



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

## CÁLCULO DEL CONTENIDO TOTAL DE ELECTRONES (TEC) EN LA IONOSFERA SOBRE DIVERSAS ESTACIONES MEXICANAS DE GPS Y SU RELACIÓN CON EL CLIMA ESPACIAL ASOCIADO A RÁFAGAS INTENSAS DE RAYOS X

### T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
(FÍSICA ESPACIAL)

PRESENTA

**REBECA LÓPEZ MONTES**

JURADO EXAMINADOR

DR. H. ROMÁN PÉREZ ENRÍQUEZ (DIRECTOR DE TESIS)  
DR. ALEJANDRO LARA SÁNCHEZ (PRESIDENTE)  
DR. ANATOLIY KOTSARENKO (VOCAL)  
DR. ANDREA BORGAZZI (SUPLENTE)  
DR. EDUARDO A. ARAUJO PRADERE (SUPLENTE)



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.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>11</b>
<b>2. Estudios sobre el Clima Espacial y la Ionosfera Terrestre</b>	<b>17</b>
2.1. Ráfagas solares y Eyecciones de Masa Coronal (EMCs)	18
2.2. Estructura de la ionosfera	21
2.3. Perturbaciones en la ionosfera y su relación con el clima espacial	23
2.3.1. Perturbaciones regulares	23
2.3.2. Perturbaciones irregulares	24
<b>3. El TEC en la Ionosfera y el Sistema GPS</b>	<b>27</b>
3.1. Sistema de Posicionamiento Global(GPS)	27
3.1.1. La señal GPS	28
3.1.2. Tipo de equipos GPS	28
3.1.2.1. Navegadores Convencionales	29
3.1.2.2. Receptores C/A Avanzados	29
3.1.2.3. Receptores Geodésicos con Medición de Fase L1	30
3.1.2.4. Receptores Geodésicos de Doble Frecuencia	30
3.1.3. Componentes del sistema	30
3.1.3.1. Segmento Espacial	31
3.1.3.2. Segmento Control	31
3.1.3.3. Segmento Usuario	32
3.1.4. Obtención de la posición	33
3.1.4.1. Determinación del Rango Satélite-Usuario	33
3.2. Obtención de la velocidad	36
3.3. Filtro Kalman	37
3.4. Formato Rinex	38
3.5. Cálculo del TEC	39

---

<b>4. El TEC Sobre México Durante Ráfagas Intensas de Rayos X</b>	<b>43</b>
4.1. Tormenta 14 de julio del 2000 . . . . .	47
4.2. Tormentas del 6 y 15 de abril del 2001 . . . . .	53
4.3. Tormentas de Halloween en octubre-noviembre 2003 . . . . .	59
4.4. Tormenta del 20 enero del 2005 . . . . .	67
4.5. Tormentas 7, 8 y 9 de septiembre del 2005 . . . . .	74
4.6. Tormentas 5 y 6 de diciembre del 2006 . . . . .	85
<b>5. Discusión de los Resultados</b>	<b>95</b>
5.1. Tormenta 14 de julio 2000 . . . . .	96
5.2. Tormentas 6 y 15 de abril 2001 . . . . .	98
5.3. Tormentas de Halloween 2003 . . . . .	100
5.4. Tormenta 20 de enero 2005 . . . . .	104
5.5. Tormentas del 7, 8 y 9 de septiembre 2005 . . . . .	106
5.6. Tormentas del 5 y 6 de diciembre 2006 . . . . .	108
<b>6. Conclusiones</b>	<b>111</b>

# Índice de figuras

2.1. Ráfaga solar del 17 de enero de 2005, imagen SOHO EIT 195. . . . .	19
2.2. Eyección de masa coronal del 14 de julio de 2000. Imagen LASCO C2. .	20
2.3. Capas de la ionosfera por Anderson, 1999. . . . .	22
3.1. Constelación GPS, por Peter, (2000). . . . .	32
3.2. Estaciones monitoras permanentes del sistema GPS, por <i>Peter (2000)</i> . .	33
3.3. Medida del tiempo de propagación de la señal entre el satélite y el receptor.	34
3.4. Distancia geométrica entre el satélite y el receptor. . . . .	35
4.1. Estaciones mexicanas de GPS que se analizaron durante los seis eventos de análisis. . . . .	46
4.2. Eyección de masa coronal del día 14 de julio 2000. . . . .	47
4.3. Estaciones mexicanas que se analizaron durante la tormenta del 14 de julio 2000. . . . .	48
4.4. TEC vertical, estaciones caya y cic1. . . . .	49
4.5. TEC vertical, estaciones huat y popn. . . . .	50
4.6. TEC vertical, estaciones uteo y yaig. . . . .	50
4.7. Gráfica de comparación de los valores de TEC obtenidos en cada una de las estaciones analizadas. . . . .	51
4.8. Gráfica de los valores de Z en desviaciones estándar por estación, por día.	51
4.9. Comparación de los días del periodo de análisis (activos) contra mismos días del siguiente año (quietos), en la estación caya. . . . .	52
4.10. Estaciones mexicanas que se analizaron durante las tormentas del 6 y 15 de abril del 2001. . . . .	54
4.11. TEC vertical, estaciones caya y cic1. . . . .	55
4.12. TEC vertical, estaciones posw y spmx. . . . .	55
4.13. TEC vertical, estaciones yaig y huat. . . . .	56
4.14. TEC vertical, estaciones igua y pino. . . . .	56

4.15. TEC vertical, estación zihp. . . . .	57
4.16. Gráfica de comparación de los valores de TEC obtenidos en cada una de las estaciones analizadas. . . . .	57
4.17. Gráfica de los valores de Z en desviaciones estándar por estación, por día.	58
4.18. Comparación de los días del periodo de análisis (activos) contra mismos días del siguiente año (días quietos, 2002), en la estación caya. . . . .	58
4.19. Ráfaga solar del día 28 de octubre de 2003, imagen SOHO. . . . .	59
4.20. Estaciones mexicanas que se analizaron durante las tormentas de Halloween de 2003. . . . .	60
4.21. TEC vertical, estaciones caya y cic1. . . . .	62
4.22. TEC vertical, estaciones coyu y doar. . . . .	63
4.23. TEC vertical, estaciones popn y sa27. . . . .	63
4.24. TEC vertical, estaciones sg21 y yaig. . . . .	64
4.25. TEC vertical, estación zihp. . . . .	64
4.26. Gráfica de comparación de los valores de TEC obtenidos en cada una de las estaciones analizadas. . . . .	65
4.27. Gráfica de los valores de Z en desviaciones estándar por estación, por día.	65
4.28. Comparación de los días del periodo de análisis (activos) contra mismos días del siguiente año (quietos). . . . .	66
4.29. Estaciones mexicanas que se analizaron durante la tormenta del 20 de enero 2005. . . . .	68
4.30. TEC vertical, estaciones cic1 y coyu. . . . .	69
4.31. TEC vertical, estaciones doar y guax. . . . .	69
4.32. TEC vertical, estaciones sa27 y sa33. . . . .	70
4.33. TEC vertical, estaciones sg21 y dema. . . . .	70
4.34. TEC vertical, estaciones maro y oxum. . . . .	71
4.35. TEC vertical, estaciones saby y upec. . . . .	71
4.36. TEC vertical, estaciones uton y zihp. . . . .	72
4.37. Gráfica de comparación de los valores de TEC obtenidos en cada una de las estaciones analizadas. . . . .	72
4.38. Gráfica de los valores de Z en desviaciones estándar por estación, por día.	73
4.39. Comparación de los días del periodo de análisis (activos) contra mismos días del siguiente año (quietos). . . . .	73
4.40. Estaciones mexicanas que se analizaron durante las tormentas del 7, 8 y 9 de septiembre 2005. . . . .	75
4.41. TEC vertical, estaciones cic1 y cpdp. . . . .	76
4.42. TEC vertical, estaciones doar y sa27. . . . .	76
4.43. TEC vertical, estaciones sa33 y usmx. . . . .	77

4.44. TEC vertical, estaciones yesx y dema. . . . .	77
4.45. TEC vertical, estaciones igua y mezc. . . . .	78
4.46. TEC vertical, estaciones mrra y oaxa. . . . .	78
4.47. TEC vertical, estaciones oxes y oxpe. . . . .	79
4.48. TEC vertical, estaciones oxum y pino. . . . .	80
4.49. TEC vertical, estaciones poal y saby. . . . .	80
4.50. TEC vertical, estaciones uigf y ujal. . . . .	81
4.51. TEC vertical, estación zihp. . . . .	82
4.52. Gráfica de comparación de los valores de TEC obtenidos en cada una de las estaciones analizadas. . . . .	83
4.53. Gráfica de los valores de Z en desviaciones estándar por estación, por día. . . . .	84
4.54. Comparación de los días del periodo de análisis (activos) contra mismos días del siguiente año (quietos). . . . .	84
4.55. Estaciones mexicanas que se analizaron durante las tormentas del 6 y 15 de diciembre 2006. . . . .	85
4.56. TEC vertical, estaciones coyu y cpdp. . . . .	86
4.57. TEC vertical, estaciones zihp y sa27. . . . .	86
4.58. TEC vertical, estaciones usmx y col2. . . . .	87
4.59. TEC vertical, estaciones her2 y lpaz. . . . .	88
4.60. TEC vertical, estaciones igua y meri. . . . .	89
4.61. TEC vertical, estaciones mpaa y mty2. . . . .	89
4.62. TEC vertical, estaciones oax2 y tol2. . . . .	90
4.63. TEC vertical, estaciones ugol y ujur. . . . .	91
4.64. TEC vertical, estaciones upec y uton. . . . .	92
4.65. Gráfica de comparación de los valores de TEC obtenidos en cada una de las estaciones analizadas. . . . .	92
4.66. Gráfica de los valores de Z en desviaciones estándar por estación, por día. . . . .	93
4.67. Comparación de los días del periodo de análisis (activos) contra mismos días del siguiente año (quietos). . . . .	93
5.1. Comparación de los valores de TEC contra los índices geomagnéticos Ap y Dst, durante los días 191-200 del año 2000. . . . .	97
5.2. Comparación de los valores de TEC contra los índices geomagnéticos Ap y el índice Dst, durante los días 90-109 del año 2001. . . . .	99
5.3. Comparación de los valores de TEC contra los índices geomagnéticos Ap y Dst, durante los días 291-320 del año 2003. . . . .	101
5.4. Comportamiento del campo magnético el día 24 de octubre del 2003, Observatorio de Teoloyucan. . . . .	102

5.5.	Comportamiento del TEC el día 24 de octubre del 2003, en cada una de las estaciones. . . . .	103
5.6.	Comparación de los valores de TEC contra los índices geomagnéticos Ap y Dst, durante los días 13-22 del año 2005. . . . .	105
5.7.	Comportamiento del campo magnético en los días del 01 al 19 de enero del 2005, Observatorio de Teoloyucan. . . . .	105
5.8.	Comparación de los valores de TEC contra los índices geomagnéticos Ap y Dst, durante los días 244-255 del año 2005. . . . .	107
5.9.	Comparación de los valores de TEC contra los índices geomagnéticos Ap y Dst, durante los días 335-349 del año 2006. . . . .	109

# Índice de cuadros

4.1. Ráfagas solares en rayos X para las cuales se calcula el TEC . . . . .	44
-----------------------------------------------------------------------------	----

## Resumen

Para el clima espacial la ionosfera es el constituyente atmosférico más importante pues es donde se cierran todos los circuitos eléctricos naturales, lo que *de facto* la convierte en la interface entre los fenómenos electromagnéticos del cosmos y la dinámica terrestre; ésta se ve afectada por el clima espacial, por lo que es fundamental su monitoreo. En particular, siendo la ionosfera un plasma, la concentración total de electrones (o TEC, por sus siglas en inglés) es el parámetro a medir y dar seguimiento.

En esta tesis, se estudia la relación del comportamiento del contenido de electrones en la ionosfera a latitudes medias como la de México, durante eventos solares intensos (de rayos X). Este análisis, se basa en el cálculo del contenido total de electrones (TEC) en la ionosfera. Para realizar este cálculo se utilizan los datos de observación de estaciones permanentes de GPS. En efecto, la ionosfera es normalmente transparente para las señales de los satélites GPS. Sin embargo, cuando la ionosfera está perturbada (hay regiones de mayor o menor concentración de electrones), la señal del satélite presenta una variación en el tiempo de recorrido hasta el receptor. La medición de esta variación está relacionada con el contenido de electrones, que es lo que nos interesa medir. El monitoreo continuo de la ionosfera nos brinda la posibilidad de estudiar de manera detallada el clima espacial.

Se analizan un total de seis eventos solares que van desde mediados del año 2000 hasta finales de 2006. Se obtuvieron datos de un total de 44 estaciones permanentes de GPS en México, variando la disponibilidad de las mismas en cada evento, con las que se calculó el TEC en la ionosfera sobre México, durante periodos que comprendían dichos eventos. Calculado el TEC, se visualizó su comportamiento de manera individual para cada estación y se hizo una comparación en función del tiempo de dicho comportamiento, de cada estación con respecto a las otras y en cada evento solar. Se observó que en algunos casos unas estaciones eran mucho más influenciadas por el evento solar que otras, sin que su ubicación importara (norte o sur de México).

Partiendo de la comparación del TEC como función del tiempo, se identificaron los máximos por día y se calculó la amplitud de la variación. En este análisis, para algunos eventos, se alcanzaron valores de entre 3 y 14 desviaciones estándar. También, se realizó una comparación del comportamiento del TEC, en cada periodo analizado, contra el mismo periodo pero de un año posterior y así observar el valor de la desviación porcentual de

los días con evento, con respecto a aquellos en los que no se presentaba una perturbación.

Finalmente, se realizó una comparación del comportamiento del TEC con los índices geomagnéticos Ap y Dst en cada evento, en donde se observa, en algunos casos, una clara relación de estos últimos valores con el TEC, durante los eventos específicos. También se ve que en algunos casos se presentaban aumentos en los valores de TEC sin una manifestación clara en los de Ap, mientras que sólo para dos eventos analizados se contó con datos magnéticos del observatorio de Teoloyucan. Esto limitó su comparación con el campo magnético en México.



# Capítulo 1

## Introducción

Para el clima espacial la ionosfera es el constituyente atmosférico más importante pues es donde se cierran todos los circuitos eléctricos naturales, lo que *de facto* la convierte en la interface entre los fenómenos electromagnéticos del cosmos y la dinámica terrestre; ésta se ve afectada por el clima espacial, por lo que es fundamental su monitoreo. En particular, siendo la ionosfera un plasma, la concentración total de electrones (o TEC, por sus siglas en inglés) es el parámetro a medir y dar seguimiento.

Vivimos en la vecindad de una estrella, el Sol. El clima espacial tiene que ver con la variación diaria del plasma espacial solar, la Tierra y el espacio que la rodea. Gracias al reciente progreso que se ha alcanzado sobre tormentas solares, tormentas y subtormentas geomagnéticas, es posible poner todas estas cosas juntas en un campo del estado del tiempo en el espacio, que se ha denominado así, clima espacial.

Indudablemente, el Sol controla el clima espacial. Debido a inestabilidades de plasma, el plasma superficial del Sol produce de vez en cuando ráfagas y eyecciones de masa coronal (EMCs). Estas nubes de plasma solar caliente, viajan en el espacio y pueden interactuar con la magnetosfera de la Tierra. Las interacciones con el plasma del ambiente terrestre generan una onda de choque, perturban el campo magnetosférico y lo energizan (ver por ejemplo *Lai, Singh y Peratt, 2000*). En muchas ocasiones, también la ionosfera se perturba y en casos extremos, las corrientes ionosféricas y las variaciones de sus campos magnéticos pueden destruir transformadores de estaciones eléctricas sobre la superficie de la Tierra (*Lanzarotti, et al., 2000*). Las tormentas geomagnéticas y las auroras son precisamente manifestaciones naturales de perturbaciones magnéticas y eventos energéticos de plasma. De acuerdo con *Lai, Singh y Peratt (2000)*, las EMCs más intensas acarrean “electrones asesinos” (con energías de varios MeVs) que son peligrosos para vehículos espaciales. Recientemente, se descubrió que configuraciones magnéticas en forma de  $S$  se presentan en la atmósfera solar en regiones cercanas a

las que dan origen a EMCs (*Canfield, et al., 1999*). Esto promete ser de gran ayuda para el pronóstico de estos eventos, lo que daría un tiempo para dar alertas del clima espacial.

Una de las técnicas más utilizadas actualmente para conocer el estado del clima espacial es el cálculo del contenido total de electrones (TEC) en la ionosfera utilizando dispositivos GPS, debido a que nos da una visión aproximada de lo que está ocurriendo en el medio interplanetario de manera relativamente fácil y accesible económicamente. De hecho, en todos los países del mundo existen redes de estaciones permanentes o temporales de GPS, cuya información se encuentra a menudo disponible para el análisis, conformando bases de datos globales vitales para la investigación del clima espacial. En el caso de México, por ejemplo, el Servicio Sismológico Nacional cuenta con un buen número de estaciones que poco a poco van siendo más accesibles a la comunidad científica internacional.

Estos estudios iniciaron desde varios siglos atrás, cuando se comenzó a estudiar fenómenos que dieron origen a grandes sospechas de la existencia de la ionosfera, durante el estudio de pequeñas anomalías que se producían en el campo magnético terrestre (ver libro *"Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry de Schunk y Nagy, 2000*). Sin embargo, su existencia fue comprobada hasta 1901 cuando Marconi transmitió señales de radio exitosamente a través del Atlántico.

Este experimento demostró, que las ondas de radio son reflejadas alrededor de la superficie terrestre a distancias mucho mayores a las que se le atribuyen a la refracción. El siguiente año, A. E. Kennelly y O. Heaviside, propusieron de forma independiente la existencia de una capa conductora en la atmósfera superior de cargas eléctricas libres, que permite la reflexión de ondas de radio (*Ratcliffe, 1967*).

En 1903, J.E. Taylor sugirió que la radiación ultravioleta era la fuente de las cargas eléctricas en la ionosfera, lo que implicaba que el Sol controlaba la propagación de ondas de radio (*Taylor, 1903*). Las primeras medidas de la altura de la capa reflectora fueron hechas por L. de Forest y L.F. Fuller en The Federal Telegraph Company de San Francisco, California entre los años de 1912 y 1914 (*Villard, 1976*). La altura de la capa reflectora fue deducida usando un transmisor-receptor, separado aproximadamente 500 km. Sin embargo, los resultados de Forest-Fuller no fueron conocidos y generalmente las medidas aceptadas de la altura de la capa reflectora se le atribuyen a Breit-Tuве (*Breit y Tuве, 1925*) y a Appleton-Barnett (*Appleton y Barnett, 1925*), experimentos que fueron realizados independientemente en 1924. Breit-Tuве experimentaron con una técnica de sondeos en pulsos, la cual es utilizada hasta el día de hoy. Appleton-Barnett utilizaron un cambio de frecuencias en su experimento.

En 1925, la invención de la ionosonda permitió una observación directa de la ionosfera, dando lugar al primer estudio científico de sus características y variabilidad,

---

así como sus efectos sobre las ondas de radio (*Taylor y Nagy, 2000*).

En 1940 Appleton, se dedicó a estudiar las características de esta zona de la atmósfera y observó que las señales de radio se debilitaban más por la noche. Descubrió que la capa Kennelly-Heaviside tenía 80 km de altura. Al amanecer, esta capa desaparecía pero aún se manifestaba reflexión en una capa situada a casi 250 km (capa de Appleton).

En 1926 el nombre de “ionosfera” fue propuesto por Watson-Watt en un artículo de la United Kingdom Radio Research Board, pero no apareció en la literatura hasta tres años después (*Watson-Watt, 1929*). Los primeros radio sondeos de la ionosfera mostraban que ésta se constituía por diversas capas que fueron llamadas *D*, *E* y *F*; estos nombres fueron dados por Appleton, al observar en sus primeros trabajos, que la primera capa que se observa refleja el campo eléctrico (*E*) y después, al reconocer la segunda capa a una altura mayor, la nombró *F* por la reflexión del campo. Y posteriormente con el descubrimiento de una capa que se encuentra a menor altitud se decide nombrarla como capa *D*, por la anterior designación de Appleton como *E* y *F* a las dos primeras capas (*Silberstein, 1959*).

La tecnología de cohetes disponible a finales de la segunda guerra mundial, fue utilizada por diversos científicos en el estudio de la alta atmósfera y la ionosfera, preparando el camino para la exploración espacial vía satélites. El primer cohete científico para hacer medidas directas de la ionosfera, fue lanzado en 1946 sobre un V-2 desde Nuevo México y consistía en una sonda de Langmuir y un calibrador de presión termoiónica.

En 1947, la ionosonda se empezó a utilizar rutinariamente para medir las características de la ionosfera. Durante el Año Geofísico Internacional (IGY, por sus siglas en inglés) en 1957-1958, un esfuerzo cooperativo internacional creó una red mundial de ionosondas para recolectar medidas de sondeos verticales durante el periodo del máximo solar (*Van Allen, 1984 y Nicolet, 1984*). Como parte del IGY, los científicos propusieron lanzar un satélite artificial y el 4 de octubre de 1957 la Unión Soviética lanzó el satélite Sputnik I (este suceso es considerado como el inicio de la era espacial). El primer satélite de sondeo del extremo superior de la ionosfera (topside), fue el Alouette I lanzado por la NASA en septiembre de 1962; su principal objetivo fue determinar las variaciones diurnas, estacionales y geográficas en la distribución de la densidad electrónica en la alta ionosfera.

El Año Internacional del Sol Quietos (IQSY, por sus siglas en inglés, 1964-1965), se caracterizó por experimentos mundiales, utilización de cohetes y satélites, mediciones de radiación solar, construcción de bases de datos de la ionosfera, utilización del radar de dispersión incoherente, sondeo de la ionosfera alta y la realización de los primeros modelados de la ionosfera. A través de estos avances la ionosfera fue mejor explorada

y por consiguiente se obtuvo un mayor entendimiento de ella.

Para los años 70, se estableció que las capas de la ionosfera son creadas por radiación solar y, particularmente, la capa  $F2$  esta influenciada por la circulación termosférica global. Las fuerzas principales que conducen a esta circulación son: el calentamiento debido a la radiación solar, el viento solar y la energía que aparece en latitudes altas en forma de campos eléctricos o partículas energéticas y, por último, las mareas y ondas transmitidas hacia arriba desde la atmósfera media. Así la estructura vertical de la ionosfera depende directamente del espectro solar y la estructura latitudinal de la ionosfera depende del campo geomagnético (*Rishbeth, 1998*).

Otra técnica más que se ha estado utilizando es, por ejemplo, el estudio de la ionosfera terrestre usando la red satelital del Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) y la cual se ha vuelto un campo importante de investigación, especialmente por los efectos que la ionosfera puede tener en las telecomunicaciones y la navegación (Rodger and Jarvis, 2000). Muestra de esto es que desde finales de los años noventa hasta la fecha se han realizado diversas investigaciones del impacto del clima espacial en la ionosfera terrestre por medio del empleo de esta técnica y esto debido a que la infraestructura actual del sistema GPS es tal que permite un monitoreo constante y prácticamente en tiempo real del clima espacial, lo cual ha permitido una mejora considerable en los modelos ionosféricos.

Para el estudio del clima espacial la ionosfera constituye, junto con la magnetosfera, la parte más importante. Si bien la magnetosfera sirve como un escudo natural de nuestro planeta para contener el impacto de plasma de viento solar y partículas cargadas de alta energía, es realmente en la ionosfera donde se depositan tanto las partículas cargadas que logran penetrar el campo magnético como la radiación electromagnética de gran energía (rayos de extremo ultravioleta, rayos X y aun rayos gamma). Dado que por regla general la ionosfera es transparente a las señales de microondas de los satélites, éstas pueden resultar alteradas por la presencia de actividad en la ionosfera. Por ello, en la siguiente sección hago una descripción detallada de la estructura de esta capa tan importante de la atmósfera, lo que me permitirá justificar el análisis de dichas señales cuando éstas sufren alteración por la presencia de perturbaciones en el TEC.

En esta tesis se reporta el cálculo del TEC, realizado utilizando datos de GPS sobre diversas estaciones permanentes de México durante las tormentas solares que se presentaron en el pasado ciclo solar número 23 y que reportaron intensidades mayores o igual a 5X. Se trata de un total de seis eventos analizados desde el año 2000 hasta finales del 2006 (que incluyen los días de las llamadas tormentas de Halloween del 2003 durante las cuales se alcanzaron valores máximos por encima de las 200 unidades de TEC ( $10^{16}m^{-2}$ ), en el día 29 de octubre). Desgraciadamente, el número de estaciones analizadas fue muy variable entre un evento y otro, así como su distribución espacial.

Ésto debido a la poca existencia de estaciones permanentes de GPS en México y la difícil tarea de acceder a sus datos.

El TEC se calculó utilizando datos de observación de GPS en formato RINEX, obtenidos de las redes públicas de UNAVCO, SOPAC, CORS y el Servicio Sismológico Nacional, así como por parte del Dr. Enrique Cabral Cano (Instituto de Geofísica, UNAM). Posteriormente se realizó un análisis estadístico del comportamiento del TEC en cada una de las estaciones alrededor de cada evento, comparándolo con datos de quietud, así como del comportamiento de la actividad geomagnética global, dada por el índice Ap y el índice Dst.

Con todo esto se pretende estudiar cuál es la respuesta de la ionosfera a latitudes medias (caso específico sobre México), a la radiación electromagnética de alta frecuencia y corpuscular alta de energía emitidas durante ráfagas solares y EMCs. Esto permitirá mostrar la importancia que tiene el monitoreo constante de la ionosfera a estas latitudes, tanto para entender mejor el clima espacial, como para estudiar el impacto de éste sobre la tecnología espacial de la cual cada vez somos más dependientes.

La presente tesis consta de varios capítulos. En el siguiente, se hace una descripción de lo que es el clima espacial y su impacto sobre la ionosfera. Al estudiar la estructura de esta última se hace posible ver por qué, para los propósitos de esta tesis, basta considerar toda la ionosfera como si fuera una sola capa delgada plana localizada a una altura de 400 km, lo que permite calcular más fácilmente el TEC vertical y concentrarnos en las variaciones de éste. En el tercer capítulo, me concentro en una explicación de la técnica que se utiliza para hacer el cálculo del TEC. Dado que este cálculo se realiza con datos de cada uno de los satélites GPS, se describe también el sistema de satélites, el formato en el que se obtienen los datos y las redes de donde se pueden obtener dichos datos, incluyendo sistemas como el del Servicio Sismológico Nacional y otras de investigadores que gentilmente me dieron acceso a sus datos. En el cuarto capítulo se presentan los resultados del análisis realizado, el cual incluye la comparación de datos durante cada uno de los eventos y épocas "quietas", así como los valores máximos y su nivel de significancia. En el capítulo cinco hago una discusión de los resultados obtenidos mediante este análisis en comparación con otros estudios (sobre todo obtenidos en otras latitudes y con otro tipo de técnicas), así como su comparación con el comportamiento del campo geomagnético, tanto globalmente –a través de los índices Ap y Dst– como en México, en el Observatorio Geomagnético de Teoloyucan. Finalmente, en el capítulo 6 doy las conclusiones del trabajo realizado.



## Capítulo 2

# Estudios sobre el Clima Espacial y la Ionosfera Terrestre

El término clima espacial se ha utilizado desde la década de los 90s para referirse a las condiciones en que se encuentra el medio interplanetario (en las inmediaciones de la Tierra), debido principalmente a la actividad solar, la cual involucra radiación electromagnética de alta energía y plasma de viento solar intensificado que interactúan con la magnetosfera y la atmósfera de nuestro planeta. El clima espacial es entonces el estudio de las condiciones ambientales en el sistema que rodea a la Tierra, asociadas con eventos intensos de actividad solar, tales como ráfagas y eyecciones de masa coronal (EMCs). En efecto, cuando éstas son muy intensas y tienen lugar en regiones cercanas al centro del disco solar, pueden causar tormentas geomagnéticas importantes si su  $B_z$  se encuentra primordialmente en dirección sur; si esto ocurre pueden provocar grandes cambios en el estado del tiempo espacial que circunda la Tierra. Como consecuencia de eventos específicos, se han estudiado las formas y mecanismos físicos que están involucrados en la relación de afectación que puede llegar a tener la interacción directa e indirectamente de ellos con los sistemas terrestres. Entre ellos destacan los relacionados con la tecnología. Como ejemplo de esto se tiene la afectación sobre sistemas de comunicaciones globales e instrumentación satelital y terrestre (*Muir, H., 1996*). Esto tiene un impacto directo sobre la humanidad debido a que cada vez dependemos más de la tecnología para nuestras actividades cotidianas. El conocimiento detallado del clima espacial se ha convertido entonces en un elemento fundamental para intentar predecir algunos de estos fenómenos y reducir, por tanto, algunos de sus efectos más severos.

## 2.1. Ráfagas solares y Eyecciones de Masa Coronal (EMCs)

Las ráfagas solares y las EMCs son las “explosiones” más energéticas del sistema solar, con una liberación de energía equivalente a mil millones de toneladas de partículas. Ocurren más a menudo en épocas cercanas al máximo del ciclo de actividad solar, el cual tiene un periodo de aproximadamente 11 años, y pueden disparar perturbaciones en la magnetosfera terrestre. Las ráfagas solares de gran magnitud están a menudo asociadas con grandes EMCs, aunque esto no siempre es muy claro. Las EMCs son porciones de la corona solar que se expanden a medida que aumenta la altura. El plasma solar se calienta entonces a decenas de millones de grados; hay una aceleración a grandes energías de electrones, protones y elementos más pesados. Los electrones supercalientes se mueven a lo largo de las líneas de campo magnético más rápidamente de lo que lo puede hacer el viento solar. Se piensa que el rearrreglo del campo magnético y las ráfagas solares pueden dar lugar a la formación de ondas de choque que aceleran partículas al frente del bucle de la EMC. En términos de masa, una EMC puede liberar hasta 100 mil millones de kilogramos de material solar y la velocidad de la eyección puede alcanzar más de 1000 km/s.

Las ráfagas solares se clasifican según su emisión electromagnética, particularmente en rayos X y extremo ultravioleta. El flujo a estas frecuencias da origen a los niveles C, M, ó X, que corresponden a ligeras, medias e intensas, respectivamente. La ráfaga del 17 de enero de 2005, por ejemplo, fue clasificada como 3.8X, pero la del 7 de septiembre de 2005, con un nivel de 17X. A esta última se le asoció una rápida y potente EMC, la cual impactó la magnetosfera dando lugar a una tormenta geomagnética con intensificación de auroras, bloqueo de transmisiones de radio, y sobrecarga de transformadores en algunas estaciones eléctricas. Una cosa que es importante hacer notar es que aunque estos impulsos energéticos del Sol están, como mencioné antes, asociados con épocas de alta actividad solar, algunos de los eventos más intensos se han registrado en periodos de baja actividad. Como ejemplos de esto se encuentran el evento de protones de agosto de 1972 (ver por ejemplo *Moussas et al., 1980*), que fue como una tormenta de nieve en el verano. Se calculó para este evento que la capa de ozono se adelgazó sustancialmente por el impacto de protones energéticos (*Fabian, Pyle y Wells, 1979*) y la ráfaga del 10 de marzo de 1989 (ver *Miroshnichenko et al., 2006*), la cual se sabe que produjo una gran tormenta geomagnética, ocasionó auroras a bajas latitudes, calentó la parte superior de la atmósfera a tal grado que ésta se expandió ejerciendo un mayor “arrastre” sobre satélites (el Skylab fue una de sus víctimas ya que, a causa de este evento se precipitó al mar antes de tiempo), sobrecargó transformadores de potencia, dejando

sin luz a la ciudad de Quebeq, en Canadá, etc. Varias tormentas solares de este tipo se analizan en esta tesis, como la del 14 de julio del 2000 (llamada “Bastilla”), las de octubre-noviembre de 2003 (llamadas de “Halloween”), y las de enero y septiembre de 2005. Precisamente la ráfaga del 17 de enero de 2005 se muestra en la figura 2.1.

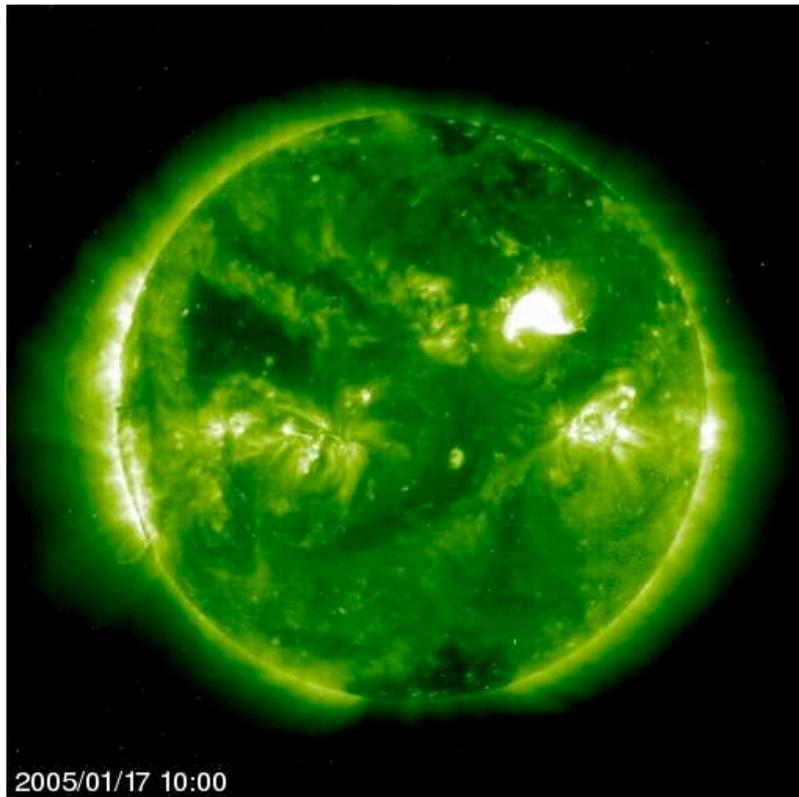


Figura 2.1: Ráfaga solar del 17 de enero de 2005, imagen SOHO EIT 195.

