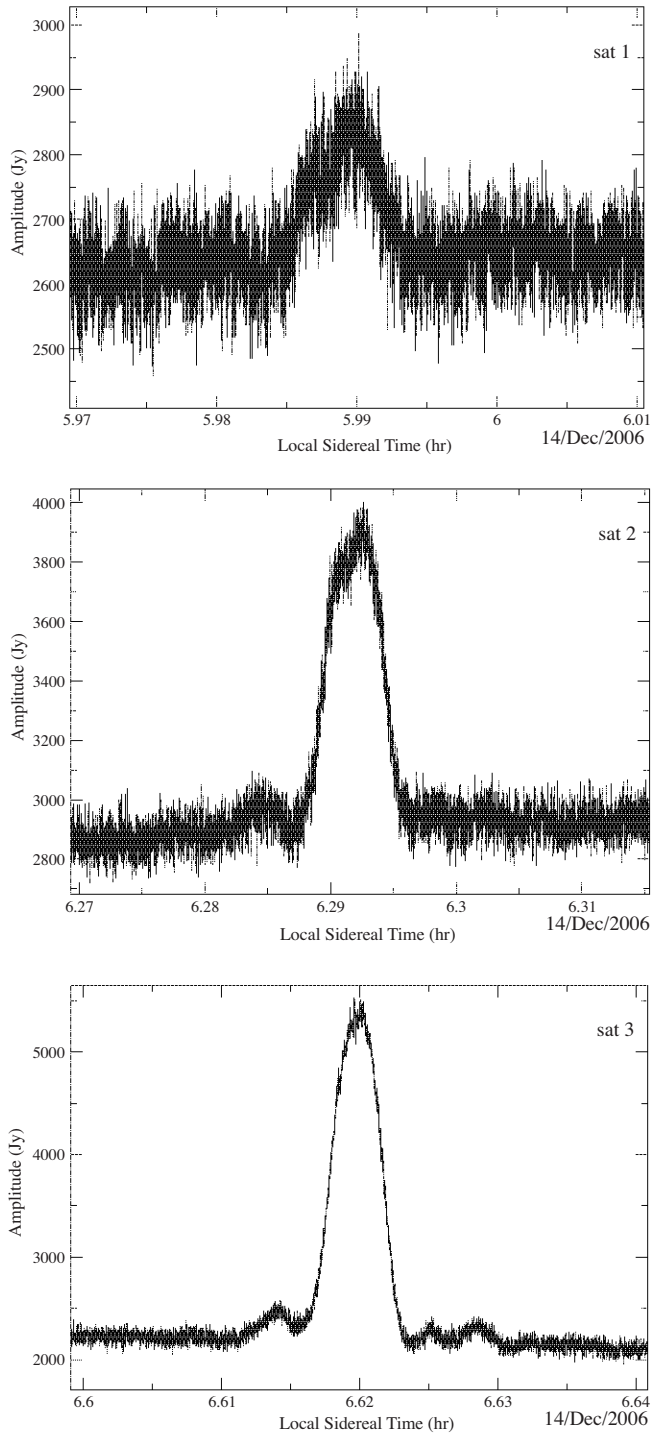


Fig. 7. Time series for the satellites detected on December 14th: sat 1 (top panel), sat 2, (middle panel) and sat 3 (bottom panel).

peak value was 40 TECu. For this particular case, TEC was calculated for the whole month of December 2006, using 17 stations that cover a wide area in the sky above the MEX-ART observatory. This month showed the typical diurnal variation with a strong event starting on December 14th 2006. The event had three main peaks, the greatest of them with a value of $\sim 30 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$. Fig. 10, in the upper panel, shows the TEC for each station and a average TEC

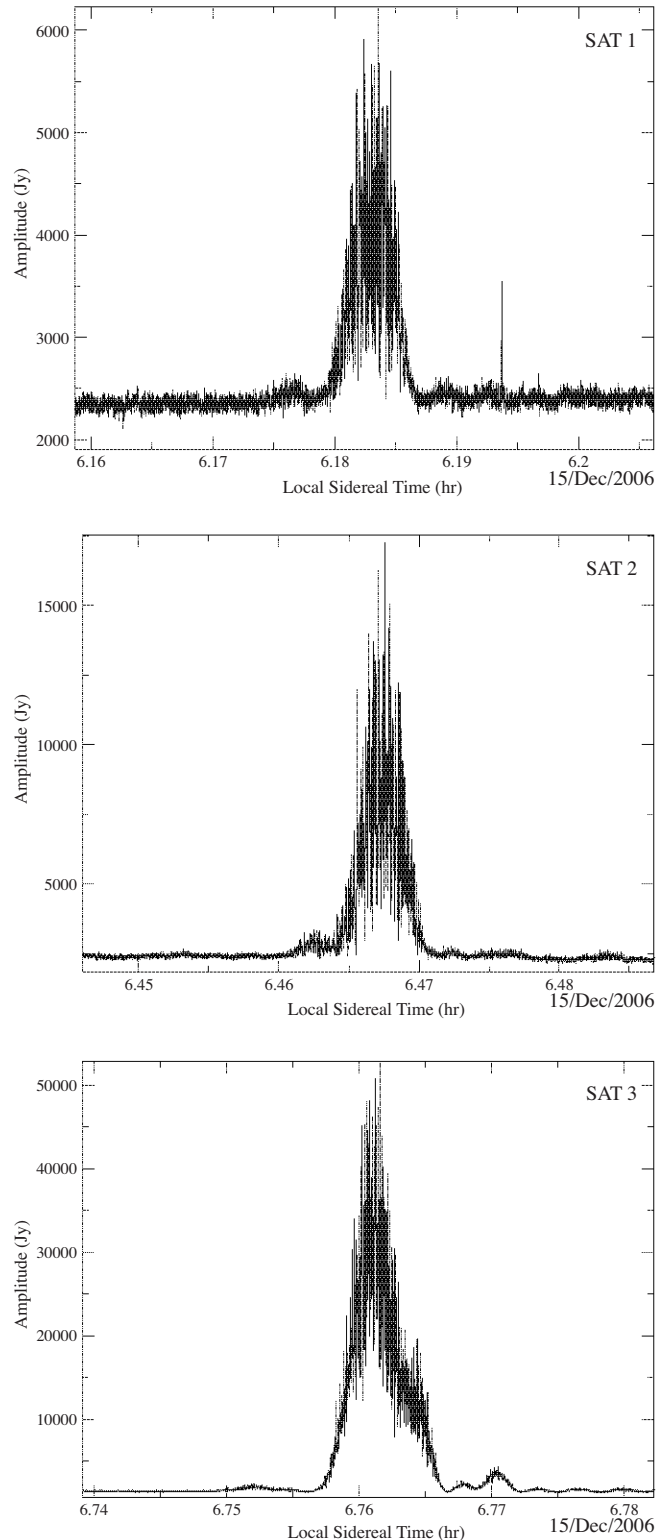


Fig. 8. Time series for the satellites showing scintillation. The top panel shows SAT 1, and SAT 2 is presented in the middle panel. SAT 3 is presented in bottom panel.

obtained from the 17 stations, with the average of them in the middle panel. The Geomagnetic Equatorial Dst index for this period, is shown in the bottom panel. The

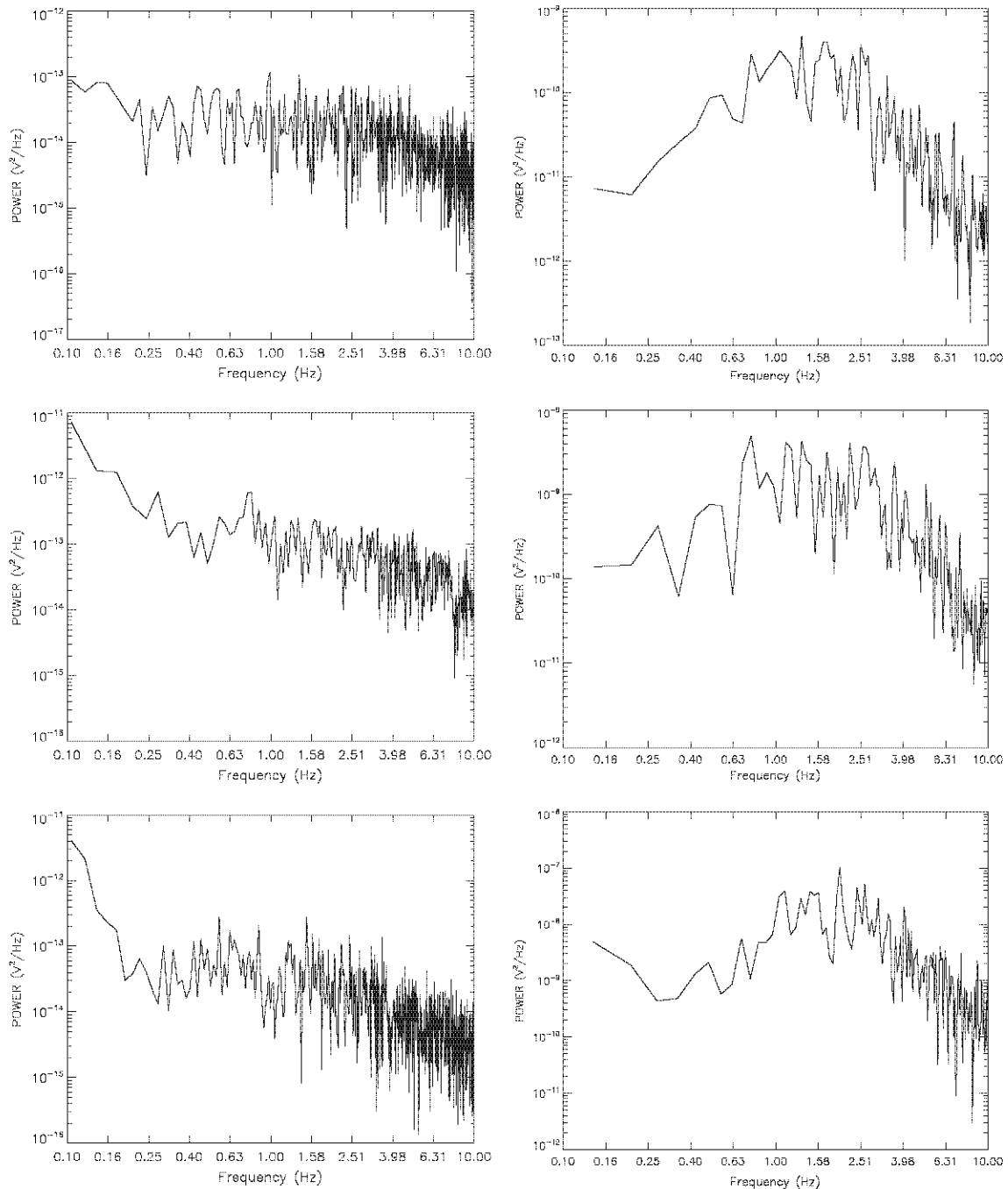


Fig. 9. Power spectra from the radio-signal of the satellites sat1, sat2, sat3, SAT1, SAT2, and SAT3 observed on December 14th (left column) and 15th (right column).

Dst index shows that there was a geomagnetic storm with a sudden commencement around 20:00 UT on December 14th, and the main phase had dropped to -135 nT, around 10:00 UT on December 15th.

4. Discussion and conclusion

The disturbances analyzed in this work include studies for both, radio source and radio-signals from polar satellites observed by MEXART observatory, as well of TEC

calculated by GPS data. From our results we have found that this complementary study can help us to discriminate from those fluctuations produced by IPS and ionospheric disturbances. In fact, the events shown here indicate that there are contributions to the fluctuations observed in the radio signal for both the source and the satellites. Even though the procedure described by Manoharan (1991) which makes a filtering of the signal for low frequencies in order to eliminate ionospheric scintillation from the IPS, we argue that this is not sufficient in general as there

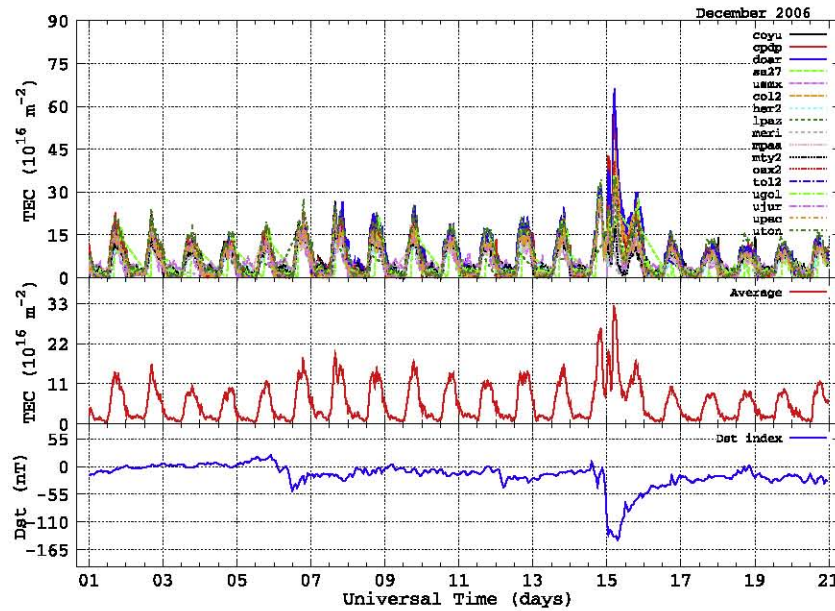


Fig. 10. Total Electron Content (TEC) and Dst index for December 2006. The top panel shows the time series for all GPS stations; The middle panel shows the average TEC for the period; and, the bottom panel shows the Dst index for the same period.

may also be the contribution of ionospheric disturbances, such as has been pointed out by Cohen and Röttgering (2009) that these make a strong contribution to radio signals below 150 MHz, as in our case, so we cannot discriminate *a priori* between IPS or Ionospheric disturbances as possible sources of the observed intensity fluctuations. However, in this particular event, the different frequency range where the fluctuations occur may allow to do it as shown in Fig. 5. In addition, from the TEC we observed that there are a significant variation of this index corresponding to December 15th, which is in agreement with the abrupt dip observed in the Dst index.

The power spectra for the source 3C144 during December 15th shows that there is a significant difference of power (about 3 orders of magnitude) in comparison with the powers of December 13th and 14th, occurring at lower frequencies (<0.4 Hz). This may suggest that this abrupt change is produced by a major contribution from ionospheric disturbances and in a minor extent by the IPS. The fact that the maximum power spectra of MEXART lies in the frequency range 0.1–1.3 Hz, which is different from other observatories, is due to its different operating frequency (139.65 MHz).

The event of December 15th 2006, analyzed here, corresponds to a period of solar activity minimum, so it is pertinent to ask for the strong oscillations observed in 3C144. We looked for the reported activity in the Sun from December 13th to 16th and found 5 events reported by SOHO/LASCO CME Catalog.⁶ There were at least two coronal mass ejections with a potential correlation with our observations: (a) CME-Halo, observed on December

13th at 02:54:04 UT, with a linear speed of 1774 km/hr, associated with a X3.4 flare, located at S03W26, and (b) CME-Halo, observed on December 14th at 22:30:04 with linear speed of 1042 km/s, associated with an X1.2 flare located at S06W46. In fact, the TEC and Dst index show that both are strongly associated with the coronal mass ejections detected in December 13th and 14th. Fig. 10 shows the expected anticorrelation between these parameters for December 15th.

The conclusions of this work are:

- The MEXART data observations on December 15th show strong fluctuations in the radio signal of 3C144 and for the three satellites. The behavior of Fourier spectra from 3C144 and the satellites show a different shape with a maximum power occurring at frequencies in the range 0.1–0.5 Hz. As the shape of the satellite spectra comes from the contribution of disturbances in the ionosphere only, this suggests that the fluctuations observed in the 3C144 radio source spectrum are probably contaminated by ionospheric disturbances.
- The TEC and the Dst index are strongly associated with the coronal mass ejections detected in December 13th and 14th. Furthermore, both indexes confirm our idea that the geomagnetic activity in a large degree affected the Earth's ionosphere in the line of sight of 3C144 and satellites.
- The ionospheric disturbances observed by MEXART should be taken into account as possible sources of contamination in the measurements of IPS. According to Cohen and Röttgering (2009) ionospheric disturbances may contribute to radio signals below 150 MHz. TEC from GPS and Dst indexes can help to identify the origin of such fluctuations. Further work in this direction is presently in progress.

⁶ This CME catalog is generated and maintained at the CDAW Data Center by NASA and the CUA in cooperation with the NRL: http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/.

Acknowledgments

The authors thank to MEXART TEAM: P. Villanueva, E. Andrade, A. González-Esparza, and E. Aguilar, for the technical support and the data provided. We also thank CORS, SOPAC and UNAVCO for putting their data on their respective websites from where the GPS data can be freely downloaded. We also thank the Servicio Sismológico Nacional as well as E. Cabral for providing us with some Mexican GPS data. The paper was made possible thanks to PAPIIT, UNAM project IN111509. We also thank two anonymous referees for their contribution to improving the paper.

