



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA

CIENCIAS ATMOSFÉRICAS, ESPACIALES Y PLANETARIAS

**VELOCIDAD DE RESPUESTA DE LA IONÓSFERA ANTE LA PRESENCIA DE
TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS DEL CICLO SOLAR 24**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

ARIANA VARELA MENDEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. MARIO RODRÍGUEZ MARTÍNEZ

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA

COMITÉ TUTOR:

DR. ERNESTO AGUILAR RODRÍGUEZ

INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNIDAD MORELIA

DRA. ESMERALDA ROMERO HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

ESTADOS UNIDOS MEXICANOS

MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO. ENERO DE 2024



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

Resumen	I
Abstract	III
Dedicatoria	V
Agradecimientos	VII
1. Antecedentes	2
1.1. Introducción	2
1.2. Conceptos básicos	3
1.2.1. Ionósfera	3
1.2.2. TEC	4
1.2.3. GNSS	4
1.2.4. Formato RINEX	5
1.2.5. Relación Sol-Tierra	6
1.2.6. Viento Solar	7
1.2.7. Regiones de interacción entre corrientes (RIC)	8
1.2.8. Eyecciones de Masa Coronal (EMCs)	8
1.2.9. TG	9
1.2.10. Tormenta ionosférica (TI)	12
1.2.11. Burbujas de plasma ionosférico	12
1.3. Motivación del trabajo	13
1.4. Objetivos	13
1.5. Justificación	13
2. Índices geomagnéticos y ionosféricos	16
2.1. Índices geomagnéticos	16
2.1.1. Índice Dst	16
2.1.2. Índice SYM-H	18
2.1.3. Índice K	18
2.1.4. Índice Kmex	19
2.2. Índices ionosféricos	19
2.2.1. Índice W	19
2.2.2. Delta	20
2.2.3. ROTI	20

3. Procesamiento de datos	23
3.1. Ciclo solar 24	23
3.2. TGs intensas del ciclo solar 24	24
3.3. Parámetros del viento solar e índices geomagnéticos	30
3.3.1. TG del 08 de marzo del 2012 (invierno)	30
3.3.2. TG del 24 de abril del 2012 (primavera)	31
3.3.3. TG del 14 de julio del 2012 (primavera)	31
3.3.4. TG del 17 de marzo del 2015 (invierno)	31
3.3.5. TG del 21 de junio del 2015 (verano)	32
3.3.6. TG del 19 de diciembre del 2015 (otoño)	32
3.3.7. TG del 18 de enero del 2016 (invierno)	32
3.3.8. TG del 13 de octubre del 2016 (otoño)	32
3.3.9. TG del 27 de mayo del 2017 (verano)	33
3.3.10. TG del 07 de septiembre del 2017 (verano)	33
3.3.11. TG del 25 de agosto del 2018 (verano)	33
3.4. Red GPS	35
3.5. GPS-TEC desarrollado por el Dr. Gopi Seemala	39
3.6. Tec-suite	40
3.7. TayAbsTec	41
4. Análisis y Resultados	46
4.1. TEC	46
4.1.1. Comportamiento del vTEC durante la TG del 8 de marzo de 2012 . .	46
4.1.2. Comportamiento del vTEC durante la TG del 23 de abril de 2012 . .	49
4.1.3. Comportamiento del vTEC durante la TG del 14 de julio de 2012 . .	51
4.1.4. Comportamiento del vTEC durante la TG del 14 de julio de 2012 . .	53
4.1.5. Comportamiento del vTEC durante la TG del 17 de marzo de 2015 .	55
4.1.6. Comportamiento del vTEC durante la TG del 21 de junio de 2015 . .	57
4.1.7. Comportamiento del vTEC durante la TG del 19 de diciembre de 2015	59
4.1.8. Comportamiento del vTEC durante la TG del 18 de enero de 2016 . .	60
4.1.9. Comportamiento del vTEC durante la TG del 13 de octubre de 2016	62
4.1.10. Comportamiento del vTEC durante la TG del 27 de mayo de 2017 . .	63
4.1.11. Comportamiento del vTEC durante la TG del 7 de septiembre de 2017	64
4.1.12. Comportamiento del vTEC durante la TG del 25 de agosto de 2018 .	65
4.1.13. Resumen Sección 4.1	66
4.2. Correlación entre Índices ionosféricos-Índice Dst	66
4.2.1. TG del 8 de marzo de 2012	67
4.2.2. TG del 23 de abril de 2012	69
4.2.3. TG del 14 de julio de 2012	71
4.2.4. TG del 17 de marzo de 2015	73
4.2.5. TG del 21 de junio de 2015	76
4.2.6. TG del 19 de diciembre de 2015	78
4.2.7. TG del 18 de enero de 2016	80
4.2.8. TG del 13 de octubre de 2016	82
4.2.9. TG del 27 de mayo de 2017	85
4.2.10. TG del 07 de septiembre de 2017	87