Aunque las ráfagas de rayos X son muy energéticas, son realmente las EMCs, que a menudo las acompañan, las que contienen la mayor energía. Las EMCs inician con una explosión o descarga, usualmente sobre una región de manchas o región activa. Las manchas son lugares con intensos campos magnéticos que surgen a través de la superficie solar. Por razones que nadie entiende completamente, estos campos se hacen inestables y explotan, liberando la gran cantidad de energía que mencioné antes. Normalmente, las EMCs viajan a velocidades relativamente bajas (500 km/s), aunque algunas alcanzan los miles de km/s, alcanzando la Tierra en 1 ó 2 días. Recientemente, se descubrió que a medida que se mueven hacia el espacio, las EMCs se aceleran, lo que , según la teoría se explica por la onda de choque que se produce en el medio

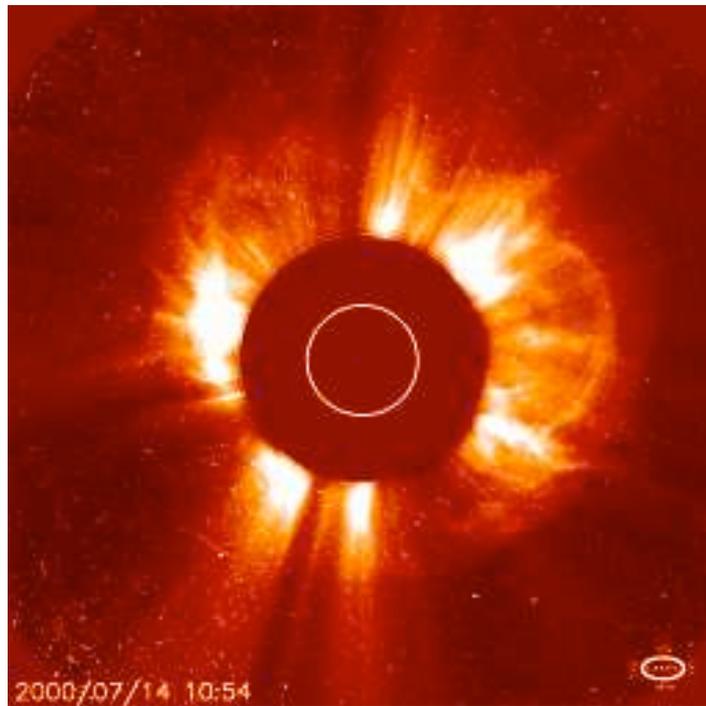


Figura 2.2: Eyección de masa coronal del 14 de julio de 2000. Imagen LASCO C2.

interplanetario debido al movimiento de la eyección en el medio. Según parece, el choque enfrente de la EMC acelera protones dando origen a una tormenta de partículas energéticas (*Lara et al., 2006*). Una imagen de la EMC del 14 de julio de 2000 se muestra en la figura 2.2.

Por lo general, el Sol da una señal cuando está a punto de lanzar una EMC. Filamentos, ráfagas, áreas brillantes y, como mencioné antes, sigmoides brillantes en forma de *S*, se asocian frecuentemente con las eyecciones. Sin embargo, en la última década más o menos un número relativamente grande de tormentas magnéticas alrededor de la Tierra parecían estar asociadas con EMCs que ocurrieron sin una clara señal que indicara el sitio que podría haberlas originado (*Lara et al., 2006*). La explicación más plausible fue que estas erupciones eran simplemente miembros débiles de la familia de EMCs, capaces de emerger de la superficie solar sin señales dramáticas que sirvan de alerta.

## 2.2. Estructura de la ionosfera

La ionosfera es la capa de la atmósfera terrestre que se encuentra ionizada permanentemente debido principalmente a la fotoionización provocada por radiación electromagnética de alta frecuencia emitida por el Sol, tal como rayos X y extremo ultravioleta; su impacto sobre los átomos y moléculas presentes es capaz de arrancar uno o varios electrones produciendo ionización, convirtiendo el gas neutro de la atmósfera en plasma. Esto permite que sean entonces las fuerzas electromagnéticas las que determinen su comportamiento y su interacción con la radiación.

Históricamente la ionosfera se ha dividido en tres regiones:  $D$ ,  $E$  y  $F$ , refiriéndose a cada una como “capas” según el grado de ionización de cada región. 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. En todos los casos estas alturas varían en función de los cambios diurnos así como del comportamiento de la actividad solar. La estructura de la ionosfera se muestra en la figura 2.3, en donde se grafican por un lado la temperatura y por el otro la concentración electrónica, como función de la altura (*Anderson y Fuller-Rowell, 1999*).

La siguiente descripción de las capas ionosféricas corresponde al libro “An introduction to the ionosphere and magnetosphere” de *Ratcliffe (1972)*.

Capa  $D$ : La ionización en esta capa se debe principalmente a la radiación Lyman- $\alpha$  del Hidrógeno que tiene una longitud de onda de  $121,5nm$ , ionizando el óxido nítrico ( $NO$ ). Además, con actividad solar alta, los rayos X duros (longitud de onda  $1nm$ ) pueden ionizar los componentes  $N_2$  y  $O_2$ . 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. Por consiguiente 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.

Capa  $E$ : La ionización de esta capa se debe a rayos X blandos ( $1 - 10nm$ ) y a los rayos ultravioleta (UV) que ionizan principalmente al oxígeno 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 competitivos 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). Esta región es también conocida como la capa de Kennelly-Heaviside o simplemente la capa de Heavi-

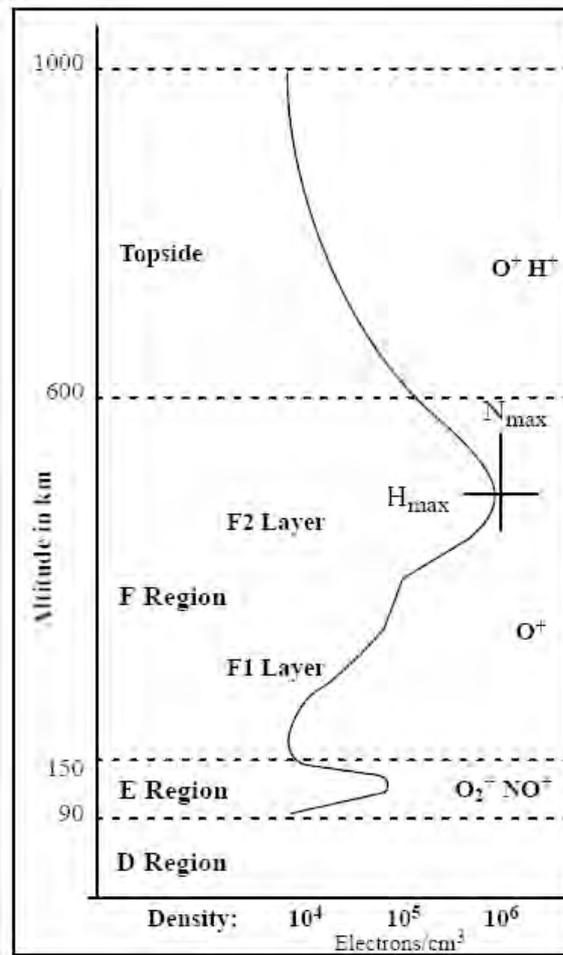


Figura 2.3: Capas de la ionosfera por Anderson, 1999.

side. 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.

Capa *F*: Conocida como la capa Appleton, es la capa superior de la ionosfera terrestre y la causa de su ionización es la radiación solar del ultravioleta extremo (*UV*,  $10 - 100nm$ ), la cual ioniza el oxígeno atómico (*O*). La capa *F* sufre una deformación en su perfil de densidad durante el día dando origen a las capas *F1* y *F2*. 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 *F2* sigue siendo durante el día o la noche la capa responsable de la transmisión de ondas de alta frecuencia, facilitando las comunicaciones de radio de larga distancia.

## **2.3. Perturbaciones en la ionosfera y su relación con el clima espacial**

Las perturbaciones en la ionosfera se producen por la relación de ésta con la emisión de radiación electromagnética desde el Sol y las variaciones de ésta radiación, las cuales están relacionadas 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 un resultado del comportamiento anormal del Sol y por lo tanto es imposible conocer cuándo se presentará una de ellas.

En ambos casos, estas perturbaciones tienen efectos importantes sobre la propagación de ondas de radio.

### **2.3.1. Perturbaciones regulares**

Estas perturbaciones pueden ser subdivididas en cuatro tipos:

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 del 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 localiza a una altura mayor (Zou, et al., 2000).

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. La capa  $F2$ , sin embargo, 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 los cambios estacionales en la atmósfera neutra. Es decir, la circulación de la atmósfera neutra de verano a invierno resulta en un incremento del cociente  $O/N_2$  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  $N_2$  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).

Variación con el Ciclo Solar (11 años): Uno de los fenómenos más notables sobre la superficie del Sol es la aparición y desaparición de manchas. 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.

Variación con el Ciclo de Rotación del Sol (27 días): Como el sol rota en su propio eje, las manchas solares son visibles en intervalos de 27 días, que es el período aproximado para que el Sol complete una rotación. El ciclo de rotación del sol de 27 días causa entonces variaciones en la densidad de ionización de las capas sobre una base diaria. Las fluctuaciones son mayores en la capa  $F2$  que para las demás capas.

### 2.3.2. 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. Pueden afectar drásticamente la capacidad de comunicación sin ninguna advertencia. Las variaciones irregulares más comunes son:

Esporádica  $E_s$ : consiste en un aumento muy marcado, pero irregular y rápidamente

variable de la densidad de electrones en la región  $E$ . La reflexión de ondas, cuando está presente el fenómeno esporádico  $E_s$ , hace posible la recepción de ondas de mayor frecuencia que normalmente no son percibidas (50 MHz). La  $E_s$  puede ocurrir durante el día y la noche, variando marcadamente con la latitud; la  $E_s$  está asociada con tormentas, meteoritos, actividad solar y actividad geomagnética.

Perturbaciones ionosféricas súbitas: Estas perturbaciones pueden ocurrir sin aviso y pueden prevalecer por cualquier intervalo de tiempo, desde unos pocos 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  $E$ . El resultado es que son absorbidas las ondas de radio de alta frecuencia que normalmente pasarían a través de la capa  $D$  y se reflejarían en los niveles más altos. Las comunicaciones por radio a larga distancia, que dependen de la reflexión en la ionosfera, quedan interrumpidas súbitamente durante intervalos de tiempo que van de 15 minutos a una hora.

Tormentas ionosféricas: Las tormentas ionosféricas son variaciones de la densidad electrónica y están relacionadas con tormentas geomagnéticas, que 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 intervalo de 27 días correspondientes a la rotación del Sol; se caracterizan por una ionización más gradual y por una mayor duración que las perturbaciones súbitas ionosféricas. En éstas, las frecuencias críticas son más bajas que las normales, particularmente para la capa  $F2$ , ya que las tormentas ionosféricas afectan la región  $F2$ , reduciendo su concentración de iones. Las regiones más bajas no son afectadas apreciablemente por las tormentas, a menos que la perturbación sea muy grande. El efecto práctico de las tormentas ionosféricas es que el rango de frecuencias que pueden ser utilizadas son mucho más bajas que las normales.

Efectos producidos desde abajo de la ionosfera: Estos efectos producen cambios en la concentración electrónica. Las mareas y ondas de gravedad juegan un papel importante en la dinámica de la termosfera, particularmente en un intervalo de altitud de los 100 a los 250 km. Dichas ondas son generadas *in situ* por calentamiento solar UV y EUV, procesos aurorales que varían temporalmente como precipitación de partículas, corrientes, rayos, “sprites”, convección del plasma, etc. Las mareas y las ondas de gravedad también son generadas en la baja atmósfera y se propagan 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 en diferentes escalas y tormentas (*Schund y Nagy, 2000*).

## Capítulo 3

# El TEC en la Ionosfera y el Sistema GPS

En la última década el cálculo del TEC utilizando datos de observación GPS ha alcanzado una proporción significativa en diversos países desarrollados. En ellos se han instalado grandes redes de estaciones permanentes GPS que permiten la realización de un monitoreo continuo del comportamiento de la ionosfera y por ende se ha logrado una mejora significativa en los modelos ionosféricos. En este capítulo se describe a grandes rasgos qué es el sistema global de posicionamiento, de qué consta y cómo funciona para llevar a cabo su tarea de localización. Así mismo, se hace una descripción de lo que es el filtro Kalman, lo que es determinante para el cálculo del TEC. A continuación se da una explicación del formato de los datos que arroja el GPS conocido como “Receiver Independent Exchange Format” o RINEX, para terminar con una descripción de cómo se realiza propiamente el cálculo del TEC.

### 3.1. Sistema de Posicionamiento Global(GPS)

El sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés), es un sistema global de navegación por satélite; desarrollado, instalado y actualmente operado por el departamento de defensa de los Estados Unidos de América (DOD). El sistema permite determinar en todo el mundo la posición de cualquier punto de interés, pudiendo alcanzar una precisión centimétrica. El GPS funciona mediante una red de satélites artificiales (SAT) que se encuentra orbitando la tierra. Cuando se desea determinar una posición, el equipo receptor utilizado para ello localiza automáticamente como mínimo cuatro satélites de la red, de los cuales recibe la información correspondiente

a su propia posición y el tiempo de medición de sus cuatro relojes atómicos en cada uno de ellos (sección 3.1.1.). Con base en estas señales, el equipo receptor sincroniza su reloj y calcula el tiempo de vuelo de las señales, es decir, la distancia al satélite. Por triangulación a cuatro o más satélites, el receptor determina su propia posición.

### 3.1.1. La señal GPS

El elemento clave de la precisión del sistema, es el hecho de que los componentes de la señal están controlados por relojes atómicos muy precisos. Los satélites tienen a bordo cuatro normas de tiempo (dos relojes de Rubidio y dos relojes de Cesio); estas normas de frecuencia altamente precisa constituyen el corazón de los satélites GPS, produciendo la frecuencia fundamental en la banda  $L$  (10.23 MHz) (ver *Ashby, 2002*).

A partir de ésta frecuencia fundamental, se derivan coherentemente dos señales:  $L1$  y  $L2$ ; que se generan multiplicándolas por 154 y 120, respectivamente, con lo que producen:

$$L1 = 1,575.42 \text{ MHz (19cm)}$$

$$L2 = 1,227.60 \text{ MHz (24cm)}$$

Estas frecuencias duales son esenciales para eliminar el error causado por la refracción ionosférica durante el cálculo de la localización, siendo en nuestro caso ese “error” lo que nos interesa analizar.

Las pseudos-distancias que se obtienen a partir del tiempo de viaje de la señal, medidas desde cada satélite al receptor, emplean dos códigos de ruido pseudo-aleatorios (PRN) modulados (sobrepuestos) sobre las frecuencias  $L1$  y  $L2$ . Existen además dos códigos que viajan a través de dichas frecuencias; el primer código es el C/A (código de adquisición imprecisa), designado también como servicio estándar de determinación de la posición (SPS, por sus siglas en inglés) y el cual se encuentra disponible para uso civil. Este código tiene una longitud de onda de 293.1 m y está modulado solamente sobre  $L1$ .

El segundo es el código P (código de precisión), designado como servicio preciso de determinación de la posición (PPS, por sus siglas en inglés). Este servicio es reservado para uso militar (EUA) y otros usuarios autorizados (investigación); la longitud de onda de este código es de 29.31 m y está modulado sobre ambas señales ( $L1$  y  $L2$ ).

### 3.1.2. Tipo de equipos GPS

Caracterizar todos los tipos de GPS que existen actualmente en el mercado es casi imposible, dado al amplio surtido de productos. Además, dicha clasificación puede

realizarse por diversos criterios como: en función de su arquitectura (receptores secuenciales, continuos o múltiples), del método de funcionamiento (correlación de código o análisis de fase  $L1$  y  $L2$ ) o en función de las aplicaciones a las que se destine. Este último criterio es la base de la clasificación que se presenta a continuación:

### **3.1.2.1. Navegadores Convencionales**

Los navegadores son los tipos de receptores GPS más extendidos, dados su bajo costo y múltiples aplicaciones. Consisten en receptores capaces de leer el código fuente C/A, además de que pueden tener la capacidad de leer señales diferenciales vía radio o conexión software y representar cartografía sencilla en su pantalla. Permiten también conocer las coordenadas en varios formatos y la conversión de baja o media precisión a un datum local, conjunto de puntos de referencia que sirven de base para definir un sistema de referencia terrestre, desde el WGS84. También en estos equipos es posible la navegación asistida con indicación de rumbos, direcciones y señales audibles de llegada a rutas definidas por el usuario a través de puntos de referencia.

Las precisiones de estos equipos pueden ir de los 25 a los 3 m en planimetría y un error de al menos 16 m en altimetría, dependiendo de la visibilidad de satélites y de la geometría espacial que presenten los mismos. Una ventaja de los navegadores, es que el usuario no necesita tener algún tipo de formación específica para su manejo.

### **3.1.2.2. Receptores C/A Avanzados**

Estos receptores permiten el uso de metodologías diferenciales (DGPS), en ocasiones bajo la forma de suscripciones a servicios vía satélite como LandStar. Bajo esta metodología se consiguen precisiones del orden de 1 m en tiempo real. Estos receptores son también muy aptos para aplicaciones en sistemas de información geográfica (GIS), porque permiten una precisión compatible con la mayoría de las escalas usadas en GIS; además permiten el manejo de base de datos geográficos realizados por el usuario. Con este tipo de receptores conectados a computadoras portátiles y otros dispositivos móviles, es posible capturar cómo replantear, ubicar en el terreno puntos de un plano, en el terreno con una buena precisión. Esto es posible porque el DGPS vía satélite permite correcciones en tiempo real.

Los dispositivos móviles que se conectan a este tipo de receptores suelen ser PDAs (Personal Digital Assistant), efectuando programas específicos para este tipo de tareas, como ArcPAD de ESRI. Dichos programas pueden leer varios tipos de formatos vectoriales y raster(matriz de celdas, en donde cada celda tiene un único valor que se considera representativo para la superficie que abarca la misma), lo que permite fácil-

mente integrar datos GIS. De esta forma, podemos llevar nuestras bases de datos al terreno y conocer nuestra posición en tiempo real, ver la cartografía con una pantalla de color y tener acceso a base de datos asociadas. Es como llevar una versión reducida del GIS al terreno.

### 3.1.2.3. Receptores Geodésicos con Medición de Fase L1

Son receptores que trabajan con la onda portadora  $L1$ , acumulando información que con un postprocesado en gabinete pueden obtenerse precisiones relativas centimétricas para distancias de 25 a 30 km entre estaciones. Permiten el cálculo de vectores con su evaluación estadística siendo aptos para el ajuste de redes, aunque se trata de una tecnología vieja hoy en día.

Este tipo de receptores suelen ser usados con métodos estadísticos relativos, con el uso de estaciones de referencia complementarias. Muchos de ellos son compatibles con los servicios DGPS vía satélite, mediante la incorporación de una tarjeta electrónica de expansión y la suscripción al sistema.

### 3.1.2.4. Receptores Geodésicos de Doble Frecuencia

Trabajan con las ondas  $L1$  y  $L2$ , lo cual permite disminuir los errores derivados de la propagación desigual de la señal a través de las distintas capas atmosféricas (sobre todo la ionosfera). Con este tipo de equipos se puede llegar a precisiones por debajo del centímetro con postprocesado para distancias de hasta 10 km y por debajo de un metro para distancias de hasta 500 km.

Algunos de ellos son compatibles con sistemas DGPS vía satélite, lo que permite llegar a precisiones decimétricas en tiempo real. Este tipo de receptores es más apropiado para tareas de geodesia y topografía que para aplicaciones de GIS, donde no se necesita bajar del metro de precisión.

## 3.1.3. Componentes del sistema

El sistema global de posicionamiento se compone de tres subsistemas o segmentos que llevan a cabo diferentes tareas:

- Segmento Espacial: Constituido por la red de satélites artificiales que orbitan la Tierra.
- Segmento Control: Es el cerebro del sistema, cuya misión es el seguimiento y control de los satélites, así como el cálculo de los datos sobre el movimiento de

cada uno de ellos y su posterior transmisión a los usuarios a través de los propios satélites.

- Segmento Usuarios: Formado por los receptores.

### **3.1.3.1. Segmento Espacial**

Los satélites se clasifican en dos grupos: geoestacionarios y no geoestacionarios. Los primeros permanecen en un punto fijo respecto a la superficie terrestre a unos 36000 km de altura, siguiendo órbitas circulares en el plano ecuatorial; y los segundos recorren órbitas elípticas respecto al centro de la Tierra, formando un plano con respecto al plano ecuatorial.

En el sistema GPS NAVSTAR se utilizan satélites no geoestacionarios que recorren todos los puntos de la superficie terrestre, con el fin de obtener una cobertura global. Gracias a esto, en cualquier punto de la Tierra se ve un número mínimo de satélites con una duración y periodicidad aceptable, que permite la recepción de señales y cálculo de posición de receptores con una precisión determinada.

El segmento espacial de GPS es una constelación de satélites en órbitas semi-sincronizadas alrededor de la Tierra. El contingente total de satélites se ubica en seis planos orbitales, de tres o más satélites en cada uno (ver figura 3.1). Para conseguir la capacidad de operación completa se requieren 24 satélites en la constelación, habiendo actualmente más de ellos. Los planos orbitales tienen una inclinación de 55 grados con respecto al ecuador y una altitud aproximada de 20000 km (*Ashby, 2002*).

Los satélites completan su órbita en 12 horas aproximadamente, estando posicionados de tal forma que normalmente hay un mínimo de cinco a la vista para un usuario en cualquier sitio y en cualquier momento.

### **3.1.3.2. Segmento Control**

Está compuesto por una estación maestra de control (MCS por sus siglas en inglés), situada en la base aérea Falcon en Colorado Springs y por cinco estaciones monitoras permanentes situadas en Hawái, Kwajalein, Diego García, Ascensión y Colorado Springs (ver figura 3.2). Se está considerando colocar otra estación monitora en la estación aérea de Cabo Cañaveral. La estación MCS es la unidad central de procesamiento del GPS, operando las 24 horas del día los 365 días del año. Sus funciones son el seguimiento y manejo de la constelación de satélites, además de actualizar el mensaje de navegación.

Las estaciones monitoras permanentes, siguen pasivamente a los satélites que tienen a la vista, más de 11 simultáneamente, y obtienen la información necesaria para calcular

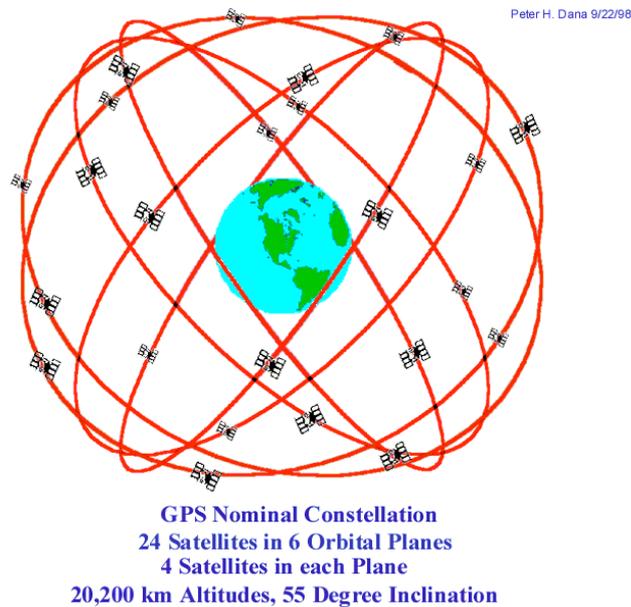


Figura 3.1: Constelación GPS, por Peter, (2000).

con gran precisión las órbitas de los satélites. Las estaciones monitoras permanentes hacen un pequeño procesamiento de datos, enviando a la estación maestra sus medidas y observaciones de los mensajes de navegación de cada satélite. Esta información, la MCS la procesa para estimar y predecir las efemérides y parámetros de tiempo de los satélites. Utilizando esta información la estación maestra envía periódicamente a cada satélite efemérides y datos de tiempo actualizados en los mensajes de navegación.

### 3.1.3.3. Segmento Usuario

El segmento de usuario es el consumidor final del GPS, el cual consiste en una variedad de receptores/procesadores civiles y militares, diseñados específicamente para recibir o sintonizar la señal emitida por los satélites. Se encarga de decodificar el mensaje de navegación, medir los tiempos de retardo y procesar los códigos que envía el satélite.

El GPS fue diseñado para dos niveles de usuarios, los que usan el Servicio de Posicionamiento Estándar y los que usan el Servicio de Posicionamiento Preciso. Como ya se mencionó antes, el primero es de uso civil y el segundo está reservado para uso militar y de investigación.

Las diferencias entre el servicio estándar y el preciso es, por supuesto, la precisión

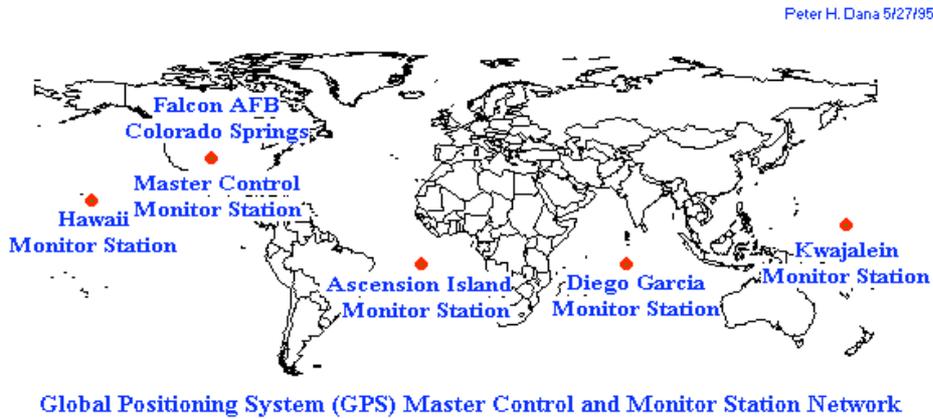


Figura 3.2: Estaciones monitoras permanentes del sistema GPS, por *Peter (2000)*.

conseguida en la obtención de la posición. Lo que sigue fue Tomado del libro “Understanding GPS: Principles and Applications” de *Kaplan E. y Hegarty C., 2005*.

### 3.1.4. Obtención de la posición

Los satélites, en su transmisión de señales, utilizan una secuencia de códigos característica y única de cada satélite, llamada Pseudorange noise (PRN). Hay dos tipos de PRN: código C/A y código P, el cual está encriptado.

Si el tiempo de los satélites, tiempo del sistema y el tiempo de los receptores estuvieran en perfecta sincronía, se puede usar el concepto de trilateración (determina la posición relativa de un punto utilizando la localización conocida de dos o más puntos de referencia y la distancia medida entre el objeto y cada punto de referencia) para calcular la posición de un punto.

#### 3.1.4.1. Determinación del Rango Satélite-Usuario

Existe un gran número de fuentes de error que pueden afectar la exactitud de medidas del rango (ruido en la medida, propagación retrasada, etc.). Sin embargo, éstos pueden ser considerados insignificantes cuando se comparan con los experimentados con relojes desincronizados.

Por lo tanto se tiene

$$r = \| S - u \|, \quad (3.1)$$

donde  $r$  es la distancia satélite-usuario (rango) medida por el tiempo de propagación de la señal,  $S$  es la posición del satélite con respecto a las coordenadas ECEF (sistema de coordenadas cartesianas centrado en la Tierra) y, donde se desea determinar el vector  $u$ , el cual representa la posición de un receptor con respecto al origen del sistema de coordenadas de ECEF.

La distancia  $r$  se calcula midiendo el tiempo de propagación requerido para que un código PRN, generado por el satélite, llegue hasta la antena del receptor del usuario.

Como ejemplo (ver figura 3.3), un ciclo específico del código generado por el satélite a un tiempo  $t_1$ , llega al receptor en tiempo  $t_2$ ; el tiempo de propagación es representado por  $\Delta t$ .

Multiplicando este tiempo de propagación ( $\Delta t$ ) por la velocidad de la luz, la distancia verdadera (geométrica) satélite-usuario puede ser calculada, porque se presentaría el caso ideal. Sin embargo, los relojes del satélite y el receptor no están perfectamente sincronizados.

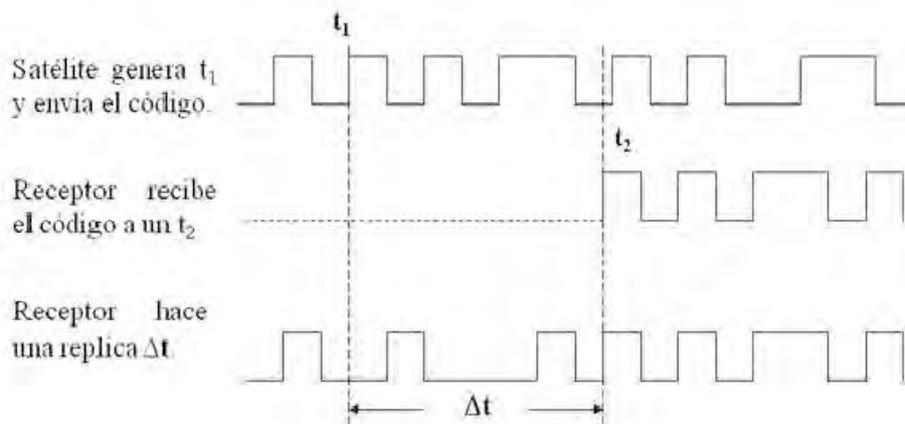


Figura 3.3: Medida del tiempo de propagación de la señal entre el satélite y el receptor.

La distancia geométrica  $r$  estará dada por

$$r = c\Delta t, \quad (3.2)$$

en donde  $c$  es la velocidad de la luz.

Para entender cómo se calcula la posición, debemos tener en cuenta que hay tres sistemas de tiempo: el tiempo del sistema en reposo, el tiempo satelital y el tiempo del receptor, que por lo general no están sincronizados. Para tomar esto en cuenta se

introduce el concepto de pseudorango  $\rho$ , el cual considera, (1) distancia geométrica  $r$ , más (2) offset del tiempo del sistema y receptor más (3) offset del tiempo del sistema y satelital (ver figura 3.4).

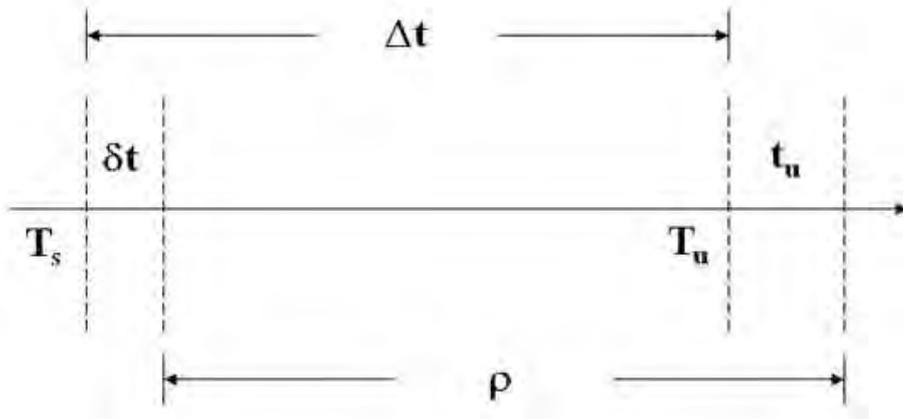


Figura 3.4: Distancia geométrica entre el satélite y el receptor.

Aquí  $T_s$  es el tiempo del sistema al salir la señal del satélite,  $T_u$  es el tiempo del sistema al llegar la señal al receptor,  $\delta t$  es el offset entre el tiempo del sistema y el satelital,  $t_u$  es el offset entre el tiempo del sistema y el receptor,  $T_s + \delta t$  es la lectura del reloj del satélite, y  $T_u + t_u$  es la lectura del reloj del receptor.

Por lo tanto tenemos la distancia geométrica y el pseudorango como:

$$r = c(T_u - T_s) = c\Delta t \quad (3.3)$$

$$\rho = c[(T_u + t_u) - (T_s + \delta t)] = r + c(t_u - \delta t). \quad (3.4)$$

Reescribiendo (3.1):

$$\rho - c(t_u - \delta t) = \| S - u \| . \quad (3.5)$$

El offset de tiempo del sistema y satelital no se considera una incógnita. El centro de control va determinando las correcciones a cada momento en el mensaje de navegación, Aunque tiene otros efectos. Entonces:

$$\rho - ct_u = \| S - u \| . \quad (3.6)$$

Para determinar la posición y el tiempo del receptor se necesitan 4 satélites (j), de tal manera que

$$\rho_j = \| S - u \| + ct_u. \quad (3.7)$$

Esta ecuación se puede expandir de la siguiente forma:

$$\rho_j = \sqrt{(x_j - x_u)^2 + (y_j - y_u)^2 + (z_j - z_u)^2} + ct_u = f(x_u, y_u, z_u, t_u), \quad (3.8)$$

Se puede resolver de varias formas:

(1) Forma cerrada

(2) Linearización iterativa

(3) Filtro Kalman

Se considera aproximadamente la posición del receptor.

Posición "real"  $(x_u, y_u, z_u)$

Posición aproximada  $(\bar{x}_u, \bar{y}_u, \bar{z}_u)$

Offset  $(\Delta x_u, \Delta y_u, \Delta z_u)$

Este esquema de linealización trabaja bien mientras el desplazamiento esté dentro de la proximidad del punto de linealización. Si el desplazamiento se excede, el procedimiento se repite.

Los errores como ruido, desviación de los satélites y "multipath", se pueden introducir en una matriz de "errores".

$$\epsilon_x = H^{-1} \epsilon_{mediciones}, \quad (3.9)$$

donde  $\epsilon_{mediciones}$ , contiene el error en los pseudorangos y  $\epsilon_x$  es el vector de errores en posición y tiempo. Estos errores se pueden minimizar haciendo "sobremediciones". Estas "sobremediciones" se tratan mediante mínimos cuadrados usando más de 4 satélites.

## 3.2. Obtención de la velocidad

En algunos receptores la velocidad se puede determinar usando una aproximación de la derivada de la posición respecto del tiempo.

$$u \approx \frac{u(t_2) - u(t_1)}{t_2 - t_1}. \quad (3.10)$$

Esto funciona bien cuando la velocidad es aproximadamente constante y si los errores en las posiciones son menores a la diferencia.

Efecto Doppler: Se produce por el movimiento relativo del satélite respecto del usuario. La velocidad del satélite viene en las efemérides. Como se sabe, en el efecto Doppler cuando se acerca una fuente, la frecuencia aumenta y cuando la fuente se aleja la frecuencia disminuye. La ecuación clásica de efecto Doppler es:

$$f_R = f_t \left[ 1 - \frac{(v_r \cdot a)}{c} \right], \quad (3.11)$$

donde  $f_R$  es la frecuencia de recepción del usuario,  $f_t$  es la frecuencia de transmisión del satélite,  $v_r$  es la velocidad relativa, y  $a$  es un vector a lo largo de la línea entre el satélite y el usuario. Aquí, el producto punto es la componente radial de la velocidad relativa, la cual está dada por:

$$v_r = v - u,$$

donde  $v$  es la velocidad del satélite y  $u$  la velocidad del usuario en el marco de referencia ECEF.

### 3.3. Filtro Kalman

El filtro de Kalman es un algoritmo desarrollado por Rudolf E. Kalman en 1960 (*Welch y Bishop, 2006*), que sirve para poder identificar el estado oculto (no medible) de un sistema dinámico lineal. Este filtro consiste en un algoritmo recursivo basado en la estadística del “ruido” y las mediciones de posición y velocidad. Combina la naturaleza estadística de errores para estimar el estado de un sistema.

El filtro es un procedimiento matemático que opera por medio de un mecanismo de predicción y corrección. En esencia este algoritmo pronostica el nuevo estado a partir de su estimación previa añadiendo un término de corrección proporcional al error de predicción, de tal forma que este último es minimizado estadísticamente (*Solera, 2003*).