References

- Aarons, J. 50 years of radio-scintillation observations. *IEEE Antennas Propag. Mag.* 39, 7–12, 1997a.
- Aarons, J. Global positioning system phase fluctuations at auroral latitudes. *J. Geophys. Res.* 102, 17219–17232, 1997b.
- Araujo-Pradere, E.A. GPS-derived total electron content response for the Bastille day magnetic storm of 2000 at a low mid-latitude station. *Geofis. Int.* 44 (2), 211–218, 2005.
- Araujo-Pradere, E.A., Fuller-Rowell, T.J., Spencer, P.S.J. Consistent features of the TEC changes during ionospheric storms. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 68 (16), doi:10.1016/j.jastp.2006.06.2006, 2006.
- Araujo-Pradere, E.A., Fuller-Rowell, T.J., Spencer, P.S.J., Minter, C.F. Differential validation of the USTEC model. *Radio Sci.* 42, RS3016, doi:10.1029/2006RS003459, 2007.
- Basu, S., Makela, J., Christensen, A., Groves, K., Dasgupta, A. Space-time variability of ionospheric scintillation in the equatorial region. AGU Spring Meeting Abstracts A1, 2004.
- Carrillo-Vargas, A. Diseño y construcción del radiotelescopio de centelleo interplanetario MEXART. PhD-Thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, 2007.
- Cohen, A.S., Röttgering, H.J.A. Probing fine-scale ionospheric structure with the very large array radio telescope. *Astron. J.* 138, 439–447, 2009.
- Dixon, T.H. An introduction to the global positioning system and some geological applications. *Rev. Geophys.* 29, 249–276, 1991.
- Eftaxiadis, K., Cervera, M.A., Thomas, R.M. A global positioning system receiver for monitoring ionospheric total electron content. Defense Science and Technology Organisation, Salisbury South Australia, DSTO-TR-0742, p. 29, 1999.
- Erickson, W.C., Perley, R.A., Flatters, C., Kassim, N.E. Ionospheric corrections for VLA observations using local GPS data. *Astron. Astrophys.* 366, 1071–1080, 2001.
- Gapper, G.R., Hewish, A., Purvis, A., Duffett-Smith, P.J. Observing interplanetary disturbances from the ground. *Nature* 296, 633–636, 1982.
- González-Esparza, J.A., Carrillo, A., Andrade, E., Pérez-Enríquez, R., Kurtz, S. The MEXART interplanetary scintillation array in Mexico. *Geofis. Int.* 43, 61–73, 2004.
- González-Esparza, J.A., Carrillo, A., Andrade, E., Sierra, P., Vazquez, S., Rodríguez, C., Pérez-Enríquez, R., Kurtz, S., Blanco-Cano, X. Calibration and testing of the MEXART antenna using solar transits. *Adv. Space Res.* 38, 1824–1827, 2006.
- Hewish, A., Scott, P.F., Wills, D. Interplanetary scintillation of small diameter radio sources. *Nature* 203, 1214–1217, 1964.
- Hewish, A. The diffraction of radio waves in passing through a phase-changing ionosphere. *Roy. Soc. London Proc. Ser. A* 209, 81–96, 1951.
- Hewish, A., Duffett-Smith, P.J. A new method of forecasting geomagnetic activity and proton showers. *Planet. Space Sci.* 35, 487–491, 1987.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J. Global Positioning System. Theory and Practice, in: Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J. (Eds.), Springer, Wien (Austria), ISBN:3-211-82477-4, ISBN:0-387-82477-4 (USA), pp. 347, 1993.
- Jackson, B.V., Hick, P.L., Kojima, M., Yokobe, A. Heliospheric tomography using interplanetary scintillation observations I. Combined Nagoya and Cambridge data. *J. Geophys. Res.* 103, 12049–12068, 1998.
- Komjathy, A. Global ionospheric total electron content mapping using the global positioning system. Ph.D. dissertation, Geodesy and Geomagnetism Engineering Technical Report No. 188, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, p. 248, 1997.
- Lawrence, R.S., Little, C.G., Chivers, H.J.A. A survey of ionospheric effects upon earth-space radio propagation. *Proc. IEEE* 52, 4–27, 1964.
- Lei, J., Wang, W., Burns, A.G., Solomon, S.C., Richmond, A.D., Wiltberger, M., Goncharenko, L.P., Coster, A., Reinisch, B.W. Observations and simulations of the ionospheric and thermospheric response to the December 2006 geomagnetic storm: initial phase. *J. Geophys. Res.* 113, A01314, 2008.
- Little, C.G., Maxwell, A. Scintillation of radio stars during aurorae and magnetic storms. *J. Atmos. Terr. Phys.* 2, 356–360, 1952.
- Logsdon, T. The Navstar Global Positioning System. The Navstar global positioning system, in: Logsdon, T. Van Nostrand Reinhold. (Eds.), New York, NY (USA), ISBN 0-442-01040-0, p. 272, 1992.
- Lucek, E.A., Clark, T.D.G., Moore, V. The use of various interplanetary scintillation indices within geomagnetic forecasts. *Ann. Geophys.* 14, 139–148, 1996.
- Manoharan, P.K. Study of the solar wind using single-station interplanetary scintillation. Ph. D. dissertation Tata Institute for Fundamental Research, University of Bombay, Bombay, India, p. 223, 1991.
- Manoharan, P.K., Ananthakrishnan, S. Determination of solar-wind velocities using single-station measurements of interplanetary scintillation. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 244, 691–695, 1990.
- Minter, C.F., Robertson, D.S., Spencer, D.S., Jacobsen, A.R., Fuller-Rowell, T.J., Araujo-Pradere, E.A., Moses, R.W. A comparison of MAGIC and FORTE ionospheric measurements. *Radio Sci.* 42, RS3026, doi:10.1029/2006RS003460, 2007.
- Nicolet, M. Historical aspects of the IGY in History of Geophysics, in: Gilmore, C.S. (Ed.), American Geophysical Union, 4, 1984.
- Pedatella, N.M., Lei, J., Larson, K.M., Forbes, J.M. Observations of the ionospheric response to the 15 December 2006 geomagnetic storm: long-duration positive storm effect. *J. Geophys. Res.* 114, A12313, 2009.
- Pérez-Enríquez, R., Carrillo, A., Kotsarenko, A., Cruz-Abeyro, J.A.L. State of the inner heliosphere as given by the G index of interplanetary scintillation and the Dst index of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.* (Space Physics) 113, 10107, 2008.
- Pryse, S.E., Kersley, L., Russell, C.D. Scintillation near the F layer trough over northern Europe. *Radio Sci.* 26, 1105–1114, 1991.
- Purvis, A., Tappin, S.J., Rees, W.G., Hewish, A., Duffett-Smith, P.J. The Cambridge IPS survey at 81.5 MHz. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 229, 589–619, 1987.
- Readhead, A.C.S. Interplanetary scintillation of radio sources at metre wave-lengths-II. Theory. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 155, 185, 1971.
- Readhead, A.C.S., Hewish, A. Fine structure in radio sources at 81.5 MHz-III. The survey. *Mem. Roy. Astron. Soc.* 78, 1, 1974.
- Rodger, C.J., Clilverd, M.A., Thomson, N.R., Gamble, R.J., Seppala, A., Turunen, E., Meredith, N.P., Parrot, M., Sauvaud, J.A., Berthelier, J.J. Radiation belt electron precipitation into the atmosphere: recovery from a geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.* 112, A11307, 2007.
- Ros, E., Marcaide, J.M., Guirado, J.C., Sardón, E., Shapiro, I.I. A GPS-based method to model the plasma effects in VLBI observations. *Astron. Astrophys.* 356, 357–362, 2000.
- Rufenach, C.L. Wavelength dependence of radio scintillation: ionosphere and interplanetary irregularities. *J. Geophys. Res.* 79, 1562–1566, 1974.

- Rufenach, C.L., Pope, J.H. Interpretation of single-site scintillation measurements to estimate F-region drift velocities. *Planet. Space Sci.* 23, 560–562, 1975.
- Shishov, V.I., Tyul'Bashev, S.A., Chashei, I.V., Subaev, I.A., Lapaev, K.A. Interplanetary and ionosphere scintillation monitoring of radio sources ensemble at the solar activity minimum. *Sol. Phys.* 265, 277–291, 2010.
- Tappin, S.J., Hewish, A., Gapper, G.R. Tracking a high-latitude corotating stream for more than half a solar rotation. *Planet. Space Sci.* 32, 1273–1281, 1984.
- Thomas, R.M., Cervera, M.A., Ramli, A.G., Effendy, Totarong, P., Groves, K.M., Wilkinson, P.J. Seasonal modulation of GPS performance due to equatorial scintillation. *Geophys. Res. Lett.* 31, 18806, 2004.
- Van Allen, J.A. Genesis of the international geophysical year, in *History of Geophysics*, in: Gilmor, C.S. (Ed.), American Geophysical Union, 4, 49, 1984.
- Woan, G. Observations of long-lived solar wind streams during 1990–1993. *Ann. Geophys.* 13, 227–236, 1995.
- Zhang, D.H., Mo, X.H., Cai, L., Zhang, W., Feng, M., Hao, Y.Q., Xiao, Z. Impact factor for the ionospheric total electron content response to solar flare irradiation. *J. Geophys. Res.* 116, A04311, doi:10.1029/2010JA016089, 2011.

3.4. Perturbaciones ionosféricas y su impacto sobre IPS usando observaciones del MEXART

M. Rodríguez-Martínez, R. Pérez-Enríquez, A. Carrillo-Vargas, R. López-Montes, E. A. Araujo-Pradere, G. A. Casillas-Pérez, J.A. L. Cruz-Abeyro. 2012. Ionospheric Disturbances and Their Impact on IPS Using MEXART Observations. Solar Phys.

Se estudia el impacto de perturbaciones ionosféricas sobre el medio ambiente de la Tierra causadas por eventos solares que se produjeron del 20 de abril al 31 de mayo de 2010, utilizando observaciones del radiotelescopio MEXART. Durante este período de tiempo, varias fuentes astronómicas presentan fluctuaciones en sus señales de radio. Un análisis de ondeletas, junto con información complementaria como el contenido total de electrones vertical (vTEC) y el índice Dst, se utilizaron para identificar y comprender cuando el centelleo interplanetario (IPS) podría estar contaminado por las perturbaciones de la ionosfera (IOND). Encontramos que las perturbaciones de la señal de radio a veces se asocian con IOND y/o fluctuaciones IPS; sin embargo, en algunos casos, no fue posible identificar claramente su origen. Nuestro análisis de Fourier y ondeletas mostró que estas fluctuaciones tienen frecuencias en el rango de ≈ 0.01 Hz – ≈ 1.0 Hz (periodicidades de 100s hasta 1s).

Ionospheric Disturbances and Their Impact on IPS Using MEXART Observations

M. Rodríguez-Martínez · H.R. Pérez-Enríquez · A. Carrillo-Vargas ·
R. López-Montes · E.A. Araujo-Pradere · G.A. Casillas-Pérez · J.A.L. Cruz-Abeyro

Received: 19 January 2012 / Accepted: 7 February 2014
© Springer Science+Business Media Dordrecht 2014

Abstract We study the impact of ionospheric disturbances on the Earth's environment caused by the solar events that occurred from 20 April to 31 May 2010, using observations from the *Mexican Array Radio Telescope* (MEXART). During this period of time, several astronomical sources presented fluctuations in their radio signals. Wavelet analysis,

M. Rodríguez-Martínez (✉)
Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México,
Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Ex-Hacienda de San José de la Huerta,
C.P. 58190 Morelia, Michoacán, Mexico
e-mail: mrodriguez@enesmorelia.unam.mx

H.R. Pérez-Enríquez · R. López-Montes · J.A.L. Cruz-Abeyro
Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Blvd Juriquilla
No. 3001, C.P. 76230 Juriquilla, Querétaro, Mexico

H.R. Pérez-Enríquez
e-mail: roman@geociencias.unam.mx

R. López-Montes
e-mail: rebeca@geociencias.unam.mx

J.A.L. Cruz-Abeyro
e-mail: lcabeyro@geociencias.unam.mx

A. Carrillo-Vargas
Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus
Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Ex-Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190
Morelia, Michoacán, Mexico
e-mail: armando@geofisica.unam.mx

E.A. Araujo-Pradere
CIRES-University of Colorado, 325 Broadway W/NP9, Boulder, CO, USA
e-mail: eduardo.araujo@noaa.gov

G.A. Casillas-Pérez
Instituto de Geofísica, Unidad de Cómputo, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad
Universitaria, C.P. 04510 México, D.F., Mexico
e-mail: gacp@geofisica.unam.mx

together with complementary information such as the vertical total electron content (*vTEC*) and the *Dst* index, were used to identify and understand when the interplanetary scintillation (IPS) could be contaminated by ionospheric disturbances (IOND). We find that radio signal perturbations were sometimes associated with IOND and/or IPS fluctuations; however, in some cases, it was not possible to clearly identify their origin. Our Fourier and wavelet analyses showed that these fluctuations had frequencies in the range ≈ 0.01 Hz – ≈ 1.0 Hz (periodicities of 100 s to 1 s).

Keywords Interplanetary scintillation · Ionospheric disturbances · MEXART · *vTEC*

1. Introduction

Large-scale solar-wind disturbances in the interplanetary medium (IPM) can, and frequently do, distort radio-wave fronts coming from compact radio sources producing the so-called interplanetary scintillation (IPS) (Hewish, Scott, and Wills, 1964; Hewish and Bravo, 1986). It is well known that radio sources with an angular diameter smaller than 1 arcsec present interplanetary scintillation at frequencies > 0.1 Hz (Hewish and Duffet-Smith, 1987); though, depending on the observing wavelength, IPS can be present beyond 10 Hz (Milne, 1976; Manoharan and Ananthakrishnan, 1990; Manoharan, Kojima, and Misawa, 1994; Manoharan, 2010). IPS on a large number of compact radio sources has been observed using the *Ooty Radio Telescope* (ORT), *Solar-Terrestrial Environment Laboratory* (STEL) and *Mexican Array Radio Telescope* (MEXART), providing insight in the solar-wind properties (Manoharan and Ananthakrishnan, 1990; Manoharan, Kojima, and Misawa, 1994; Mejia-Ambriz *et al.*, 2010).

Solar events can affect the plasma of the Earth's ionosphere either directly, through X-ray and/or EUV radiation from flares as it reaches Earth, or indirectly, through the perturbation of the magnetospheric electric field upon the arrival of an interplanetary CME (Tsurutani *et al.*, 2009). The Earth's ionosphere is considered a dispersive medium for radio waves. Its refractive index is a function of the radio-wave frequency, the electron density, and the intensity of the Earth's magnetic field, \mathbf{B} . Its perturbation can be an important source of error for the signals of the *Navstar Global Positioning System* (GPS) satellites and other positioning systems like *Galileo* (European Union), *Glonass* (Russia), and *Compass* (China). The error in the signals is proportional to the integrated electron density along the signal path, TEC, and inversely proportional to the square of the carrier phase frequency, $\tau \propto TEC/v^2$ (Langley, 1996; Komjathy, 1997). The signals from GPS satellites must travel through the Earth's ionosphere on their way to the GPS receivers (on the Earth's surface) in the L-band: $L_1 = 1575.42$ MHz and $L_2 = 1227.60$ MHz. Although there is another L-band, $L_3 = 1381.05$ MHz, GPS users cannot use it (Erickson *et al.*, 2001).

Several works have shown the importance of the ionospheric interference on the IPS (Gapper *et al.*, 1982; Purvis *et al.*, 1987; Tappin, Hewish, and Gapper, 1984; Woan, 1995; Lucek, Clark, and Moore, 1996; Jackson *et al.*, 1998; Pérez-Enríquez *et al.*, 2008; Shishov *et al.*, 2010). Part of this contamination, or ionospheric scintillation (IONS), can represent a serious problem in IPS studies. In fact, the presence of IONS can lead to a misinterpretation of the IPS; however, there are techniques to remove the ionospheric scintillation part. Carrillo-Vargas *et al.* (2012) have explored another possible data contamination by ionospheric effects. They have shown an example related to a solar event on 15 December 2006, where the fluctuations observed in the signal of the radio sources exhibited strong contamination by ionospheric disturbances (IOND). The behavior shown by the radio signal was

consistent with the fluctuations observed from the signal emitted by polar satellites. The authors suggested that not only the total electron content (TEC) and the geomagnetic equatorial index, Dst , could be used to characterize the origin of such fluctuations, but also the possibility of removing the contaminating frequencies from the data to study the IPS or the IOND separately.

Since we have observed fluctuations in the radio signal of sources transiting the MEXART observatory, the purpose of our study is to understand the nature of these fluctuations, as well as answering the following questions: Are the fluctuations intrinsic to quiet solar-wind conditions? When are these fluctuations related to ionospheric disturbances? How do these fluctuations quantitatively affect the IPS? To answer these questions, we have analyzed the radio signal of sources observed with the MEXART. We have explored all observations to investigate whether the ionospheric contribution is always present, even in the absence of solar events. In Section 2, we present the information related to the MEXART observations for the period between April and May 2010. Section 3 shows the data analysis applied and the results using wavelet analysis applied to the MEXART data. Finally, in Sections 4 and 5 we present the discussion and conclusions of our work, respectively.

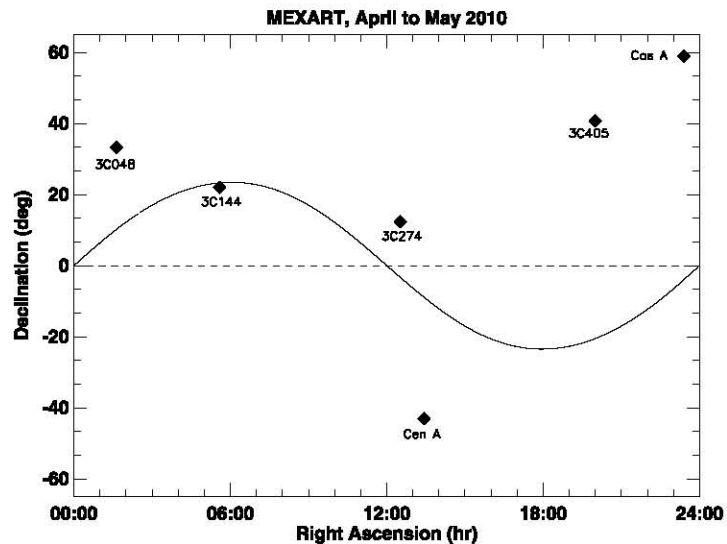
2. Observations

We considered two short periods of MEXART (located at a latitude of $+19^{\circ}48'39''$, longitude of $-101^{\circ}41'39''$, and elevation of 1964 m above mean sea level) observations, from 20 to 30 April and 8 to 31 May 2010, with a configuration that used a small section of the MEXART antenna. We used a 1024-dipole rectangular sub-array arranged in 16 rows. Each row is horizontally polarized in the East–West direction. The total area of the antenna is 2415 square meters, 17.25 m (North–South) \times 140 m (East–West), which is one fourth of the total MEXART array. The array feeds a 16×16 Butler matrix, which generates 16 beams, each of width 1×8 degrees. The receiver works at 139.65 MHz with a 2 MHz bandwidth and a time constant of 40 ms. The acquisition rate is 20 ms. Further technical details of the radio telescope can be found elsewhere (González-Esparza *et al.*, 2004; González-Esparza *et al.*, 2006; Carrillo-Vargas, 2007). The daily MEXART observations and the transit of strong radio sources can be viewed in real time.¹

Transit observations of the following sources were taken on several days: 3C48 (R. A. = $01^{\text{h}}37^{\text{m}}41.3^{\text{s}}$, Dec = $+33^{\circ}09^{\text{m}}35^{\text{s}}$, right ascension and declination, respectively), 3C144 (R. A. = $05^{\text{h}}34^{\text{m}}32.0^{\text{s}}$, Dec = $+22^{\circ}00^{\text{m}}52^{\text{s}}$), 3C274 (R. A. = $12^{\text{h}}30^{\text{m}}49.4^{\text{s}}$, Dec = $+12^{\circ}23^{\text{m}}28^{\text{s}}$), Cas A (R. A. = $23^{\text{h}}23^{\text{m}}27.9^{\text{s}}$, Dec = $+58^{\circ}48^{\text{m}}42^{\text{s}}$), Cen A (R. A. = $13^{\text{h}}25^{\text{m}}27.6^{\text{s}}$, Dec = $-43^{\circ}01^{\text{m}}09^{\text{s}}$), and 3C405 (R. A. = $19^{\text{h}}59^{\text{m}}28.3^{\text{s}}$, Dec = $+40^{\circ}44^{\text{m}}02^{\text{s}}$). The coordinates are precessing at equinox J2000.0 and are represented in a map (Figure 1) showing the right ascension (R. A.) and declination (Dec). Table 1 lists the observation dates of the sources whose radio signal presented fluctuations when transiting the MEXART observatory (see first and second columns). We use the MEXART position (latitude, longitude, and elevation) and the precessed coordinates (R. A. and Dec) for each radio source to determine their transit time during the date we analyze MEXART data. The third column in Table 1 shows the corresponding elongation angle (ϵ , the angle between the Sun–Earth line

¹<http://www.mexart.unam.mx>.

Figure 1 Location of the radio sources observed with MEXART. These radio sources were observed between 20 April and 31 May 2010. The orbit of the Sun along the year is indicated with a continuous line.



and the source) in degrees for each source. The radio source 3C144 shows the smallest ϵ values, all fluctuations shown by these sources were analyzed to characterize their origin. There are days with no MEXART observations; they appear as blanks in Table 1.

2.1. The $vTEC$ and the Dst Index

When analyzing radio sources observed by any telescope, such as MEXART, it is important to take into account the conditions in the environment. The origin of the fluctuations observed in the radio signal of each source can be understood if we analyze them together with the characteristics of the geomagnetic field and the ionosphere. In this context, we included the geomagnetic equatorial Dst index (the provisional values from Kyoto²) and the vertical total electron content³ ($vTEC$) to understand the potential correlation between geomagnetic storms and ionospheric disturbances. The ionospheric total electron content is a well suited parameter to study the conditions of the perturbed ionosphere and it is particularly important to correct the positioning information for single-frequency GPS users (Araujo-Pradere, 2005; Araujo-Pradere, Fuller-Rowell, and Spencer, 2006). To facilitate the comparison between the Dst index and the $vTEC$ properties, in the fourth and fifth column of Table 1, we list the averaged Dst index, $\langle Dst \rangle$, and the corresponding minimum value of Dst , Dst_{min} , for each day. Finally, we have included the dispersion of $vTEC$, δ , which is defined as

$$\delta = \frac{(vTEC_{max} - \langle vTEC \rangle)}{\langle vTEC \rangle}, \quad (1)$$

where values of $\delta \gtrsim 4$ indicate that $vTEC$ is strongly disturbed (see for instance López-Montes, Pérez-Enríquez, and Araujo-Pradere, 2012; Carrillo-Vargas *et al.*, 2012).

The $vTEC$ values reported here were calculated using five GPS receivers in stations that cover a wide region of the sky and that were located in the proximity of the MEXART observatory: Coeneo (UCOE), Celaya (CEGA), Aguascalientes (INEG), Oaxaca (OAX2) and Toluca (TOL2). Table 2 shows the location (latitude and longitude) and the elevation of the GPS-signal recording stations.

²<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/>.

³Usually the $vTEC$ is measured in TEC units ($TECu$), where $1\ TECu = 10^{16}\ m^{-2}$.

Table 1 Sources showing fluctuations in the radio signal observed by MEXART observatory. The δ parameter is the dispersion of νTEC (see Section 2.1).

Date (2010)	Sources	ϵ ($^{\circ}$)	$\langle Dst \rangle$ (nT)	Dst_{\min} (nT)	δ
20 April			1	-10	1.50
21 April			1	-7	1.33
22 April			5	-5	1.71
23 April	3C144, 3C405	50.6, 82.6	-9	-22	1.48
24 April	Cas A	55.1	-12	-23	1.47
25 April	3C144, 3C405, Cas A	48.7, 83.6, 55.2	1	-5	1.65
26 April	3C274, Cen A, Cas A	143.7, 148.8, 55.3	7	2	1.23
27 April	3C144, Cas A	46.7, 55.4	5	0	1.33
28 April	3C144, 3C405, Cas A	45.8, 85.1, 55.6	7	-3	1.56
29 April	3C405, Cas A	85.6, 55.7	2	-6	1.55
30 April			0	-4	1.75
7 May			-14	-23	1.35
8 May	3C144	36.1	-8	-28	1.10
9 May			-6	-13	1.41
10 May			4	-8	1.38
11 May	3C274, Cen A	130.2, 146.4	8	-8	1.76
12 May			-8	-12	1.09
13 May			1	-10	1.46
14 May			3	-3	1.97
15 May			-3	-13	1.92
16 May			4	-3	1.72
17 May			-1	-12	2.29
18 May			-3	-28	2.37
19 May	Cas A	60.4	0	-2	1.93
20 May	3C405, Cas A	95.8, 60.7	-12	-17	1.64
21 May	3C405	96.3	3	-11	1.96
22 May	3C405, Cas A	96.8, 61.4	3	-3	1.43
23 May	3C405, Cen A	97.3, 141.0	5	-1	1.16
24 May	3C405	97.7	10	0	1.17
25 May	3C405	98.2	9	0	1.34
26 May	3C405, Cas A	98.7, 62.9	-4	-4	1.57
27 May	Cas A	63.3	1	-3	1.45
28 May	3C144, 3C405, Cas A	16.7, 99.6, 63.7	-3	-3	1.52
29 May	3C144, 3C405, Cas A	16.0, 100.1, 64.1	-29	-85	1.28
30 May			-37	-48	1.93
31 May			-32	-37	1.34

3. Data Analysis and Results

The data analysis was done in two steps: first we analyze MEXART data and second we study the ionospheric data.

Table 2 Location of the GPS-signal recording stations used to calculate the $vTEC$. The fifth column corresponds to the elevation above sea level of each station.

Station Name	Station Code	Latitude (N)	Longitude (W)	Elevation (m)
Coeneo	UCOE	19°48'47"	101°41'39"	1978.8
Celaya	CEGA	20°31'40"	100°48'55"	1750.0
Aguascalientes	INEG	21°51'22"	102°17'03"	1888.4
Oaxaca	OAX2	17°04'42"	96°43'00"	1607.3
Toluca	TOL2	19°37'35"	99°38'36"	2651.9

3.1. MEXART Data

Data analysis of MEXART radio signals yielded two statistical parameters: the signal to noise ratio (S/N) and the average root mean square (rms) value calculated for the previous and the ensuing days for each radio source observational period. We analyzed the time series for each source transit time (around 8 min), looking for strong fluctuations in the radio signals.

We used several routines developed to analyze MEXART data in which we included one to read the raw data, another one to remove interference and gaps, and a third one that included Gaussian fits to obtain a detrended time series.

The time interval covered by the GPS data was the same, 20 April to 31 May, 2010. During this period, the GPS data showed the typical diurnal variation without any significant event. However, the $vTEC$ showed a maximum of about 30 $TECu$ associated with the geomagnetic storm with a minimum Dst of -85 nT, which occurred on 29 May. Figure 2 shows the $vTEC$ for each station, where the $vTEC$ series is given every 15 minutes. The lower panel in Figure 2 shows the evolution of the Dst index. We observe two minima, one around 2 May (with a minimum value of -67 nT at 18:00 UT) and a second one on 29 May (with a minimum value of -85 nT between 13:00 and 14:00 UT).

The two minima, mentioned above, were probably associated with the coronal mass ejections (CME⁴) that occurred in active regions 11063 and 11072, or with the coronal holes located close to central meridian around four days before they were registered. These solar events certainly modified the plasma conditions in the interplanetary medium, and possibly along the line of sight between the radio sources and the MEXART observatory.

Four slow and narrow CMEs were observed on 29 April, which could be associated with the minimum on 2 May; however, these CMEs seemed to have no significant effect on the Earth's magnetosphere. The CMEs occurred at 01:12 UT, 03:36 UT, 07:00 UT, and 17:00 UT, and had velocities of 138 km s⁻¹, 178 km s⁻¹, 187 km s⁻¹, and 378 km s⁻¹, respectively. Their position angles (PAs) were around 80° for the first three, and 260° for the last one. All these CMEs seemed to originate from active region 11063 (N16 E11), very close to central meridian.

A coronal hole was observed in X-ray images obtained with the GOES 14 satellite on 24 April. This coronal hole appeared as a small region at the pole to the North–East of the solar disk. The coronal hole displaced towards the North–West during several days and reached lower latitudes where it became bigger. The high-speed streams (~ 600 to

⁴See the Large Angle and Spectroscopic (LASCO) CME catalog at http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/.

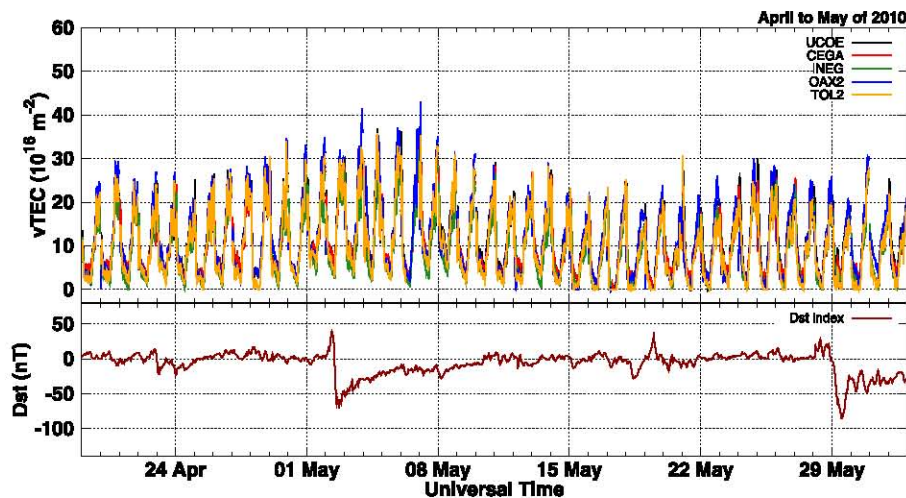


Figure 2 The vertical total electron content ($vTEC$) and Dst index. The top panel shows the $vTEC$ calculated from five stations: UCOE, CEGA, INEG, OAX2 and TOL2, represented with lines in black, red, green, blue, and orange colors, respectively (see Section 2.1). The bottom panel shows the Dst index. Both, $vTEC$ and Dst index, are shown in the time interval from April to May 2010.

700 km s^{-1}) originating in the coronal hole were registered by the plasma instruments onboard *Wind* and the *Advanced Composition Explorer* (ACE) from 30 April to 2 May 2010. Before the initiation of the geomagnetic storm, the solar-wind speed had an average value of $\sim 400 \text{ km s}^{-1}$. However, on 2 May, this value increased to around 650 km s^{-1} . This fact coincides with the growth of the plasma temperature (reaching $7 \times 10^5 \text{ K}$). The magnetic field magnitude also showed an increase, which is consistent with an observed rotation of the southward component of the magnetic field, B_z and with the growth of the plasma pressure. Finally, the plasma- β parameter exhibited small values (close to zero) in the same time interval, confirming the effect of the high-speed stream from this coronal hole.

Regarding the second minimum in the Dst index on 29 May, the active region 11072 (S15 W11) displayed some activity during several days starting on 24 May. A halo CME, with a linear speed of 427 km s^{-1} occurred on 24 May at $\approx 14:06 \text{ UT}$. X-ray images from GOES 14 also showed a coronal hole by the end of 24 May; it appeared as a small region at the pole to the North–East of the solar disk. This structure continuously moved to lower latitudes and became bigger. Thus, the presence of the active region, the high-speed stream from a coronal hole, and the CMEs occurrence, which displayed the characteristics of a magnetic cloud (with a nice B_z rotation), may have led to the dip in Dst index. The $vTEC$ showed a slight response to these events, whereas the Dst index presented minima. The total electron content had a maximum no greater than 45 TECu between 3 to 6 May, and no greater than 35 TECu between 29 and 31 May. Unfortunately, we do not have MEXART data for the period of 1 to 7 May. Depending on the availability of MEXART observations, we estimated the scintillation index for each source as in Pérez-Enríquez, Carrillo, and Rodríguez (2006).

3.2. Wavelet Analysis

A wavelet transform can map the power of a particular frequency at different times, giving an expansion of the signal in both time and frequency. Furthermore, the wavelet transform not only tells us which frequencies are present in the signal, but also shows whether a particular

scale varies in time. In addition, the wavelet tool has an important advantage over Fourier transforms since it can extract frequency information from a signal using search windows of variable scales.

The wavelet analysis used in this work is based mainly on the wavelet software provided by C. Torrence and G. Compo,⁵ and programmed in the Interactive Data Language (IDL). We also included several new routines adapted to this software for analyzing MEXART data. These routines were developed to read the data and for fitting Gaussian functions to get a detrended time series, which was used in our wavelet approach.

The wavelet analysis was applied to the radio signal of every source day by day to look for fluctuations that stand above the background signal along the time interval for the data analysis used in this work. With this tool we characterized the frequencies associated with these fluctuations in perturbed time subintervals (where the *Dst* geomagnetic index and TEC were slightly perturbed) and we compared them with undisturbed subintervals.

Figures 3 to 8 show wavelet plots for representative dates and sources. Each figure considers 4-day observations for one source. From top to bottom and from left to right we present in the first two panels, the time series together with a Gaussian fitting (thick yellow line) and the amplitude of the detrended time series below. In addition, the middle panels show the wavelet of the detrended time series depicting the periodicities associated with the observations. The black lines indicate the influence of the cone region at a 95 % significance level. To the right, the wavelet window shows the spectral power-spectrum highlighting the periodicities/frequencies above a line which represents the 95 % significance level. Finally, the bottom panels show the average variance.

Table 3 shows the best Gaussian-fit parameters applied to the radio data in order to obtain a detrended signal. We selected representative dates for perturbed (*i.e.* 24 to 31 May) and unperturbed (*i.e.* 24 to 30 April and 13 to 18 May time intervals) TEC for every source that reflects this behavior in several parameters. Table 3 also contains signal to noise ratio (S/N) values in the second column, the amplitude (A) in volts in the third column, the transit time (T.T.) recorded by the MEXART observatory for every source, the full-width at half-maximum (FWHM) in minutes, and the standard error between the fit and the radio signal, shown in the fourth, fifth, and sixth columns, respectively. The S/N ratio for the sources presented in this work took values between 4.1 to 36.8 (see Table 3), showing that the parameters obtained in our analysis were well determined.

4. Discussion

In this paper we compared the perturbations observed with the MEXART radio telescope and those in the *vTEC* and the *Dst* index for the periods of observation from 20 to 30 April and from 8 to 31 May. Several sources were found to scintillate and we analyzed in which cases the signals were contaminated by IOND (as was found by Carrillo-Vargas *et al.*, 2012). Figure 9 shows the *G*-index computed as

$$G = \left(\frac{\langle \Delta I(t)^2 \rangle}{\langle I(t) \rangle^2} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

⁵<http://atoc.colorado.edu/research/wavelets/>.

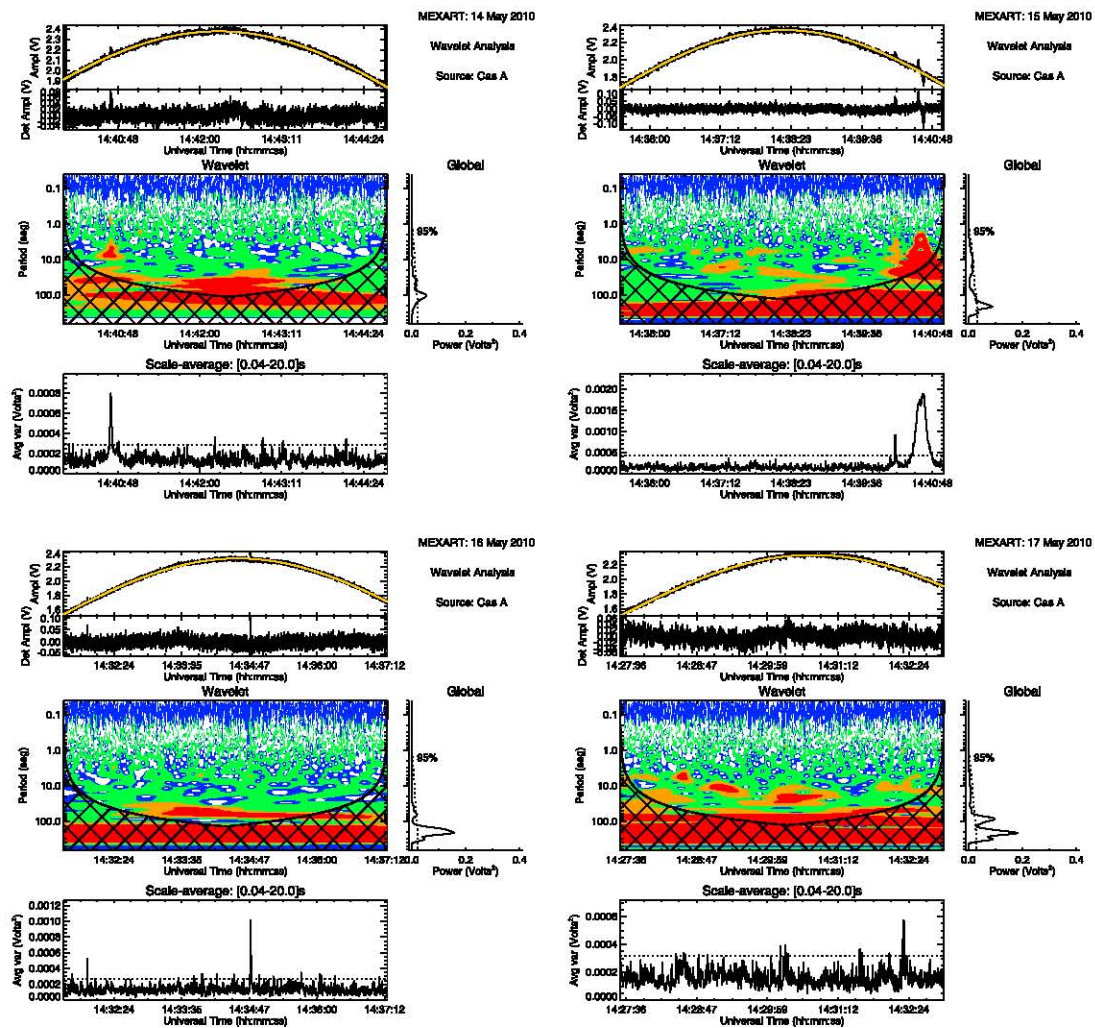


Figure 3 Wavelet analysis for the radio source Cas A, from 14 to 17 May. The radio signal of this source does not show significant disturbances during these days. These are characteristic wavelet-spectra of quiet days for this particular source. The level colors (black to red) for the power of each spectrum were [0.0001, 0.0006, 0.007, 0.02, 0.5, 0.8, 2.0] V². See Section 3.2 for a more detailed explanation of the panels.

for each source plotted as a function of time (in days), where the source intensity at a given time is $I(t)$ and its fluctuation around the mean is $\Delta I(t)$. The fluctuation is defined as $\Delta I(t) = I(t) - \langle I(t) \rangle$ and the mean intensity of the source is defined as $I_0 \sim \langle I(t) \rangle$ (Pérez-Enríquez, Carrillo, and Rodríguez, 2006). From panel (a), we observe that the G -index shows an increase on 26 April for the sources Cen A and 3C274. Since the Dst index and the $vTEC$ correspond to quiet periods, this suggests that these fluctuations are probably associated with perturbations in the interplanetary medium producing IPS. Moreover, Cas A also presents an increase on 30 April, suggesting an ionospheric origin. From panel (b), we observe along this time interval that the G -index for source 3C405 has stronger peaks. Due to the position of this source, we consider that its radio-signal behavior is related to ionospheric disturbances around the auroral region.