Para ejemplificar esto sea  $x$  una cantidad constante pero desconocida. A cualquier tiempo de medición  $t_n$ , hay cierta cantidad de ruido, produciéndose una observación  $y(t_n)$ , la cual se puede expresar como:

$$y(t_n) = x + \epsilon_m(t_n). \quad (3.12)$$

Para estimar  $x$ , se incorpora la medición actual  $y(t_n)$  y el estimado de  $x$  justo antes de la medición,  $\hat{x}(t_n^+)$ , la cual se expresa como

$$\hat{x}(t_n^+) = \hat{x}(t_n^-) + k(t_n)[y(t_n) - \hat{x}(t_n^-)]. \quad (3.13)$$

El error de estimación es:

$$\tilde{x}(t_n^+) = \hat{x}(t_n^+). \quad (3.14)$$

El parámetro  $K(t_n)$  es la ganancia Kalman, que contiene errores dados por:

$$k(t_u) = \frac{\sigma_x^2(t_n^-)}{\sigma_x^2(t_n^-) + \sigma_m^2}. \quad (3.15)$$

Después de la medición, el error se reduce a:

$$\sigma_x^2(t_n^+) = [1 - k(t_n)]\sigma_x^2(t_n^-). \quad (3.16)$$

Si se supone que la varianza es constante, se puede escribir

$$\sigma_x^2(t_n^+) = \frac{\sigma_m^2}{n}. \quad (3.17)$$

Así, de esta manera, empieza a tender a cero conforme aumenta el número de mediciones.

### 3.4. Formato Rinex

Como mencioné antes, los datos GPS se encuentran en formato RINEX, que son las siglas en inglés de “Receiver INdependent EXchange”. Se trata de un formato de ficheros de texto orientado a almacenar, de manera estandarizada, medidas proporcionadas por receptores de sistemas de navegación por satélite; como GPS, GLONASS, EGNOS, WAAS o Galileo.

La salida final de un receptor de navegación suele ser su posición, velocidad u otras magnitudes físicas relacionadas. Sin embargo, el cálculo de todas estas magnitudes se basa en una serie de medidas a una o varias constelaciones de satélites. Aunque los receptores calculan las posiciones en tiempo real, en muchos casos resulta interesante almacenar las medidas intermedias para su uso posterior. RINEX es el formato estandarizado que permite la gestión y almacenamiento de las medidas generadas por un receptor, así como su procesado off-line por multitud de aplicaciones informáticas, independientemente de cual sea el fabricante, tanto del receptor como de la aplicación informática.

La primera propuesta para el “RINEX” fue desarrollada por el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna en 1989, para el fácil intercambio de los datos GPS, con el fin de que pudiera ser utilizado por los diversos tipos de receptores, participando más de 60 receptores GPS, de 4 diferentes fabricantes.

El formato Rinex ha ido evolucionando con el tiempo para adaptarse al aumento progresivo de tipos de medidas, correspondientes a los nuevos sistemas de navegación por satélite. La versión más común en la actualidad es la 2.10, que permite el almacenamiento de medidas de pseudorange, fase portadora y Doppler para los sistemas GPS, GLONASS, EGNOS y WAAS, simultáneamente (*Gurtner, 2001*).

Actualmente, el formato se compone de seis tipos de archivo ASCII:

1. Archivo de datos de observación.
2. Archivo del mensaje de navegación.
3. Archivo de datos meteorológicos.
4. Archivo del mensaje de navegación GLONASS.
5. Archivo del mensaje de navegación GEO.
6. Archivo del tiempo del Satélite y el receptor (fecha-hora).

### 3.5. Cálculo del TEC

El GPS nos brinda una visión sin precedentes del comportamiento del clima espacial y su influencia en la ionosfera terrestre ya que es una manera relativamente simple y económica, además de brindar una buena precisión; todo esto considerando la facilidad que existe hoy en día de tener un receptor GPS en prácticamente cualquier lugar, brindando una visión del cielo local las 24 horas del día. De esta manera se abre la posibilidad de realizar correcciones ionosféricas de una manera constante. Dicho lo anterior, se puede calcular el contenido total de electrones en la ionosfera por medio del GPS utilizando los archivos RINEX de observación (\*.o) y de navegación (\*.n).

La frecuencia dual del sistema GPS, es 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 entre la línea de visión del satélite al receptor, además de detectar centelleo ionosférico. El operar en dos frecuencias al mismo tiempo ( $L1$  y  $L2$ ), permite medir el retraso de fase relativo entre las dos señales, con lo que se determina el contenido total de electrones (TEC) (*Eftaxiadis, et al., 1999*).

Básicamente el TEC se obtiene por medio de la medida de los códigos de pseudo-rango o por las mediciones de fase de la señal del GPS. La medición de la fase puede ser modelada por

$$\Phi = ((\rho/\lambda) + f)(\Delta\rho + N - (\Delta^{iono}/\lambda)), \quad (3.18)$$

donde  $\rho$  es el rango geométrico entre el satélite y el receptor,  $f$  es la frecuencia,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $N$  es el número de ciclos y  $\Delta^{iono}$  es el retraso ionosférico. El modelo equivalente para éste código es

$$R = \rho + c\Delta\rho + \Delta^{trop}, \quad (3.19)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $\Delta^{trop}$  es el retraso troposférico. El número de ciclos  $N$  inicial entre el satélite y el receptor es desconocido y esta ambigüedad de fase  $N$  permanece constante siempre y cuando no ocurra pérdida de la señal (*Araujo-Pradere, 2005*).

El grupo y la fase de índices de refracción para una onda electromagnética que se propaga en el espacio con frecuencia  $f$  y un grupo de ondas con frecuencias ligeramente diferentes, pueden ser aproximadas por  $n_{gr} = 1 - (c^2/f^2)$  y  $n_{ph} = 1 + (c_2/f^2)$ , además de términos de orden superior, donde  $c = -40,3N_e$ ,  $TEC = \int N_e ds_0$ ,  $N_e$  es la densidad electrónica y  $TEC$  representa el contenido total de electrones.

La dispersión, o tiempo de retardo entre las señales de dos frecuencias, proporciona una medida de la integral de TEC a lo largo de la trayectoria de propagación. La medida del rango y del rango geométrico están definidos por  $s = \int nds$  y  $s_0 = \int ds_0$  y la diferencia entre ambos representa la refracción ionosférica  $\Delta^{iono} = s - s_0$ . De las fórmulas anteriores es posible obtener ambos retrasos:  $\Delta_{gr}^{iono} = (40,3/f^2)TEC$  y  $\Delta_{ph}^{iono} = (40,3/f^2)TEC$  (en metros).

Las ecuaciones de observación del GPS para el código del pseudorango son:

$$R_1 = \rho + c\Delta\rho + \Delta_{f_1}^{iono} + \Delta^{trop} + b_{f_1}^S + b_{f_1}^R + m_{R_1} + \epsilon_{R_1}, \quad (3.20)$$

$$R_2 = \rho + c\Delta\rho + \varkappa\Delta_{f_1}^{iono} + \Delta^{trop} + b_{f_2}^S + b_{f_1}^R + m_{R_2} + \epsilon_{R_2}, \quad (3.21)$$

donde  $b_{f_1}^S$  y  $b_{f_2}^S$  son el retraso satelital;  $b_{f_1}^R$  y  $b_{f_1}^R$  el retraso del receptor;  $m_{R_1}$  y  $m_{R_2}$  los efectos multipath y  $\epsilon_{R_1}$  y  $\epsilon_{R_2}$  el ruido del receptor, todos obtenidos por el código de pseudorango observado y

$$\varkappa = (f_1/f_2)^2. \quad (3.22)$$

Combinando las ecuaciones previas, se obtiene la expresión para el contenido total de electrones utilizando los pseudorangos observados:

$$TEC_R = 9,52(R_2 - R_1). \quad (3.23)$$

La cual es inambigua pero con ruido.

Las ecuaciones de observación del GPS por medio de la medición de la señal de fase son:

$$\lambda_1 \Phi_1 = \rho + c\Delta\rho + \lambda_1 N_1 - \Delta_{f_1}^{iono} + \Delta^{trop} + b_{f_1}^{S,\Phi} + b_{f_1}^{R,\Phi} + m_{\Phi_1} + \epsilon_{\Phi_1}, \quad (3.24)$$

$$\lambda_2 \Phi_2 = \rho + c\Delta\rho + \lambda_2 N_2 - \Delta_{f_2}^{iono} + \Delta^{trop} + b_{f_2}^{S,\Phi} + b_{f_2}^{R,\Phi} + m_{\Phi_2} + \epsilon_{\Phi_2}, \quad (3.25)$$

donde  $N_1$  y  $N_2$  son las ambigüedades desconocidas de la fase portadora;  $b_{f_1}^{S,\Phi}$  y  $b_{f_2}^{S,\Phi}$  el retraso satelital;  $b_{f_1}^{R,\Phi}$  y  $b_{f_2}^{R,\Phi}$  retraso del receptor;  $m_{\Phi_1}$  y  $m_{\Phi_2}$  efectos “multipath”; y finalmente  $\epsilon_{\Phi_1}$  y  $\epsilon_{\Phi_2}$  son el ruido del receptor; todos éstos terminos provenientes de observaciones de la fase. De donde  $b^S = b_{f_1}^{S,\Phi} - b_{f_2}^{S,\Phi}$  es el retraso diferencial del satélite,  $b^R = b_{f_1}^{R,\Phi} - b_{f_2}^{R,\Phi}$  el retraso diferencial del receptor y  $b^R + b^S$  es el retraso total satélite-receptor.

Combinando las ecuaciones previas, el contenido total de electrones utilizando la fase de la señal observada es:

$$TEC_\Phi = 9,52(\lambda_1 \Phi_1 - \lambda_2 \Phi_2), \quad (3.26)$$

la cual es una ecuación precisa pero con ambigüedades. Ahora bien, 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 pseudorangos nos da valores absolutos (*Erickson et al, 2001*). Por lo tanto para los fines de esta tesis es más conveniente el uso de la ecuación de diferencia de fase de la señal observada en los respectivos cálculos del TEC.

El programa de cómputo con el cual se obtuvieron los datos de TEC sobre diversas estaciones mexicanas fue proporcionado por el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), en los Estados Unidos y nos referiremos a él en esta tesis como “tequis”. El funcionamiento de tequis, para el cálculo del TEC, se basa en las ecuaciones mencionadas en esta sección.

El receptor de la estación de estudio, recibe diversas señales de los satélites que estén en su campo de visión. El programa tequis calcula para cada una de las señales

recibidas por el receptor el valor de TEC entre la línea de viaje satélite-receptor, con lo que se tendrán varios valores de TEC según el número de satélites observados en un tiempo específico. A estos valores se les llama “slant” TEC. Cada uno de estos valores se proyectan a la vertical sobre la estación y se promedian para obtener el valor de TEC vertical (vTEC), que es el que se utiliza para los análisis. Para el cálculo del vTEC sólo se considera el número de valores positivos. Es decir, que una estación a una hora determinada ve 8 satélites pero sólo 4 dan valores positivos el promedio se realiza solamente entre estos cuatro valores.

## Capítulo 4

# El TEC Sobre México Durante Ráfagas Intensas de Rayos X

En este capítulo se dan a conocer los resultados obtenidos del cálculo de contenido de electrones en la ionosfera sobre diversas estaciones mexicanas de GPS, durante eventos específicos, por medio del programa tequis descrito en el capítulo anterior. Obtenidos los valores de TEC en cada estación y para cada evento, se realizó un estudio estadístico de dicho comportamiento, con el fin de ver el posible impacto de éstos sobre nuestra ionosfera.

Para este análisis se consideraron eventos acompañados de ráfagas solares intensas en rayos X (con intensidad mayor o igual a 5X). Todos los eventos ocurrieron durante el pasado ciclo solar número 23. No tomé datos de periodos anteriores por la escasez de datos de GPS sobre estaciones mexicanas. Los datos de GPS fueron obtenidos de estaciones pertenecientes al Servicio Sismológico Nacional (SSN) y algunos investigadores. En ambos casos, los datos nos fueron hechos amablemente accesibles. Durante el periodo mencionado ocurrieron seis épocas con dichas características. En la tabla 4.1 se muestran estos seis eventos con sus características principales: intensidad del evento, fecha, hora de inicio, de máximo y de término de la tormenta, así como las coordenadas de localización del mismo. Cabe aclarar que todos los tiempos descritos en éste capítulo están dados en tiempo universal (UT).

Cuadro 4.1: Ráfagas solares en rayos X para las cuales se calcula el TEC

Fecha	Inicio	Máximo	Terminación	Localización	Intensidad
14/07/2000	10:03	10:24	10:43	N22O07	5.7X
04/04/2001	19:10	19:21	19:31	S21O31	5.6X
15/04/2001	13:19	13:50	13:55	S20O85	14.4X
28/10/2003	09:51	11:10	11:24	S16O08	17.2X
29/10/2003	20:37	20:49	21:01	S15O02	10X
02/11/2003	17:07	17:25	17:39	S14O56	8.3X
20/01/2005	06:36	07:01	07:26	N14O61	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	S12O67	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

Para este análisis se consiguieron un total de 44 estaciones permanentes de GPS en México, variando considerablemente la disponibilidad de las mismas para cada uno de los eventos analizados en esta tesis. En la figura 4.1 se muestra la distribución espacial de dichas estaciones.

Primero se graficaron los datos de TEC obtenidos para cada estación como función del tiempo, considerando épocas de 24 hrs. Entonces en el eje  $x$  se grafican el tiempo por día cada 15 min.; en el eje  $y$  la época correspondiente y en eje  $z$  los valores de TEC. Se obtiene después una gráfica de los valores de TEC para todas las estaciones y para el tiempo total del análisis. De esta gráfica se identifican los máximos para cada día y se calcula la amplitud de la variación. Es claro que durante el día del evento esa amplitud será la más grande. La amplitud de la variación, para cada estación considerada, se da en valores de sigma a partir de la siguiente relación

$$Z = \frac{X_{max} - X_{mean}}{\sigma}, \quad (4.1)$$

donde  $X_{max}$  es el valor máximo de la amplitud,  $X_{mean}$  es el valor medio de la serie y  $\sigma$  es la desviación estándar de la serie. Estos valores  $Z$ , para cada estación, se grafican como función de los días de análisis.

Considerando que los días que se analizan corresponden a días activos, se hace una comparación del comportamiento en una de las estaciones con el de un periodo de tiempo igual pero del año siguiente y se obtiene la diferencia porcentual

$$D = \left(\frac{DA - DQ}{DQ}\right)100, \quad (4.2)$$

en donde  $D$  es la desviación porcentual,  $DA$  es el valor de los días activos y  $DQ$  el valor de los días quietos.

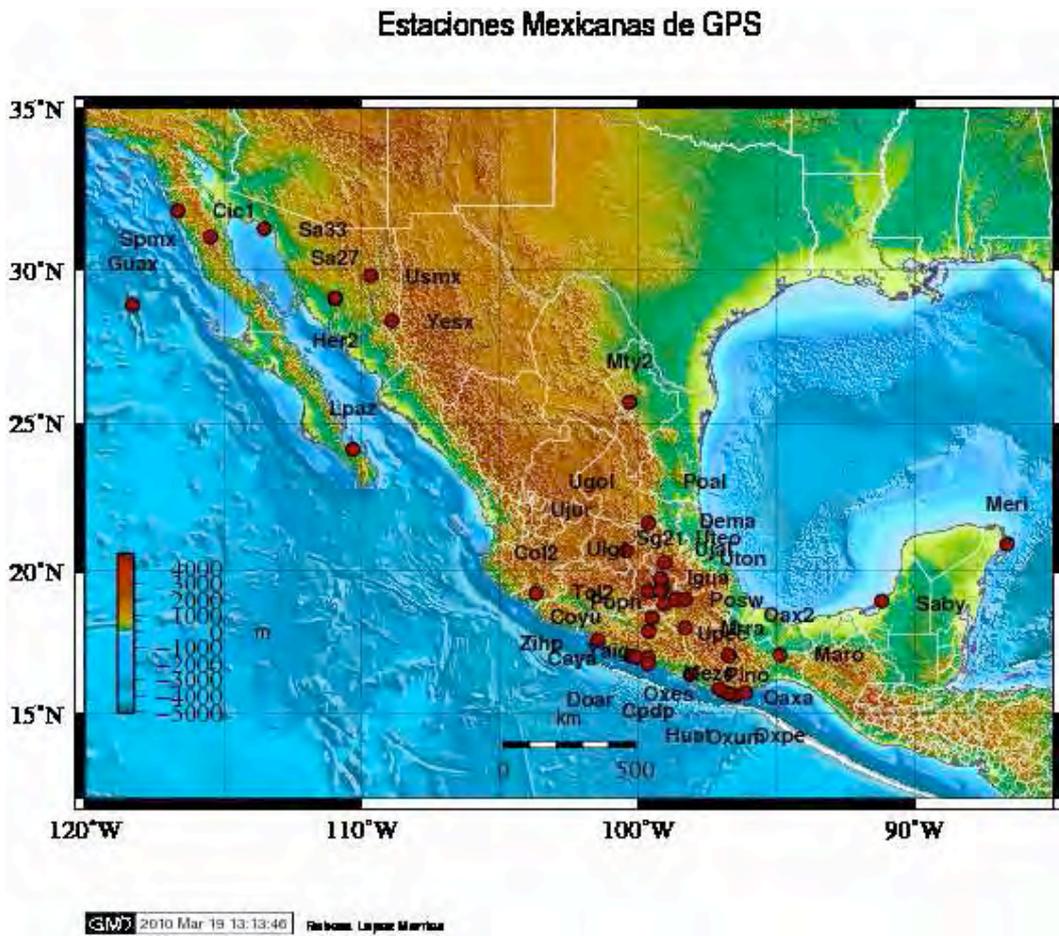


Figura 4.1: Estaciones mexicanas de GPS que se analizaron durante los seis eventos de análisis.

## 4.1. Tormenta 14 de julio del 2000

En esta sección se analiza el comportamiento del TEC sobre estaciones mexicanas para el evento solar ocurrido el día 14 de julio del año 2000 (llamada tormenta del día de la Bastilla) y cuya intensidad, como se indica en la tabla 4.1, fue de 5.7X. Este evento ocurrió a las 10:03 hrs., teniendo una duración de aproximadamente 40 min. y alcanzó su máximo a las 10:24 hrs. El evento en el disco del Sol ocurrió prácticamente en el centro, con coordenadas N22 O07.

A esta ráfaga se le asocia una eyección de masa coronal (EMC) (figura 4.2), visible a las 10:54 hrs. y alcanzó una velocidad de 1775 km/s. Arribó a la tierra a las 15:00 y produjo varias auroras (ver catálogo de EMCs Halo <ftp://ares.nrl.navy.mil/pub/lasco/halo/>).

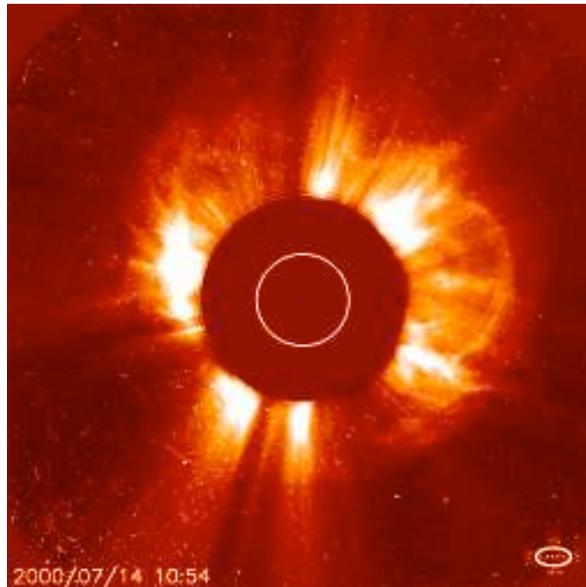


Figura 4.2: Eyección de masa coronal del día 14 de julio 2000.

Debido a que en este evento ocurrió sólo una ráfaga solar y considerando la intensidad de la misma, se tomó la decisión de analizar un periodo de 10 días alrededor del evento (14 de julio). Por lo tanto se buscaron datos de observación para estaciones GPS para los días 191-200 de ese año.

Para este evento se localizaron sólo seis estaciones mexicanas GPS con datos disponibles alrededor de esta fecha; caya, cic1, huat, popn, uteo y yaig (figura 4.3), para las cuales en el caso de las dos primeras estaciones se localizaron datos para todo el periodo escogido. Para el resto de las estaciones hubo una falta de datos: a la estación

huat le falta el primer día de análisis (191); a la estación uteo los dos últimos días (199-200); y para las estaciones popn y yaig sólo se obtuvieron datos para los primeros 6 y 5 días, respectivamente, del periodo analizado.

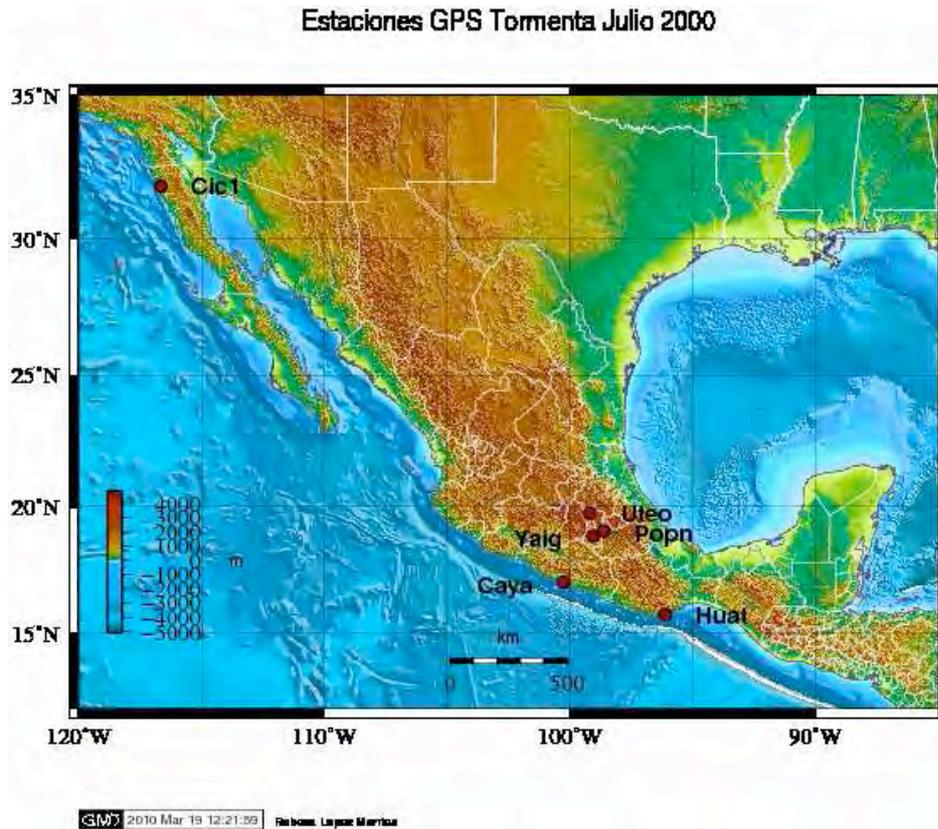


Figura 4.3: Estaciones mexicanas que se analizaron durante la tormenta del 14 de julio 2000.

El comportamiento del TEC para cada estación como función del tiempo, considerando épocas de 24 hrs. se muestra en las figuras 4.4 a la 4.6.

Se realizó una comparación del comportamiento del TEC entre las mismas estaciones y así poder visualizar las diferencias de una con respecto a las otras (ver figura 4.7), en donde se puede observar que el periodo en general no es lo que llamamos quieto (aproximadamente 20 uTec antes y después del evento), ya que en los días previos y posteriores a la tormenta durante el día se obtienen valores de TEC que van entre las 50 y 60 unidades.

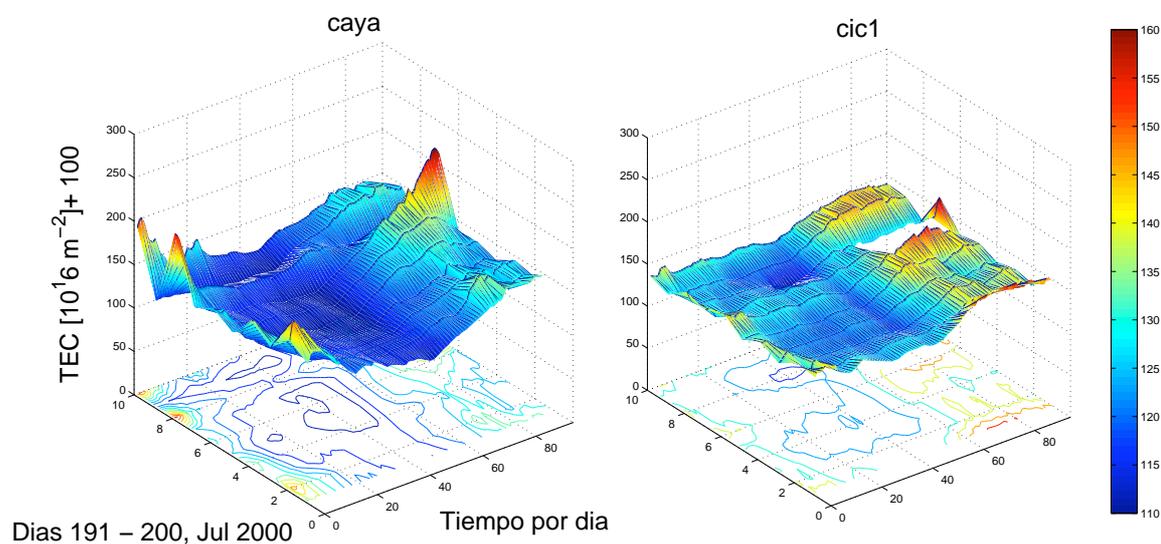


Figura 4.4: TEC vertical, estaciones caya y cic1.

Después se obtuvieron los valores de la amplitud de la variación, tal como se describió en la introducción del capítulo, y se realizó la gráfica correspondiente (figura 4.8). Debido a que para estas fechas se estaba cerca del máximo de actividad, la variación diurna tenía un amplitud de alrededor de una desviación estándar, mientras que para el evento propiamente dicho (que en este caso correspondió al día de la ráfaga), la amplitud alcanzó las cinco desviaciones estándar (estación huat).

Finalmente, en la figura 4.9 se muestra la comparación de los días del periodo analizado para la estación caya (191-200), considerados activos, contra los mismos días del año para la misma estación pero del 2001 por considerar a estos últimos como quietos. La desviación porcentual alcanzó valores de hasta 500%.

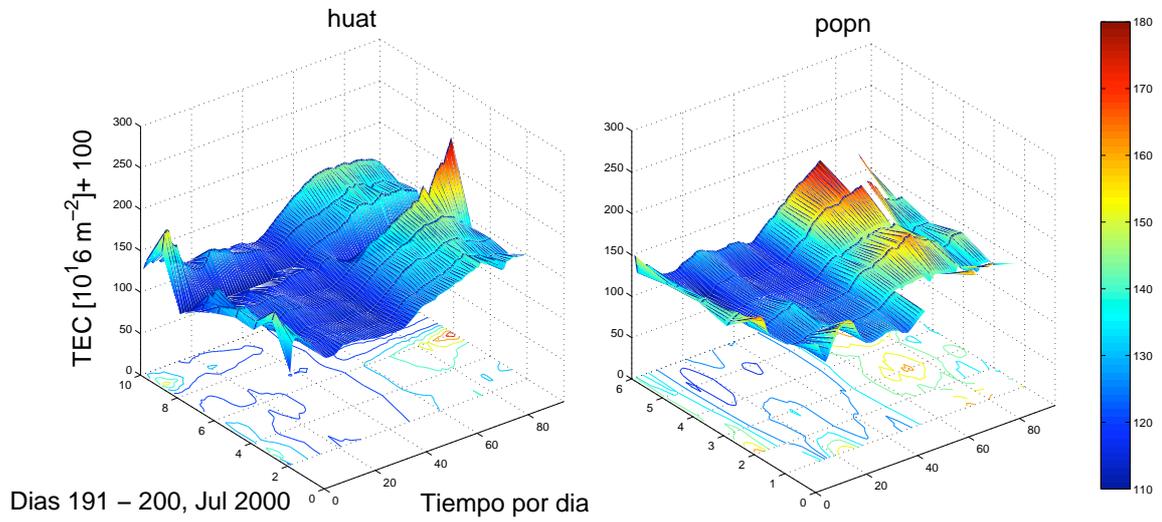


Figura 4.5: TEC vertical, estaciones huat y popn.

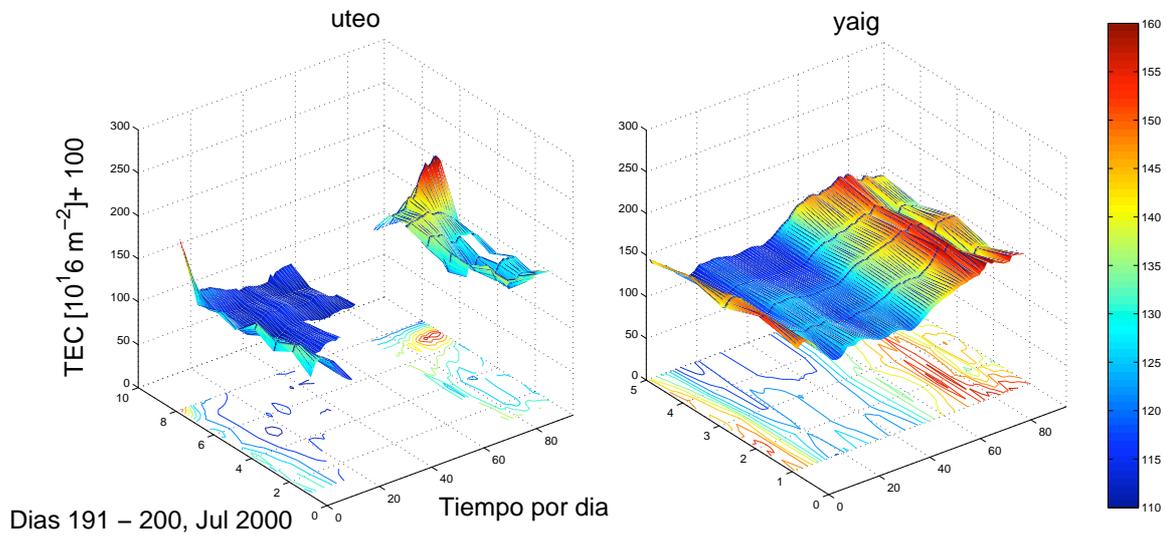


Figura 4.6: TEC vertical, estaciones uteo y yaig.

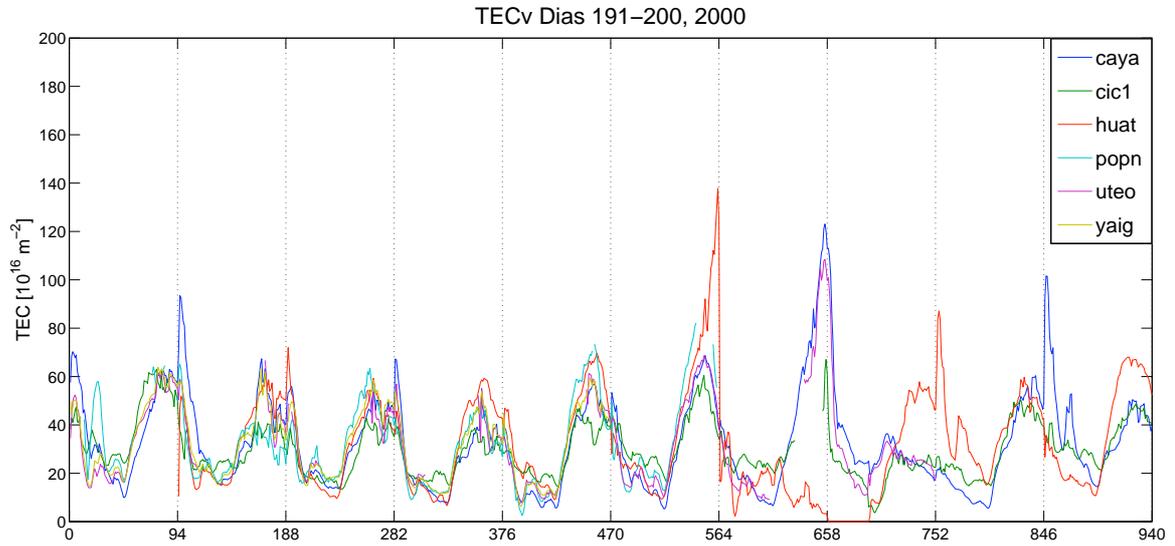


Figura 4.7: Gráfica de comparación de los valores de TEC obtenidos en cada una de las estaciones analizadas.

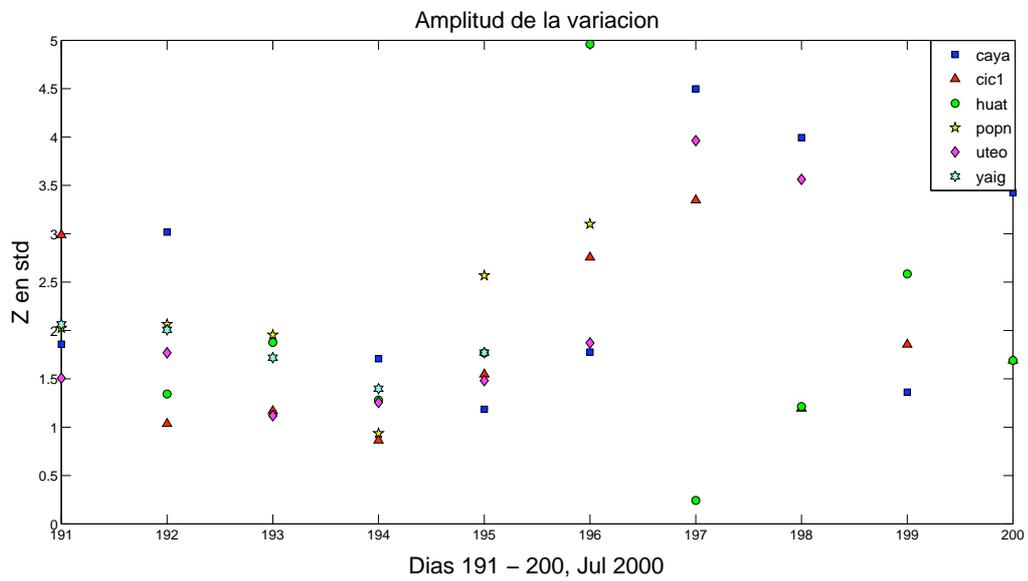


Figura 4.8: Gráfica de los valores de Z en desviaciones estándar por estación, por día.

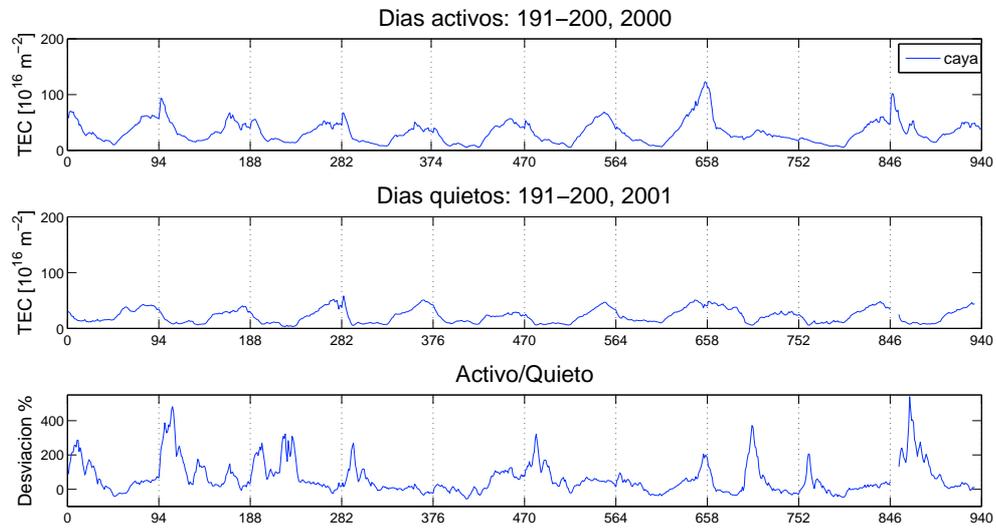


Figura 4.9: Comparación de los días del periodo de análisis (activos) contra mismos días del siguiente año (quietos), en la estación caya.