We discuss the behavior of the signal of each source:

- i) *Cas A* shows no significant fluctuations in an undisturbed period from 14 to 17 May, as shown in Figure 3. The behavior of the radio signal is very similar for several days. Additionally, the wavelet analysis shows no significant periodicities/frequencies within the

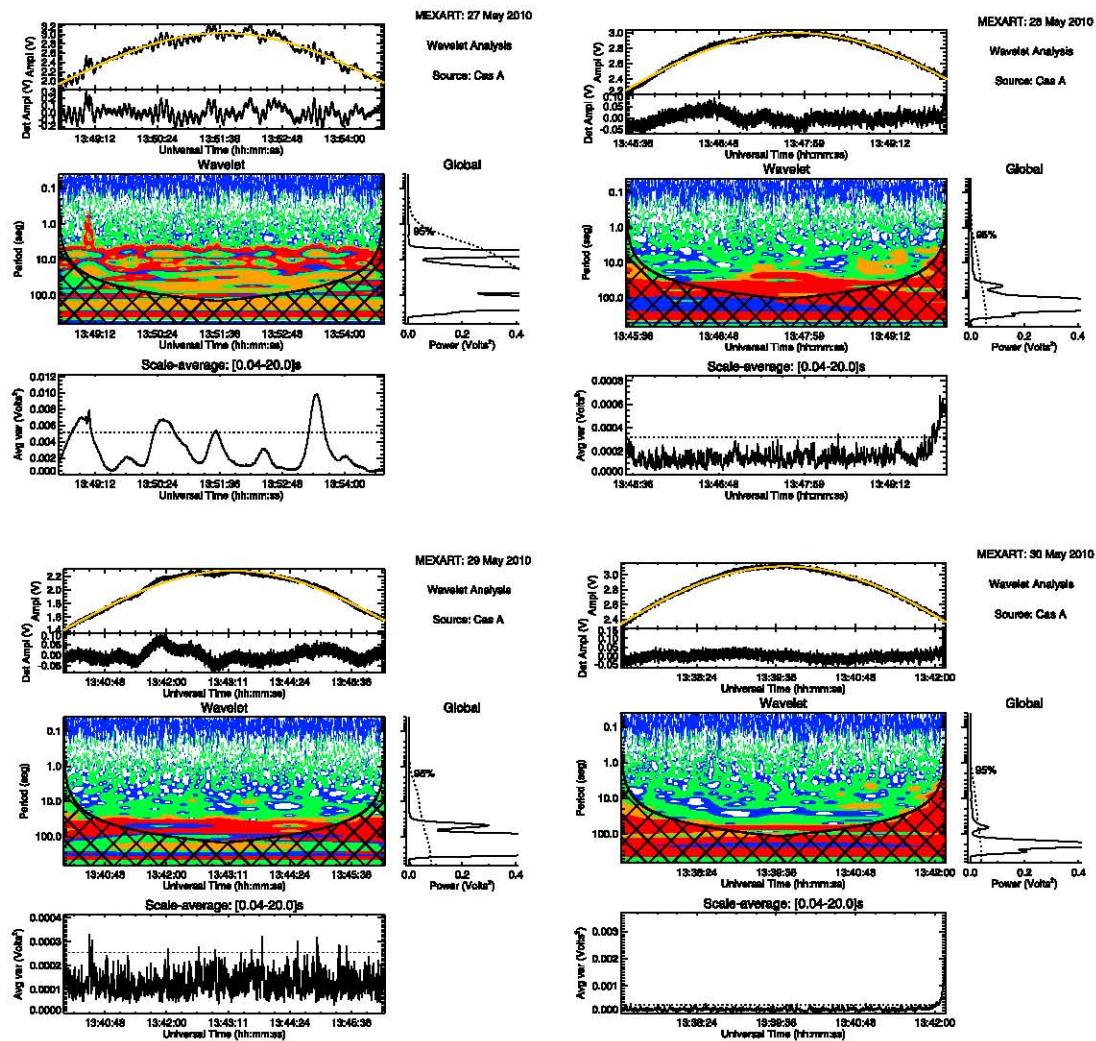


Figure 4 Wavelet analysis for the radio source Cas A, from 27 to 30 May. The fluctuations observed on 27 May could be associated with perturbations in the IPM producing IPS and, similarly, from 28 to 29 May. This source shows slight fluctuations in the signal related to a Halo-CME event (see Section 3). The level colors are the same as in Figure 3. See Section 3.2 for a more detailed explanation of the panels.

cone of influence for each day. This is in agreement with the observed power spectra, which show similar behaviors with no significant periodicities beyond a 95 % significance level. Furthermore, we observe that sometimes there are narrow peaks mounted on the source radio-signal that modify the variance substantially (bottom panel). These peaks are associated with lightning storms close to the MEXART observatory and/or with transiting-satellite signals. We assume that these signals do not affect our analysis in a first approach, because they occur sporadically and randomly and do not affect substantially the periodicities and the power spectra. On the other hand, Figure 4 shows significant differences in the period of 27 to 30 May in comparison with Figure 3. For instance, this radio source shows appreciable fluctuations on 27 May, when periods of ≈ 6 s (≈ 0.17 Hz) and also ≈ 40 s (≈ 0.025 Hz) are within the cone of influence. The behavior of the $vTEC$ and the Dst index correspond to a quiet period for this day suggesting that these fluctuations are probably associated with ionospheric perturbations restricted to the auroral zone. In fact, on 28 May the radio signal shows slight fluctuations with periodicities greater than ~ 50 s (~ 0.02 Hz), but on 29 May there was an

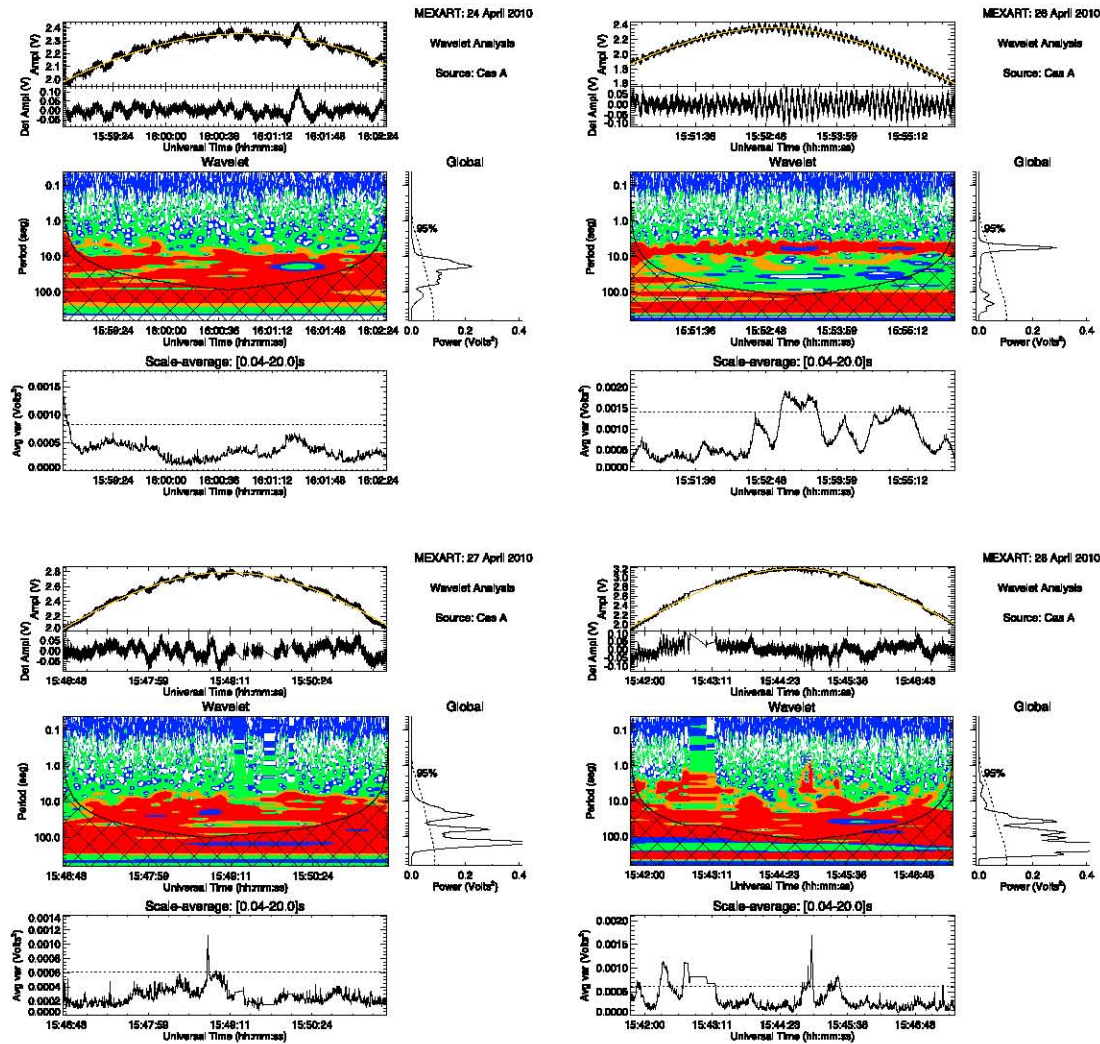


Figure 5 Wavelet analysis for the radio source Cas A from 24 to 28 April. For all of these days, Cas A shows clear and different fluctuations. On 24 and 26 April, these fluctuations may be due to perturbations in the IPM producing IPS; however, on 27 and 28 April, the fluctuations may be associated with IPS and IOND. The level colors are the same as in Figure 3. See Section 3.2 for a more detailed explanation of the panels.

increase in power concentrated around 20 s (~ 0.05 Hz). This increase could be probably associated with the arrival to Earth of a CME, as is reflected by the *Dst* index for these days. Several CMEs took place around this period, but we believe that only the halo CME observed ($\sim 14:06$ UT, with a velocity of 427 km s^{-1}) on 24 May plus the high-speed stream from a coronal hole observed on the solar disc may be responsible for the geomagnetic storm (see Figure 2). In this scenario, a complete study is always useful to understand the whole context in the interplanetary medium, interplanetary CMEs (*e.g.*, ejecta and magnetic cloud), corotating interaction regions or CIRs, etc. Finally, on 30 May the behavior of this source radio-signal returns to a quiet state without fluctuations, as shown in Figure 4. Figure 5 shows a different period of observation for this source, from 24 to 28 April. During this period of time, the radio signal presents fluctuations every day. However, the frequencies indicate different origins. In fact, for 24 and 26 April the *vTEC* and the *Dst* index display a behavior corresponding to a quiet period (see Figure 2), suggesting that these fluctuations are probably associated with perturbations in the interplanetary medium producing IPS. For 27 and 28 April, the fluctuations

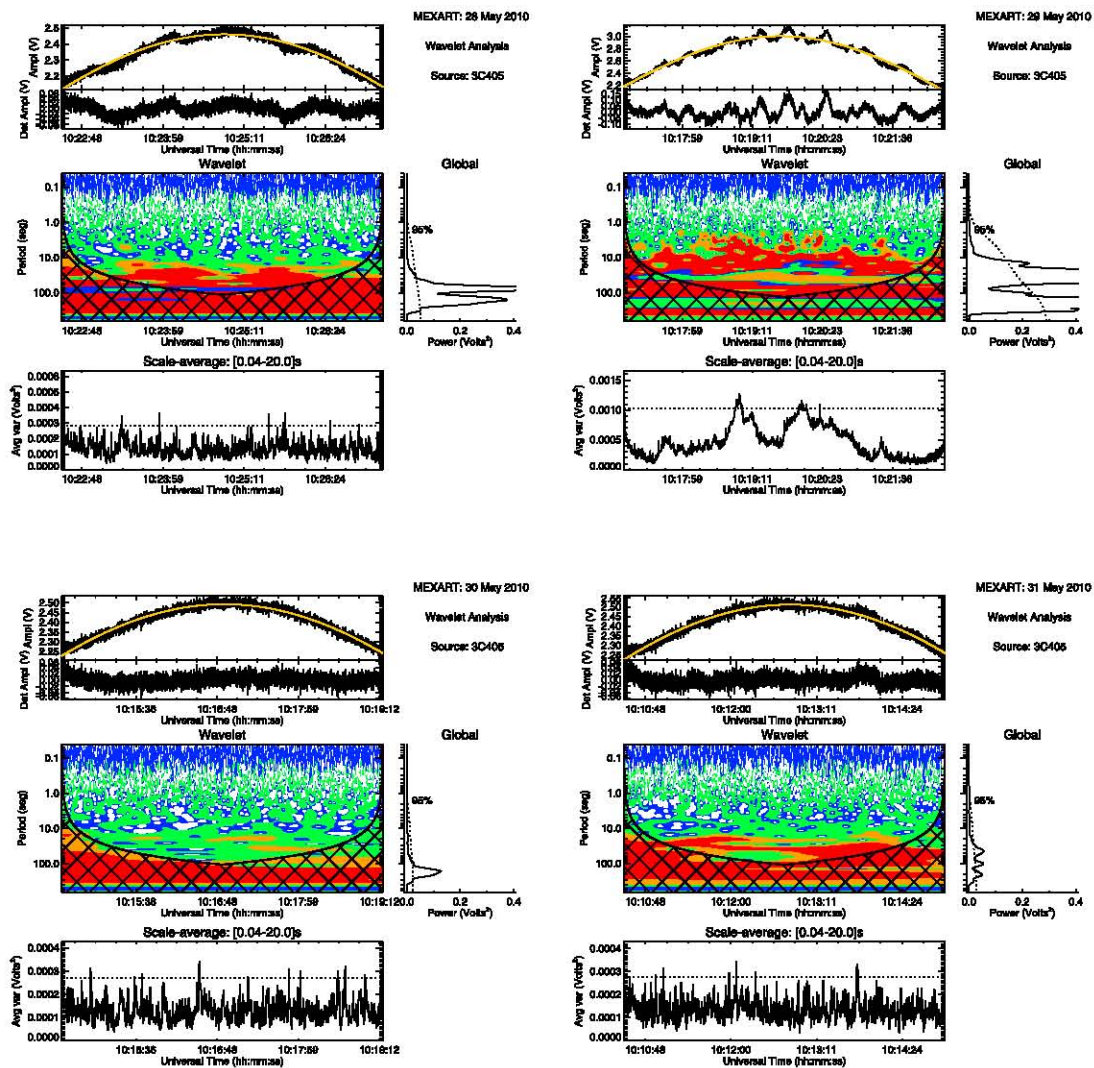


Figure 6 Wavelet analysis for the radio source 3C405 from 28 to 31 May. This source shows strong fluctuations on 29 May, probably associated with IPS (see Section 4). The level colors are the same as in Figure 3. See Section 3.2 for a more detailed explanation of the panels.

could be associated with IPS plus IOND. Figure 9 shows that the index presents an abrupt peak on 30 April. This increase, although due to ionospheric disturbances, as can be appreciated from the wavelet analysis, does not let us clearly understand what the contribution of the ionosphere is (in relation with the *Dst* variation) because this would require data from more radio sources.

- ii) *3C405* shows a behavior similar to that of *Cas A*, when on 28 May the radio signal presents slight fluctuations with periodicities greater than 50 s (~ 0.02 Hz) and with a significant power at these frequencies. However, on 29 May, the fluctuations are stronger with periodicities greater than 10 s (~ 0.1 Hz) and also with a significant power at these frequencies (see Figure 6). Because the ν TEC (see Figure 10) is not highly altered locally on 29 May, it is suggested that the fluctuations observed are probably due to ionospheric perturbations around the auroral region. On 30 May the radio signal of this source shows a behavior corresponding to a quiet period. Finally, on 31 May, the radio signal of this source presents slight fluctuations: however, in this case, the ν TEC (see

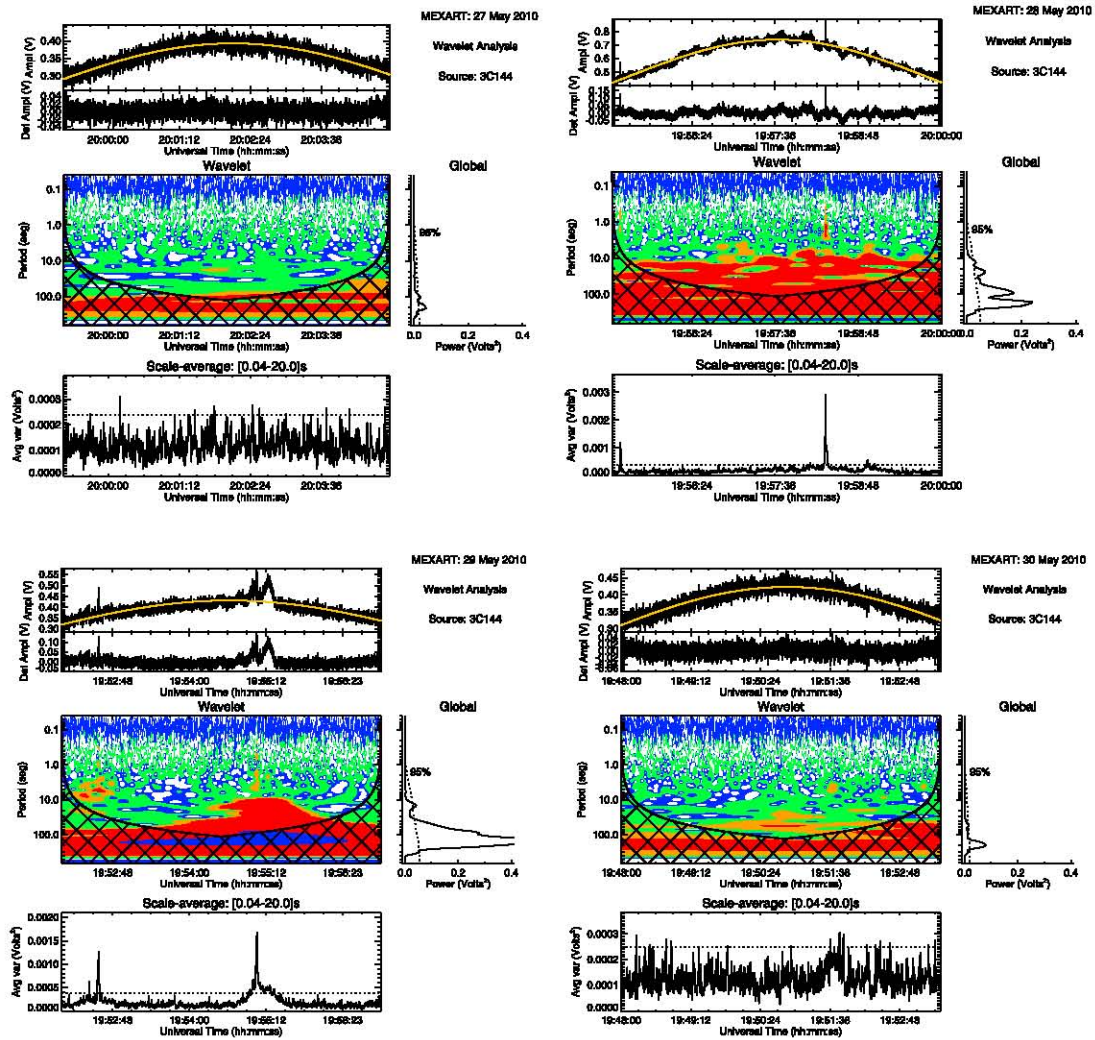


Figure 7 Wavelet analysis for the radio source 3C144, from 27 to 30 May ... (see Section 4). The level colors are the same as in Figure 3. See Section 3.2 for a more detailed explanation of the panels.

- Figure 10) is also slightly perturbed at the end of 30 May, suggesting that the observed fluctuations may be contaminated by ionospheric disturbances (see Figure 6).
- iii) *3C144* shows a different behavior. No fluctuations were observed on 27 May (see Figure 7). However, the radio signal of this source is highly perturbed, the perturbations have periods of around 10 s (~ 0.1 Hz). In addition, both the ν TEC and the Dst (see Figure 10) show a behavior typical of quiet periods, suggesting that the fluctuations observed on this day may be due to IPS. There are several CME events between 25 and 28 May that may contribute to the IPS. Finally, on 29 and 30 May no significant fluctuations are observed (see Figure 7).
 - iv) *3C48*, remains unperturbed on 26 and 30 May, but on 28 and 29 May there are slight fluctuations observed in the wavelet window. However, the power spectra show no periodicities above the 95 % significance level (see Figure 8). In this case, the fluctuations observed could be associated with IPS and ionospheric perturbations, respectively. However, we need a higher S/N to have a better definition of their origin.

In summary, we have observed several sources that present fluctuations in their radio signal (see Table 1). These fluctuations may be associated with IOND, suggested by the

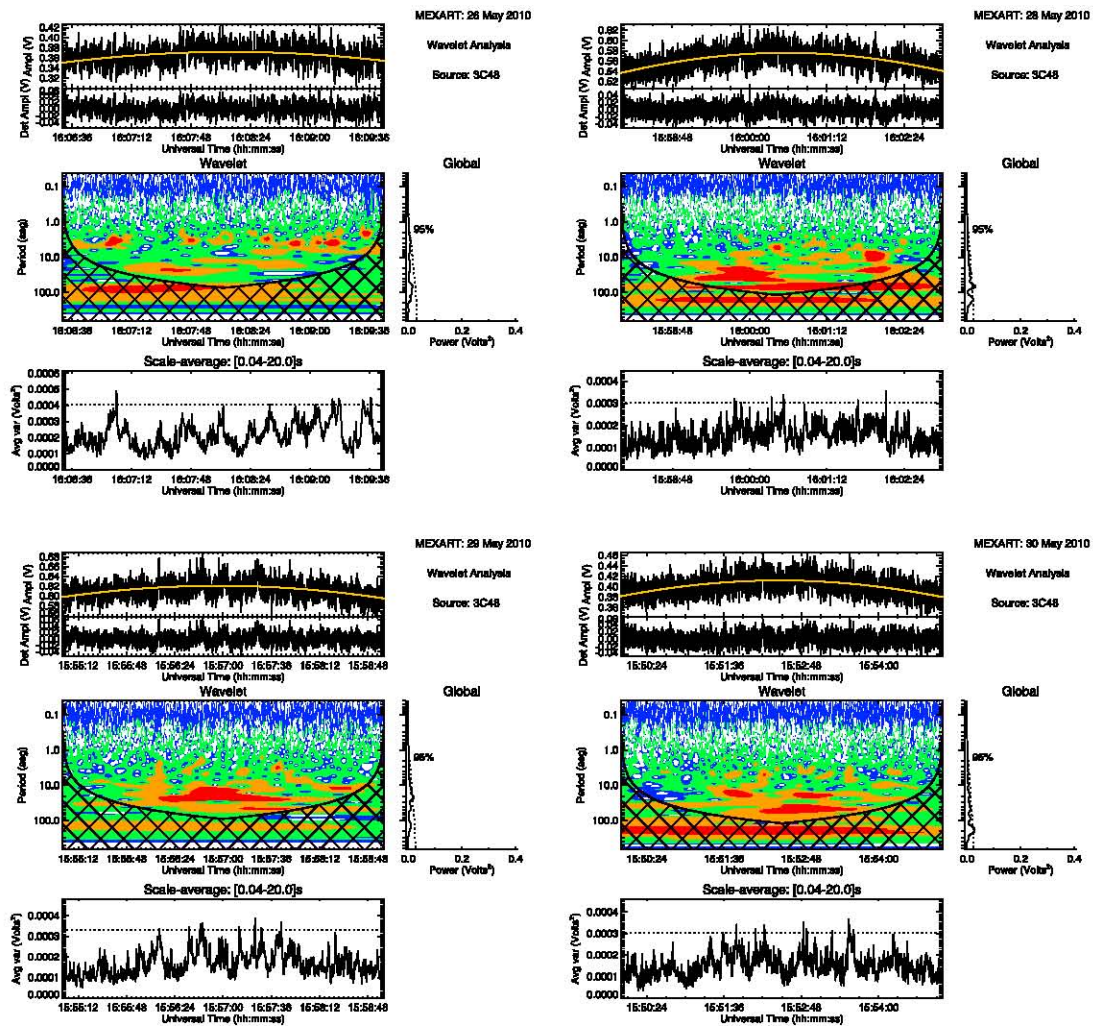


Figure 8 Wavelet analysis for the radio source 3C48 from 26 to 30 May ... (see Section 4). The level colors are the same as in Figure 3. See Section 3.2 for a more detailed explanation of the panels.

$vTEC$ in some days; but, in other cases, they were associated with IPS, and sometimes with both. The fact that sometimes the radio signal from astronomical sources is contaminated by ionospheric disturbances, suggests that these fluctuations should be taken into account as possible sources of contamination in IPS measurements obtained with the MEXART observatory (Carrillo-Vargas *et al.*, 2012).

From our results, we have found that this complementary study can help to understand the origin of the observed fluctuations in the radio signal of astronomical sources. In addition, we have found that the ionospheric disturbances can play an important role in the contamination of the signal when looking for IPS. The ionosphere acts as an obstacle to radio waves of ≤ 150 MHz (Cohen and Röttgering, 2009) and sometimes it is not possible to discriminate *a priori* between IPS or ionospheric disturbances as sources of the observed intensity fluctuations recorded by MEXART.

From a further analysis using the radio signal from satellites transiting close to an astronomical source and detected by MEXART observatory, it was possible to discern whether the intensity fluctuations were associated with IOND or IPS (Carrillo-Vargas *et al.*, 2012). In this context, we have used an additional tool, a wavelet analysis, in this article. This alternative tool lets us characterize the perturbed signal.

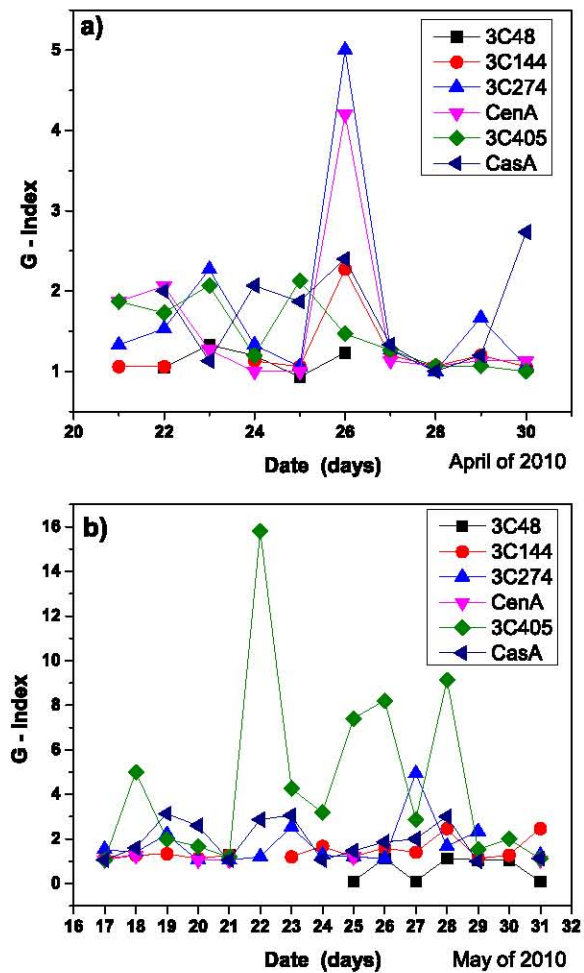
Table 3 Parameters for the best fit to the radio signal obtained from the wavelet analysis, where S/N is the signal to noise ratio, A is the amplitude for each radio signal, T.T. is the transit time for each source, FWHM is the full width at half maximum, and E_{std} is the standard error between the fit and the signal data.

Date	S/N	A (volts)	T.T. (hr)	FWHM (min)	E_{std}
Source: Cas A					
24 April 2010	22.0	2.35	16.01	8.23	0.03
26 April 2010	10.4	2.36	15.88	8.33	0.03
27 April 2010	11.1	2.79	15.82	7.15	0.03
28 April 2010	7.0	3.18	15.74	6.92	0.03
14 May 2010	14.3	2.38	14.70	8.13	0.01
15 May 2010	10.6	2.34	14.64	8.03	0.02
16 May 2010	9.4	2.32	14.58	8.04	0.01
17 May 2010	9.4	2.33	14.51	8.23	0.02
Source: 3C405					
25 April 2010	19.5	3.07	12.55	8.03	0.01
26 April 2010	14.8	2.89	12.49	8.23	0.02
27 April 2010	29.6	1.12	12.43	10.25	0.01
28 April 2010	9.0	3.47	12.37	6.04	0.02
28 May 2010	22.8	2.46	10.41	10.34	0.02
29 May 2010	10.1	3.00	10.33	7.89	0.05
30 May 2010	30.6	2.49	10.28	11.98	0.01
31 May 2010	29.4	2.51	10.21	11.17	0.01
Source: 3C144					
22 April 2010	12.5	0.93	22.32	5.68	0.01
23 April 2010	12.4	0.93	22.26	5.61	0.01
24 April 2010	9.2	0.79	22.19	5.53	0.01
25 April 2010	8.4	0.86	22.12	5.85	0.01
28 May 2010	6.2	0.74	19.96	5.26	0.02
29 May 2010	10.4	0.43	19.91	8.04	0.02
30 May 2010	11.1	0.42	19.85	8.54	0.01
31 May 2010	8.9	0.79	19.77	5.41	0.02
Source: 3C48					
22 April 2010	33.9	0.69	18.39	21.81	0.02
24 April 2010	27.1	0.58	18.24	16.56	0.02
25 April 2010	27.0	0.55	18.17	16.80	0.02
26 April 2010	31.9	0.61	18.12	17.22	0.02
26 May 2010	21.2	0.37	16.14	11.69	0.02
28 May 2010	30.7	0.58	16.01	16.09	0.01
29 May 2010	36.8	0.62	15.95	16.63	0.01
30 May 2010	23.4	0.41	15.87	14.86	0.01
Source: 3C274					
23 April 2010	4.1	0.27	5.23	4.51	0.01
24 April 2010	5.5	0.30	5.16	5.48	0.01
25 April 2010	4.7	0.24	5.10	4.65	0.01
26 April 2010	6.8	0.26	5.03	4.19	0.01
14 May 2010	4.8	0.27	3.85	4.66	0.01

Table 3 (Continued.)

Date	S/N	A (volts)	T.T. (hr)	FWHM (min)	E_{std}
15 May 2010	7.5	0.26	3.79	4.13	0.01
16 May 2010	5.1	0.25	3.72	4.42	0.01
17 May 2010	9.2	0.27	3.65	4.51	0.02
Source: Cen A					
23 April 2010	9.2	0.91	6.14	7.44	0.03
24 April 2010	13.8	0.92	6.07	7.66	0.02
25 April 2010	14.2	0.88	6.00	7.41	0.01
26 April 2010	15.0	0.86	5.94	7.11	0.01
28 May 2010	14.3	0.78	3.84	7.16	0.02
29 May 2010	9.7	0.70	3.78	6.35	0.01
30 May 2010	10.2	0.85	3.71	7.44	0.03
31 May 2010	15.1	0.78	3.64	7.19	0.03

Figure 9 The G -index, as defined in Pérez-Enríquez, Carrillo, and Rodríguez (2006), is plotted as a function of time (in days). Panel (a) shows the behavior for each radio source used in our analysis from 21 to 30 of April, close to the time of the first Dst minimum on 2 May. On 26 April, 3C274 and Cen A exhibit a significant G -index, its value being twice as large as for the other sources. Panel (b) shows the same data as panel (a), but from 16 to 31 May. The source 3C405 shows several peaks indicating a high G -index along the line of sight (see the text for more details in Section 4).



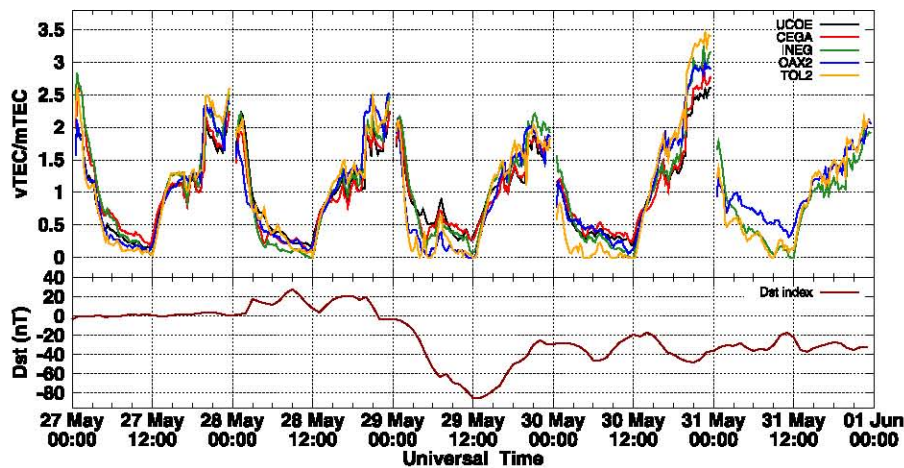


Figure 10 The vertical total electron content ($vTEC$) and the Dst index shown in detail from 27 May to 1 June 2010. The top panel shows the $vTEC$ divided by the mean value of the TEC (mTEC) and calculated using data from five stations: UCOE, CEGA, INEG, OAX2 and TOL2, represented with lines in black, red, green, blue and orange colors, respectively (see Section 2.1). The bottom panel shows the Dst index.

5. Conclusions

The conclusions of our work can be summarized as follows.

- Our study incorporates the use of wavelets together with complementary information provided by the $vTEC$ and Dst index. This is the first time these tools have been applied to MEXART data and allow a better understanding of cases when the IPS may be contaminated by IOND.
- Within the period of April–May 2010, several radio sources presented fluctuations in their radio signal registered with the MEXART. Using wavelets we found the periods/frequencies that characterize these fluctuations. We found that the perturbations in the signal were sometimes associated with IOND and/or IPS (see for instance Figure 4 top left, Figure 5 top left and Figure 8 top right). In this context the $vTEC$ can help to establish the cases in which the IPS is actually contaminated by IOND. Furthermore, in the example shown in Figure 8 (top left), the wavelet analysis indicates that the ionospheric scintillation is associated with quiet conditions, and in Figure 5 (top left) and Figure 6 (top right) the wavelet analysis shows ionospheric disturbances associated with the geomagnetic storm.
- In addition, Fourier spectra show that these fluctuations have frequencies between ~ 0.01 Hz to ~ 1.0 Hz (periods of 100 s to 1 s, respectively) for both IOND and IPS. We found that there is a tendency for the frequencies close to ~ 1.0 Hz to be more likely associated with IPS, whereas lower frequencies tend to be related to IOND. However, in the cases where both IPS and IOND occur, we could not distinguish between them.
- In the examples that neither the Dst index nor the $vTEC$ showed any significant change, we can say that the fluctuations are not related to global ionospheric effects but could be probably related to IPS. We observed that when the $vTEC$ is perturbed and solar-origin effects can be assumed, then the radio signal can be contaminated by ionospheric perturbations. This is probably the case observed by Carrillo-Vargas *et al.* (2012), where the fluctuations could be attributed to IOND and/or IPS.
- The solar-minimum period has allowed us to characterize better the radio fluctuations of astronomical sources observed with the MEXART, during this period the ionosphere can

contribute strongly. This is especially true for those sources that having large elongations (around 90° , for instance) present fluctuations in their signal. However, more work is needed to characterize the intrinsic fluctuations in the radio signal.

Acknowledgements The authors thank the MEXART team, in particular: A. González-Esparza (P.I. of MEXART), P. Villanueva, E. Andrade, and E. Aguilar, for technical support and provision of data. We also thank CORS, SOPAC, and UNAVCO for incorporating the data on their respective websites from which the GPS data can be freely downloaded. We are also grateful to NOAA-SWPC for access to the TEC calculation program. We also wish to thank the Servicio Sismológico Nacional and E. Cabral for providing some Mexican GPS data. This article was possible thanks to the PAPIIT-UNAM projects IN111509 and IA102514-2. M. Rodríguez-Martínez thanks REDCyTE and CONACyT for a postdoctoral fellowship supported by the project *Estudio de la ionosfera y sus aplicaciones* for the Mexican Space Agency (MSA). The authors finally thank the suggestions of M. Sánchez and S. Kurtz, which have improved this article.

References

- Araujo-Pradere, E.A.: 2005, GPS-derived total electron content response for the Bastille Day magnetic storm of 2000 at a low mid-latitude station. *Geofís. Int.* **44**, 211.
- Araujo-Pradere, E.A., Fuller-Rowell, T.J., Spencer, P.S.J.: 2006, Consistent features of TEC changes during ionospheric storms. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **68**, 1834.
- Carrillo-Vargas, A.: 2007, Construcción y calibración del radiotelescopio de centelleo interplanetario MEXART, Ph.D. Thesis, Univ. Nacional Autónoma de México.
- Carrillo-Vargas, A., Pérez-Enríquez, H.R., Rodríguez-Martínez, M., López-Montes, R., Casillas-Pérez, G.A., Araujo-Pradere, E.A.: 2012, Ionospheric disturbances detected by MEXART. *Adv. Space Res.* **49**, 11.
- Cohen, A.S., Röttgering, H.J.A.: 2009, Probing fine-scale ionospheric structure with the Very Large Array Radio Telescope. *Astron. J.* **138**, 439.
- Erickson, W.C., Perley, R.A., Flatters, C., Kassim, N.E.: 2001, Ionospheric corrections for VLA observations using local GPS data. *Astron. Astrophys.* **366**, 1071.
- Gapper, G.R., Hewish, A., Purvis, A., Duffett-Smith, P.J.: 1982, Observing interplanetary disturbances from the ground. *Nature* **296**, 633.
- González-Esparza, J.A., Carrillo, A., Andrade, E., Pérez-Enríquez, R., Kurtz, S.: 2004, The MEXART interplanetary scintillation array in Mexico. *Geofís. Int.* **43**, 61.
- González-Esparza, J.A., Carrillo, A., Andrade, E., Sierra, P., Vazquez, S., Rodríguez, C., Pérez-Enríquez, R., Kurtz, S., Blanco-Cano, X.: 2006, Calibration and testing of the MEXART antenna using solar transits. *Adv. Space Res.* **38**, 1824.
- Hewish, A., Bravo, S.: 1986, The sources of large-scale heliospheric disturbances. *Solar Phys.* **106**, 185.
- Hewish, A., Duffett-Smith, P.J.: 1987, A new method of forecasting geomagnetic activity and proton showers. *Planet. Space Sci.* **35**, 487.
- Hewish, A., Scott, P.F., Wills, D.: 1964, Interplanetary scintillation of small diameter radio sources. *Nature* **203**, 1214.
- Jackson, B.V., Hick, P.L., Kojima, M., Yokobe, A.: 1998, Heliospheric tomography using interplanetary scintillation observations 1. Combined Nagoya and Cambridge data. *J. Geophys. Res.* **103**, 12049.
- Komjathy, A.: 1997, Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System, Technical Report No. 188, New Brunswick. Ph.D. Thesis, Univ. of New, Brunswick.
- Langley, R.B.: 1996, *Propagation of the GPS Signals*, *Lect. Notes Earth Sci.* **103**, 60.
- López-Montes, R., Pérez-Enríquez, R., Araujo-Pradere, E.A.: 2012, The impact of large solar events on the total electron content of the ionosphere at mid latitudes. *Adv. Space Res.* **49**(7), 1167.
- Lucek, E.A., Clark, T.D.G., Moore, V.: 1996, The use of various interplanetary scintillation indices within geomagnetic forecasts. *Ann. Geophys.* **14**, 139.
- Manoharan, P.K.: 2010, Evolution of near-Sun solar wind turbulence. In: Hasann, S.S., Rutten, R.J. (eds.) *Magnetic Coupling Between the Interior and Atmosphere of the Sun*, *Astrophys. Space Sci. Proc.* **XII**, Springer, Dordrecht, 324.
- Manoharan, P.K., Ananthkrishnan, S.: 1990, Determination of solar-wind velocities using single-station measurements of interplanetary scintillation. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **244**, 691.
- Manoharan, P.K., Kojima, M., Misawa, H.: 1994, *J. Geophys. Res.* **99**, 23411.
- Mejía-Ambríz, J.C., Villanueva-Hernandez, P., Gonzalez-Esparza, J.A., Aguilar-Rodriguez, E., Jeyakumar, S.: 2010, Observations of Interplanetary Scintillation (IPS) using the Mexican Array Radio Telescope (MEXART). *Solar Phys.* **265**, 309.