## 4.2. Tormentas del 6 y 15 de abril del 2001

En esta sección se analizan los eventos solares ocurridos los días 6 y 15 de abril del año 2001. El evento del día 6 tuvo una intensidad de 5.6X comenzando a las 19:10 hrs., con una duración aproximada de 20 min. y alcanzando su máximo a las 19:21 hrs.; este evento ocurrió en las coordenadas S21 E31.

La tormenta del día 15 de abril de ese año alcanzó una intensidad de 14.4X, comenzando a las 13:19 hrs. y obteniendo su máximo a las 13:50. Se localizó en las coordenadas S20 O85.

A la ráfaga del día 6 se le asocia la aparición de una EMC que se registró a las 19:30 hrs., alcanzando una velocidad aproximada de 1103 km/s.

Para el análisis del comportamiento del TEC sobre México en estas tormentas y considerando que fueron dos explosiones de intensidad relevante, se decidió analizar un periodo de 20 días que incluyeran ambos eventos. El periodo escogido fue del día 90 al 109 del ese año.

Para este análisis se encontraron un total de nueve estaciones permanentes mexicanas de GPS que tuvieron datos disponibles para el periodo de escogido (caya, cic1, huat, igua, pino, posw, spmx, yaig y zihp). En la figura 4.10 se muestra el mapa con la distribución espacial de estas estaciones.

Después del cálculo del TEC se realizaron gráficas de manera individual para cada estación como función del tiempo, en épocas de 24 hrs. (ver figuras de 4.11 a la 4.15).

Al realizar una comparación del comportamiento del TEC entre las mismas estaciones para visualizar las diferencias de cada una con respecto a las otras (ver figura 4.16), ésta muestra que el periodo en sí es bastante activo durante el día, ya que se alcanzan valores que van desde las 50 unidades de TEC hasta por encima de 100, siendo un comportamiento que se repite en todas las estaciones analizadas durante este periodo. Se observa también que los eventos en cuestión, no tienen una influencia significativa sobre la ionosfera de nuestro país ya que no se logra ver un disparo en el contenido de electrones durante el ya perturbado periodo. Aunque esto parece extraño para el caso de la ráfaga del día 6 que se localizó muy cerca del meridiano central, no lo es para la ráfaga del día 15 que ocurrió demasiado al oeste.

Después se obtuvieron los valores de la amplitud de la variación y se realizó la gráfica correspondiente (figura 4.17). Debido a que para estas fechas, como se mencionó antes, el periodo estuvo muy perturbado la variación diurna tiene amplitudes que van desde alrededor de media desviación estándar hasta 3.5. Mientras que para el día 6 sólo en caya se dio un valor de 3.3, para el día 15 este valor sólo se alcanzó en las estaciones huat y pino.

Finalmente, en la figura 4.18 se muestra la comparación de los días del periodo

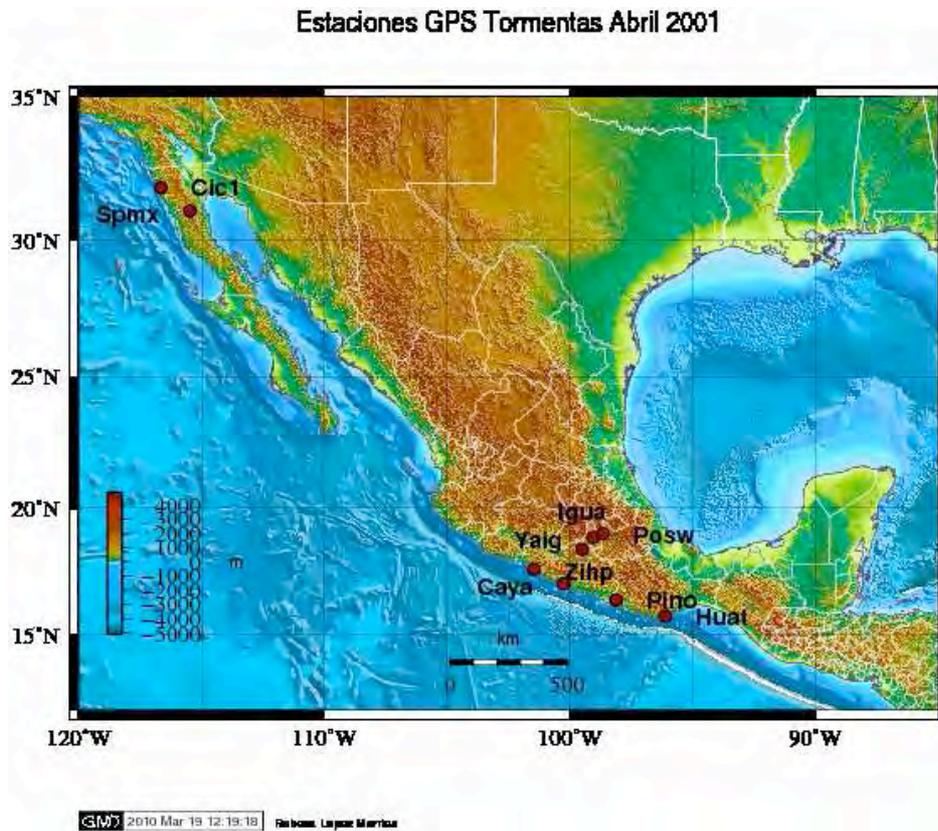


Figura 4.10: Estaciones mexicanas que se analizaron durante las tormentas del 6 y 15 de abril del 2001.

analizado para la estación caya (90-109), considerados activos, contra los mismos días del año para la misma estación pero del 2002 por considerar a estos últimos como quietos. Ambos periodos resultan ser muy similares, pero aun así en algunos casos la desviación porcentual alcanzó valores de hasta 200 %.

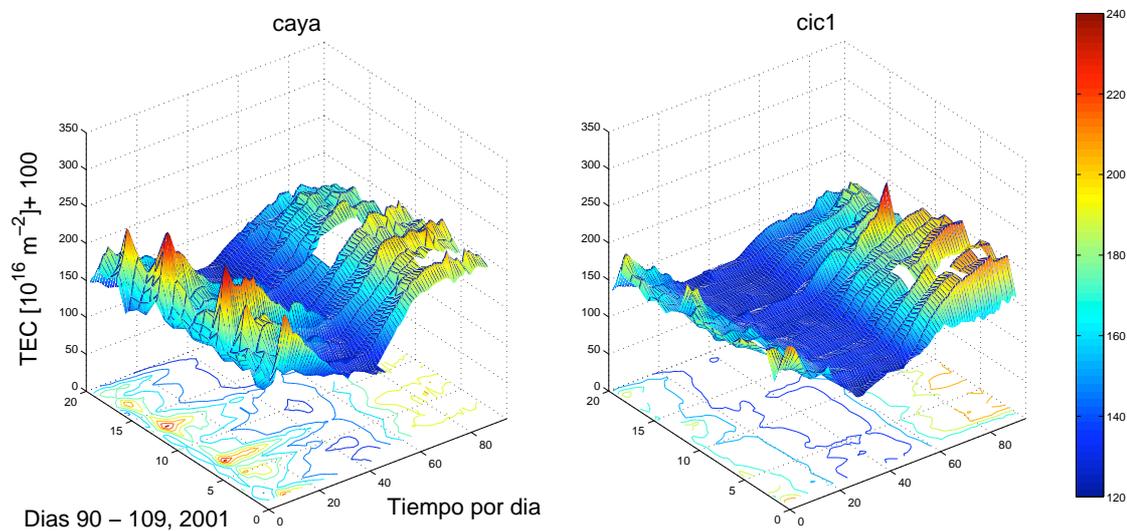


Figura 4.11: TEC vertical, estaciones caya y cic1.

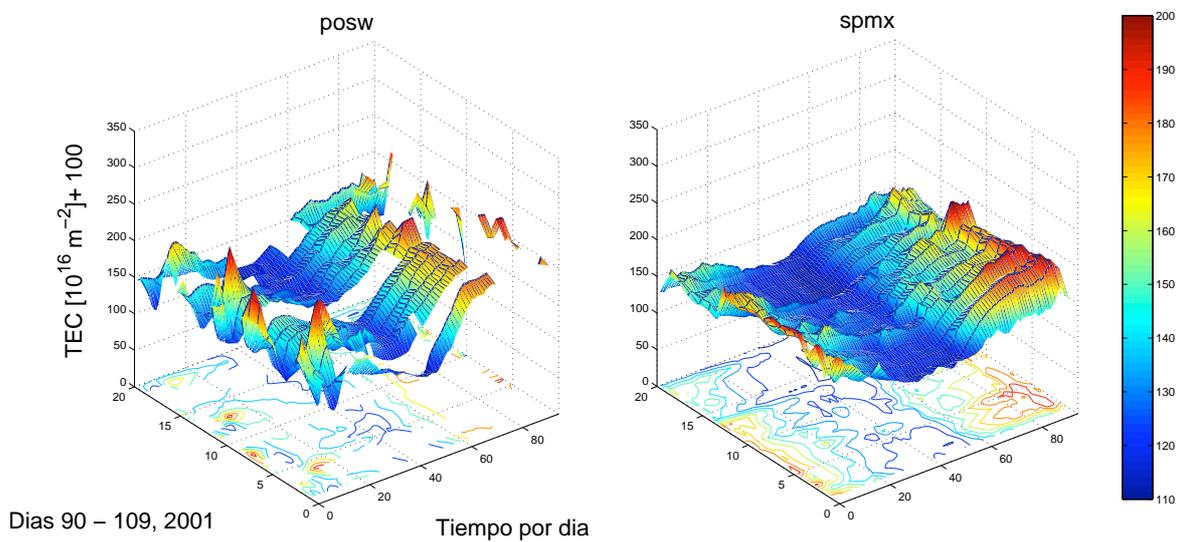


Figura 4.12: TEC vertical, estaciones posw y spmx.

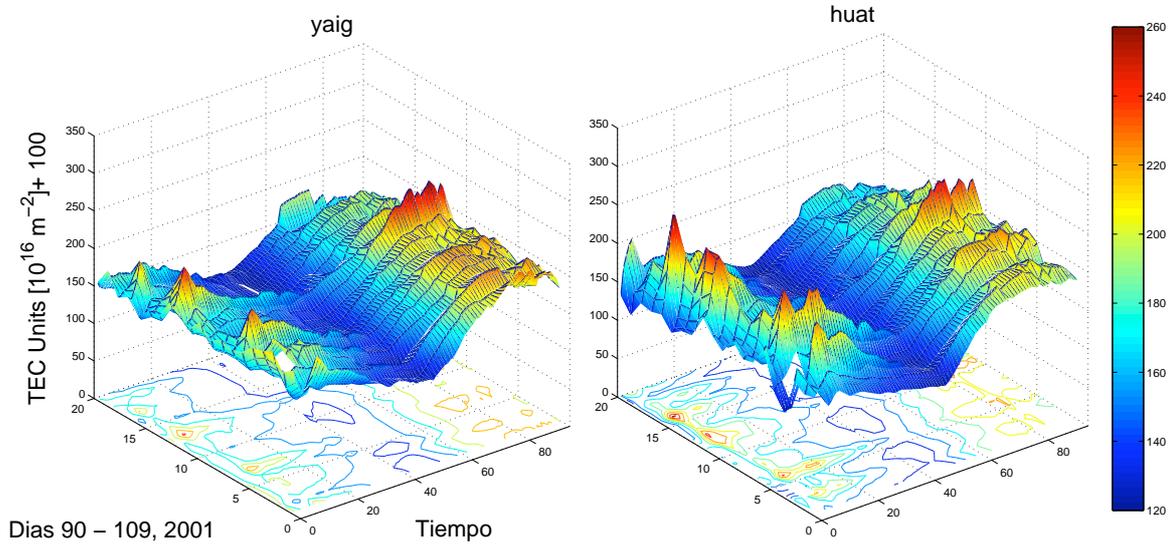


Figura 4.13: TEC vertical, estaciones yaig y huat.

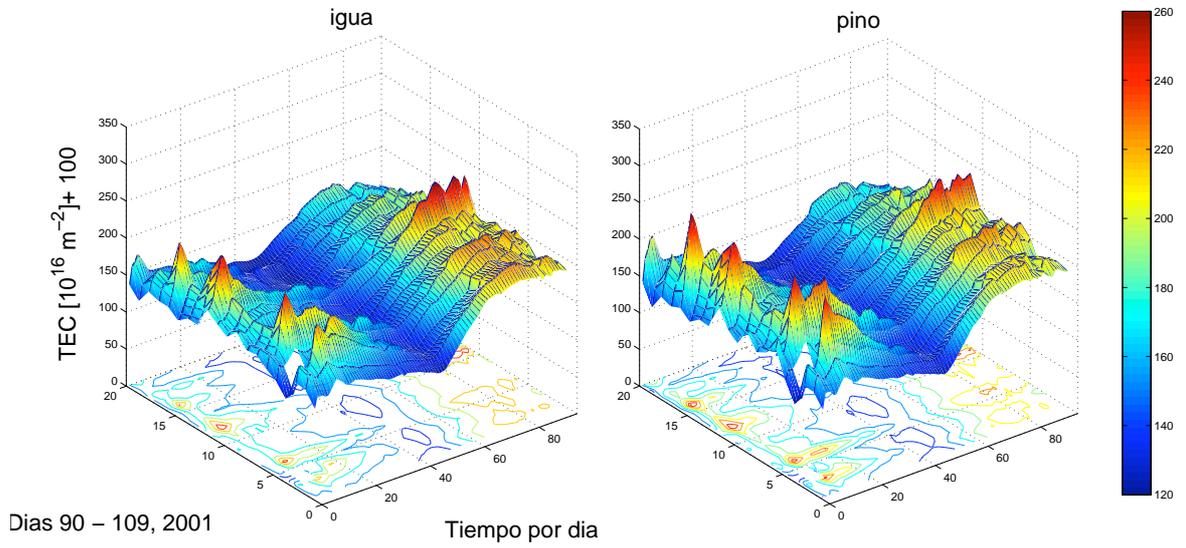


Figura 4.14: TEC vertical, estaciones igua y pino.

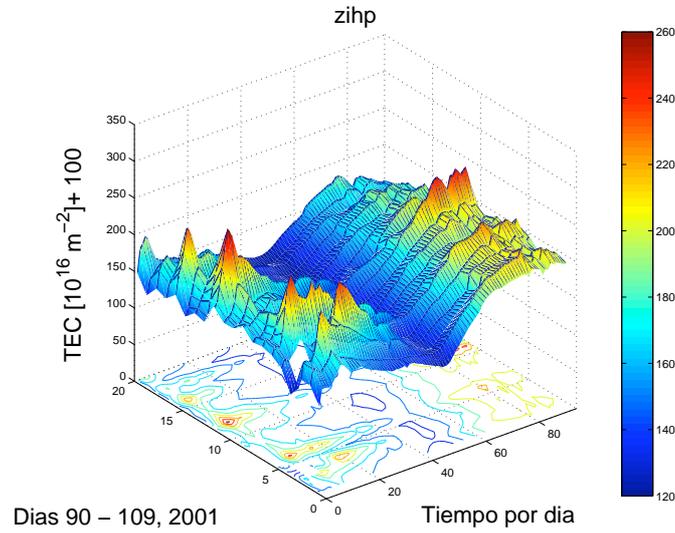


Figura 4.15: TEC vertical, estación zihp.

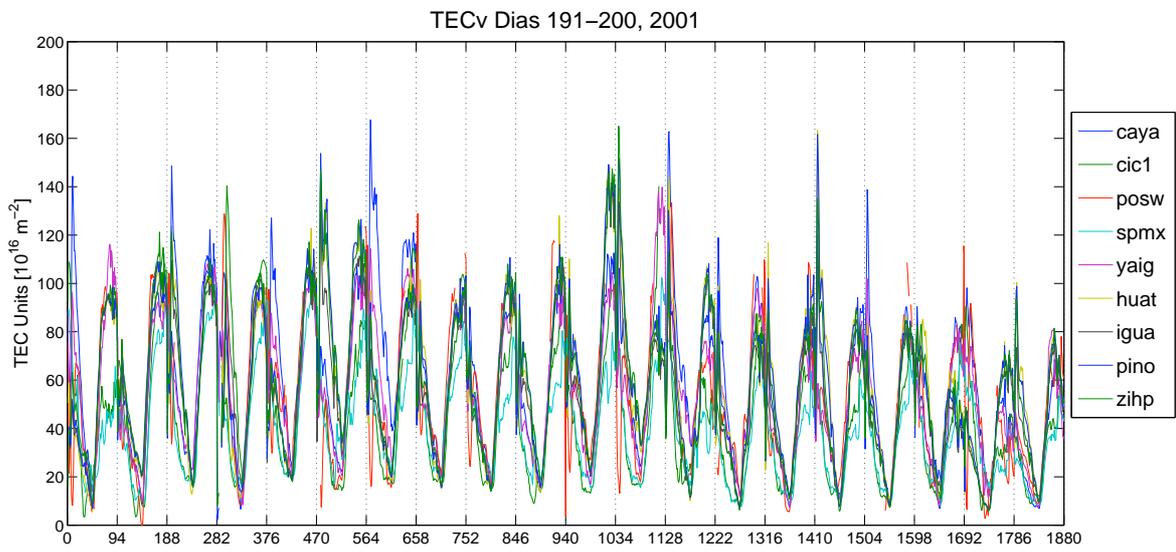


Figura 4.16: Gráfica de comparación de los valores de TEC obtenidos en cada una de las estaciones analizadas.

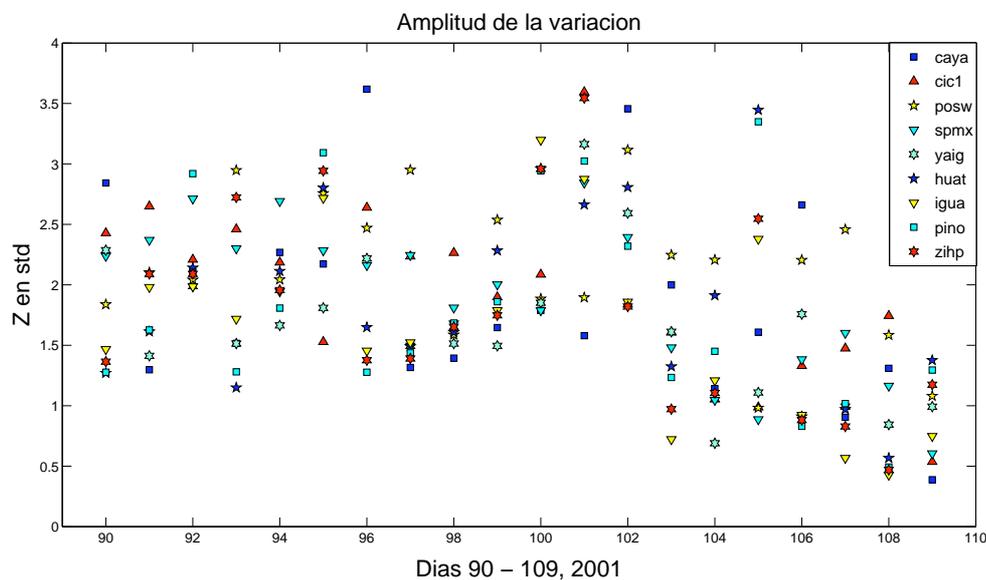


Figura 4.17: Gráfica de los valores de Z en desviaciones estándar por estación, por día.

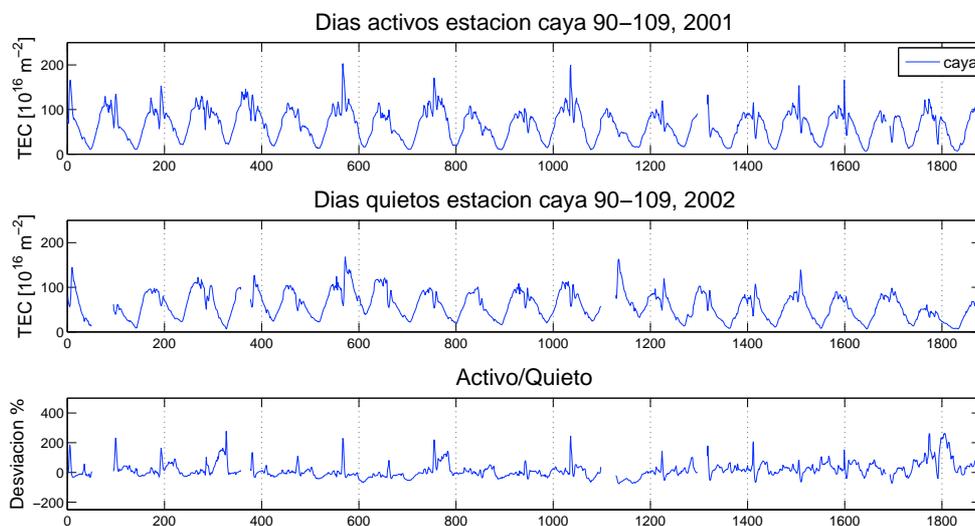


Figura 4.18: Comparación de los días del periodo de análisis (activos) contra mismos días del siguiente año (días quietos, 2002), en la estación caya.

### 4.3. Tormentas de Halloween en octubre-noviembre 2003

Una ráfaga solar producida el 4 de noviembre de 2003 podría ser la más intensa jamás registrada (*SpaceWeather.com*). Esta erupción en rayos X fue dos veces más intensa que cualquiera de las que se han detectado desde que se empezó a registrar esta frecuencia hacia mediados de los 70s (exceptuando la de 28 de octubre de 2003). Según algunos investigadores, el Sol no es capaz de llegar a energías más grandes que ésta.

Las tormentas de Halloween, se llaman así porque se produjeron tres grandes explosiones solares entre los días 28 de octubre y 02 de noviembre del año 2003. La primera ráfaga ocurrió el día 28 de octubre a las 09:51 hrs., teniendo una duración aproximada de 1 hora y 35 min. y una intensidad de 17.2X (ver imagen 4.19); siendo la más intensa en el análisis de esta tesis (ya que estoy suponiendo que la del 4 de noviembre, al haber ocurrido en el limbo oeste, no tuvo repercusiones sobre la ionosfera).

La segunda ráfaga se produjo el día 29 de octubre a las 20:37 hrs., con una duración aproximada de 24 min. y tuvo una intensidad de 10X. La tercera y última ráfaga ocurrió el día 2 de noviembre a las 17:03 hrs., con una duración de 36 min. y alcanzó una intensidad de 8.3X.



Figura 4.19: Ráfaga solar del día 28 de octubre de 2003, imagen SOHO.

La ráfaga del día 28 originó una EMC en dirección a la Tierra que alcanzó una velocidad de 2125 km/s cuando salió del Sol; el día 29 de octubre también se observó una EMC, asociada con la ráfaga antes mencionada, que alcanzó una velocidad de 1948 km/s y, finalmente, el día 2 de noviembre se registró otra EMC con

una velocidad de 1826 km/s, teniendo una fuerte desaceleración (ver catálogo Halo <ftp://ares.nrl.navy.mil/pub/lasco/halo/>).

Para el análisis del comportamiento del TEC sobre México en estas tormentas, y considerando que fueron tres explosiones de gran intensidad, se decidió analizar un periodo de 30 días que incluyera dichos eventos. El periodo escogido fue del día 291 al 320 de ese año (18 de octubre a 16 de noviembre de ese año).

Se encontraron un total de nueve estaciones permanentes de GPS que tuvieron datos disponibles para el periodo de análisis escogido (figura 4.20). En ella se muestra la distribución espacial de las estaciones con sus respectivos nombres. El comportamiento del TEC de manera individual en cada una de las estaciones analizadas en este evento, como función del tiempo, se muestra en las figuras 4.21 a la 4.25.

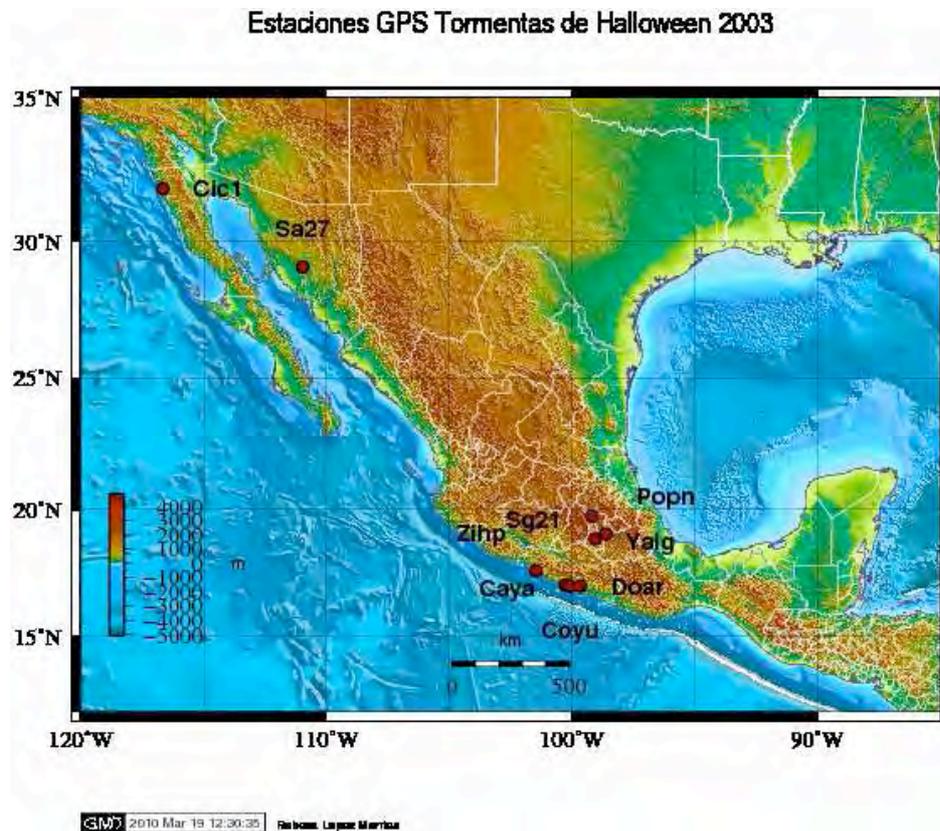


Figura 4.20: Estaciones mexicanas que se analizaron durante las tormentas de Halloween de 2003.

En la figura 4.26 se muestra la comparación del comportamiento del TEC entre las

mismas estaciones, donde se pueden observar las diferencias de cada una con respecto a las otras. En ella se puede observar claramente la influencia que tienen las tres ráfagas en el comportamiento del TEC en cada una de las estaciones, al ocurrir un disparo de los valores principalmente después de la ráfaga del día 28, en donde las estaciones popn y yaig alcanzaron valores de TEC por encima de las 300 unidades.

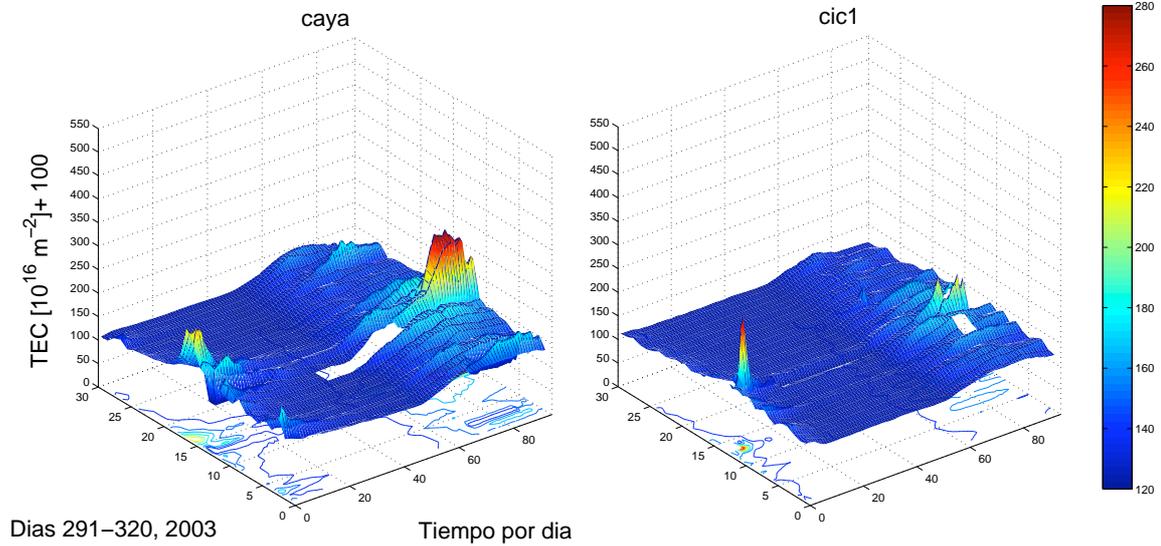


Figura 4.21: TEC vertical, estaciones caya y cic1.

También se realizó un cálculo de los valores de amplitud de la variación de manera individual para cada una de las estaciones y por cada día de análisis (ver figura 4.27). En esta figura se puede apreciar claramente la gran influencia de la tormenta del día 28 de octubre en donde se alcanzaron valores desde 6 desviaciones estándar hasta 14 (estación popn). Esta tormenta constituye, en esta tesis, la que mayor influencia tuvo sobre datos de GPS de estaciones mexicanas.

El estudio de estos eventos termina con una comparación de los siete días activos del periodo analizado (302-308) contra los siete días previos a los mencionados (295-301), estos últimos considerados como quietos. La desviación porcentual de un periodo con respecto al otro (figura 4.28), muestra que dicha desviación porcentual alcanzó valores de hasta 5000 %.

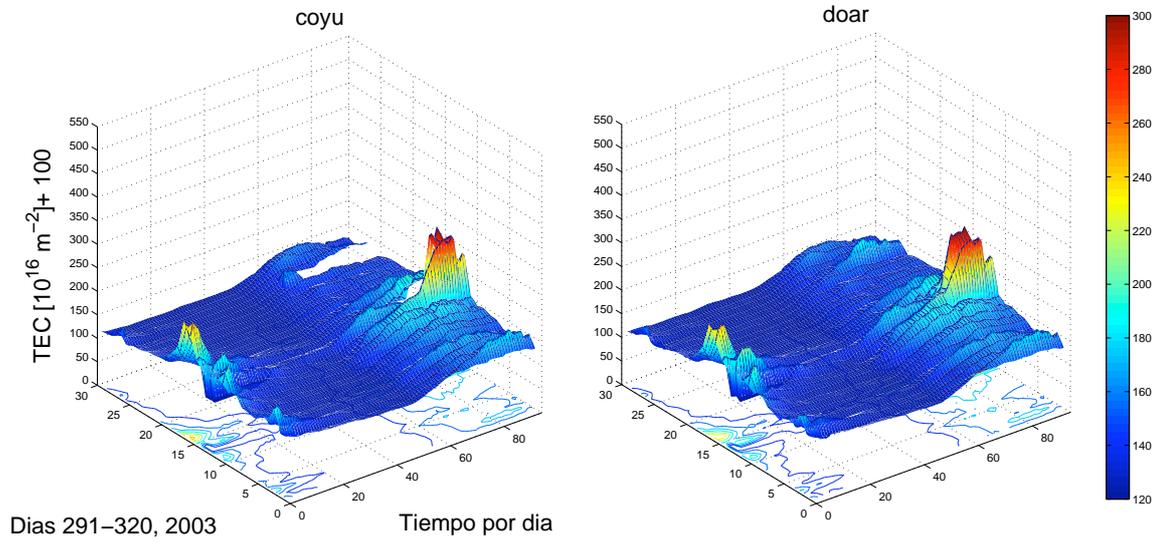


Figura 4.22: TEC vertical, estaciones coyu y doar.

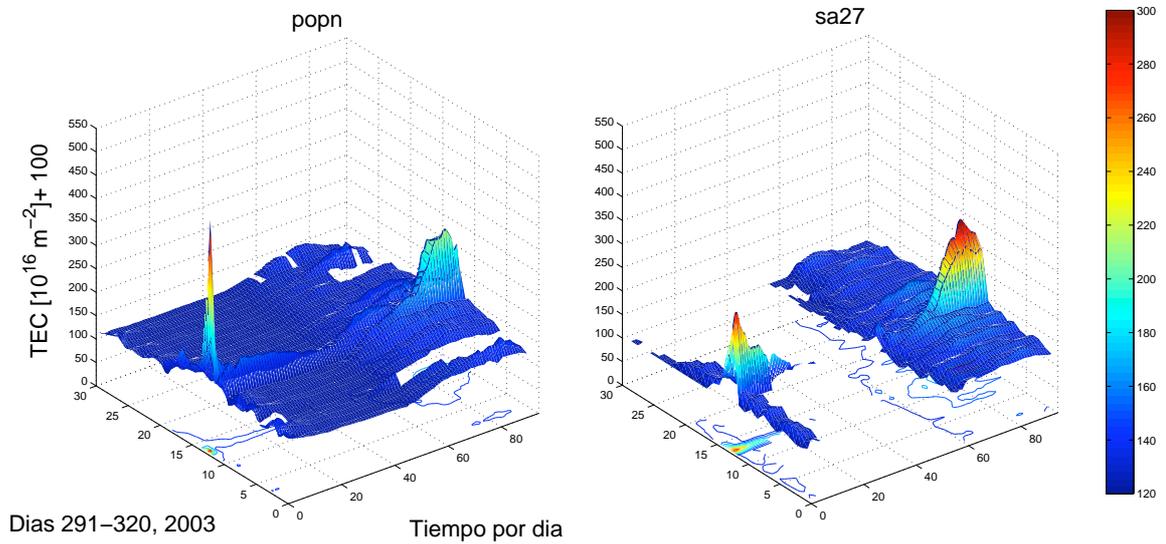


Figura 4.23: TEC vertical, estaciones popn y sa27.