- Milne, R.G.: 1976, Interplanetary scintillation power spectra. *Aust. J. Phys.* **29**, 201.
- Pérez-Enríquez, R., Carrillo, A., Kotsarenko, A., Cruz-Abeyro, J.A.L.: 2008, State of the inner heliosphere as given by the G index of interplanetary scintillation and the Dst index of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.* **113**, 10107.
- Pérez-Enríquez, R., Carrillo, A., Rodríguez, C.: 2006, Fractal character of G-index of IPS data for the period 1991–1994 obtained from multiscale wavelet analysis. *Adv. Space Res.* **38**, 1819.
- Purvis, A., Tappin, S.J., Rees, W.G., Hewish, A., Duffett-Smith, P.J.: 1987, The Cambridge IPS survey at 81.5 MHz. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **229**, 589.
- Shishov, V.I., Tyul'Bashev, S.A., Chashei, I.V., Subaev, I.A., Lapaev, K.A.: 2010, Interplanetary and ionosphere scintillation monitoring of radio sources ensemble at the solar activity minimum. *Solar Phys.* **265**, 277.
- Tappin, S.J., Hewish, A., Gapper, G.R.: 1984, Tracking a high-latitude corotating stream for more than half a solar rotation. *Planet. Space Sci.* **32**, 1273.
- Tsurutani, B.T., Verkhoglyadova, O.P., Mannucci, A.J., Lakhina, G.S., Li, G., Zank, G.P.: 2009, A brief review of “solar flare effects” on the ionosphere. *Radio Sci.* **44**, RS0A17.
- Woan, G.: 1995, Observations of long-lived solar wind streams during 1990–1993. *Ann. Geophys.* **13**, 227.

Capítulo 4

Discusión y Conclusiones

En el presente capítulo se presenta la discusión y conclusiones sobre cada uno de los temas centrales de esta investigación, acerca del efecto del clima espacial sobre la ionosfera terrestre, específicamente la influencia de eventos solares de energía alta y tormentas geomagnéticas sobre la ionosfera y su impacto sobre dispositivos en tierra, como el MEXART, medido por cambios en el TEC. Para un mayor entendimiento, el presente capítulo se divide en perturbaciones ionosféricas debidas a eventos solares de alta energía y debidas a tormentas geomagnéticas, para exponer mejor la discusión y conclusiones acerca de la influencia del clima espacial sobre la ionosfera terrestre a latitudes medias.

4.1. Perturbaciones ionosféricas debidas a eventos solares de alta energía

En este trabajo, se presentan los resultados del análisis del cálculo del TEC a partir de datos GPS sobre varias estaciones mexicanas, durante 15 eventos solares clasificación X que ocurrieron entre los años 2000 y 2006, con el propósito de poner a prueba la hipótesis de que tales eventos pueden tener un impacto en latitudes medias. En este contexto, la variación en sigmas para todos los eventos se muestra en la Tabla 4.1, donde se puede observar que, en general, esta variación es pequeña, pero no despreciable. La excepción ocurrió durante las “tormentas de Halloween”, donde la variación alcanzó 14 sigmas. Así que la pregunta es si estamos hablando de un caso *atípico*, es decir, algo que rara vez sucede, o si esto es una posibilidad real. En otras palabras, es claro que debemos tener en cuenta la dinámica clima espacial, tanto en términos de los más grandes eventos como las supertormentas, como los menos intensos que ocurren a lo

Cuadro 4.1: Variación de amplitud del TEC en sigmas y la diferencia porcentual del TEC, respecto a un periodo tranquilo.

Fecha	Variación	Diferencia porcentual
14/07/2000	5	321.7
02/04/2001	2.9	162.3
06/04/2001	3.6	228.9
15/04/2001	3.4	206.6
28/10/2003	6.9	399.7
29/10/2003	14	1423
02/11/2003	4.8	475.8
04/11/2003	2.6	116.9
20/01/2005	6.2	1956
07/09/2005	2.2	120.5
08/09/2005	1.8	94.2
09/09/2005	5.6	312.9
05/12/2006	1.6	115.1
06/12/2006	3.1	202.3
13/12/2006	6.2	542.4

largo del ciclo solar. Por otra parte, algunos de los eventos que han sido analizados resultaron estar relacionados con una ráfaga solar no asociada con una EMC. Por lo tanto, en un trabajo futuro, se analizará el TEC con respecto a las ráfagas solares y eliminar la influencia de las EMC, a fin de determinar la relación causa-efecto de las ráfagas sobre la ionosfera, si es que existe.

En general se reconoce que el clima espacial tiene un impacto significativo gradual en todas las latitudes, observándose los efectos más importantes principalmente en latitudes altas. De esta investigación se puede concluir que existe una considerable influencia de las ráfagas de fotones solares y/o de las tormentas geomagnéticas relacionadas con las EMC, sobre el comportamiento del contenido total de electrones en México. Otras conclusiones se muestran a continuación:

1. Para algunos eventos, como los de abril de 2001 que ocurrieron durante el máximo de actividad solar, la ionosfera estuvo muy alterada. A pesar de esto, en algunas estaciones se observó claramente un incremento en el TEC por encima de la variación diurna de fondo.
2. A pesar del hecho de que para algunos de los eventos analizados el índice Dst

no muestra alguna tormenta geomagnética, hay una variación apreciable en el TEC. De hecho, para los eventos del 14 de julio de 2000 y los de abril de 2001, la variación alcanza valores mayores a 4 sigmas. Una posible interpretación de esto es que el aumento de la radiación UVE durante una ráfaga solar también puede participar en la ocurrencia de una perturbación en la ionosfera.

3. Es muy importante señalar que durante las tormentas de diciembre de 2006, se incluyó una ráfaga de magnitud 3.4X en el análisis, que estuvo acompañada de una EMC. Dicho evento causó aumentos significativos de TEC en los valores máximos diarios que van desde casi 3 sigmas a más de 5 sigmas. Lo que nos dice que eventos relativamente pequeños pero bien localizados en el disco solar, con respecto a la Tierra, puede producir efectos considerables sobre la ionosfera terrestre.
4. También es claro que incluso ráfagas solares muy intensas, bien localizadas en el disco solar, que se producen en una hora adecuada (nuestro lado día), no siempre producen efectos apreciables en la ionosfera. Este fue el caso de los eventos del 5 y 6 de diciembre de 2006 con magnitudes 9X y 6.5X, que ocurrieron a las 10:18 y 18:29 UT, respectivamente, y con los cuales no observamos la ocurrencia de actividad geomagnética ni ionosférica a nuestras latitudes.
5. En todos los eventos que influenciaron los valores de TEC, ya sea por la llegada de fotones UVE o por la tormenta geomagnética (julio de 2000, abril de 2001 y “tormentas de Halloween” de octubre-noviembre de 2003), algunos de los valores máximos ocurrieron en las estaciones mexicanas de latitudes más bajas. Esto implica que la penetración de campos eléctricos que provoca efectos ionosféricos a latitudes geomagnéticas medias (propuesto por *Mannucci et al.* (2005)) debe ser más estudiado.

Como un complemento y en seguimiento al estudio de los efectos causados por eventos solares de energía alta, también se han analizado ráfagas solares intensas (ver Tabla 4.2), las cuales están acompañadas por una tormenta de partículas energéticas, calculando TEC antes y durante la ocurrencia de la explosión en el Sol y antes de la ocurrencia de la tormenta geomagnética, para estudiar sólo los efectos de eventos energéticos sobre la ionosfera. Para este estudio se tomó como referencia el evento del 14 de julio de 2000, por ser una de las tormentas solares más importantes de los últimos años. El evento consistió en la ocurrencia de una ráfaga solar de gran intensidad (5.7X) acompañada de una EMC y una tormenta de partículas. Además, surgió prácticamente del centro del disco solar en dirección hacia la Tierra (N22O07). Por las características del evento, a finales del día 15 y el día 16 de julio dio inicio en tierra una gran tormenta

geomagnética, la cual ha sido estudiada por numerosos autores (*Caroubalos et al.*, 2001; *Immel et al.*, 2003; *Zhang et al.*, 2003; *Huba et al.*, 2005; *Araujo-Pradere*, 2005; *López-Montes et al.*, 2012). Como se mencionó anteriormente este análisis se enfoca en el día mismo de la ocurrencia de la explosión en el Sol, para poder decir si ocurre o no una perturbación en la ionosfera debida a cambios en el flujo de radiación electromagnética de alta energía y/o partículas energéticas.

Cuadro 4.2: Eventos solares analizados

Fecha	Intensidad
14/07/2000	5.7X
06/12/2006	6.5X
13/12/2006	3.4X
09/08/2011	6.9X
07/03/2012	5.4X

Durante el evento del 14 de Julio del 2000, se encontró que algunas de las estaciones GPS observaron perturbaciones ionosféricas positivas asociadas a la explosión solar. Los valores máximos de TEC fueron 137.82 y 98.05 uTEC, en las estaciones Huat y Posw, respectivamente (ver Figura 4.1). Con el análisis de ondeletas se observan periodicidades de 1, 2 y 6 hrs., relacionadas a las perturbaciones observadas (Figura 4.2).

En resumen, con los resultados obtenidos hasta hoy, sólo el evento del 14 de julio del 2000, provocó claramente perturbaciones ionosféricas de corta duración, además de que los tiempos de ocurrencia de dichas perturbaciones no coinciden con los tiempos de duración conocidos y aceptados de las perturbaciones provocadas por una ráfaga solar. Esto último nos hace pensar que el mayor tiempo de duración de estas perturbaciones se debe probablemente a la presencia de radiación de mayor energía (como rayos Gamma) y/o a la tormenta de partículas energéticas que acompañaron a la ráfaga solar en cuestión. Y finalmente, para intentar entender mejor lo que ocurrió en este evento (14 de julio, 2000) y saber si este tipo de perturbaciones han ocurrido en el pasado, o bien nos enfrentamos a un caso especial, debemos seguir analizando eventos con características similares, comenzando con el ciclo solar pasado.

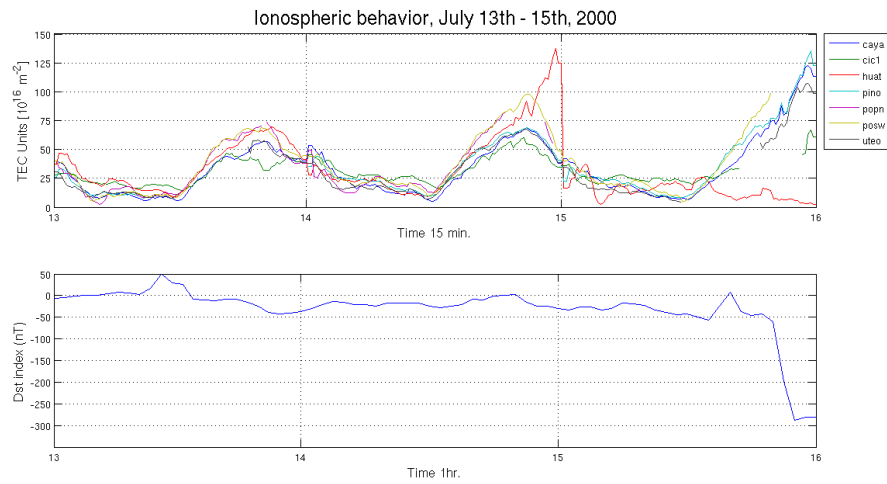


Figura 4.1: Panel superior; series de tiempo de TEC durante los días 13, 14 y 15 de julio del 2000, para 6 estaciones GPS analizadas. Panel inferior; comportamiento del índice geomagnético Dst durante el mismo periodo de tiempo.

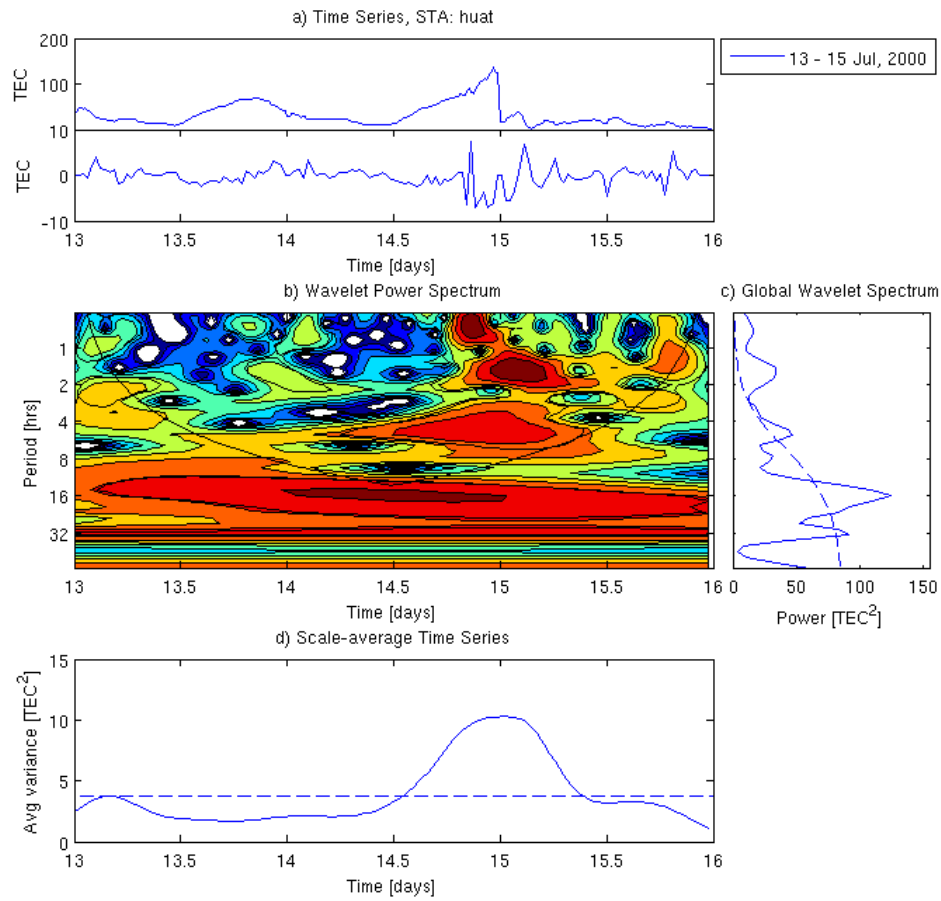


Figura 4.2: Análisis de ondeletas sobre la series de tiempo de la estación Huat, periodo del 13 al 15 de julio del 2000.

4.2. Perturbaciones ionosféricas debidas a tormentas geomagnéticas

Con referencia al estudio de la influencia de las grandes tormentas geomagnéticas en la ionosfera terrestre a latitudes medias, se analizaron un total de 11 tormentas geomagnéticas ($Dst < -200$ nT) que ocurrieron desde el año 2000 a la fecha. El análisis consistió en calcular el contenido de electrones en la ionosfera con datos de estaciones de GPS ubicadas en México, para posteriormente medir el grado de impacto en la amplitud de TEC durante dichas tormentas geomagnéticas. Después, por medio del exponente de Hurst, se midieron cambios de la rugosidad de la series de tiempo y finalmente, por medio de un análisis de ondeletas, se buscaron las periodicidades asociadas a las perturbaciones ionosféricas debidas a la presencia de una tormenta geomagnética.

En general, se esperaría que la ionosfera sería perturbada por la ocurrencia de una tormenta geomagnética, sin embargo esto no es siempre el caso, especialmente cuando se consideran factores tales como la ubicación geográfica y magnética de las estaciones que se miden, así como las condiciones atmosféricas locales sobre las mismas estaciones, como se muestra a continuación:

4.2.1. Perturbaciones ionosféricas asociadas a la tormenta geomagnética

Durante este trabajo se encontró que varias de las tormentas geomagnéticas analizadas tuvieron una gran influencia en la ionosfera en latitudes medias. Los resultados obtenidos se pueden resumir de la siguiente manera:

1. Las tormentas geomagnéticas del 7 de abril de 2000, 16 de julio de 2000, 30 de octubre de 2003, 20 de noviembre de 2003 y 8 de noviembre de 2004, causaron grandes perturbaciones en la ionosfera de latitudes medias. Las series de tiempo de TEC mostraron cambios de amplitud que van desde 3.29 hasta 8.82 sigmas, donde la tormenta del 30 de octubre de 2003 (tormentas de Halloween), fueron las que causaron la mayor alteración (8.82 sigmas, Tabla 3). Estas perturbaciones ionosféricas estan probablemente asociadas con la penetración de campos eléctricos y los vientos neutros hacia el ecuador (*Lin et al.*, 2005; *Lu et al.*, 2008; *Tsurutani et al.*, 2008; *Balan et al.*, 2010). Estos eventos han sido analizados por varios autores (ver por ejemplo: *Caroubalos et al.* (2001); *Immel et al.* (2003); *Zhang et al.* (2003); *Araujo-Pradere* (2005); *Blanch et al.* (2005); *Huba et al.* (2005); *Tsurutani et al.* (2005); *Zhang and Xiao* (2005); *Mannucci et al.* (2005);

Sutton et al. (2006); *Liu et al.* (2007); *Kane* (2009); *Rama Rao et al.* (2009)), quienes también encontraron grandes perturbaciones ionosféricas a diferentes latitudes. Por ejemplo, para la tormenta del 16 de julio de 2000, *Araujo-Pradere* (2005) reportó perturbaciones en el TEC que aumentaron hasta en un 250% más que en un día típico para un lugar determinado (28.46N de latitud). También para las tormentas de Halloween, *Zhang and Xiao* (2005) reportaron incrementos por arriba del 300% en el TEC. Además, para la tormenta del 20 de noviembre de 2003, *Blanch et al.* (2005) reportaron la ocurrencia de un cinturón latitudinal delgado entre $55^\circ - 45^\circ N$, el cual presentó un decremento en el TEC (tormenta negativa) y otro cinturón latitudinal entre $45^\circ - 30^\circ N$, en el cual aumentó el TEC (tormenta positiva).