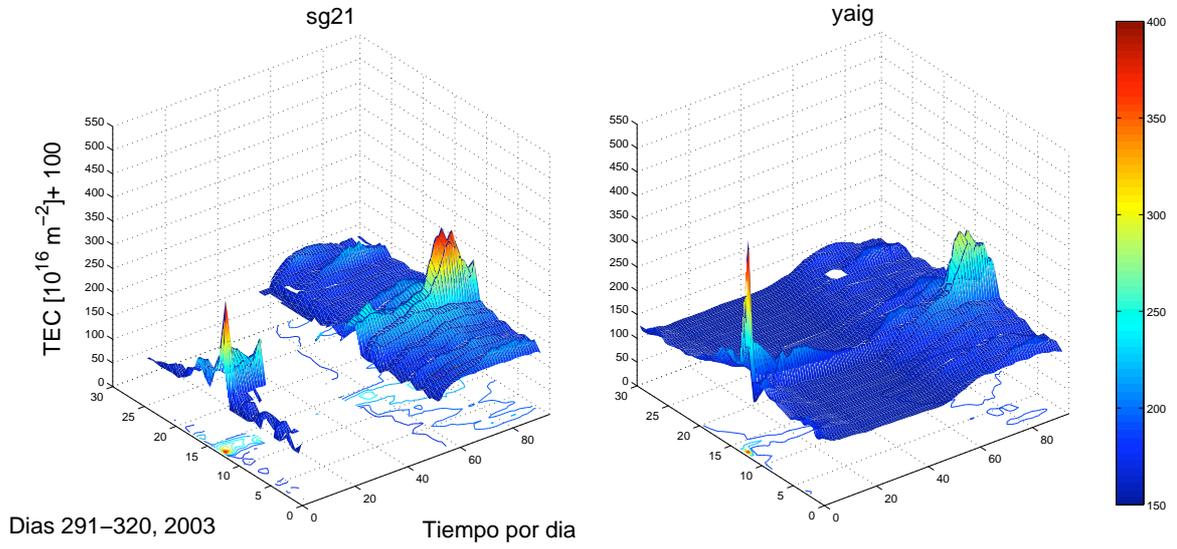


Figura 4.24: TEC vertical, estaciones sg21 y yaig.

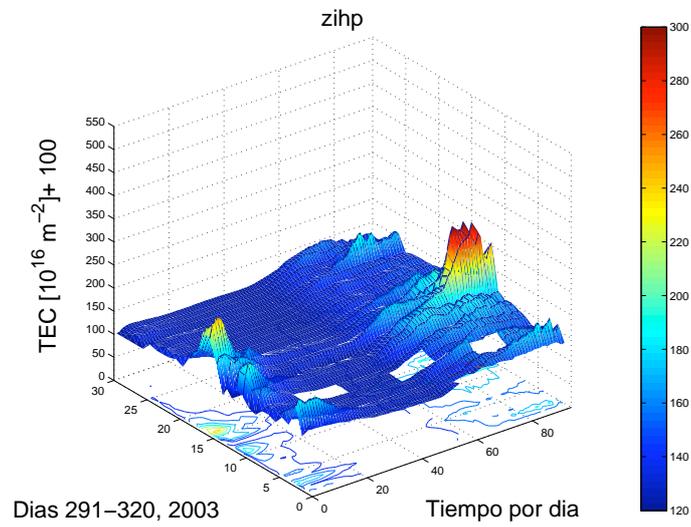


Figura 4.25: TEC vertical, estación zihp.

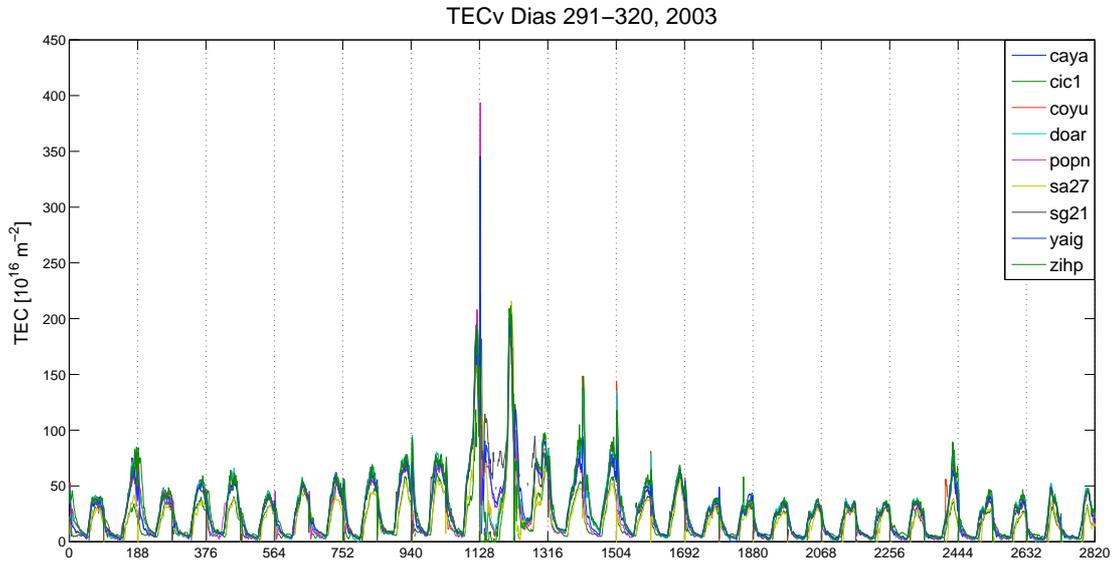


Figura 4.26: Gráfica de comparación de los valores de TEC obtenidos en cada una de las estaciones analizadas.

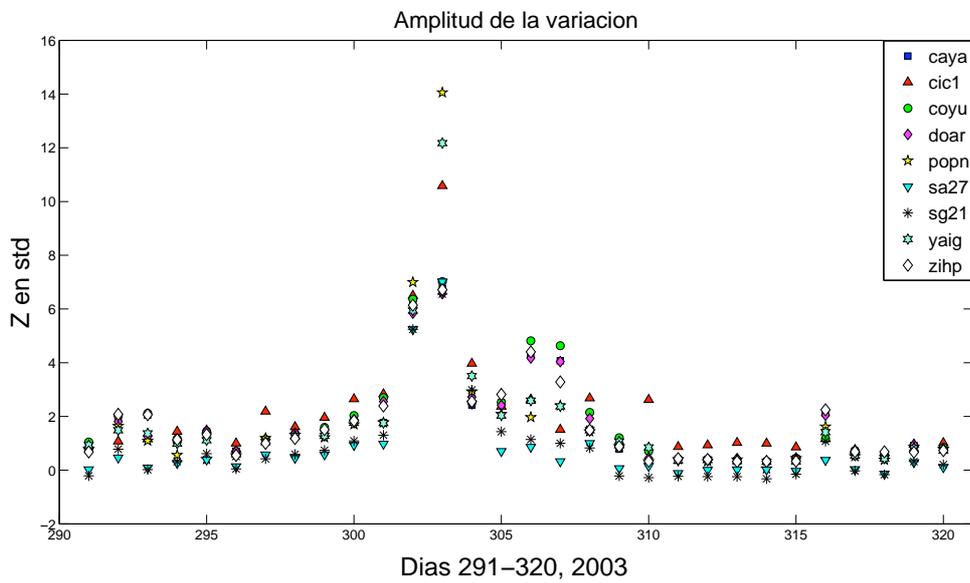


Figura 4.27: Gráfica de los valores de Z en desviaciones estándar por estación, por día.

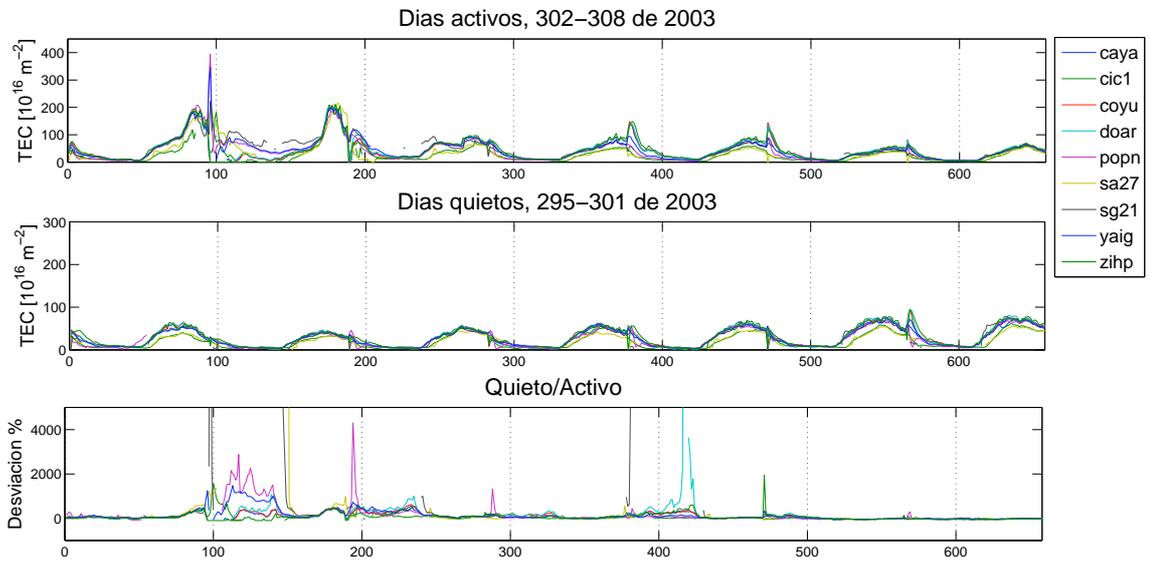


Figura 4.28: Comparación de los días del periodo de análisis (activos) contra mismos días del siguiente año (quietos).

## 4.4. Tormenta del 20 enero del 2005

En enero de 2005, a pesar de que en rayos X no se registró una gran intensidad, ocurrió una EMC importante. En efecto, entre el 15 y el 19 de enero se presentaron cuatro ráfagas solares en la región de manchas 720 (ver la figura 2.1). Después, el 20 de enero, una quinta ráfaga produjo una EMC que alcanzó una velocidad de 571 km/s (ver catálogo Halo <ftp://ares.nrl.navy.mil/pub/lasco/halo/>). Aunque usualmente toma más de 24 horas para que las partículas cargadas de plasma de una tormenta solar alcancen la Tierra, en esa ocasión el impacto sobre el medio terrestre supuestamente ocurrió sólo unas horas después de la explosión en el Sol. El registro de ese evento se consideró entonces como el de la tormenta de protones solares más grande en décadas (Lin, 2006). Según este investigador, el hecho de que cuando ocurrió la explosión la región de manchas 720 se encontraba a 60 grados oeste de longitud solar es una clave importante para entender este evento debido a que estaba “conectada magnéticamente a la Tierra”. Es decir que las líneas de fuerza del campo magnético solar que salen del Sol a lo largo de la espiral de Arquímedes, llevan directamente a la Tierra.

De los eventos ocurridos en esos días, el que ocurrió el día 20 de enero a las 06:36 hrs. alcanzó una intensidad de X7.1; duró un tiempo aproximado de 50 min., alcanzando su máximo a las 07:01 hrs. Su localización fue en las coordenadas N14 O61.

Por las características de este evento se decidió considerar un periodo de análisis de 10 días que va desde el día 13 al 22 de enero de ese año. Se consiguieron los datos de observación de 14 estaciones mexicanas de GPS para el periodo de análisis en cuestión, ver figura 4.29.

El comportamiento del TEC para cada estación como función del tiempo, considerando épocas de 24 hrs. se muestra en las figuras 4.30 a la 4.36.

Se comparó el comportamiento del TEC entre las mismas estaciones y así poder visualizar las diferencias de una con respecto a las otras y en donde se puede apreciar que el periodo es bastante tranquilo. Además, no existe una perturbación considerable en la ionosfera sobre estaciones mexicanas causada por esta tormenta, ya que solo ocurrió un ligero aumento en los valores de TEC de hasta alrededor de 60 unidades (ver figura 4.37).

También se realizó un cálculo de los valores de amplitud de la variación en desviaciones estándar de manera individual para cada una de las estaciones, por cada día de análisis y se hizo su correspondiente gráfica (ver figura 4.38). En esta gráfica se observa que los valores de la variación tiene una amplitud desde dos hasta seis desviaciones estándar.

Y finalmente se realizó una comparación de los días del periodo analizado (13-22) para la estación coyu, considerados activos, contra los mismos días del año de la

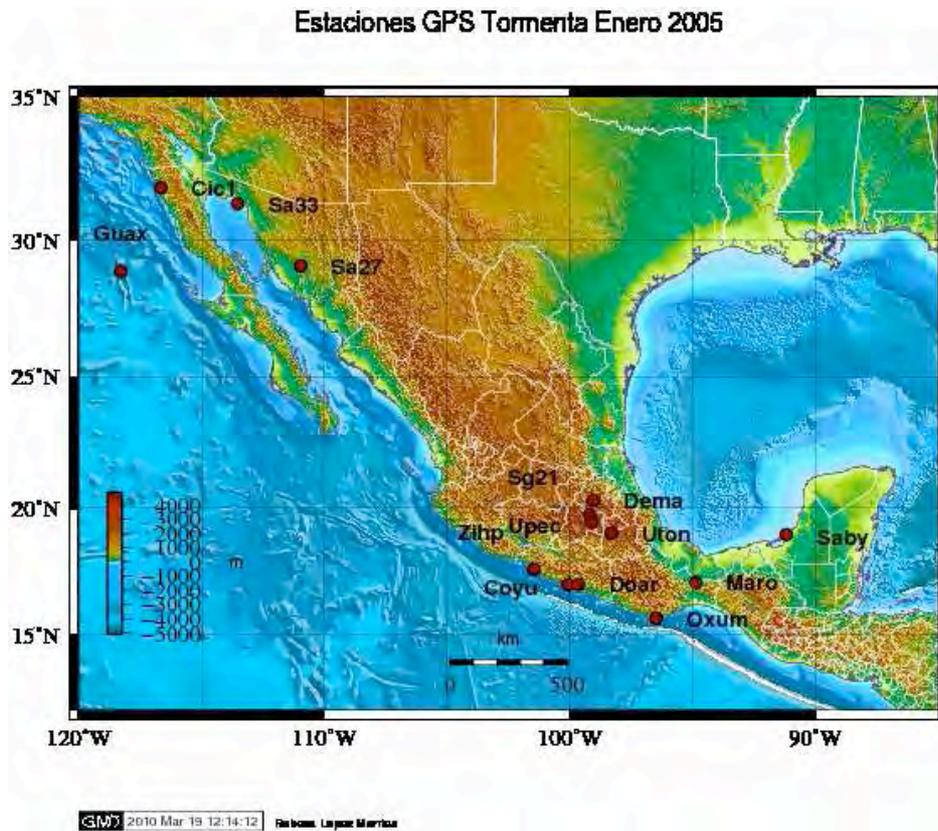


Figura 4.29: Estaciones mexicanas que se analizaron durante la tormenta del 20 de enero 2005.

misma estación pero del 2006, por considerar a éstos últimos como quietos y ver así la desviación porcentual de un periodo con respecto al otro (figura 4.39). En donde se alcanzaron valores de hasta 2000 %.

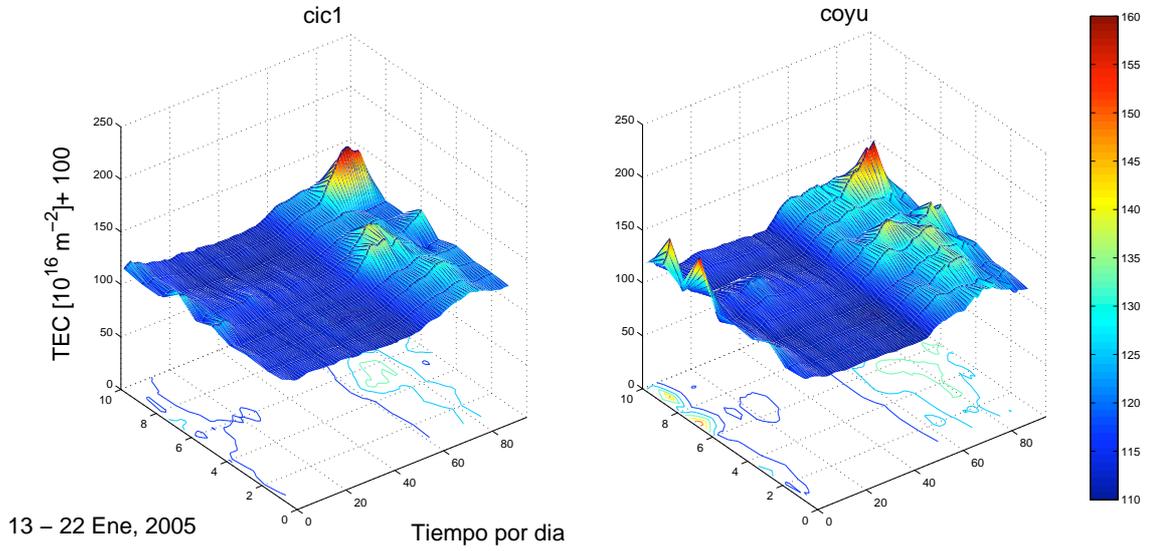


Figura 4.30: TEC vertical, estaciones cic1 y coyu.

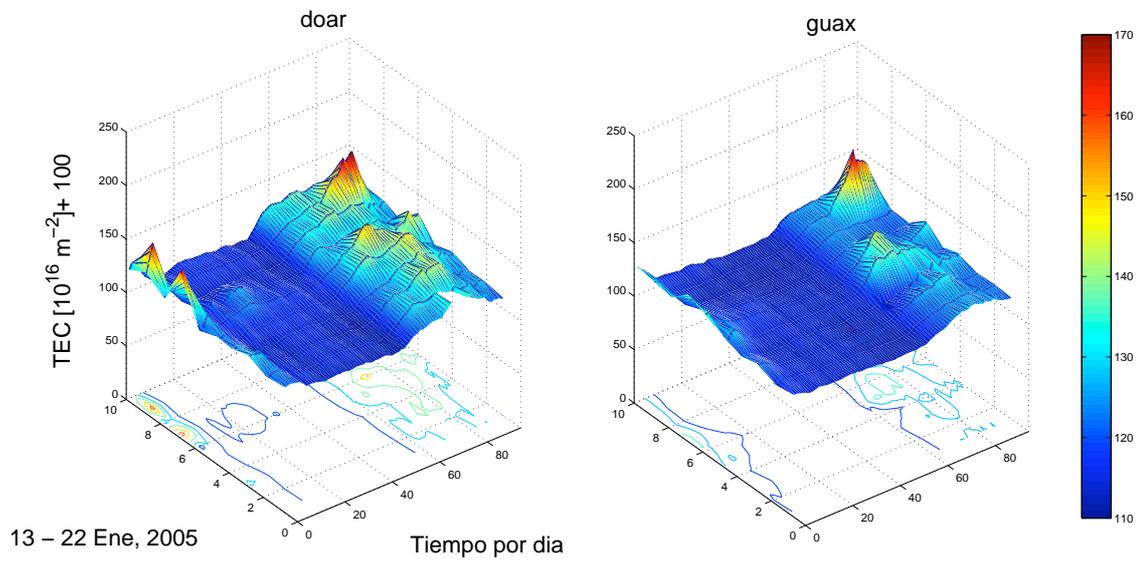


Figura 4.31: TEC vertical, estaciones doar y guax.

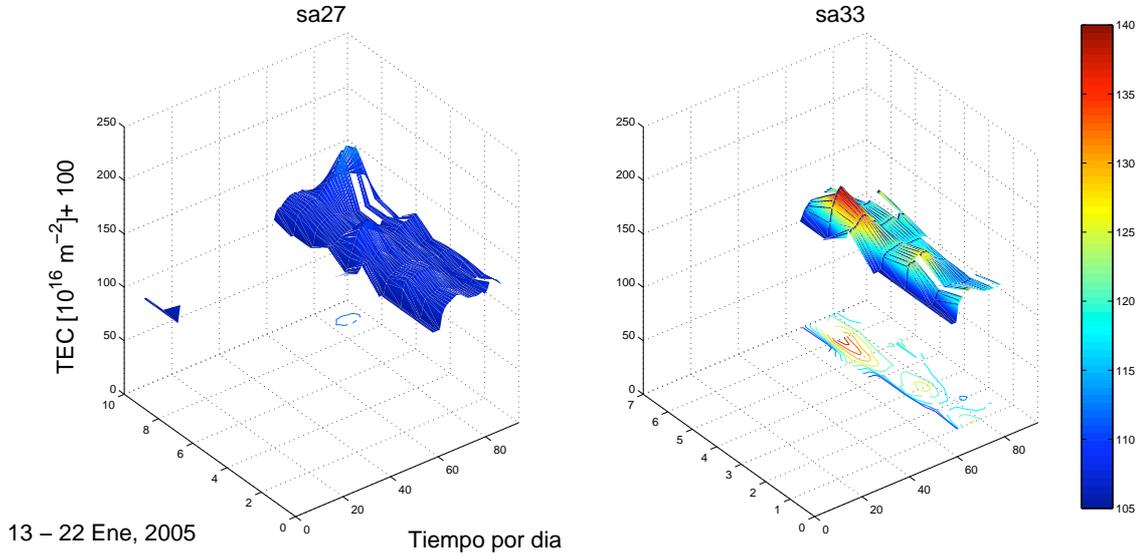


Figura 4.32: TEC vertical, estaciones sa27 y sa33.

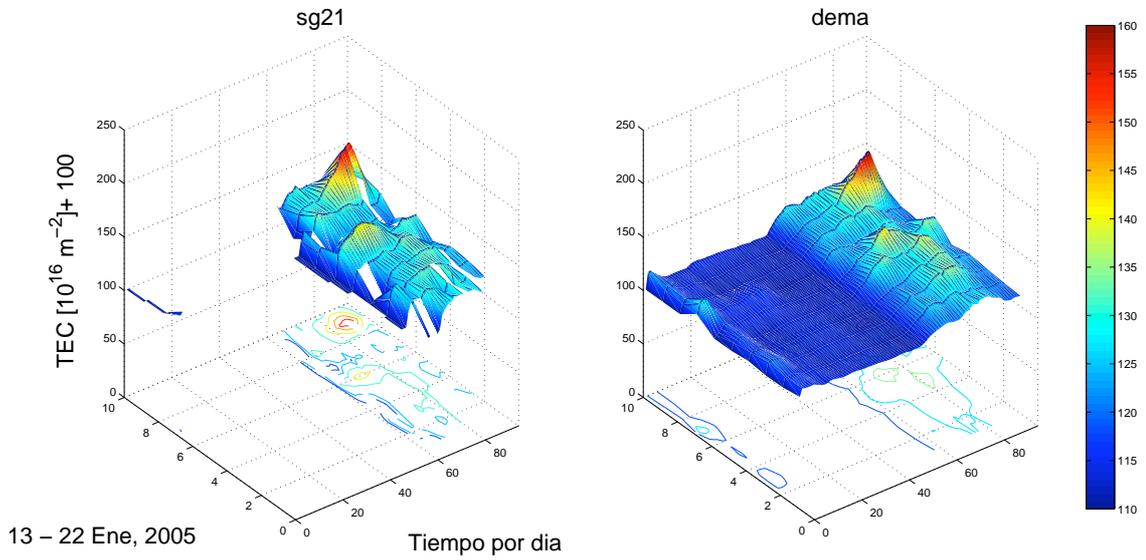


Figura 4.33: TEC vertical, estaciones sg21 y dema.

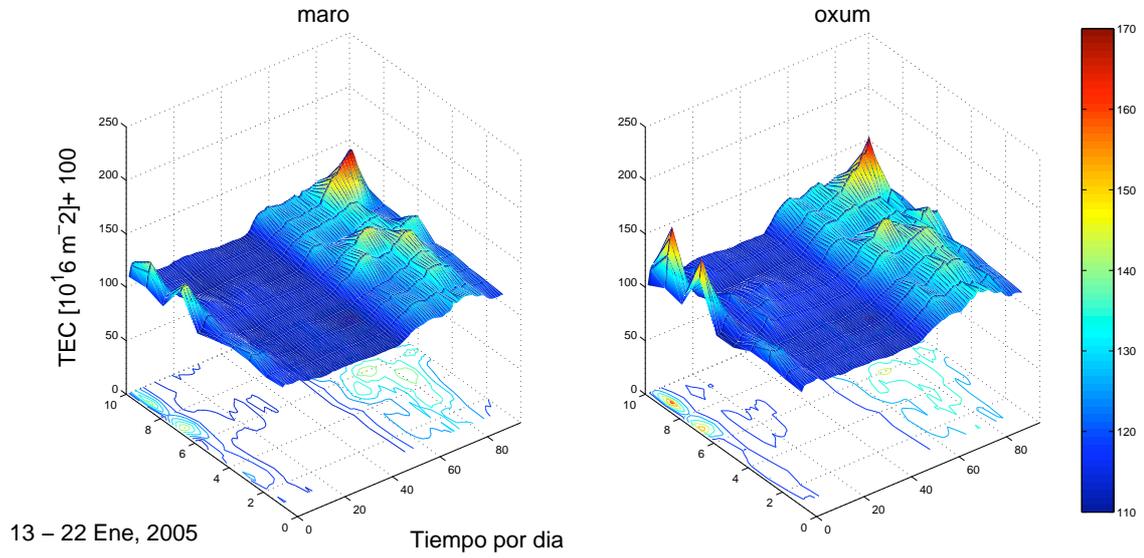


Figura 4.34: TEC vertical, estaciones maro y oxum.

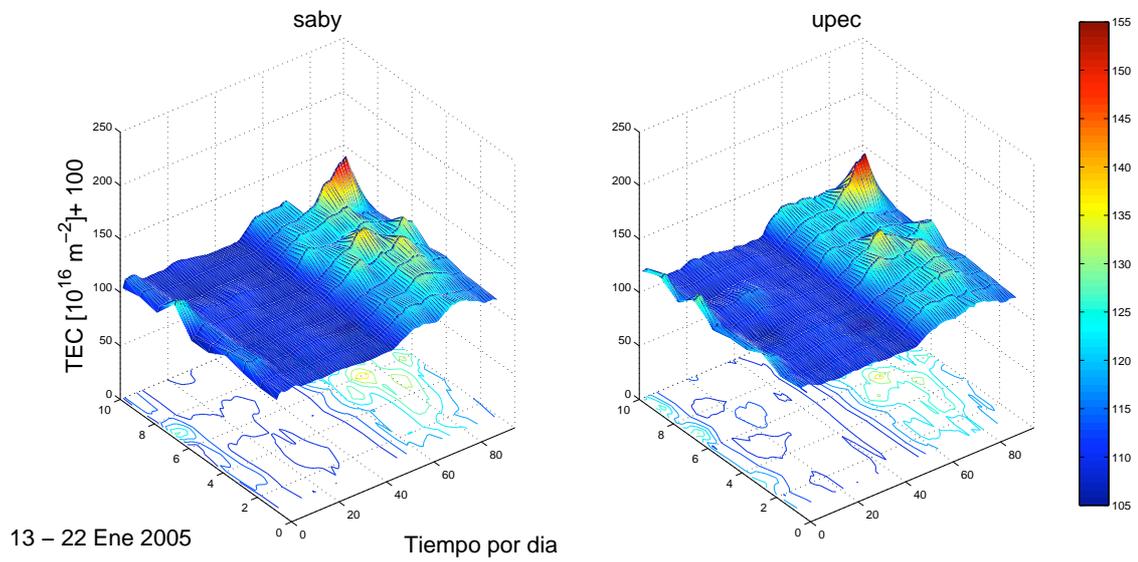


Figura 4.35: TEC vertical, estaciones saby y upec.

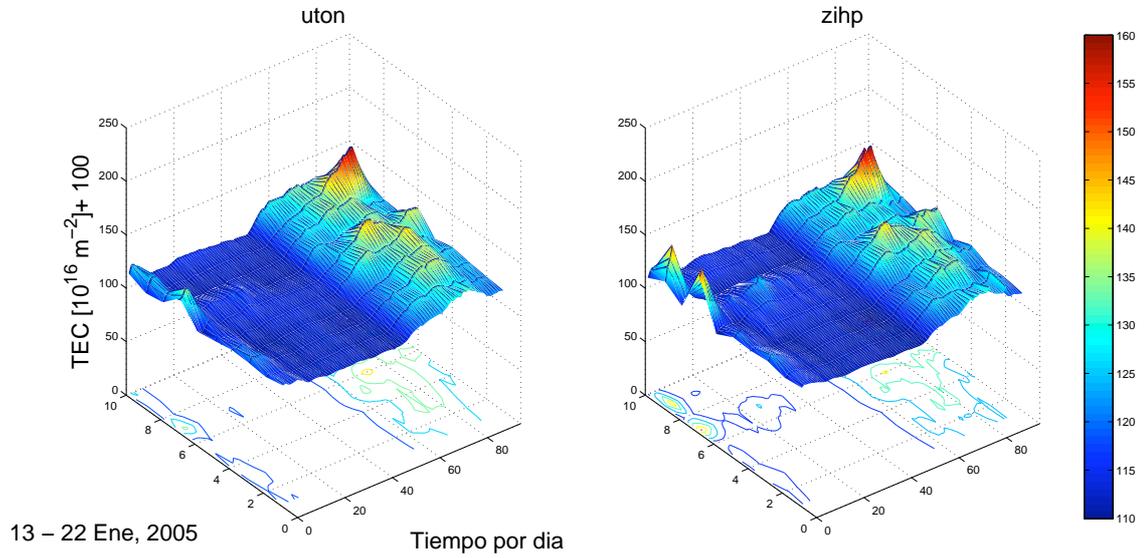


Figura 4.36: TEC vertical, estaciones uton y zihp.

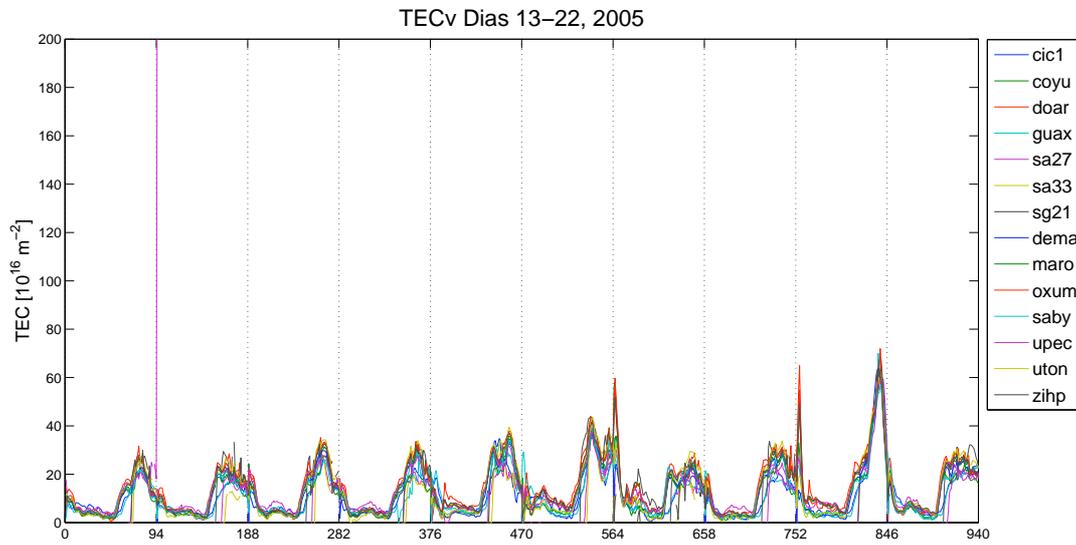


Figura 4.37: Gráfica de comparación de los valores de TEC obtenidos en cada una de las estaciones analizadas.

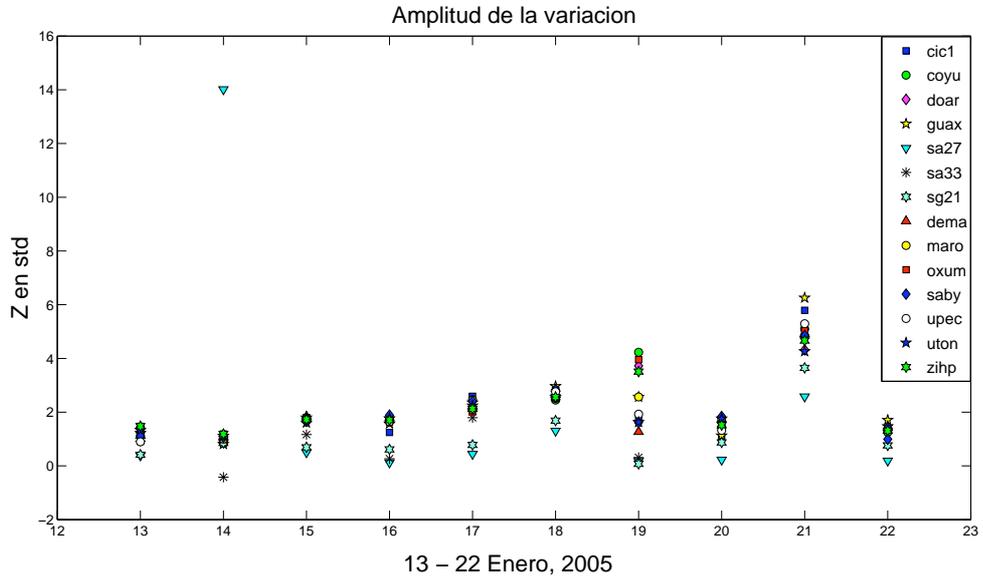


Figura 4.38: Gráfica de los valores de Z en desviaciones estándar por estación, por día.

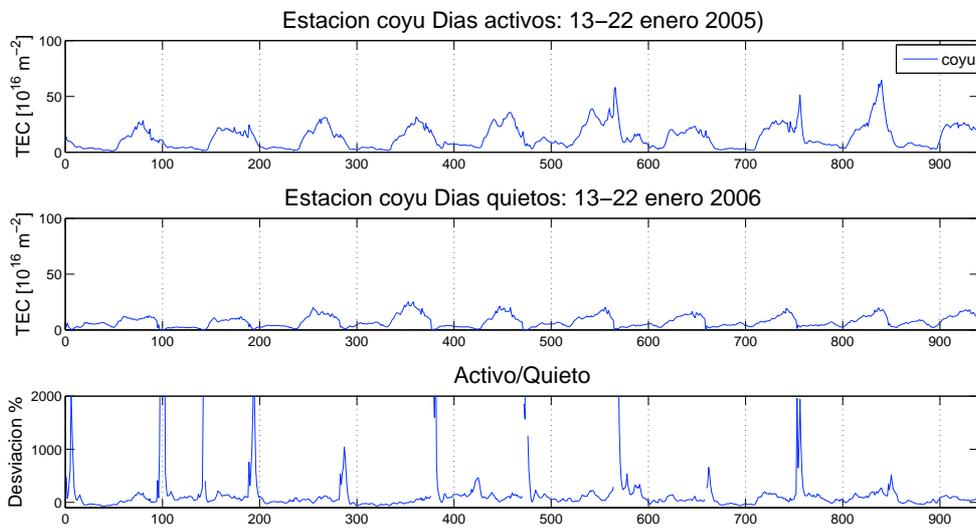


Figura 4.39: Comparación de los días del periodo de análisis (activos) contra mismos días del siguiente año (quietos).

## 4.5. Tormentas 7, 8 y 9 de septiembre del 2005

En el mes de septiembre del 2005 ocurrieron tres explosiones solares consecutivas, los días 7, 8 y 9 de ese mes, alcanzando intensidades de 17X, 5.4X y 6.2X, respectivamente.

La primera explosión (7 de septiembre) inició a las 17:17 hrs., alcanzando su máximo a las 17:40 hrs. y terminando a las 18:03 hrs. Se localizó en las coordenadas S11 E77.

El segundo evento inició a las 20:52 hrs. alcanzando su máximo a las 21:06, localizándose en las coordenadas S12 E75. Por último, el evento del día 9 de septiembre inició a las 19:13 hrs. alcanzando su máximo a las 20:04 hrs. y se localizó en las coordenadas S12 E67.

Únicamente a la ráfaga ocurrida el día 9 se le asocia una EMC observada por primera vez a las 19:48 hrs., la cual alcanzó una velocidad promedio de 2300 km/s (ver catálogo Halo <ftp://ares.nrl.navy.mil/pub/lasco/halo/>).

Dedido a las carecterísticas de esta tormenta (tres explosiones pero en días consecutivos) se decidió estudiar un periodo de 12 días para este evento, que va desde el día 244 al 255 del año 2005 (1 al 12 de septiembre). Se obtuvieron un total de 22 estaciones GPS para esa fechas, las cuales se pueden observar en la figura 4.47.

En las figuras 4.41 a la 4.51, se muestra el comportamiento del TEC para cada estación como función del tiempo, considerando épocas de 24 hrs.

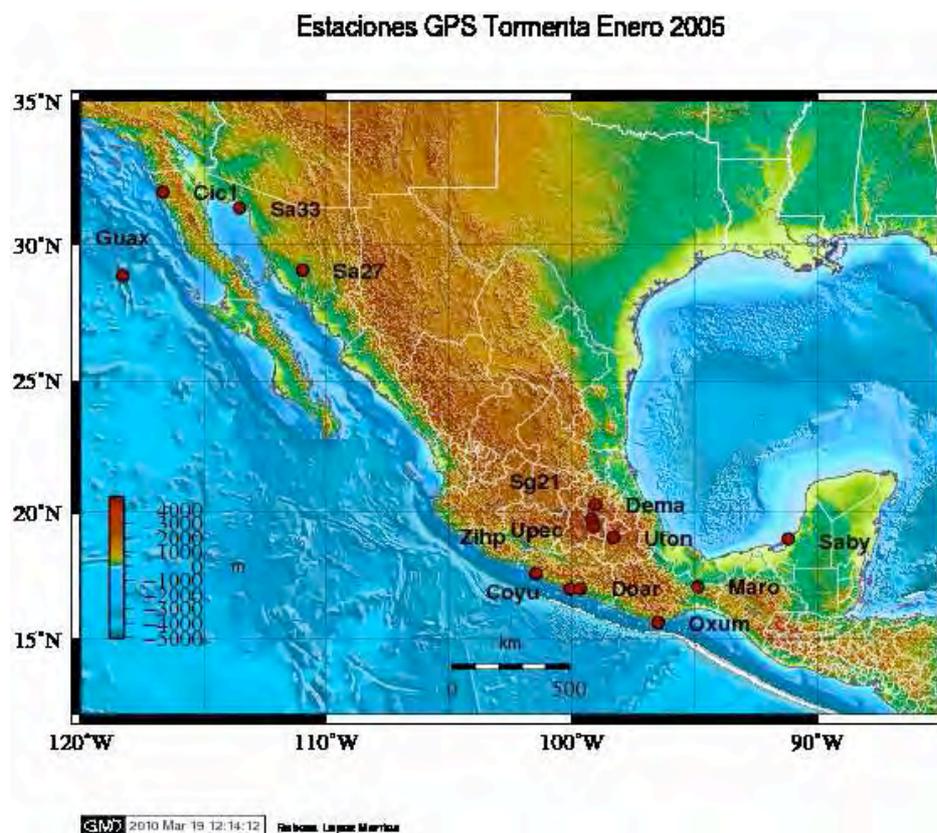


Figura 4.40: Estaciones mexicanas que se analizaron durante las tormentas del 7, 8 y 9 de septiembre 2005.

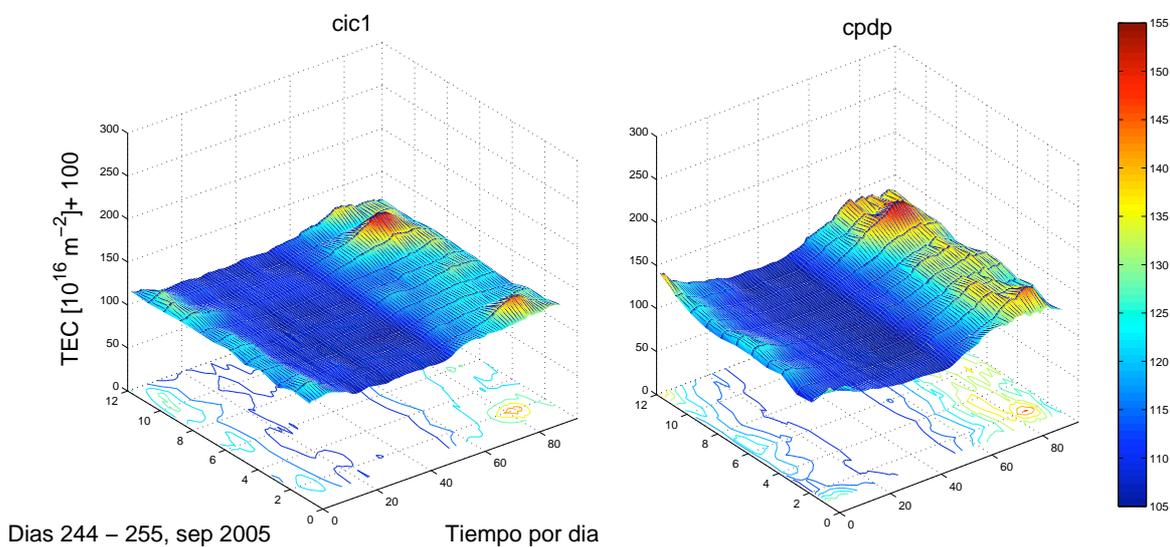


Figura 4.41: TEC vertical, estaciones cic1 y cpdp.

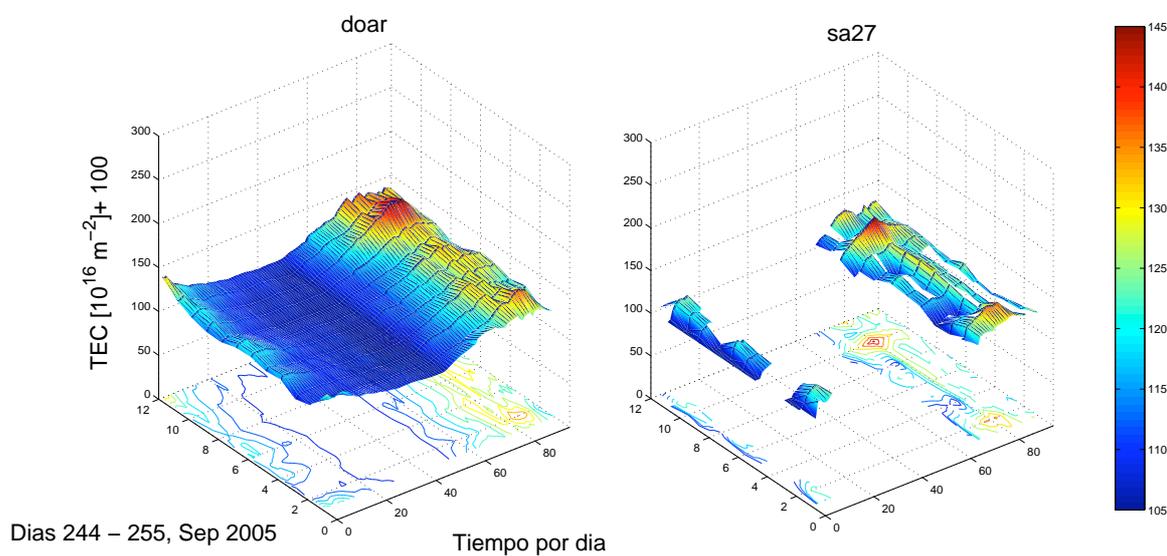


Figura 4.42: TEC vertical, estaciones doar y sa27.

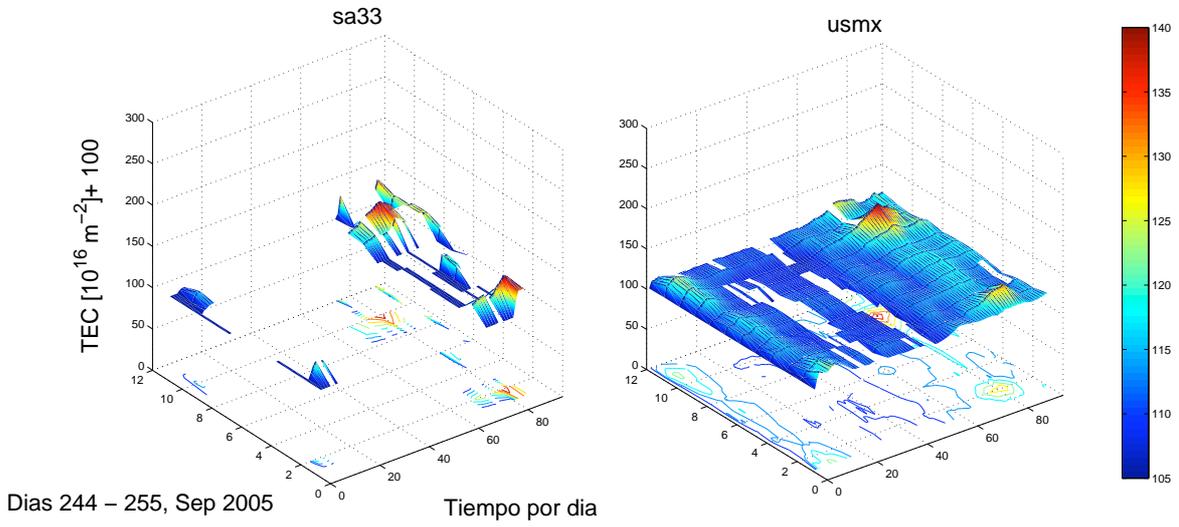


Figura 4.43: TEC vertical, estaciones sa33 y usmx.

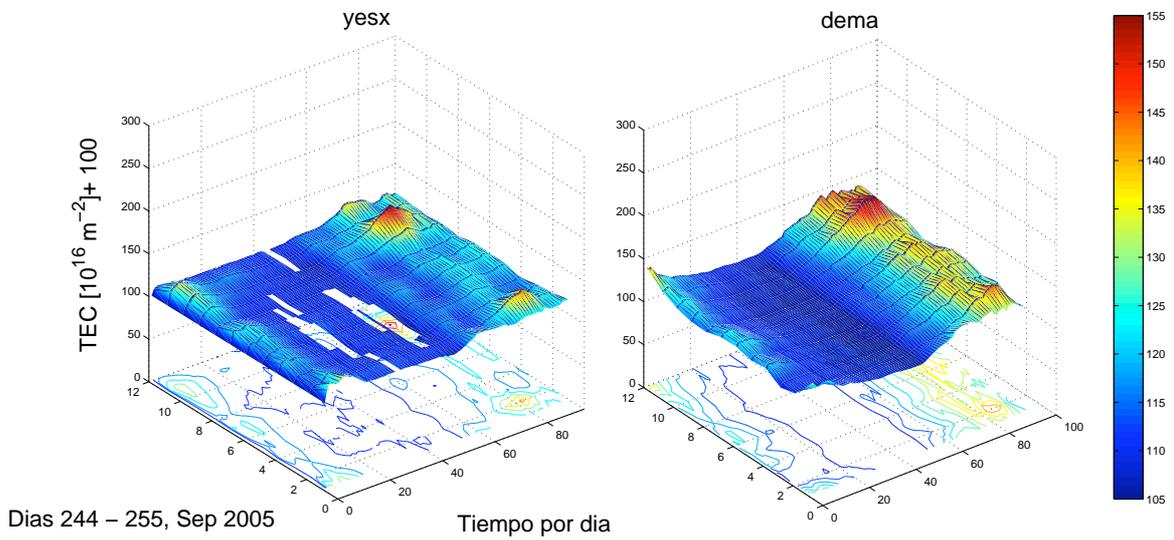


Figura 4.44: TEC vertical, estaciones yesx y dema.

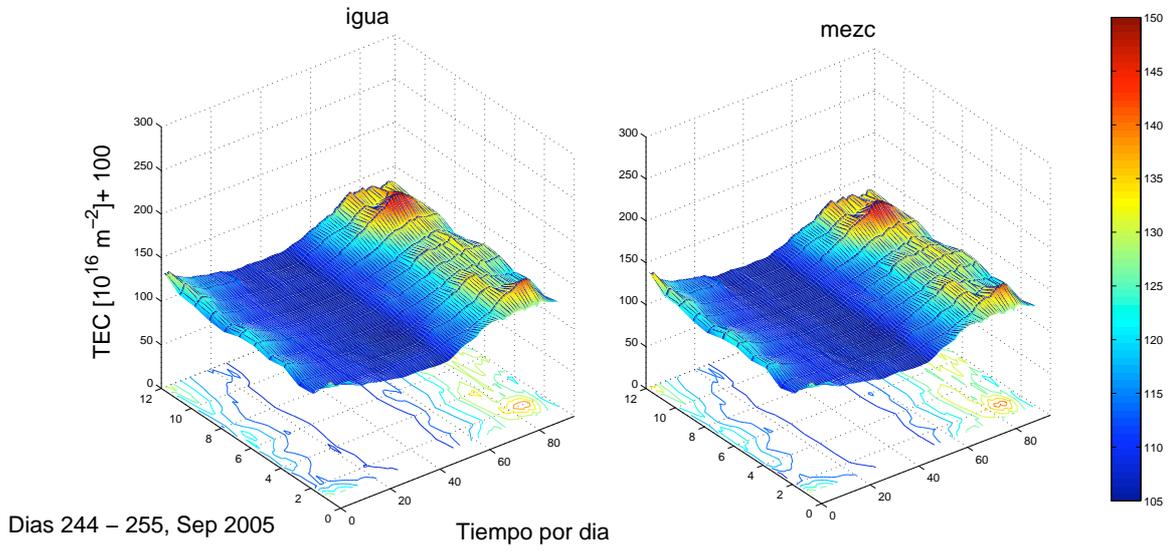


Figura 4.45: TEC vertical, estaciones igua y mezc.

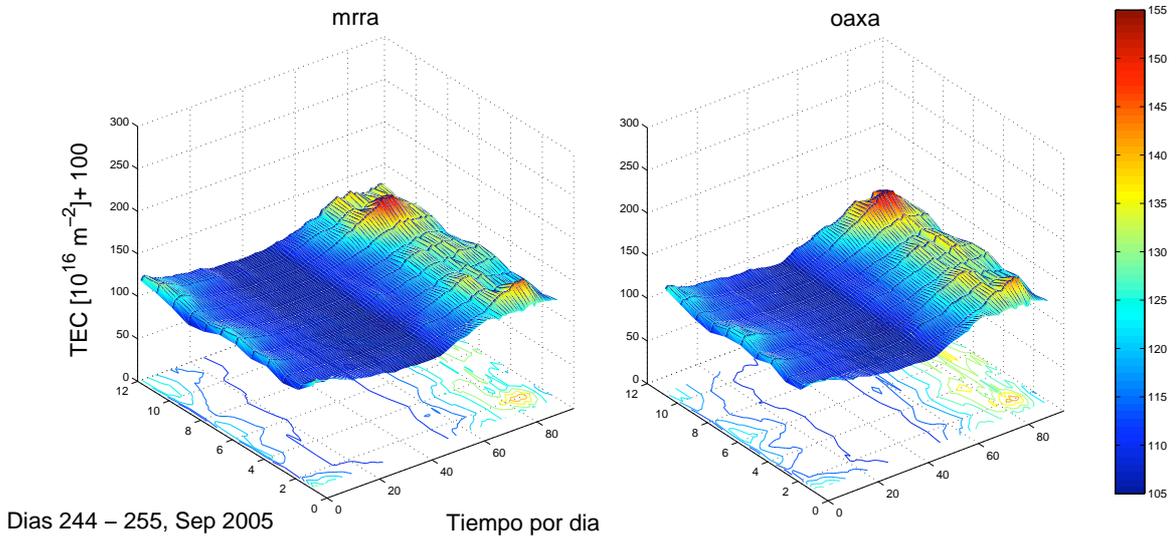


Figura 4.46: TEC vertical, estaciones mrra y oaxa.

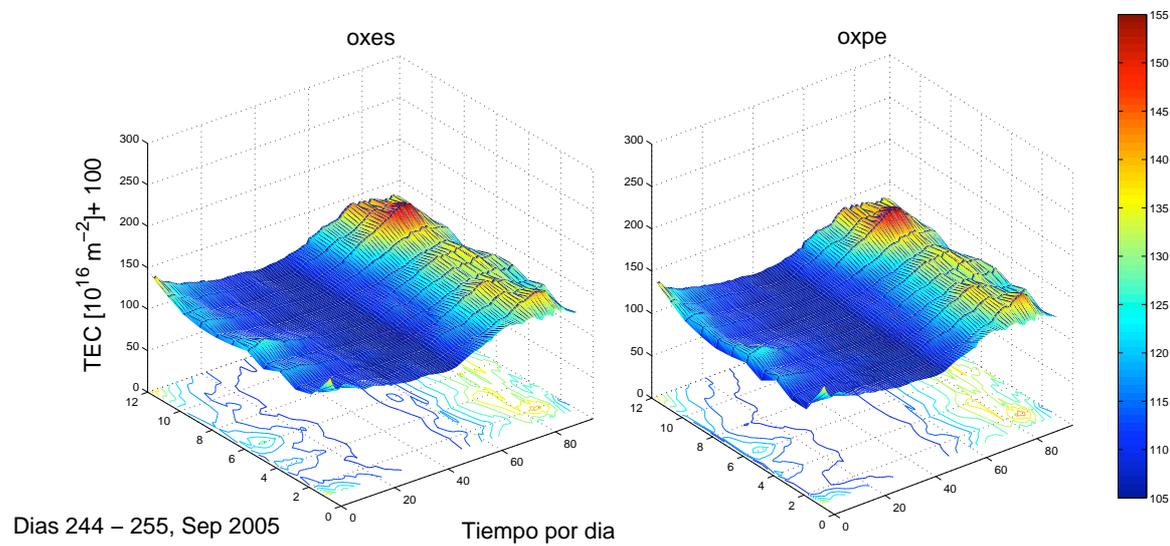


Figura 4.47: TEC vertical, estaciones oxes y oxpe.

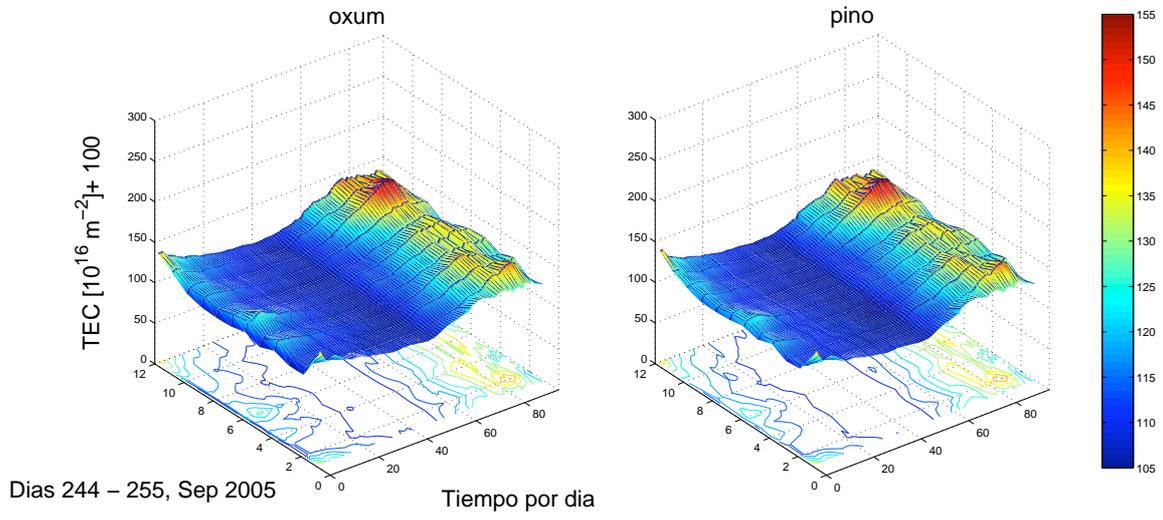


Figura 4.48: TEC vertical, estaciones oxum y pino.

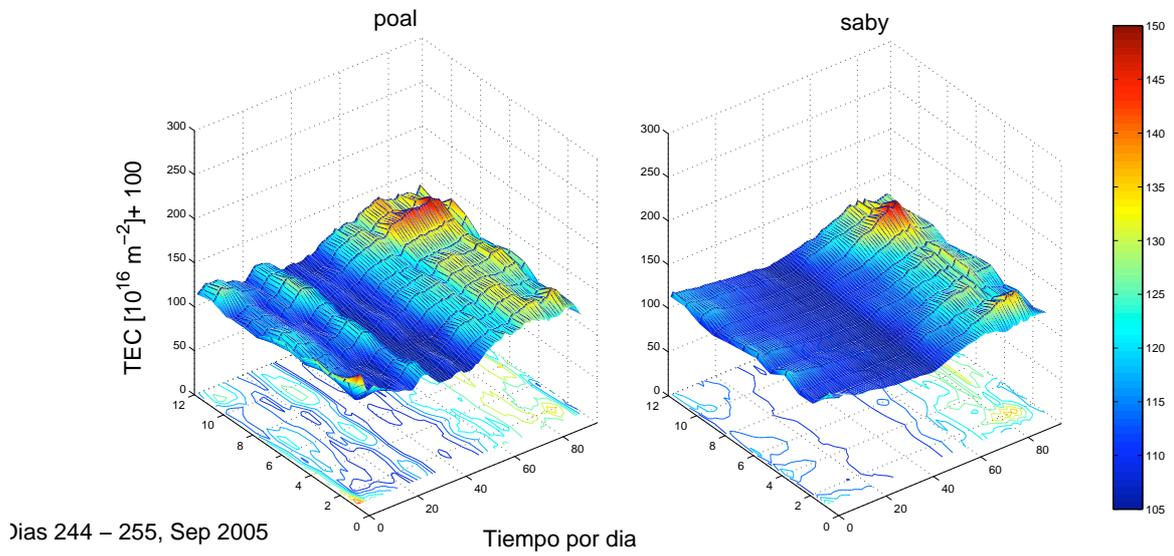


Figura 4.49: TEC vertical, estaciones poal y saby.

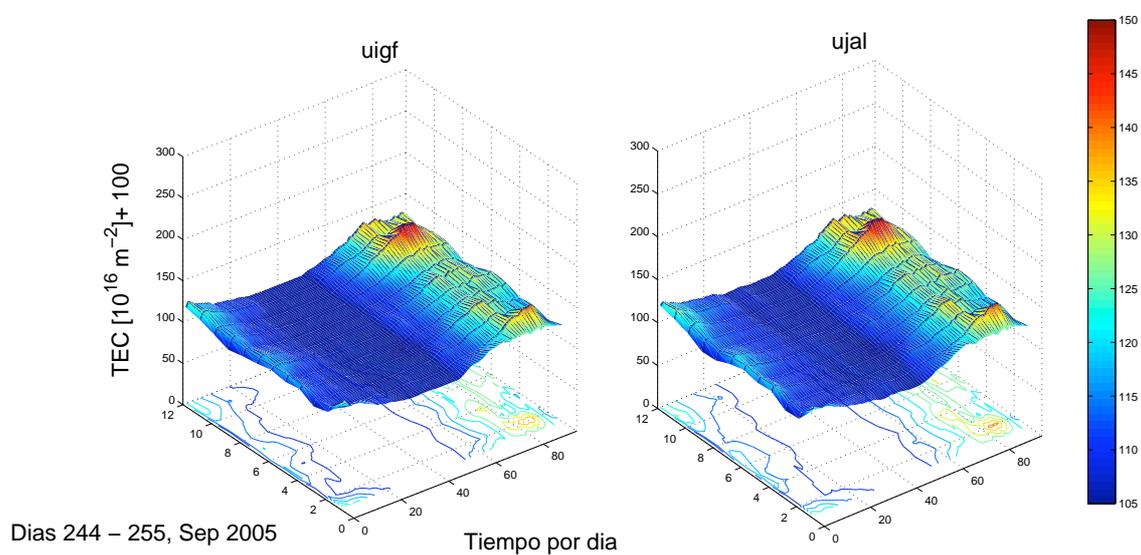


Figura 4.50: TEC vertical, estaciones uigf y ujal.

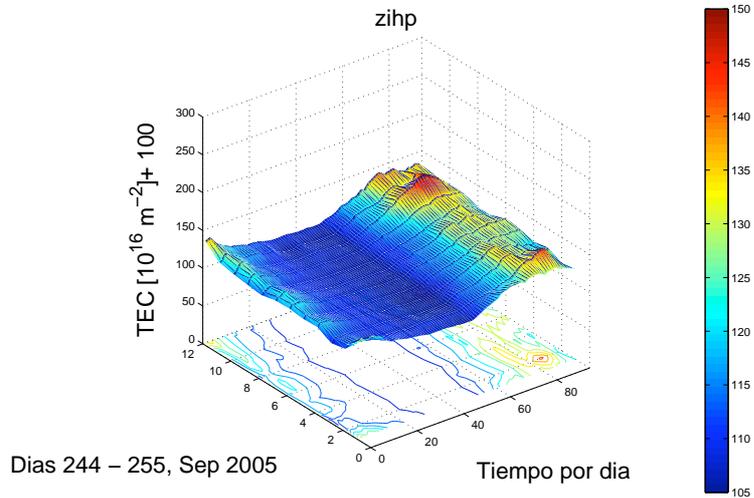


Figura 4.51: TEC vertical, estación zihp.

Se comparó el comportamiento del TEC entre las mismas estaciones para poder visualizar las diferencias de una con respecto a las otras (ver figura 4.52). En la figura se puede apreciar que sólo existe una ligera perturbación en la ionosfera después de la tormenta del día 9 de septiembre, muy posiblemente asociada a la EMC.

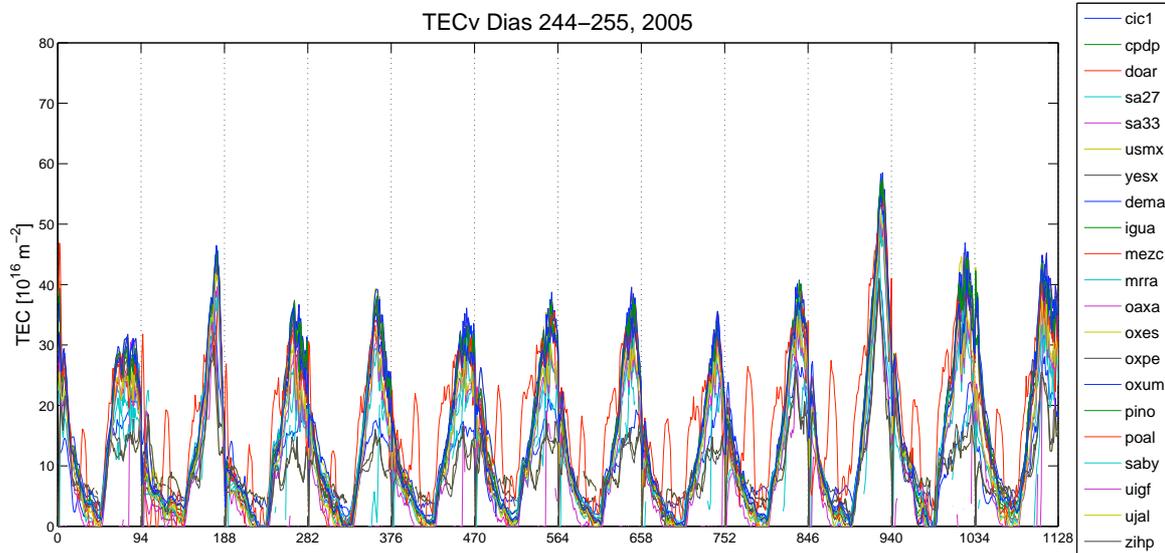


Figura 4.52: Gráfica de comparación de los valores de TEC obtenidos en cada una de las estaciones analizadas.

También se obtuvieron los valores de la amplitud de la variación, con su respectiva gráfica (figura 4.52). En ésta se observa que la variación diurna tiene en promedio hasta dos variaciones estándar y que después de la tormenta del día 9 se observan valores que van desde dos hasta casi seis desviaciones (caso de estación usmx).

Finalmente, se realizó una comparación de los días del periodo analizado (244–255), considerados activos, contra los mismos días del año anterior por considerar a estos últimos como quietos (figura 4.53). La desviación porcentual fue de hasta 4000 % debido a la tormenta del día 9.

Este parece ser un caso claro de que el impacto sobre la ionosfera fue debido a la presencia de la eyección de masa. En efecto, la ráfaga del día 7, cuya intensidad fue de 17X, no parece haber causado alguna perturbación, por lo menos en la ionosfera sobre México.

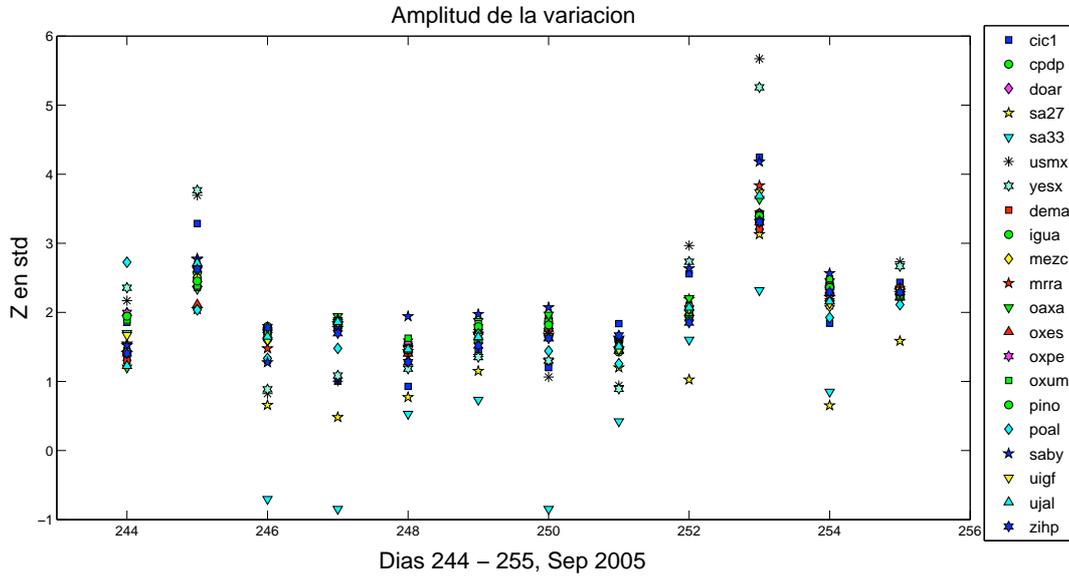


Figura 4.53: Gráfica de los valores de Z en desviaciones estándar por estación, por día.

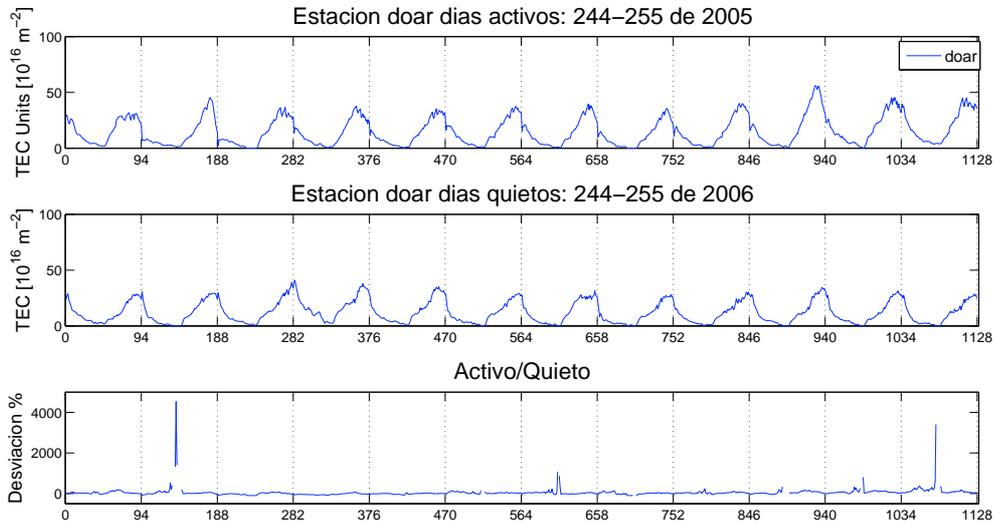


Figura 4.54: Comparación de los días del periodo de análisis (activos) contra mismos días del siguiente año (quietos).

## 4.6. Tormentas 5 y 6 de diciembre del 2006

En esta sección se analizan las tormentas ocurridas los días 5 y 6 de diciembre del año 2006, las cuales tuvieron intensidades de 9X y 6.5X, respectivamente. El primer evento inició a las 10:18 hrs., terminando a las 10:45 y se localizó en las coordenadas S07 E68; el segundo evento inició a las 18:29 hrs y terminó a las 19:00, localizándose en las coordenadas S05 E64. No se asocia ninguna EMC a éstas ráfagas.

Se analizó un periodo de 15 días que va de los días 335 al 349 de ese año. Se obtuvieron un total de 19 estaciones para el análisis. En la figura 4.55 se presentan cada una de las estaciones con su ubicación espacial.

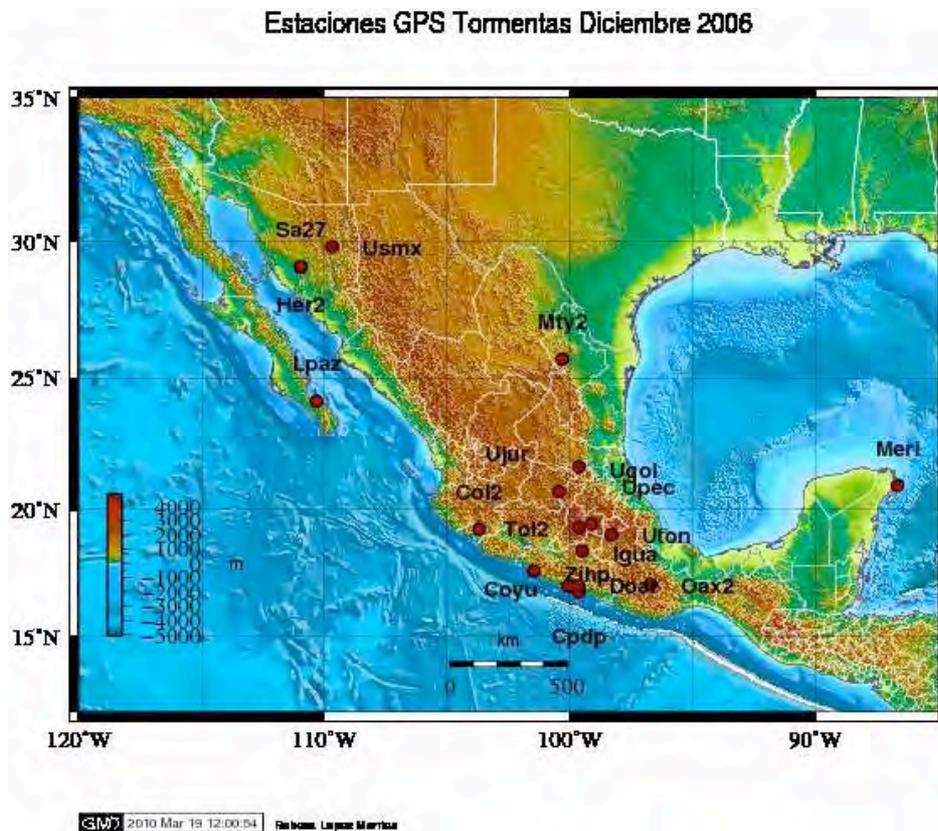


Figura 4.55: Estaciones mexicanas que se analizaron durante las tormentas del 6 y 15 de diciembre 2006.