2. Durante la mayoría de las tormentas (excepto 20 de noviembre de 2003 y el 8 de noviembre de 2004), los valores del exponente de Hurst mostraron aumentos en la rugosidad. Durante los días perturbados, los valores de H tendieron a 0.5 y durante los días no perturbados los valores de H son cercanos a 1 (ver las dos últimas columnas de la Tabla 3). Por lo tanto, durante estas tormentas geomagnéticas, la rugosidad de las series de tiempo de TEC aumentó, pero mantuvieron un comportamiento persistentes.
3. Durante la tormenta del 30 de octubre de 2003 (tormentas de Halloween), se obtuvieron valores de H de 0.2 y 0.4, por lo que la rugosidad de la serie de tiempo de TEC aumentó considerablemente, lo que significa que el comportamiento de dicha serie en ese momento es anti-persistente.
4. En el análisis de ondeletas se observa la fuerte influencia de la variación diurna en las series de tiempo de TEC (periodicidades de 12 horas), pero también se pueden observar claramente periodicidades asociadas a las perturbaciones ionosféricas (1, 2, 3, 4, 6 y 8 horas). Estas perturbaciones son probablemente debidas a la presencia de la tormenta geomagnética.
5. De nuevo, durante el análisis de ondeletas, las tormentas de Halloween presentan un comportamiento diferente de las otras tormentas. En este caso, las periodicidades asociadas a las perturbaciones de la ionosfera son más importantes que las periodicidades de la variación diurna. Esto no es de sorprender teniendo en cuenta que ocurrieron varios eventos seguidos y son unos de los más intensos registrados, lo que hace todo el periodo muy complejo. Por lo tanto, ya sea por los altos valores de TEC, por el gran aumento de la rugosidad o por las grandes

periodicidades, las tormentas de Halloween son un importante ejemplo de la gran influencia de las tormentas geomagnéticas sobre la ionosfera a latitudes medias.

6. Es importante señalar que para el evento del 16 de julio de 2000, tanto el análisis de ondeletas como la varianza muestran que las perturbaciones más importantes se producen durante el inicio de la tormenta geomagnética. Sin embargo, el exponente de Hurst muestra una tendencia hacia valores más pequeños durante el tiempo de recuperación. Esto último implica que aunque la perturbación ionosférica durante el tiempo de recuperación es más pequeña en amplitud la rugosidad en la serie de tiempo en ese momento es mayor, lo que significa que hay una anomalía en el comportamiento que no se observa bajo los otros métodos.

4.2.2. Perturbaciones ionosféricas que ocurren antes del inicio de la tormenta geomagnética

Durante el análisis se encontró que algunas de las tormentas mostraron perturbaciones ionosféricas antes de la aparición de la tormenta geomagnética estudiada. Este es el caso de las tormentas del 07 de abril 2000, 31 de marzo de 2001, 11 de abril de 2001 y del 15 de mayo de 2005, donde hubo aumentos significativos de TEC antes de la inicio de la tormenta geomagnética. Además, en dos casos (05 de abril 2000 y 13 de mayo de 2005), las perturbaciones de TEC observadas son las más grandes de todo el período analizado (4.32 y 3.56 sigmas, respectivamente).

Por otra parte, durante estos días perturbados (excepto durante la tormenta del 31 de marzo 2001), los valores de H son más bajos que en los días no perturbados. Por lo tanto, la rugosidad de las series de tiempo aumentó durante la perturbación ionosférica. Además, con el análisis de ondeletas, se observaron periodicidades asociadas a las perturbaciones ionosféricas de 1 a 6 horas.

Una posible explicación para la ocurrencia de estas perturbaciones antes el inicio de la tormenta analizada, es que el campo geomagnético estaba altamente perturbado durante los períodos analizados, mostrando pequeñas tormentas que van desde -30 hasta -100nT en el índice Dst, lo cual ya es considerable y por lo tanto, pueden llegar a perturbar la ionosfera, aun cuando para este análisis no se consideraron relevantes. Esta actividad está relacionada posiblemente con las múltiples explosiones solares que ocurrieron en esas fechas.

4.2.3. Tormenta ionosférica negativa

Durante este trabajo se encontró que varias de las tormentas geomagnéticas analizadas no tuvieron influencia aparente sobre la ionosfera a latitudes medias o bien causaron una clara tormenta ionosférica negativa, como se muestra a continuación:

1. Las tormentas del 6 y 24 de noviembre 2001, no mostraron aumentos aparentes en los valores de TEC, posiblemente debido a la influencia de las condiciones atmosféricas locales (composición), vientos termosféricos y la hora local. Sin embargo, ambos periodos analizados están muy alterados, mostrando valores máximos de TEC por día de alrededor de 100 uTEC y de 2.55 y 2.35 sigmas, respectivamente, posiblemente relacionado a la alta actividad solar de la época. A diferencia de éstos resultados, *Maruyama y Ma* (2004) hicieron notar que durante la tormenta del 6 de noviembre de 2001 hubo una tormenta ionosférica positiva de débil a moderada, en términos de f_oF2 y con respecto al TEC los valores casi se duplicaron durante el día en Japón.
2. Durante cuatro tormentas geomagnéticas analizadas (2 de agosto de 2000, 31 de marzo de 2001, 11 de abril de 2001 y 15 de mayo de 2005), el TEC presentó un comportamiento en donde la variación diurna es significativamente más baja que el resto de los días del periodo analizados, es decir, una tormenta ionosférica negativa se produjo a latitudes medias (ver figura 2). La presencia de estas tormentas ionosféricas negativas se debe probablemente a regiones atmosféricas donde la composición neutra cambió (*Prölss*, 1993a). Estas “bolsas de composición” neutra se producen por el calentamiento que ocurre a niveles aurorales por la entrada de energía magnetosférica provocando el surgimiento de aire que puede ser trasladado a latitudes medias por los vientos hacia el ecuador nocturnos y se traslada hacia el lado diurno siguiendo la rotación de la Tierra, tal como lo describe *Prölss* (1993a) y *Fuller-Rowell et al.* (1996). Además, el modelo empírico de *Araujo-Pradere et al.* (2002a); *Araujo-Pradere y Fuller-Rowell* (2002); *Araujo-Pradere et al.* (2005) muestra la dependencia de la variabilidad estimada de f_oF2 con respecto a la latitud, la estación del año y la actividad geomagnética. Las tormentas del 31 de marzo de 2001 y del 15 de mayo de 2005, se han estudiado por varios autores (*Shagimuratov et al.*, 2003; *Dashora et al.*, 2009; *Jain et al.*, 2010). Estos trabajos muestran una fuerte tormenta ionosférica positiva, pero estos estudios se centran en diferentes latitudes; la primera tormenta es analizada en estaciones a latitudes altas, mientras que la segunda se analiza sobre estaciones en la zona de la anomalía ecuatorial, lo que puede explicar los diferentes resultados debido a la influencia de las condiciones atmosféricas locales.

3. Durante la tormenta del 12 de agosto de 2000, a pesar de los bajos valores de TEC, hubo un comportamiento alterado, debido a la tormenta ionosférica negativa. Este comportamiento anómalo provocó un aumento de la rugosidad de la serie de tiempo de TEC, y además de periodicidades de 1 y 4 hrs durante la tormenta (el día 12).

Una posible explicación de por qué tormentas geomagnéticas de similar intensidad pueden causar tanto tormentas ionosféricas positivas como negativas a las latitudes medias, es que según *Araujo-Pradere et al.* (2006) los casos en que la ionosfera tiene una fase positiva, esto depende del momento en que ocurre el pico de la perturbación. Además, cuando el pico se produce cerca de la medianoche UT, el continente americano se encuentra en el sector tarde/tarde noche, por lo que este sector se ve muy afectado por la línea de penetración del campo eléctrico hacia el este, lo que empujará el plasma hacia arriba y los polos, produciendo de la fase positiva. Por otro lado, los efectos negativos se verá en estaciones ubicadas en los sectores entre la medianoche y amanecer (*Tsagouri et al.*, 2000). Esto coincide con la mayoría de las tormentas geomagnéticas estudiados en este trabajo, en donde las tormentas geomagnéticas que causaron una tormenta ionosférica positiva comenzaron cerca de la medianoche UT (tarde/tarde noche, hora local) y las tormentas geomagnéticas que causaron una tormenta ionosférica negativa, comenzaron después de la medianoche o por la mañana, hora local.

En resumen, en este análisis se encontró que las grandes tormentas geomagnéticas pueden producir perturbaciones ionosféricas importantes a latitudes medias. Las grandes perturbaciones ionosféricas que se observan (fase positiva), están probablemente asociadas con el PPEF y los vientos neutrales ecuatoriales. Además, algunos eventos produjeron tormentas ionosféricas con fase negativa, debido probablemente a cambios en la composición neutra. También se observó que durante algunos de los días perturbados, la rugosidad de las series de tiempo de TEC (calculado por el exponente de Hurst) aumenta con respecto a los días no perturbados. Por otro lado, el análisis de ondeletas mostró una fuerte influencia de la variación diurna en los valores de TEC y además muestra las periodicidades características de las perturbaciones ionosféricas. Sin embargo, también se observa que el exponente de Hurst puede detectar anomalías en las series de tiempo no observadas por el análisis de ondeletas (ver evento del 16 de julio del 2000), por lo tanto, estos dos métodos se complementan entre sí. Finalmente, con relación a la aparición de fases positivas y negativas durante una tormenta ionosférica, es necesario hacer un análisis más detallado de la ionosfera a diferentes latitudes. Este tipo de análisis se puede realizar usando modelos globales de asimilación como el programa “Magic” de NOAA.

4.3. Señales de IPS contaminadas por la presencia de una tormenta ionosférica

El radiotelescopio MEXART fue desarrollado para hacer observaciones de centelleo interplanetario (IPS) producidas por perturbaciones de gran escala asociados a eventos solares. En estos trabajos se muestra que, en ocasiones, hay perturbaciones ionosféricas que se relacionan con estos eventos y que no sólo puede contaminar el IPS, sino que también pueden ser la principal fuente de contribución de las oscilaciones observadas.

4.3.1. Perturbaciones ionosféricas detectadas por MEXART

En este trabajo, se analizó el evento del 15 de diciembre 2006 el cual fue observado por MEXART y presentó un centelleo claro. Sin embargo, ese mismo día en tierra, la ionosfera presenta una perturbación importante asociada con la presencia de una tormenta geomagnética observada en los valores de TEC, por lo que se pueden asociar los centelleos detectado por MEXART ese día a una perturbación ionosférica local. Un ejemplo de esto es el espectro de potencia para la fuente 3C144 durante el 15 de diciembre que muestra que hay una diferencia significativa de potencia (de unos 3 órdenes de magnitud) en comparación con los de los días 13 y 14, que se producen a menor frecuencia ($< 0.4\text{Hz}$). Esto sugiere que este abrupto cambio es producido por una contribución importante de perturbaciones en la ionosfera y en menor medida, por IPS.

El evento del 15 de diciembre de 2006, corresponde a un período de mínima actividad solar, por lo que es pertinente preguntarse por las fuertes oscilaciones observadas en 3C144. Buscando en la actividad solar entre el 13 y 16 de diciembre, se encontraron 5 eventos reportados por el catálogo SOHO/LASCO de EMC, en donde por lo menos dos EMC están relacionadas con nuestras observaciones: a) EMC-Halo, observada el día 13 a las 02:54:04 UT, con una velocidad lineal de 1774 km/s, asociada a una ráfaga solar de 3.4X de intensidad, y b) EMC-Halo, observada el 14 de diciembre a las 22:30:04 UT con una rapidez lineal de 1042 km/s, asociada con una ráfaga de 1.2X, en donde los valores tanto de la tormenta geomagnética (índice Dst) como del TEC están fuertemente asociados con estos eventos como se muestra en la anticorrelación esperada entre estos parámetros el 15 de diciembre. Por lo que de este trabajo se puede concluir:

1. Las observaciones del MEXART para el día 15 de diciembre de 2006 mostraron fuertes fluctuaciones en la señal de radio de la fuente 3C144 y para tres satélites. El comportamiento de los espectros de Fourier para 3C144 y los satélites muestran

una diferente forma con una potencia máxima que ocurre a frecuencias en el rango de 0.1-0.5 Hz. Como la forma de los espectros de los satélites proviene sólo de la contribución de las perturbaciones en la ionosfera, esto sugiere que las fluctuaciones observadas en el espectro de la fuente de radio 3C144 están probablemente contaminadas por perturbaciones ionosféricas.

2. El TEC y el índice Dst están fuertemente asociados con las EMCs observadas los días 13 y 14 de diciembre de 2006. Por otra parte, ambos índices confirman la idea de que al afectar la actividad geomagnética a la ionosfera terrestre se afecta la línea de visión de 3C144 y los satélites.
3. Las perturbaciones ionosféricas observados por MEXART deben ser tomadas en cuenta como posibles fuentes de contaminación en las mediciones de la IPS. Según *Cohen y Röttgering (2009)* las perturbaciones en la ionosfera pueden contribuir a las señales de radio inferiores a 150 MHz. Los índices de TEC y Dst puede ayudar a identificar el origen de estas fluctuaciones.

4.3.2. Perturbaciones ionosféricas y su impacto sobre IPS usando observaciones del MEXART

En este trabajo se estudia el impacto de las perturbaciones de la ionosfera sobre el medio ambiente de la Tierra causada por los eventos solares que se produjeron en el mes de abril y entre el 20 y 31 de mayo de 2010, usando observaciones del radiotelescopio MEXART. Durante este período, varias fuentes astronómicas presentaron fluctuaciones en sus señales de radio. Con un análisis de ondeletas, junto con información complementaria del TEC y el índice Dst, que se utilizaron para intentar identificar y comprender cuando la señal de IPS podría estar contaminada por las perturbaciones en la ionosfera (IOND). Encontramos que las perturbaciones en la señal de radio se asocian a veces con las fluctuaciones de IOND y/o IPS. Sin embargo, en algunos casos, no fue posible identificar claramente su origen. El análisis de Fourier y de ondeltas mostró que estas fluctuaciones tenían frecuencias en el rango de aproximadamente 0.01 a 1.0 Hz (periodicidades de 100 hasta 1s).

En resumen, se observaron varias fuentes que presentaron fluctuaciones en su señal de radio. Estas fluctuaciones pueden estar asociados con IOND, mostrado por el TEC en algunos días, pero en otros casos están asociadas con IPS y, además en ocasiones con ambas. El hecho de que en ocasiones la señal de radio procedente de fuentes astronómicas esté contaminada por perturbaciones en la ionosfera, sugiere que estas fluctuaciones

se deben tomar en cuenta como posibles fuentes de contaminación en las mediciones de IPS obtenidas con el MEXART (*Carrillo-Vargas et al.*, 2012).

A partir de estos resultados se encontró que este estudio complementario puede ayudar a comprender el origen de las fluctuaciones observadas en la señal de radio de fuentes astronómicas. Además, las perturbaciones ionosféricas pueden desempeñar un papel importante en la contaminación de la búsqueda de una señal de IPS, por lo que la ionosfera actúa como un obstáculo para las ondas de radio de ≤ 150 MHz (*Cohen y Röttgering*, 2009) y, a veces, no es posible discriminar entre IPS o perturbaciones ionosféricas como fuentes de las fluctuaciones de intensidad registradas por MEXART.

Con un análisis adicional utilizando la señal de radio de los satélites en tránsito cerca de una fuente astronómica y detectados por MEXART, fue posible discernir si las fluctuaciones de intensidad estaban asociadas con IOND o IPS (*Carrillo-Vargas et al.*, 2012). En este contexto, se realizó un análisis de ondeltas, como una alternativa que permita caracterizar la señal perturbada. Por lo que se puede concluir:

1. Con este estudio se incorpora el uso de un análisis de ondeletas junto con información complementaria proporcionada por el TEC y el índice Dst. Esta es la primera vez que estas herramientas se han aplicado a datos del MEXART, lo que permite una mejor comprensión de los casos en donde el IPS puede estar contaminada por IOND.
2. En el período de abril a mayo 2010, varias fuentes de radio presentan fluctuaciones en su señal de radio registradas por MEXART. Usando ondeletas se encontraron los períodos/frecuencias características a estas fluctuaciones, encontrándose que las perturbaciones en la señal a veces se asocian con la ionosfera y/o IPS. En este contexto, el TEC puede ayudar a establecer los casos en los que el IPS es en realidad contaminación por IOND. Además, el análisis de ondeltas puede indicar las condiciones ionosféricas tranquilas (centelleo ionosférico), y así como mostrar las perturbaciones ionosféricas asociadas con una tormenta geomagnética.
3. Los espectros de Fourier muestran que estas fluctuaciones tienen frecuencias de entre ~ 0.01 Hz a ~ 1.0 Hz (períodos de 100 a 1s., respectivamente) tanto para IOND e IPS. También se encontró que hay una tendencia a que las frecuencias cerca de ~ 1.0 Hz estén probablemente asociadas a IPS, mientras que las más bajas frecuencias tienden a estar relacionadas con IOND. Sin embargo, en los casos donde se encuentran ambas (IPS e IOND) no se puede distinguir entre ellas.
4. En los ejemplos en donde ni el índice Dst ni el TEC mostraron cambio significativo, se puede decir que las fluctuaciones no están relacionados con efectos

ionosféricos globales pero sí podrían estar relacionados con IPS. Se ha observado que cuando el TEC está perturbado y hay efectos de origen solar, entonces la señal de radio puede estar contaminada por las perturbaciones de la ionosfera. Este es probablemente el caso observado por *Carrillo-Vargas et al.* (2012), donde las fluctuaciones pueden atribuirse a IOND y/o IPS.

Con los resultados de esta investigación se puede concluir, que los grandes eventos solares de alta energía y las grandes tormentas geomagnéticas pueden producir perturbaciones ionosféricas importantes a latitudes medias, específicamente sobre México. Además, éstas perturbaciones pueden contaminar las señales de instrumentos en tierra.

De igual forma, los resultados de este trabajo demuestran que además de justificar y comprobar la importancia de realizar este tipo de estudios en México, las teorías existentes sobre el comportamiento de la ionosfera durante un evento específico, así como los mecanismos iniciadores de dicho comportamiento, no pueden explicar al 100 % los resultados de esta investigación. De hecho, se observaron periodicidades de hasta 6 horas correspondientes a perturbaciones ionosféricas debidas a eventos solares de alta energía, aún cuando la teoría nos dice que este tipo de perturbaciones tienen una duración que va desde un par de minutos hasta máximos de una hora. Con respecto a la ocurrencia de tormentas ionosféricas positivas o negativas, en general la aparición de una u otra corresponden con los tiempos establecidos en las teorías existentes (tanto en estación del año como la hora del día), sin embargo, obtuvimos casos en México donde dichas teorías no se cumplen, si no que aparecen a la inversa de la teoría. Por lo tanto, es necesario realizar un análisis más detallado de la ionosfera a diferentes latitudes, con el fin de intentar comprender mejor los mecanismos que producen los diferentes tipos de perturbaciones ionosféricas y así, en un futuro llegar a la predicción de perturbaciones, según como se encuentre el estado del clima espacial.