El comportamiento del TEC para cada estación como función del tiempo, considerando épocas de 24 hrs. Se muestra en las figuras 4.56 a la 4.64.

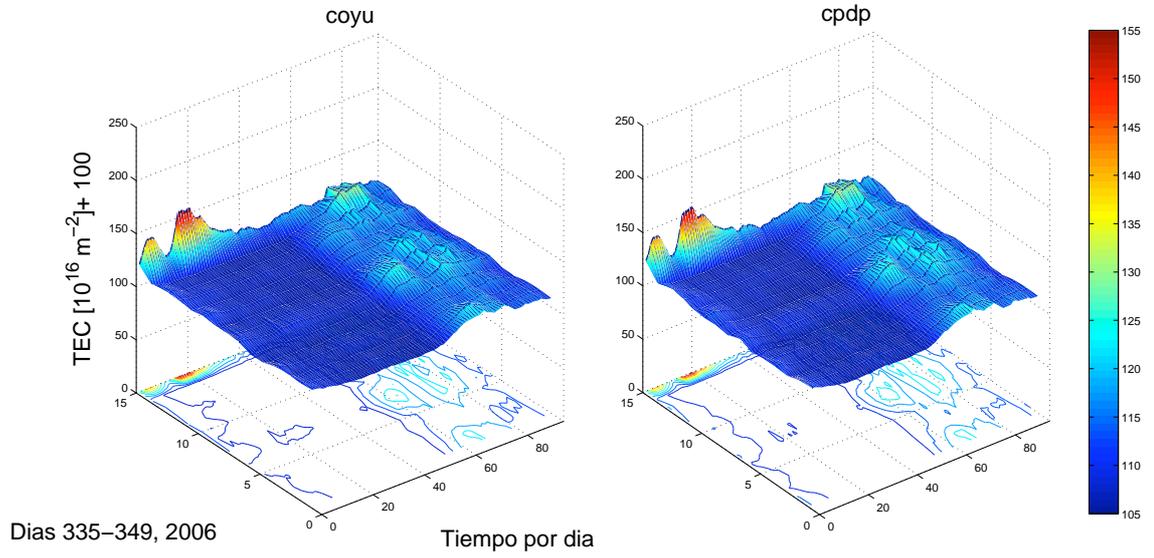


Figura 4.56: TEC vertical, estaciones coyu y cpdp.

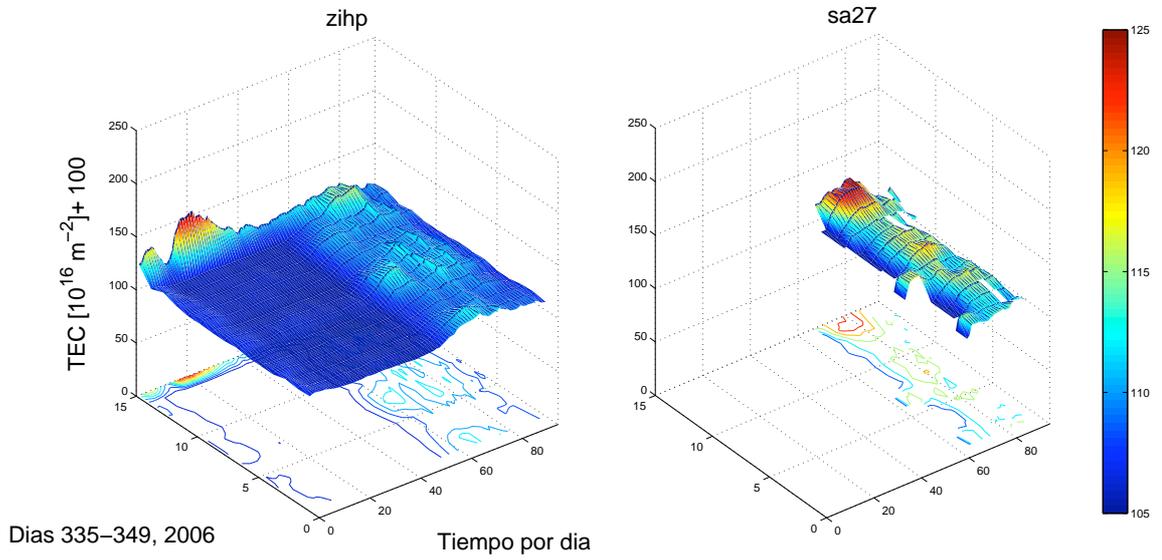


Figura 4.57: TEC vertical, estaciones zihp y sa27.

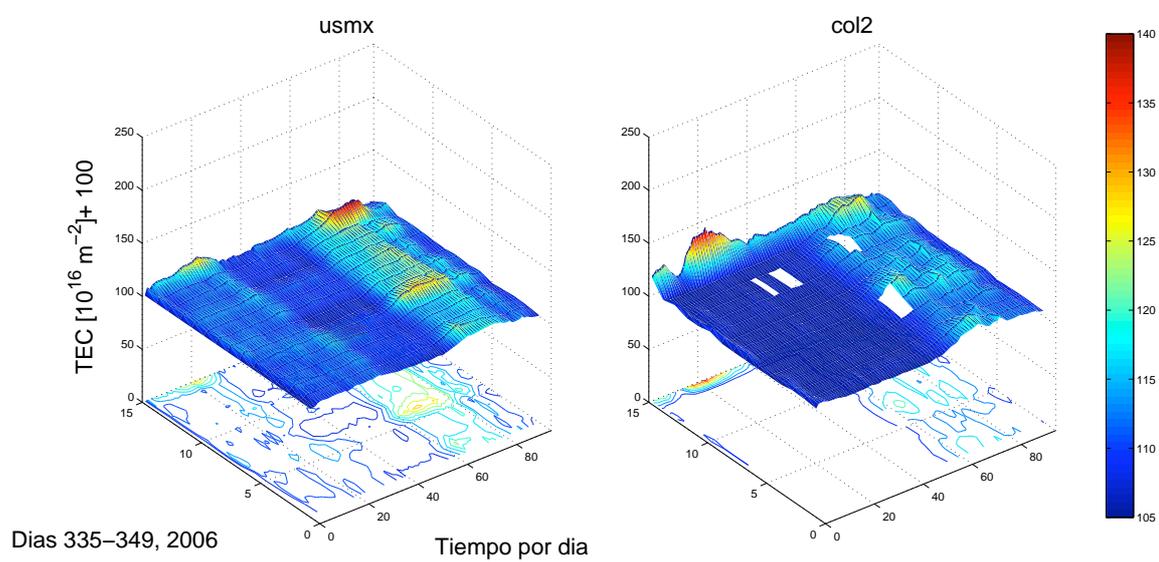


Figura 4.58: TEC vertical, estaciones usmx y col2.

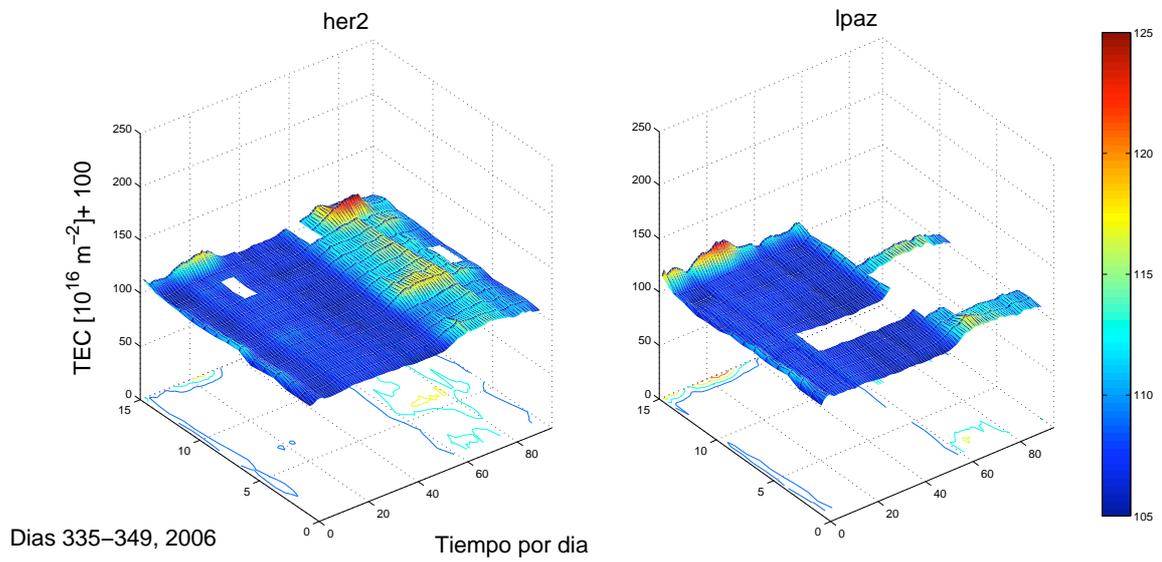


Figura 4.59: TEC vertical, estaciones her2 y lpaz.

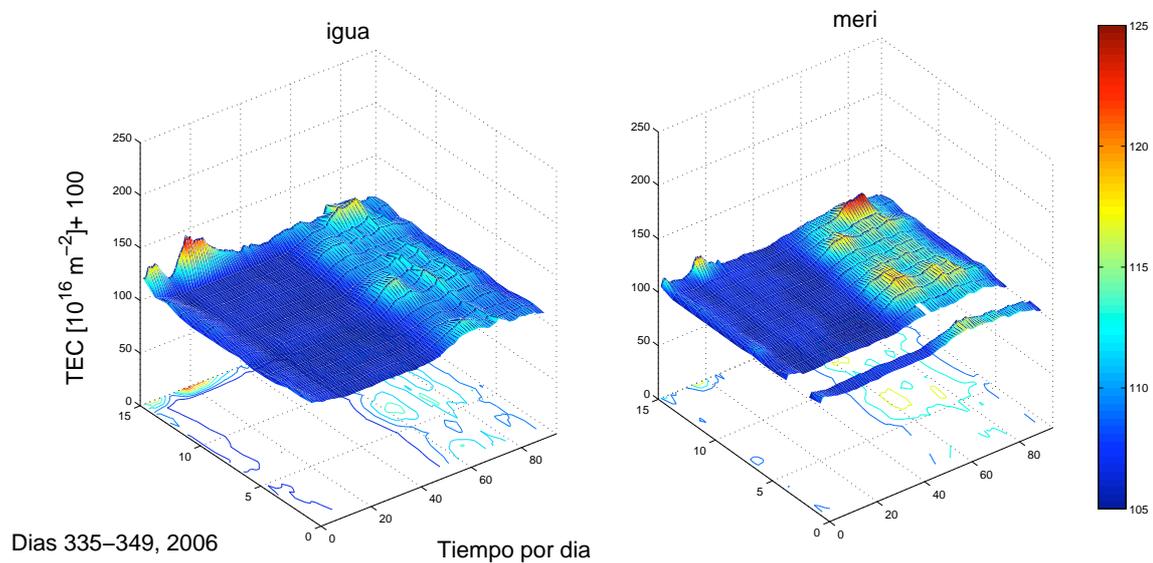


Figura 4.60: TEC vertical, estaciones igua y meri.

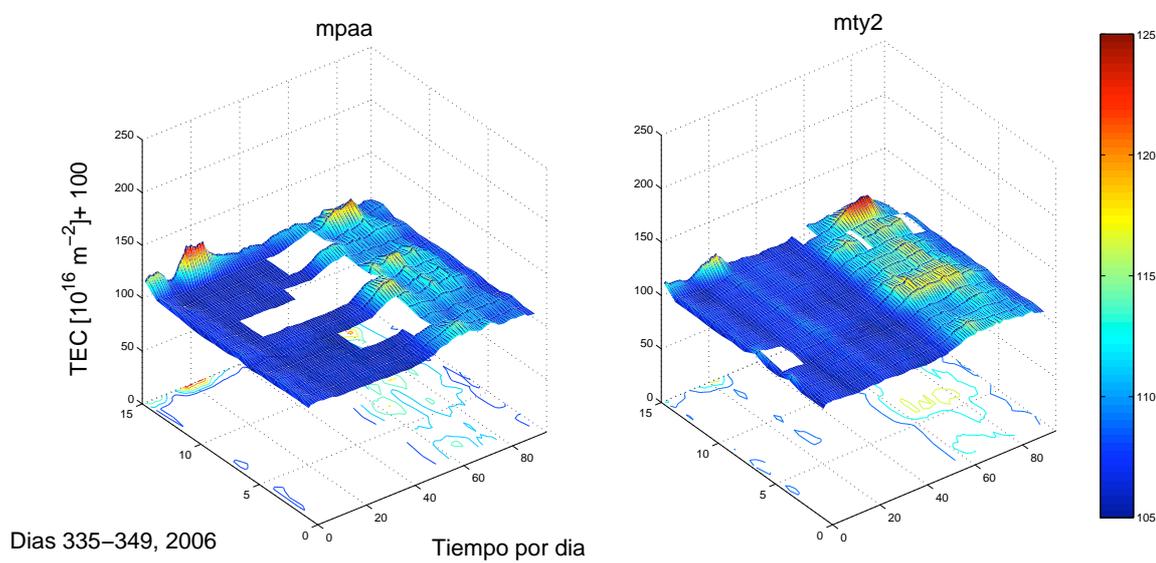


Figura 4.61: TEC vertical, estaciones mpaa y mty2.

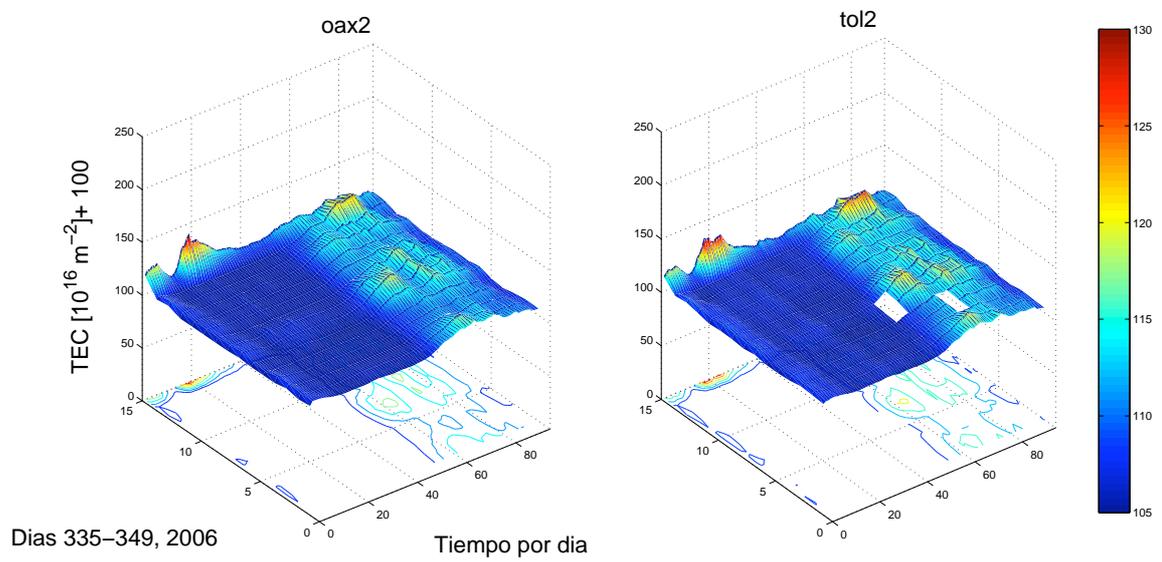


Figura 4.62: TEC vertical, estaciones oax2 y tol2.

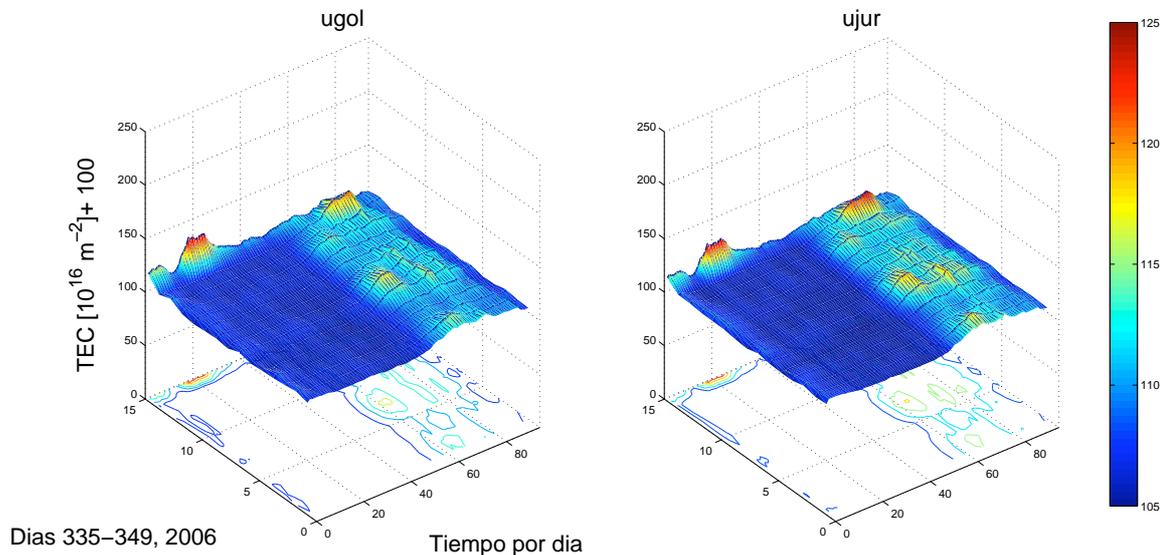


Figura 4.63: TEC vertical, estaciones ugol y ujur.

Se realizó una gráfica de comparación del comportamiento del TEC en cada estación con respecto a las otras, como función del tiempo (figura 4.65). En esta figura se aprecia que no existió una influencia en la ionosfera sobre estaciones mexicanas en ninguna de las dos tormentas analizadas. Sin embargo, sí hubo perturbación en la ionosfera debida a una tormenta el día 13 de diciembre la cual, por su intensidad (3.4X), no se consideró en éste análisis, pero quedó dentro del periodo escogido.

Después, se obtuvieron los valores de la amplitud de la variación, tal como se describió en la introducción del capítulo, y se realizó la gráfica correspondiente (figura 4.66). En ella se puede apreciar apesar de que es un periodo tranquilo, la variación diurna es muy notoria con variaciones de hasta tres desviaciones estándar. Para el caso del día 13 de diciembre, mencionado anteriormente, las variaciones de la amplitud van desde 3 hasta 5.5 sigmas.

Finalmente, se realizó una comparación de los días del periodo analizado (335-349) en la estación usmx, considerados activos, contra los mismos días del año de la misma estación pero del 2006, por considerar a estos últimos como quietos, y ver la desviación porcentual de un periodo con respecto al otro (figura 4.67).

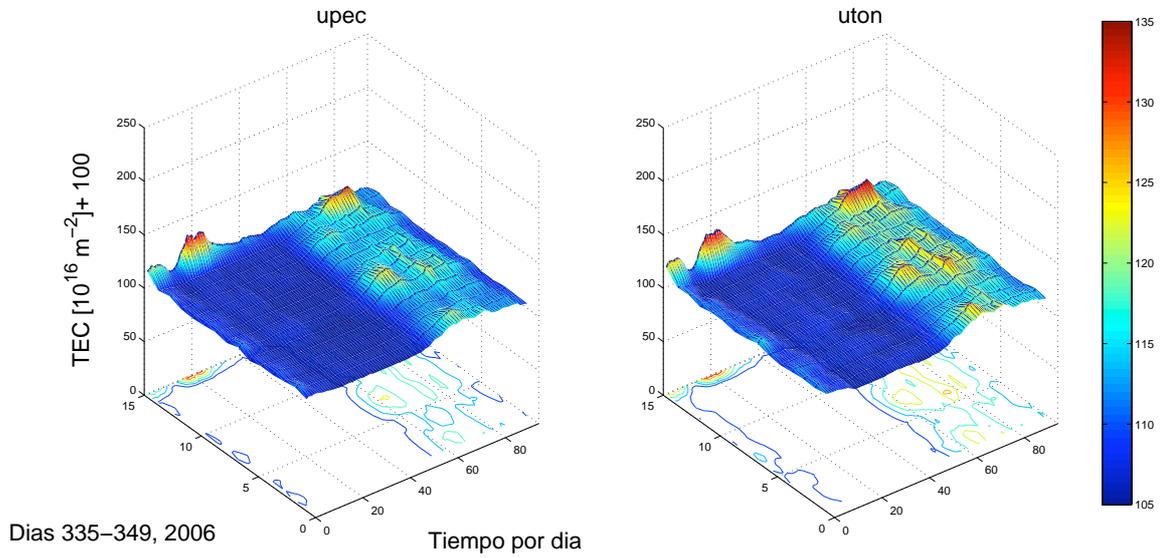


Figura 4.64: TEC vertical, estaciones upec y uton.

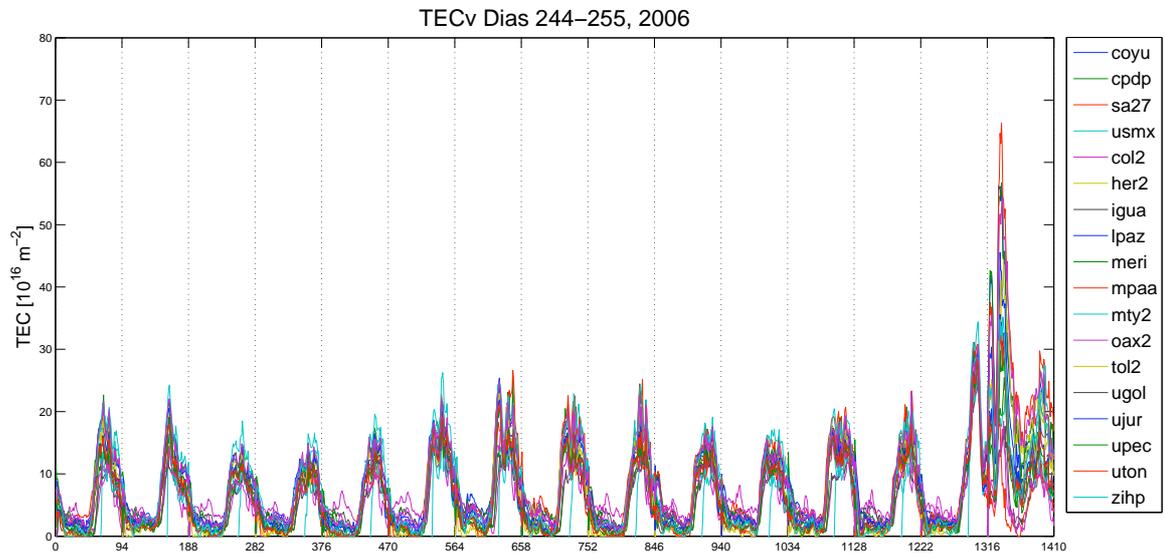


Figura 4.65: Gráfica de comparación de los valores de TEC obtenidos en cada una de las estaciones analizadas.

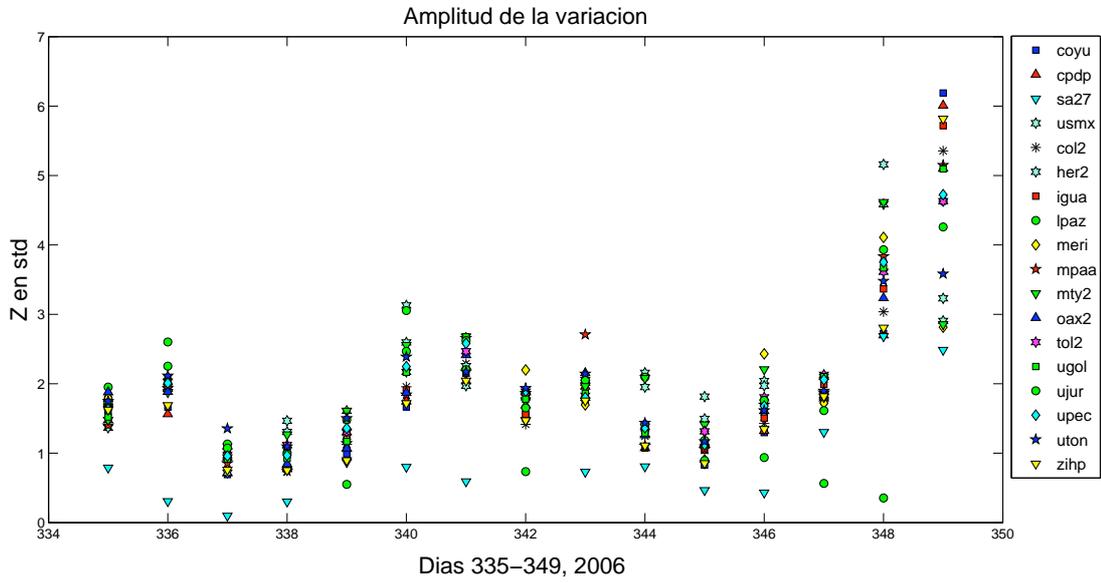


Figura 4.66: Gráfica de los valores de Z en desviaciones estándar por estación, por día.

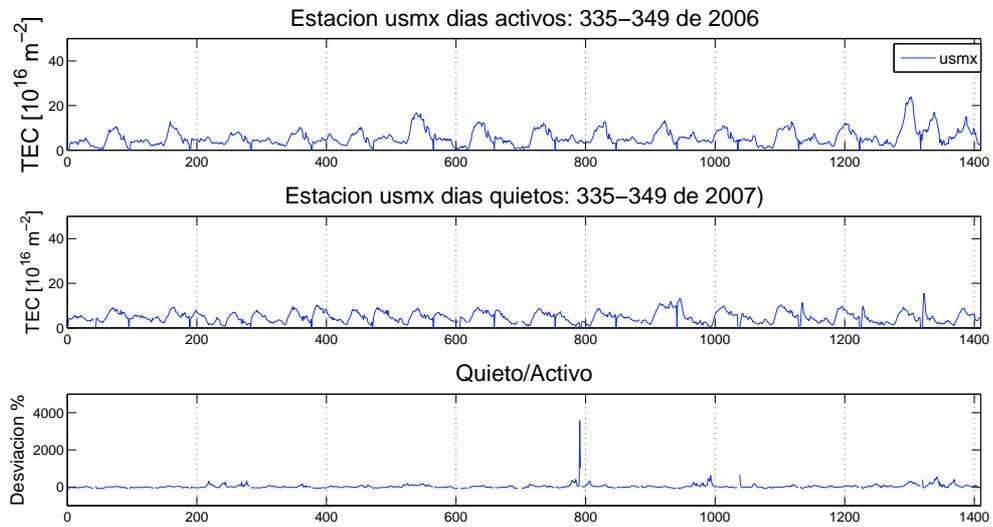


Figura 4.67: Comparación de los días del periodo de análisis (activos) contra mismos días del siguiente año (quietos).



## Capítulo 5

# Discusión de los Resultados

En esta tesis, se analizaron eventos solares de intensidad mayor o igual a 5X que ocurrieron durante el ciclo solar número 23; quedando fechas desde mediados del año 2000 hasta finales de 2006, con dichas características. La razón por la que se eligió esta intensidad como punto de partida del análisis, fue por considerarla como suficiente para perturbar la ionosfera. Además, el análisis también se limitó en tiempo al año 2000 en adelante, debido que el cálculo de TEC se realiza con datos de observación de GPS y, por lo tanto, sería muy complicado acceder a este tipo de datos en fechas anteriores al año 2000. El fin de este estudio, es ver si existe o no una influencia de eventos solares a medianas latitudes sobre la ionosfera (caso de México) y si es así, bajo que condiciones se puede presentar dicha perturbación. Para ello se consideraron un total de seis eventos solares (con una o más explosiones cada uno), con el fin de medir el grado de influencia sobre la ionosfera de nuestro país. En este capítulo se presenta a manera de discusión los resultados de nuestro análisis y en algunos casos una comparación de los mismos, con los resultados presentados por otros autores. Además, se hace una comparación del comportamiento del TEC sobre las estaciones GPS mexicanas con los índices geomagnéticos Ap y Dst con el fin de ver si existe o no una correlación. También, en el caso de las tormentas de Halloween y la de enero de 2005, se hizo una pequeña comparación del TEC con datos magnéticos provenientes del observatorio de Teoloyucan. La discusión de los resultados para cada uno de los eventos analizados se presentarán de manera individual, debido a que cada uno de ellos tiene características particulares que serán mejor analizadas por separado.

## 5.1. Tormenta 14 de julio 2000

La tormenta del 14 de julio del 2000 ha sido reportada por *Araujo-Pradere (2005)*, en donde presenta que los valores del TEC sobre la estación ccv3 (Cabo Cañaveral, Florida, latitud 28.46 N, longitud 279.45 E) alcanzaron un incremento del 250 % con respecto a días tranquilos. Además, presentó un máximo del Dst de -287.6 nT y máximo en el índice Ap igual a 400 nT.

En el análisis de datos de esta tesis, se puede apreciar que este evento tuvo una gran influencia en el comportamiento del TEC sobre estaciones mexicanas de GPS, observándose una mayor alteración sobre las estaciones huat, caya y popn; siendo la estación huat la que alcanzó el valor más alto de TEC, con 137.82 unidades (gráfica 4.7).

También se observa que en los días posteriores a la ráfaga, en las estaciones caya, huat y popn, se presentan picos en el comportamiento del TEC, debidos muy probablemente a la acción de la EMC que se presentó como parte de la tormenta solar. También, en dicha gráfica se puede ver que el periodo de análisis en sí no es lo que llamamos tranquilo (aprox. 20-30 uTEC) durante los días previos y posteriores al evento, ya que el promedio de los valores de TEC en las horas del lado día es de aproximadamente 60 unidades. Esto es debido posiblemente a que esta fecha se encuentra muy cerca del máximo solar.

En la gráfica 4.8 se aprecia que los valores máximos por día son de alrededor de entre una y dos sigmas en todo el periodo y, en los días posteriores al evento, los valores van de dos hasta cinco sigmas (caso de la estación huat).

La gráfica de desviación porcentual (4.9) se realizó sobre la estación caya, debido a la disponibilidad y calidad de los datos. En ella se puede apreciar que los valores alcanzados son por encima de 400 % del año del evento con respecto al siguiente año (2001).

A continuación se hace una comparación del comportamiento del TEC en cada una de las estaciones con respecto a los índices geomagnéticos Ap y Dst, durante todo el periodo de análisis, donde se muestra que hubo una fuerte relación entre el comportamiento de los tres valores en el día del evento en cuestión. Sin embargo, los días posteriores a él no existe ninguna alteración en el comportamiento del índice Ap, lo que sí ocurrió con el TEC durante el mismo tiempo que el Dst tardó en recuperarse (5.1).

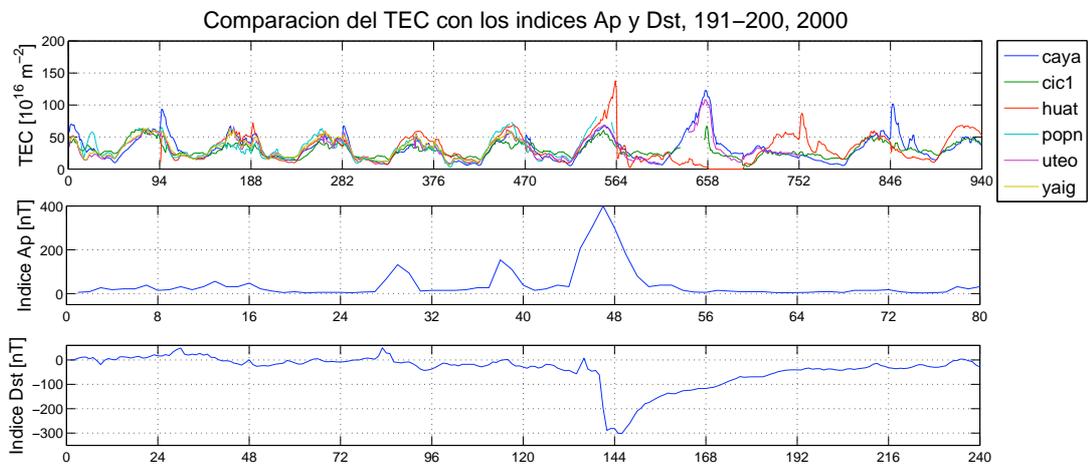


Figura 5.1: Comparación de los valores de TEC contra los índices geomagnéticos Ap y Dst, durante los días 191-200 del año 2000.

## 5.2. Tormentas 6 y 15 de abril 2001

En la gráfica 4.15 se ve que el periodo total de análisis es bastante activo ya que las unidades de TEC en el lado día son de alrededor de 100 y por lo tanto sólo en algunas estaciones (caya, cic1, yaig, pino y zihp) se puede apreciar una pequeña influencia de las tormentas solares sobre los valores de TEC, incluyendo una EMC que ocurrió el día 12 y que no está asociada a alguna ráfaga.

Estos altos valores de TEC inusuales que muestran un periodo de actividad bastante perturbado, también se puede apreciar en *Shagimuratov et al., (2003)*. Estos autores analizan un periodo previo a estos días, que va del día 18 de marzo al día 04 de abril, en donde se encuentran con dos tormentas magnéticas (días 19 y 31 de marzo). En ambas tormentas, el aumento en el conteo de TEC es de alrededor del 150 %. Por lo tanto, esta peculiaridad del periodo analizado se ve reflejado en los valores de desviación estándar (figura 4.17), los cuales van desde 0.5 hasta 3.5 sigmas, durante todo el periodo de análisis. La razón de esto es posiblemente debida a la alta actividad solar de esos días.

Finalmente, también se realizó una comparación de estos valores de TEC con los del índice geomagnético Ap y el índice Dst para el periodo en cuestión y en donde se puede apreciar que no existe una clara relación entre ambos comportamientos. Se observa que los índices geomagnéticos tienen una fuerte respuesta a la EMC del día 12 de abril, así como otros picos que no se ve claramente que estén relacionados con los eventos de los días 6 y 15 de abril (figura 5.2).

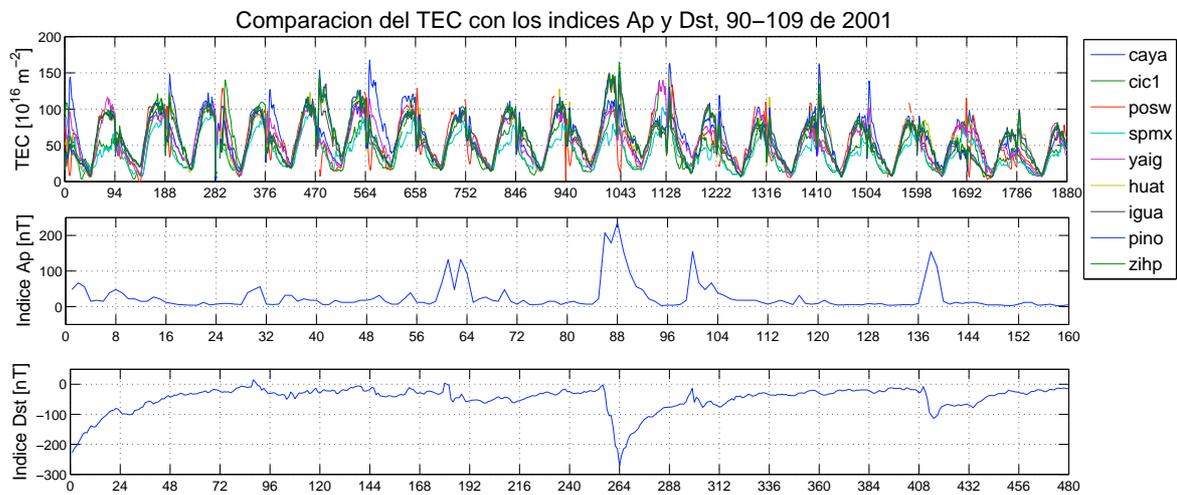


Figura 5.2: Comparación de los valores de TEC contra los índices geomagnéticos Ap y el índice Dst, durante los días 90-109 del año 2001.

### 5.3. Tormentas de Halloween 2003

Las tormentas de Halloween han sido unas de las que más importantes que han influenciado a la Tierra, presentándose grandes tormentas magnéticas, además de intensificación auroral (*Kane, 2009*). *Zhang y Xiao (2005)*, reportaron grandes incrementos en el comportamiento del TEC, el cual alcanza una elevación mayor al 300% en la concentración electrónica.

Esto mismo constatamos en nuestro análisis, de que ha sido el evento que más repercusiones a causado en nuestro país. Esto se observa claramente en la figura 4.26, en donde el día del 28 de octubre fue el mayormente afectado y en donde las estaciones de popn y yiag alcanzaron valores 393.57 y 345.42, respectivamente. Lo que significa que ésta tormenta solar en particular, puede ser una de las que mayor influencia ha tenido en las inmediaciones de la Tierra, logrando que se registren unos de los valores mas altos de TEC.

En la gráfica 4.27 se obtienen valores de entre 10 y 14 sigmas para las estaciones popn, yaig y cicl, que fueron las que presentaron valores mas altos de TEC durante la tormenta del día 28 de octubre de ese año. De la misma manera, en la gráfica 4.28 de la desviación porcentual, se observa cómo el comportamiento del TEC durante los días activos (302-308) es mucho mayor que los siete días previos (295-301), con los que se hace la comparación, ya que se alcanzan valores por encima de 4000%.

A continuación se hace una comparación de los valores de TEC en los 30 días de análisis en cada una de las estaciones con respecto al comportamiento del índice geomagnético Ap y el índice Dst (5.3) y en donde se puede apreciar una gran correlación del comportamiento de ambos valores, especialmente en los días 28 y 29 de octubre.

Se obtuvo una gráfica del comportamiento del campo magnético en el observatorio de Teoloyucan para el día 24 de octubre (figura 5.4), la cual se puede comparar con el comportamiento del TEC en ese día observado (figura 5.5). En dicha gráfica, se puede observar un ligero aumento en el contenido de electrones durante la tormenta magnética, lo que puede estar relacionado muy posiblemente a la ráfaga solar que se presentó el día 23 de octubre (5.4X).

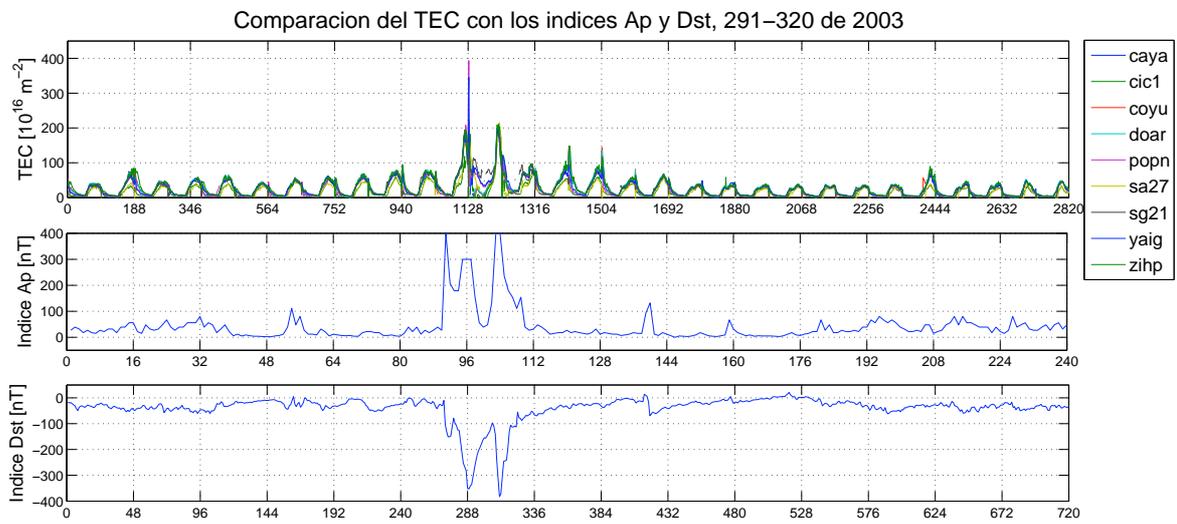


Figura 5.3: Comparación de los valores de TEC contra los índices geomagnéticos Ap y Dst, durante los días 291-320 del año 2003.

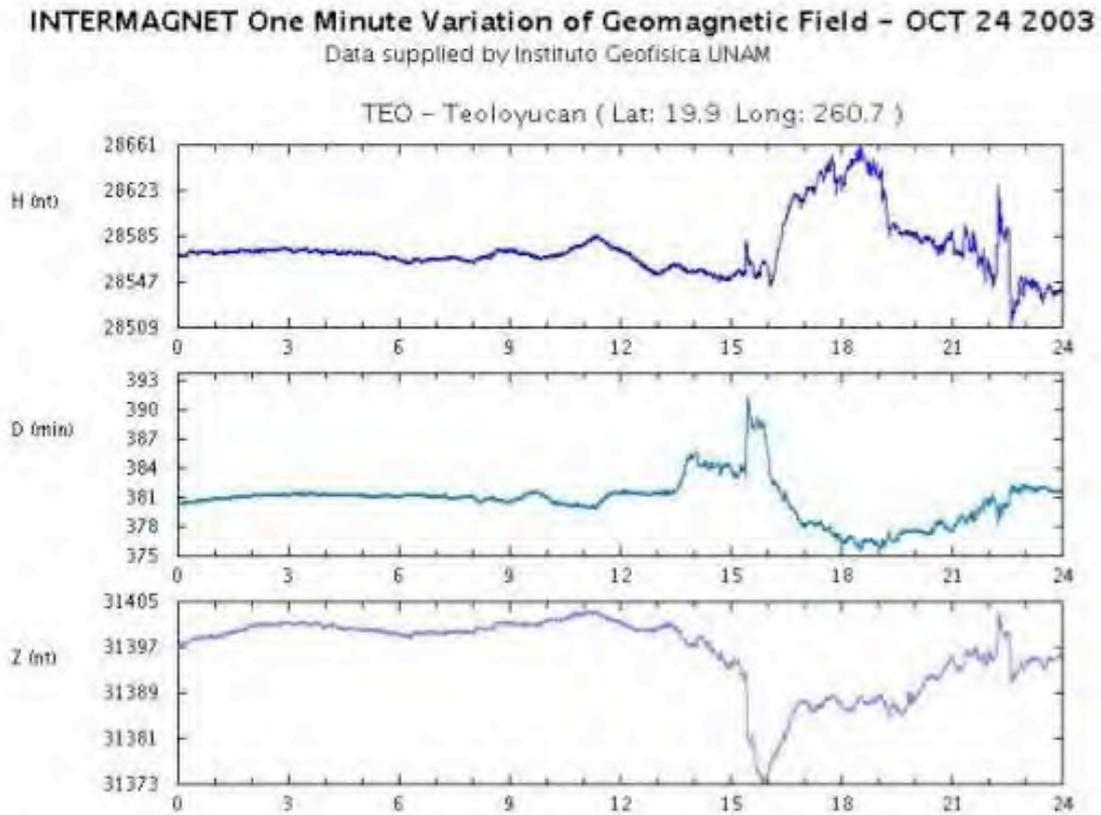


Figura 5.4: Comportamiento del campo magnético el día 24 de octubre del 2003, Observatorio de Teoloyucan.

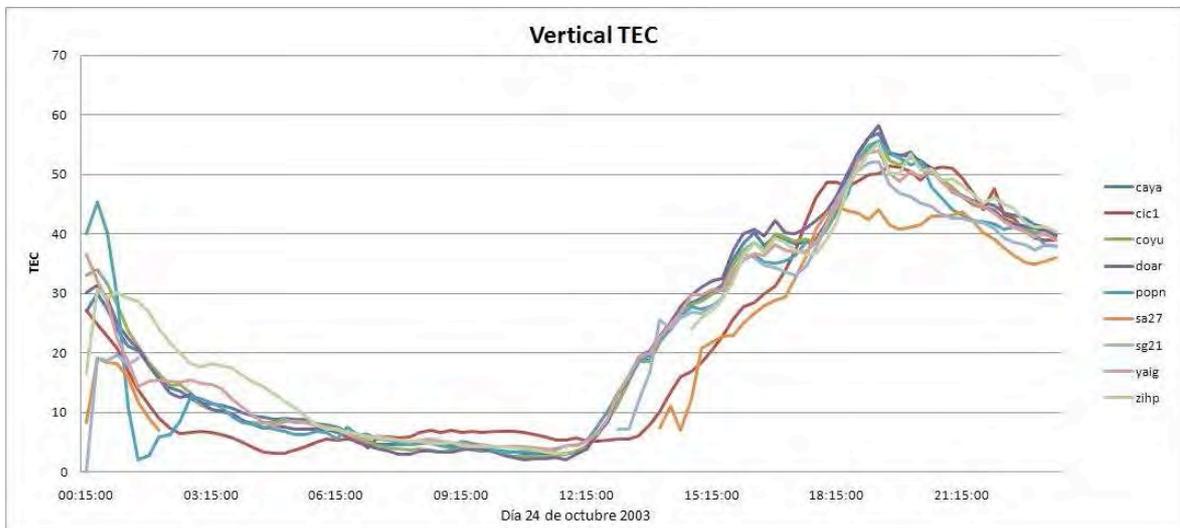


Figura 5.5: Comportamiento del TEC el día 24 de octubre del 2003, en cada una de las estaciones.

## 5.4. Tormenta 20 de enero 2005

Las peculiaridades de este evento son que dieron origen a un evento de partículas muy energéticas (GLE, o Ground Level Event), que se registran a nivel de suelo en monitores de neutrones (*Mavromichalaki et al., 2009*). Sin embargo, a pesar de su magnitud en rayos X (7.1), no pareció tener una gran repercusión en la ionosfera sobre México. En efecto, posterior al cálculo del TEC para estos días, se observó en los datos que sólo hubo una ligera influencia de esta tormenta sobre la ionosfera de México (figura 4.37), ya que los picos más altos que se presentan después del evento son de alrededor de 70 uTEC; lo que se debe muy posiblemente a que dicho evento ocurrió cuando en nuestro país nos encontrábamos alrededor de la media noche.

Sin embargo, en la estación sa33 se presenta un valor de TEC muy alto (263.15 UTec), que corresponde a los datos de un solo satélite. Ese valor no parece corresponder a la realidad pero no se ha podido explicar la observación (figura 4.37). En la figura 4.38 se puede apreciar un ligero aumento en los valores de Z después de la tormenta, que van desde 2 hasta 6 sigmas, lo cual no es despreciable.

En la figura 4.39 se muestra la desviación porcentual de los valores de TEC en la estación coyu para los días del periodo de análisis contra los mismos días pero del siguiente año (2006), de la misma estación. En esa figura se puede apreciar que un año después el periodo es significativamente más quieto por lo que se observan varios picos considerables en dicha gráfica.

En la figura 5.6 se observa que existe una correlación del comportamiento en los valores del TEC con los de los índices geomagnéticos Ap y Dst, para el evento del 20 de enero. Sin embargo, también se observa que existe un aumento en ambos valores el día 15 de enero, lo que debe estar relacionado muy posiblemente a una EMC que apareció ese día.

Finalmente, en la gráfica 5.7 se presenta el comportamiento del campo magnético en el observatorio de Teoloyucan para el periodo del 01 al 19 de enero de 2005, en donde se pueden ver variaciones posiblemente relacionadas a las tormentas solares que se presentaron en varios días consecutivos de ese mes (ver sección 4.4).

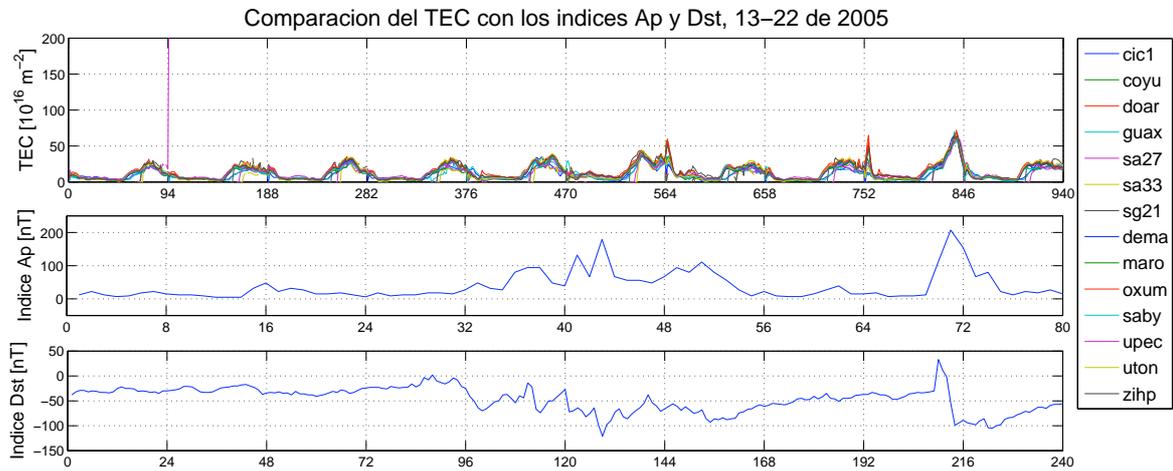


Figura 5.6: Comparación de los valores de TEC contra los índices geomagnéticos Ap y Dst, durante los días 13-22 del año 2005.



Figura 5.7: Comportamiento del campo magnético en los días del 01 al 19 de enero del 2005, Observatorio de Teoloyucan.

## 5.5. Tormentas del 7, 8 y 9 de septiembre 2005

Durante todo el periodo analizado la mayor influencia en el valor de TEC se presenta en las estaciones cpdp y doar, además de que el pico máximo de este periodo alcanza un valor aproximado de 55 uTEC (ver figura 4.52), que aunque no son valores muy altos son los mas significativos de este periodo. Sin embargo, estas tormentas no influyeron considerablemente en el comportamiento de la ionosfera sobre México, lo cual es muy posible que se deba a la ubicación de las ráfagas, a pasar de que ocurrieron en una hora adecuada para su observación nuestro país.

En la misma figura se aprecia que el único pico considerable se dio después de la tormenta del día 9 de septiembre, lo cual está posiblemente influenciado porque fue la única de las tres ráfagas que estuvo acompañada de una EMC.

En la figura 4.53 se aprecia que los valores de Z después del evento del 9 de septiembre son de 3 a 6 sigmas. También se observa un pequeño aumento el día 2 de septiembre con sigmas de entre 2 y 4, muy posiblemente asociado a las EMCs ocurridas entre los días 31 de agosto y 2 de septiembre (ver catálogo Halo).

Debido al comportamiento antes mencionado, en el análisis de días activos contra quietos, se observa claramente el mismo comportamiento que la figura de los valores de amplitud de la variación (ver figura 4.53); es decir, un pico en los días 2 y 9 de septiembre. También se aprecia que el resto de los días comparados se comporta relativamente iguales, por lo que se puede decir que posiblemente se esté observando la influencia estacional sobre los valores de TEC.

Finalmente, se realiza una comparación del comportamiento del TEC en este periodo de tiempo con respecto a los índices geomagnéticos Ap y Dst, el cual se muestra en la figura 5.8. En ésta figura se aprecia que las dos pequeñas subidas en los valores de TEC también se presentan en los índices Ap y Dst, en éstos últimos valores considerables de alrededor de 150 nT y -150 nT, respectivamente.

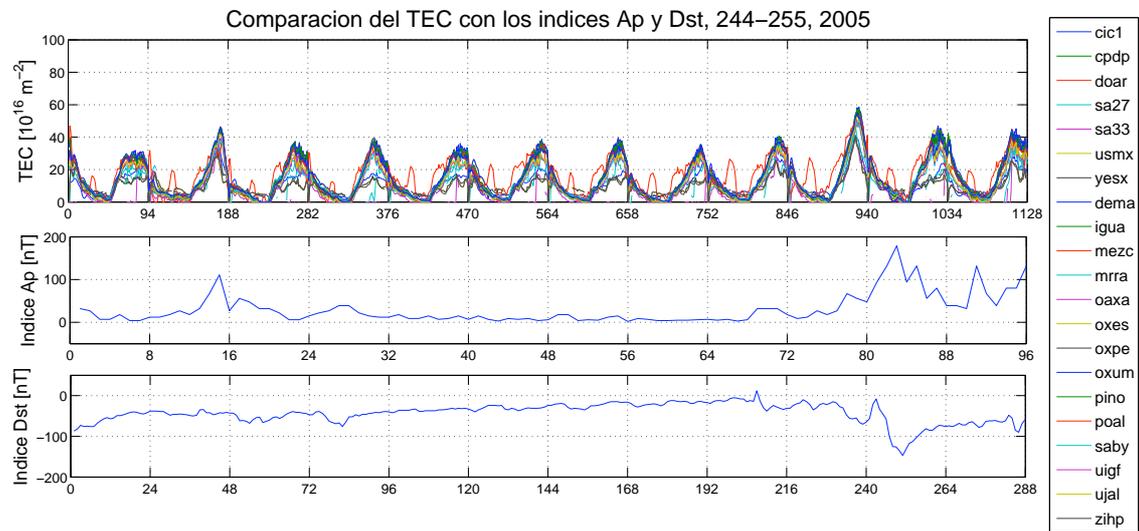


Figura 5.8: Comparación de los valores de TEC contra los índices geomagnéticos Ap y Dst, durante los días 244-255 del año 2005.

## 5.6. Tormentas del 5 y 6 de diciembre 2006

Después de la obtención del TEC para el periodo, se observa que es bastante tranquilo en su comportamiento y, curiosamente, el único pico que se observa en las gráficas se encuentra en el día en que ocurrió una ráfaga de intensidad 3.4X (13 de diciembre). Debido a que la intensidad fue menor a 5X no se consideró en los eventos que se tomaron en cuenta para analizar en estas tormentas (ver figura 4.65). Sin embargo, la ráfaga del 13 de diciembre quedó dentro del periodo de análisis escogido, para la cual se obtuvieron valores de TEC, en algunas estaciones, con máximos de 40 a 65 unidades, aproximadamente. Aunque estos valores no resultan muy importantes, sí son los únicos significativos del periodo de análisis.

Los resultados obtenidos, se deben posiblemente a la ubicación de las tormentas del 5 y 6 de diciembre (ver tabla 4.1), aunque por la hora en que sucedieron debieron haber causado alguna perturbación. La afectación debida a la tormenta del día 13 se puede relacionar con que en ese día ocurrió una EMC, mientras que alrededor de las tormentas de los días 5 y 6 no hubo tal.

En la figura 4.66 de los valores de  $Z$ , se observa que el aumento más considerable en los valores son para los ocurridos después del evento del día 13 de diciembre, los cuales van desde 3 hasta 5.5 sigmas.

Se observa en la figura 4.67, que como los periodos en sí son bastantes tranquilos y similares, la comparación de días activos contra días quietos da valores de desviación porcentual muy bajos. Sin embargo, se dio un único pico considerable que se debe a que los valores de TEC durante esos días del periodo de 2007, son mucho mas bajos que los mismos días pero de 2006.

De igual manera, se realizó una comparación de los valores de TEC de todas las estaciones analizadas con respectos a los índices geomagnéticos Ap y Dst, en la que se puede apreciar que de la misma forma que el contenido de electrones, éstos índices sólo se vieron afectados considerablemente por la ráfaga del día 13 de diciembre (através de su EMC) y que las dos ráfagas del periodo de análisis, posiblemente sólo causaron una ligeras anomalías en los índices geomagnéticos, más no así en el TEC (figura 5.9).

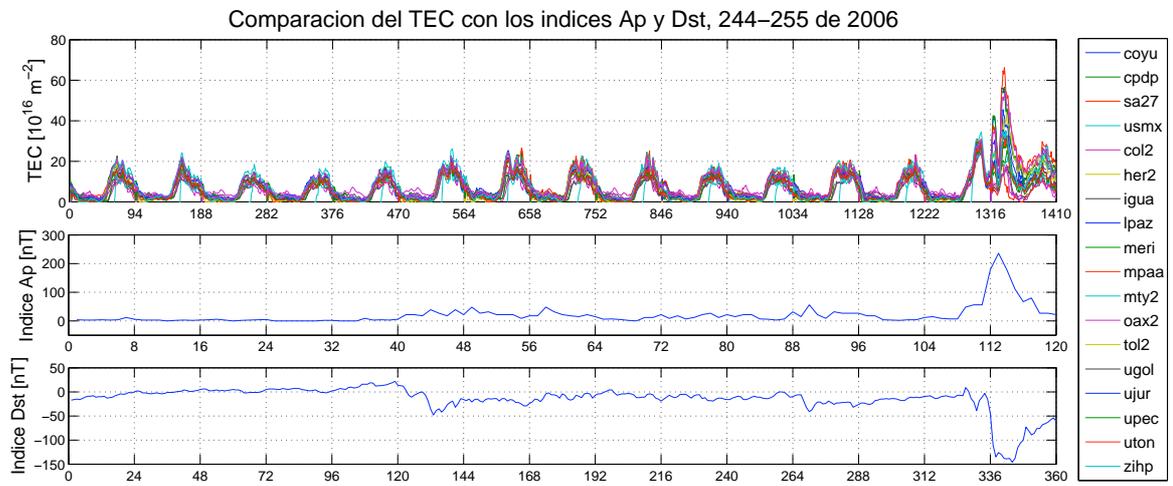


Figura 5.9: Comparación de los valores de TEC contra los índices geomagnéticos Ap y Dst, durante los días 335-349 del año 2006.



# Capítulo 6

## Conclusiones

En esta tesis se ha estudiado el impacto de eventos solares sobre la ionosfera de México. Esto se ha realizado calculando el TEC de varias estaciones mexicanas durante dichos eventos. Como es claro de diversos estudios sobre el tema, los eventos llamados de "Halloween" son, con mucho, de los más importantes que se han analizado. Primero, porque ocurrieron hace relativamente poco tiempo con lo que la cobertura de datos ha sido muy amplia y, segundo, porque los eventos fueron varios y de gran magnitud. Por ello, y debido a mi interés en estudiar el posible impacto sobre nuestra ionosfera, para esta tesis consideré eventos en los que la radiación electromagnética fuera importante, es decir eventos intensos en rayos X, en particular mayores o iguales a 5. Esto por considerar que eventos de menor magnitud no tendrían consecuencias detectables a latitudes medias (magnéticamente) como la de México.

Debido a que el sistema GPS es relativamente nuevo, me tuve que concentrar en periodos recientes (máximo y finales del ciclo 23). Concretamente, se consideraron datos de 2000 a la fecha. Así mismo, debido a la poca actividad reciente, el último evento analizado fue el de diciembre de 2006. Por otro lado, considerando que la disponibilidad de datos en nuestro país es muy limitada (tanto por el número de estaciones como por la disponibilidad de los datos) algunos eventos fueron analizados con muy pocas estaciones. En efecto, la mayoría de los datos de GPS son prácticamente de uso privado, lo que limita mucho nuestro trabajo y nos hace dependientes de terceras personas. Yo considero que esta es una problemática que debe atacarse para poder realizar en un futuro estudios a más detalle y en tiempo real sobre México.

Dejando atrás el problema de la disponibilidad de datos, el cálculo del TEC tiene su propia limitante. Se trata de que este cálculo se realizó de manera manual para cada estación de estudio y por día, lo cual implica una gran inversión de tiempo, ya que además de revisar cada archivo diario por estación, había que editar los archivos

generados para corregir huecos en los datos.

A continuación se establecen las conclusiones que yo considero más relevantes:

1. En general, se considera que el clima espacial es un conjunto de sucesos que ocurren solamente a altas latitudes. Sin embargo, a partir de este estudio se puede concluir que existe una influencia considerable de las tormentas solares sobre el comportamiento de la concentración de electrones en la ionosfera a latitudes medias como México. Por lo tanto, es de vital importancia que este tipo de estudio se siga realizando de manera constante y con mayor detalle.
2. Para algunos eventos como los de abril de 2001, que ocurren durante el máximo de actividad solar, la ionosfera está altamente alterada. Sin embargo, en algunas estaciones el incremento del TEC es claramente visible.
3. A pesar de que para algunos de los eventos analizados, los índices Ap y Dst no muestra una tormenta geomagnética clara, la variación observada en TEC es apreciable. En efecto, para los eventos del 14 julio de 2000 y los de abril de 2001 la variación alcanza valores de más de 4 sigmas. Una posible interpretación de esto es que la radiación electromagnética puede estar involucrada en la anomalía ionosférica.
4. Es de gran importancia destacar que en el análisis de las tormentas de diciembre del 2006, dentro del periodo de estudio quedó incluida una ráfaga de magnitud 3.4X la cual, al ir acompañada de una eyección de masa coronal, fue causante de aumentos apreciables en los valores máximos diarios que van de casi tres sigmas hasta más de cinco (ver figura 4.66). Es decir que al parecer aún eventos relativamente pequeños pero que van acompañados de una EMC, pueden producir efectos en la ionosfera a latitudes medias. Por tanto, eventos de este tipo deberían monitorearse con mayor detalle.
5. Es también claro que aun ráfagas intensas, bien localizadas en el disco del Sol y que tiene lugar a una hora adecuada, pero que no vienen acompañadas de EMC, no siempre producen efectos apreciables en la ionosfera. Este es el caso de los eventos de diciembre de 2006, con magnitudes de 9X y 6.5X, que tuvieron lugar a las 10:18 y 18:29, respectivamente, los cuales no produjeron ni tormenta geomagnética ni ionosférica.
6. En algunos de los eventos (julio del 2000, abril 2001 y Halloween, 2003) los valores máximos de TEC alcanzados no ocurrieron en las estaciones del norte del país,

sino en el centro y sur de México, lo cual es muy importante mencionar ya que corrobora aun más la importancia de estudiar la ionosfera a latitudes medias.

Finalmente, es necesario destacar que en relación con estudios de la ionosfera sobre México quedan muchas cosas por hacer. A final de cuentas, la meta final es que exista un monitoreo constante de su comportamiento, el cual se pueda realizar en tiempo real, tal como se hace en el caso del estado de tiempo meteorológico. Sin embargo, para lograr dicho fin es necesario tener una infraestructura de estaciones GPS lo suficientemente densa (además de una distribución espacial equitativa sobre el territorio) para formar una red nacional de estaciones, que se pueda integrar a redes mundiales existentes, con una distribución de datos disponibles de manera libre para su utilización por cualquier persona interesada. Dicha integración permitiría a la comunidad de investigación en México no sólo realizar estudios en tiempo real del clima espacial, sino también estudios de tectónica y de la atmósfera.



# Bibliografía

- [1] Afraimovich, E.L., et al., 2008. Global electron content: a new conception to track solar activity. *Annales Geophysicae*, 26, 335-344.
- [2] Anderson, D., and Fuller-Rowell, T., 1999. The ionosphere. *Space Environment Topics*, Boulder CO.
- [3] Appleton, E. V. and Barnett, M. A .F., 1925. Local reflection of wireless waves from the upper atmosphere. *Nature*, 115, 333.
- [4] 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.
- [5] Arikan, F., et al., 2003. Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data. *Journal of Geophysical Research Space Physics* , 108(A12), 1469.
- [6] Ashby, N., 2002. Relativity and the global positioning system. *Physics today*, 41-47.
- [7] Bishop, G., et al., 2009. GPS TEC and the plasmasphere: Some observations and uncertainties. *Radio Science*, 44, RS0A26.
- [8] Blagoveshchensky, D.V., et al., 2005. Observations by the CUTLASS radar, HF Doppler, oblique ionospheric sounding, and TEC from GPS during a magnetic storm. *Annales Geophysicae*, 23, 1697-1709.
- [9] Blewitt, G., 1998. *GPS Data Processing Methodology*, Springer - Verlag.
- [10] Breit, G. and Tuve, M. A., 1925. A radio method os estimating the height of the conducting layer. *Nature*, 116, 357.

- 
- [11] Canfield, R. C., et al., 1999. Sigmoidal Morphology and Eruptive Solar Activity. *Geophysical Research Letters*, 26, 6, 627-630.
- [12] Ciruolo, L., et al., 2007. Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS. *Journal of Geodesy*, 81(2), 111-120.
- [13] Eftaxiadis, K., et al., 1999. A Global Positioning System Receiver for Monitoring Ionospheric Total Electron Content. Defence Science and Technology Organisation. DSTO-TR-0742.
- [14] Enge, P., 2004. Retooling the Global Positioning System. *Scientific American*, 90-97.
- [15] Erickson, W. et al., 2001. Ionospheric corrections for VLA observations using Local GPS data. *Astronomy and Astrophysics*, 366, 1071-1080.
- [16] Fabian, P., et al., 1979. The August 1972 solar proton event and the atmospheric ozone layer. *Nature* 277, 458-460.
- [17] Gonzalez, W.D. et al., What is a Geomagnetic Storm?. *Journal of Geophysical Research*, 99(A4), 5771-5792.
- [18] Gurtner, W., 2001. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.10. Astronomical Institute, University of Berne.
- [19] Hirari, M., et al., 1998. Computerized Ionospheric Tomography using GPS data. 363-364.
- [20] Kaplan E. and Hegarty C., 2005. *Understanding GPS: Principles and Applications*. Artech House.
- [21] Lai, S. T., et al., 2000. Space Weather. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 28, 6.
- [22] Lara, A., et al., 2006, Are Halo CMEs special events?. *Journal of Geophysical Research*, 111 (A6).
- [23] Lei, J. et al., 2008. Ionosphere response to solar wind high-speed streams. Available at: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2008/2008GL035208.shtml> [Accessed August 26, 2009].

- [24] Lyatsky, W. and Tan, A., 2005. A Statistical Study of IMF Bz Generation in the Solar Wind. AGU Spring Meeting Abstracts, 41, 08.
- [25] Lyatsky, W., et al., 2003. Effect of Sun's magnetic field polarity on interplanetary magnetic field Bz. *Geophysical Research Letters*, 30, 1.
- [26] Mavromichalaki, H., et al. 2009. Solar Particle Event Analysis using the ESA Standard Radiation Environment Monitor and the Worldwide Neutron Monitor Network, Proceedings of the 31 st ICRC, LODZ.
- [27] Mendillo, M., 2006. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. Available at: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2006/2005RG000193.shtml> [Accessed September 22, 2009].
- [28] Minarovjeh, M., et al., 2004. An approach to space weather studies from ground based observations. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnat Pleso*, 34(3), 197-203.
- [29] Moussas, X., 1980. Particle trapping and acceleration during the August 1972 event. *Solar Physics*, 67(1), 163-180.
- [30] Muir, H., 1996. Watch out, here comes the Sun. *New Scientist*, 25.
- [31] Nicolet, M., 1984. Historical aspects of the IGY, in *History of Geophysics*, ed. by C. S. Gillmor, American Geophysical Union
- [32] Parkinson, M. L., et al., 2007. Solar Cycle Changes in the Geo-effectiveness of Small-scale Solar Wind Turbulence Measured by Wind and ACE at 1 AU. *Annales Geophysicae*, 25, 1138-1197.
- [33] Patel, V.L. and Desai, U.D., 1973. Interplanetary Magnetic Field and Geomagnetic DST Variations. *Astrophysics and Space Science*, 20, 431-437.
- [34] Peter, H.D, 2000. Global Positioning System Overview, The Geographer's Craft Project, Department of Geography, The University of Colorado at Boulder.
- [35] Ratcliffe, J. A. and Ashworth, J., 1972. An introduction to the ionosphere and magnetosphere, University Press.
- [36] Ratcliffe, J. A., 1967. The ionosphere and the engineer. *Institution of Electrical Engineers (London)*, 114, 1.

- [37] Rishbeth, H., 1998. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer. *Journal of atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 60, 1385-1402.
- [38] Rodger, A. and M., Jarvis, 2000. Ionospheric research 50 years ago, today and tomorrow. *Journal of atmospheric and solar terrestrial physics*, 62, 1629-1645.
- [39] Rothkaehl1, A., et al., 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.
- [40] Ruffini, G., et al., 1998. GPS tomography of the ionospheric electron content with a correlation functional. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 36(1), 143-153.
- [41] Sardón, E., et al., 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.
- [42] Shagimuratov, I.I., et al., 2003. Storm-Time Structure and Dynamics of the Ionosphere obtained from GPS observations. Report 23 of the Fifth Antarctic Geodesy Symposium Lviv, Ukraine.
- [43] Shishov, V. et al., 2008. Monitoring of interplanetary and ionospheric scintillation of an ensemble of radio sources. *Solar System Research*, 42(4), 341-350.
- [44] Silberstein, R., 1959. The prigin of the current nomenclature for the ionospheric layers. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.*, 13, 382.
- [45] Solera, A., 2003. El filtro de Kalman. Nota tecnica, División de Investigaciones Económicas, Banco Central de Costa Rica.
- [46] SpaceWeather.com. What's Up in Space, 4 Nov 2003.
- [47] Stankov, S.M. et al., 2003. A new method for reconstruction of the vertical electron density distribution in the upper ionosphere and plasmasphere. *Journal of Geophysical Research Space Physics* , 108(A5), 1164.
- [48] Taylor, J. E., 1903. Characteristics of electric earth-current disturbances, and their origin. *Proceedings of the Physical Society (London)*, LXXI, 225.
- [49] Tsurutani, B. T., et al., 2009. A brief review of solar flare effects on the ionosphere. *Radio Science*, 44.

- 
- [50] Van Allen, J. A., 1984. Genesis of the International Geophysical Year, in History of Geophysics, ed. C. S. Gillmor, American Geophysical Union, 4, 49.
- [51] Villard, O. G., 1976. The ionospheric sounder and its place in the history of radio science, *Radio Science*. 11, 847.
- [52] Watson-Watt, R. A., 1929. Weather and wireless. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 55, 273.
- [53] Welch, G. and Bishop, G., 2006. An introduction to the Kalman filter. University of North Carolina at Chapel Hill.
- [54] Zhang, J. et al., 2003. Identification of solar sources of major geomagnetic storms between 1996 and 2000. *Astrophysical Journal*, 582(1I), 520-533.
- [55] Zou, Y. and Wang, D., 2009. A study of GPS ionospheric scintillations observed at Guilin. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 71(17-18), 1948-1958.
- [56] Zou et al., 2000. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer. I. Modelling. *Annales Geophysicae*. 18, 8, 927-944.