Bibliografía

- Afraimovich, E. L., Astafyeva, E. I., Oinats, A. V., Yasukevich, Y. V., Zhivetiev, I. V. 2008. Global electron content: a new conception to track solar activity. *Annales Geophysicae*, 26, 335-344.
- Anderson, D., Fuller-Rowell, T., 1999. The ionosphere. *Space Environment Topics*, Boulder CO.
- Appleton, E. V. Barnett, M. A .F., 1925. Local reflection of wireless waves from the upper atmosphere. *Nature*, 115, 333.
- Araujo-Pradere, E. A., Fuller-Rowell, T. J. and Codrescu, M. V. 2002. STORM: An empirical storm-time ionospheric correction model, 1, Model description. *Radio Science*, 37(5), 1070, doi:10.1029/2001RS002467.
- Araujo-Pradere, E. A., and Fuller-Rowell, T. J. 2002. STORM: An empirical storm-time ionospheric correction model, 2, Validation. *Radio Science*, 37(5), 1071, doi:10.1029/2002RS002620.
- Araujo-Pradere, E. A., Fuller-Rowell, T. J., Codrescu, M. V., and Bilitza, D. (2005). Characteristics of the ionospheric variability as a function of season, latitude, local time, and geomagnetic activity. *Radio Science*, 40, RS5009, doi:10.1029/2004RS003179.
- Araujo-Pradere, E. A. 2005. GPS-derived total electron content response for the Bastille Day magnetic storm of 2000 at a low mid-latitude station. *Geofísica Internacional*, 44, 2, 211-218.
- Araujo-Pradere, E.A., Fuller-Rowell, T.J., Spencer, P.S.J.. 2006. Consistent features of TEC changes during ionospheric storms. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68 (16).

- Araujo-Pradere, E.A., Fuller-Rowell, T.J., Spencer, P.S.J., Minter, C.F. 2007. Differential validation of the USTEC model. *Radio Sciencelibrerias academicas en mexico*, 42, RS3016.
- Arikan, F., Erol, C. B., Arikan, O. 2003. Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data. *Journal Geophysical Research*, 108, 1469.
- Balan, N., Shiokawa, K., Otsuka, Y., Kikuchi, T., Vijaya Lekshmi, D., Kawamura, S., Yamamoto, M., Bailey, G. J. 2010. A physical mechanism of positive ionospheric storms at low latitudes and midlatitudes, *Journal Geophysical Research*, 115, A02304, doi:10.1029/2009JA014515.
- Blanch, E., Altadill, D., Boška, J., Burešová, D., Hernández-Pajares, M. 2005. November 2003 event: effects on the Earth's ionosphere observed from ground-based ionosonde and GPS data. *Annales Geophysicae*, 23, 3027-3034.
- Bishop, G. J., McNamara, L. F., Welsh, J., Decker, D. T. 2009. On the Relative Utilities of Data Types for Assimilation by Global Ionospheric Models. AGU Fall Meeting Abstracts A1614.
- Burns, A. G., Killen, T. L., Roble, R. G. 1992. Thermospheric heating away from the auroral oval during geomagnetic storm. *Canadian Journal of Physics*, 70, 544-552.
- Burrage, M. D., Abreu, V. J., Orsini, N., Fesen, C. G., Roble, R. G. 1992. Geomagnetic activity effects on the equatorial neutral atmosphere. *Journal Geophysical Research*, 97, 4177-4187.
- Cajueiro, D. O., Tabak, B. M. 2005. The rescaled variance statistic and the determination of the hurst exponent. *Mathematics and Computers in Simulation*, 70:172-179.
- Carrillo-Vargas, A., Pérez-Enríquez, H.R., Rodríguez-Martínez, M., López-Montes, R., Casillas-Pérez, G.A., Araujo-Pradere, E.A. 2012. Ionospheric disturbances detected by MEXART. *Advances in Space Research* 49, 11.
- Caroubalos, C., and 15 colleagues. 2001. ARTEMIS IV Radio Observations of the 14 July 2000 Large Solar Event. *Solar Physics* 204, 165-177.
- Cohen, R. H. 1976. Runaway electrons in an impure plasma. *Physics of Fluids*, 19, 239, doi:10.1063/1.861451.

- Cohen, A.S., Röttgering, H.J.A. 2009. Probing fine-scale ionospheric structure with the very large array radio telescope. *Astronomical Journal*, 138, 439-447.
- Combs, L., Viereck, R. 1996. Aurora, *Space Environment Topics SE-12*.
- Dashora, N., Sharma, S., Dabas, R. S., Alex, S., Pandey, R. 2009. Large enhancements in low latitude total electron content during 15 May 2005 geomagnetic storm in Indian zone. *Annales Geophysicae*, 27, 18031820.
- Davies, K. 1990. *Ionospheric Radio*. Peter Peregrinus Ltd, ISBN 0 86341 186 X.
- Delignieres, D., et al. 2006. Fractal analyses for short time series a reassessment of classical methods. *Journal of Mathematical Psychology*, 50, 525-544.
- Dimri, V. and Prakash, M. R. 200. Scaling of power spectrum of extinction events in the fossil record. *Earth and Planetary Science Letters*, 186, 363-370.
- Eftaxiadis, K., Cervera, M. A., Thomas, R. M. 1999. A Global Positioning System Receiver for Monitoring Ionospheric Total Electron Content. Defense Science and Technology Organization. DSTO-TR-0742.
- Emerson, W. H. 2005. On the concept of dimension. *Metrologia*, 42, L21-L22.
- Fujii-Oleschko, B. 2007. Diccionario especializado en geometría fractal en la terminología de la geometría fractal un análisis lingüístico. Tesis de Licenciada en Lenguas y Literaturas Hispánicas. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Fuller-Rowell, T. J., Codrescu, M. V., Moffett, R. J., Quegan, S. 1994. Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms, *Journal Geophysical Research*, 99, 3893-3914.
- Fuller-Rowell, T. J., Rees, D., Quegan, S., Moffett, R. J., Codrescu, M. V., Millward, G. H. 1996. A coupled thermosphere-ionosphere model (CTIM), in *STEP: Handbook of Ionospheric Models*, edited by R. W. Schunk, pp.239-279, Science Communication on Solar-Terrestrial Physics, Boulder, Colo.
- Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T., Vasyliunas, V. M. 1994. What is a geomagnetic storm?. *Journal Geophysical Research*, 99, 5771-5792.
- Gotoh, K., et al. 2004. Fractal analysis of seismogenic ULF emissions. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29, 409-417.

- Hardy, G. H. 1916. Weierstrass's non-differentiable function. *Tr. of the American Mathematical Society*, 17:322-323.
- Herzfeld, U. C. and Overbeck, C. 1999. Analysis and simulation of scale-dependent fractal surfaces with application to seafloor morphology. *Computers and Geosciences*, 25:979-1007.
- Huba, J.D., Warren, H.P., Joyce, G., Pi, X., Iijima, B., Coker, C. 2005. Global response of the low-latitude to midlatitude ionosphere due to the Bastille Day flare. *Geophysical Research Letters* 32, 15103.
- Immel, T.J., Mende, S.B., Frey, H.U., Østgaard, N., Gladstone, G.R. 2003. Effect of the 14 July 2000 solar flare on Earth's FUV emissions. *Journal Geophysical Research* 108, 1155.
- Jain, A., Tiwari, S., Jain, S., Gwal, A. K. 2010. TEC response during severe geomagnetic storms near the crest of equatorial ionization anomaly. *Indian Journal of Radio and Space Physics* Vol. 39, 11-24.
- Jiang, X., et al., 2006. Paradigm shifts in surface metrology part I historical philosophy. *Proceedings of the Royal Society A*, 463:2049-2070.
- Jones, C. L. and Jelinek, H. F. 2001. Wavelet packet fractal analysis of neuronal morphology. *Methods*, 24:347-358.
- Kane, R. P. 2009. Variations of geomagnetic Dst, auroral indices and cosmic ray intensity during 28-31 Oct 2003 Halloween events. *Indian Journal of Radio and Space Physics*, 38, 245-253.
- Larson, K. M., and Levine, J. 1999. Carrier-phase time transfer. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 46, no. 4.
- Lin, C. H., Richmond, A. D., Heelis, R. A., Bailey, G. J., Lu, G., Liu, J. Y., Yeh, H. C., Su, S. Y. 2005. Theoretical study of the low and mid-latitude ionospheric electron density enhancement during the October 2003 storm: Relative importance of the neutral wind and the electric field. *Journal Geophysical Research*, 110, A12312, doi:10.1029/2005JA011304.
- Liu, H., et al. 2007. Contrasting behavior of the thermosphere and ionosphere in response to the 28 October 2003 solar flare. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 112, 7305.

- Lopes, R. and Betrouni, N. 2009. Fractal and multifractal analysis a review. *Medical Image Analysis*, 13:634-649.
- López-Montes, R., Pérez-Enríquez, R., Araujo-Pradere, E. A. 2012. The impact of large solar events on the total electron content of the ionosphere at mid latitudes. *Advances in Space Research*, 49, 1167-1179.
- Lu, G., Goncharenko, L. p., Richmond, A. D., Roble, R. G., Aponte, N. 2008. A day-side ionospheric positive storm phase driven by neutral winds, *Journal Geophysical Research*, 113, A08304, doi:10.1029/2007JA012895.
- Malamud, B. D. and Turcote, D. L. 1999. Self-affine time series: measures of weak and strong persistence. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 80:173-196.
- Mandelbrot, B.B. 1986. Self-affine fractals and fractal dimension. *Fractals in Physics*, North-Holland, Amsterdam, 3-28.
- Mannucci, A. J., Tsurutani, B. T., Iijima, B. A., Komjathy, A., Saito, A., Gonzalez, W. D., Guarnieri, F. L., Kozyra, J. U., Skoug, R. 2005. Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29-30, 2003 “Halloween Storms”. *Geophysical Research Letters*, 32, 12.
- Mannucci, A. J., B. T. Tsurutani, M. A. Abdu, W. D. Gonzalez, A. Komjathy, E. Echer, B. A. Iijima, G. Crowley, and D. Anderson. 2008. Superposed epoch analysis of the dayside ionospheric response to four intense geomagnetic storms, *Journal Geophysical Research*, 113, A00A02, doi:10.1029/2007JA012732.
- Matos, J. M. O., et al. 2004. Rescaled range analysis and detrended fluctuation analysis study of cast irons ultrasonic backscattered signals. *Chaos, Solitons and Fractals*, 19:55-60.
- Maruyama T. and Ma, G. 2004. TEC Storm on November 6,2001, Derived from Dense GPS Receiver Network and Ionosonde Chain over Japan. *Radio Science Conference. Proceedings. Asia-Pacific*, 359-362.
- Mela, K. and Louie, J. N. 2001. Correlation length and fractal dimension interpretation from seismic data using variograms and power spectra. *Geophysics*, 66(5):1372-1378.
- Mendillo, M. 1973. A study of the relationship between geomagnetic storms and ionospheric disturbances at midlatitudes. *Planetary and Space Science*, 21, 349-358.

- Mendillo, M., Klobuchar, J. A. 1975. Investigations of the ionospheric F region using multistation total electron content observations. *Journal Geophysical Research*, 80, 643-650.
- Mendillo, M., He, X. Q., Rishbeth, H. 1992. How the effects of winds and electric field in F2-layer storms vary latitude and longitude: a theoretical study. *Planetary and Space Science*, 40, 595-606.
- Millward, G. H., Moffett, R. J., Quegan, S., Fuller-Rowell, T. J. 1993. Effects of an atmospheric gravity wave on the midlatitude ionospheric F layer. *Journal Geophysical Research*, 98, 19173-19179.
- Minter, C.F., Robertson, D.S., Spencer, P.S.J., Jacobsen, A.R., Fuller-Rowell, T.J., Araujo-Pradere, E.A., Moses, R.W. 2007. A comparison of MAGIC and FORTE ionospheric measurements. *Radio Science*, 42, RS3026.
- Pi, H., Mendillo, M., Fox, M. W., Anderson, D. N. 1993. Diurnal double maxima patterns in the F-region ionosphere; substorm-related aspects. *Journal Geophysical Research*, 98, 13677-13691.
- Prölss, G.W. 1980. Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere: recent results obtained by satellite-borne gas analyzer. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 18, 183-202.
- Prölss, G.W. 1991. Thermosphere-ionosphere coupling during disturbed conditions. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 43, 537-549.
- Prölss, G.W. 1993. On explaining the local time variation of ionospheric storm effects. *Annales Geophysicae*, 11, 1-9.
- Prölss, G.W. 1993. Common origin of positive ionospheric storms at middle latitudes and the geomagnetic activity effect at low latitudes. *Journal Geophysical Research*, 98, 5981-5991.
- Prölss, G.W. 1995. *Handbook of atmospheric electrodynamics 2*. Ed. Volland, CRC Press/Boca Raton. 195-248.
- Prölss, G. 2004. *Physics of the Earth's Space Environment*, Springer, Heidelberg, Germany.

- Rama Rao, P. V. S., Gopi Krishna, S., Vara Prasad, J., Prasad, S. N. V. S., Prasad, D. S. V. V. D., Niranjana, K. 2009. Geomagnetic storm effects on GPS based navigation. *Annales Geophysicae*, 27, 21012110.
- Rasmussen, J. E., Kossey, P. A., Lewis, E. A. 1980. Evidence of an ionospheric reflecting layer below the classical D region. *Journal Geophysical Research*, 85(A6), 3037-3044.
- Ratcliffe, J. A. and Ashworth, J. 1972. *An introduction to the ionosphere and magnetosphere*, University Press.
- Rishbeth, H., Garriot, O. K. 1969. *Introduction to the ionospheric physics*. Academic Press, New York and London.
- Rothkaehl, H., Krakowski, A., Stanislawska, I., Bcki, J., Parrot, M., Berthelier, J.-J., Lebreton, J.-P., 2008. Wave and plasma measurements and GPS diagnostics of the main ionospheric trough as a hybrid method used for Space Weather purposes. *Annales Geophysicae*, 26, 295-304.
- Salmasi, M. and Modarres-Hashemi, M. 2009. Design and analysis of fractal detector for high resolution radars. *Chaos, Solitons and Fractals*, 40:2133-2145.
- Sardón, E., Rius, A., Zarraoa, N. 1994. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observations. *Radio Science*, 29(3), 577-586.
- Sardón, E., and Zarraoa, N. 1997. Estimation of total electron content using GPS data: How stable are the differential satellite and receiver instrumental biases?. *Radio Science*, 32(5), 1899-1910.
- Scipioni, A., et al. 2008. Characterization of selfsimilarity properties of turbulence in magnetized plasmas,. *Physics of plasmas*, 15:112303:1-10.
- Shagimuratov, I. I., Krankowski, A., Baran, L. W., Cisak, J., Yakimova, G. 2003. Storm-Time Structure and Dynamics of the Ionosphere obtained from GPS observations. Report 23 of the Fifth Antarctic Geodesy Symposium, Lviv, Ukraine.
- Stankov, S.M., Stankov, S. M., Jakowski, N., Heise, S., Muhtarov, P., Kutiev, I., Warrant, R. 2003. A new method for reconstruction of the vertical electron density distribution in the upper ionosphere and plasmasphere. *Journal Geophysical Research*, 108(A5), 1164.

- Su, Z. Y. and Wu, T. 2007. Music walk fractal geometry in music. *Physica A*, 380:418-428.
- Sutton, E. K., Forbes, J. M., Nerem, R. S., Woods, T. N. 2006. Neutral density response to the solar flares of October and November, 2003. *Geophysical Research Letters* 33, 22101.
- Tapiero, C. S. and Vallois, P. 1996. Run length statistics and the hurst exponent in random and birth-death random walks. *Chaos, Solitons and Fractals*, 7(9):1333-1341.
- Taylor R. and Nagy A. 2000. *Ionospheres - Physics, Plasma physics and Chemistry*, Cambridge University press.
- Thome, G. D., and Wagner, L. S. 1971. Electron density enhancements in the E and F regions of the ionosphere during solar flares, *Journal Geophysical Research*, 76, 6883, doi:10.1029/JA076i028p06883.
- Torres-Argüelles, S. V. 2010. *Metrología Fractal*. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Querétaro.
- TruSoft, I. 1999. Software comercial benoit 1.3.
- Tsagouri, I., Belehaki, A., Moraitis, G., Mavromichalaki, H.. 2000. Positive and negative ionospheric disturbances at middle latitudes during geomagnetic storms. *Geophysical Research Letters*, 27.
- Tsurutani, B. T., Mannucci, A., Iijima, B., Abdu, M. A., Sobral, J. H., Gonzalez, W., Guarnieri, F., Tsuda, T., Saito, A., Yumoto, K., Fejer, B., Fuller-Rowell, T. J., Kozyra, J., Foster, J. C., Coster, A., Vasyliunas, V. M. 2004. Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields, *Journal Geophysical Research*, 109, A08302.
- Tsurutani, B. T., and 18 colleagues 2005. The October 28, 2003 extreme EUV solar flare and resultant extreme ionospheric effects: Comparison to other Halloween events and the Bastille Day event. *Geophysical Research Letters*, 32, 3.
- Tsurutani, B.T., O.P. Verkhoglyadova, A.J. Mannucci, A. Saito, T. Araki, K. Yumoto, T. Tsuda, M.A. Abdu, J.H.A. Sobral, W.D. Gonzalez, H. McCreddie, G.S. Lakhina, and V.M. Vasyliunas, 2008. Prompt penetration electric fields (PPEFs) and their ionospheric effects during the great magnetic storm of October 30-31, 2003. *Journal Geophysical Research*, 113, A5, A05311, doi:10.1029/2007HA012879, 2008.

- Tsurutani, B. T., Verkhoglyadova, O. P., Mannucci, A. J., Lakhina, G. S., Li, G., Zank, G. P. 2009. A brief review of “solar flare effects” on the ionosphere. *Radio Science*, 44, RS0A17, doi:10.1029/2008RS004029.
- Weisstein, E. W. 2008. From mathworld. A Wolfram Web Resource.
- Wilson, T. H. 1997. Short notice, fractal strain distribution and its implications for crosssection balancing: further discussion. *Journal of Structural Geology*, 19(1):129-132.
- Yin, X.-A., Yang, X.-H., and Yang, Z.-F. 2009. Using the r/s method to determine the periodicity of time series. *Chaos, Solitons and Fractals*, 39:731-745.
- Zhang, M., McKibben, R.B., Lopate, C., Jokipii, J.R., Giacalone, J., Kallenrode, M.-B., Rassoul, H.K. 2003. Ulysses observations of solar energetic particles from the 14 July 2000 event at high heliographic latitudes. *Journal Geophysical Research* 108, 1154.
- Zhang, D. H., Xiao, Z. 2005. Study of ionospheric response to the 4B flare on 28 October 2003 using International GPS Service network data. *Journal Geophysical Research*, 110, 3307.
- Zou et al. 2000. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer. I. Modelling. *Annales Geophysicae*. 18, 8, 927-944.
- Zhou, Z. M. 2007. Measurement of time dependent fractal dimension for time series of silicon content in pig iron. *Physica A*, 376:133-138.