4.2.11. TG del 25 de agosto de 2018	89
4.3. Cálculo de la energía inyectada durante el SSC	91
4.3.1. Regresión polinomial	91
4.3.2. Parámetro ϵ	96
4.3.3. Integración numérica	96
4.4. Correlación entre los índices ionosféricos y el cálculo de la energía inyectada durante el SSC a partir del índice geomagnético Dst	96
5. Conclusiones	102
5.1. Recomendaciones y trabajo futuro	106
Referencias y Bibliografía	107
Apéndice A	121
Gráficas obtenidas con los softwares Tec-suite y TayAbsTec	121
Apéndice B	125
Comparación entre los cálculos obtenidos por los softwares GPS-TEC desarrollado por el doctor Gopi Seemala y TayAbsTec	125

Resumen

En este trabajo se presenta el análisis realizado para estudiar la respuesta de la ionósfera, en términos de las variaciones del vertical Total Electron Content (vTEC por sus siglas en inglés) y cálculos de algunos índices ionosféricos (W , Δ y ROTI), para distintas estaciones de Global Position System (GPS por sus siglas en inglés) sobre el territorio mexicano, durante eventos solares que dieron origen a tormentas geomagnéticas (TGs) intensas del ciclo solar 24, las cuales se analizaron de acuerdo con la estación del año en la que se presentaron.

Con base en los alcances de este estudio se llevó a cabo la evaluación de la respuesta de la ionósfera, relacionando y proponiendo un método para calcular la entrada de energía durante el inicio repentino de una TG(SSC, por sus siglas en inglés) y se buscó dicha relación con los distintos índices ionosféricos antes mencionados.

Para este análisis se utilizaron diversas herramientas estadísticas, como los softwares GPS-TEC, Tec-suite y TayAbsTec, datos de observación y navegación RINEX, además de los índices geomagnéticos Dst, SYM-H y Kmex, los cuales son usados tradicionalmente para estudiar TGs, en donde se registró una correlación entre éstos.

A partir de este estudio se encontró una correlación entre las TGs intensas y el comportamiento del vTEC detectado a diferentes latitudes analizado por los softwares mencionado anteriormente, se pudo observar un mayor incremento del vTEC asociado a cada tormenta geomagnética (TG) estudiada en este trabajo en la parte sur y oeste del territorio mexicano, y una menor respuesta en la parte norte de México.

Así mismo, se observó una relación entre el momento del ciclo solar en el que se produce la TG y el comportamiento del vTEC, ya que al encontrarse en la fase mínima del ciclo solar 24, la variación del vTEC fue mínima, encontrándose valores no mayores a 45 TECU para las estaciones GPS estudiadas.

Palabras Clave: Tormenta geomagnética intensa, contenido total de electrones, índices ionosféricos, energía.

Abstract

This work presents the analysis carried out to study the response of the ionosphere, in terms of $vTEC$ variations and calculations of some ionospheric indices (W , Δ and ROTI), for different GPS stations over Mexican territory, during solar events that gave rise to intense geomagnetic storms of solar cycle 24, which were analyzed according to the season of the year in which they were presented.

Based on the scope in this study, the evaluation of the response of the ionosphere was conducted relating and proposing a method to calculate the energy injected during the Sudden Storm Commencement (SSC) and the relationship with the different ionospheric indices aforementioned.

For this analysis, several statistical tools were used, such as GPS software, TEC, Tec-suite and TayAbsTec, RINEX observation and navigation data, in addition to the geomagnetic indices Dst, SYM-H and Kmex, which are traditionally used to study geomagnetic storms, where a correlation between these was recorded.

From this study, a correlation was found between intense geomagnetic storms and the behavior of the $vTEC$ detected at different latitudes analyzed by the GPS-TEC, Tec-suite and TayAbsTec software, a greater increase in the $vTEC$ associated with each geomagnetic storm studied in this work in the southern part and western Mexican territory, and a lower response in the northern part of Mexico.

Likewise, a relationship was observed between the moment of the solar cycle in which the geomagnetic storm and the behavior of the $vTEC$, since being in the phase minimum of solar cycle 24, the variation of the TEC was minimal, finding values of the TEC no greater than 45 TECU for the GPS stations studied.

Key words: Intense geomagnetic storm, total electron content, ionospheric indices, energy.

Dedicatoria

Por ser mi luz en los momentos oscuros, mi motivación en la fatiga y mi eterna fuente de amor. Este logro también es tuyo...

Gracias por todo, mamá.

Agradecimientos

Agradecimientos institucionales

A la Universidad Nacional Autónoma de México, así como al Posgrado en Ciencias de la Tierra, por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de desarrollar este trabajo de investigación.

A CONAHCyT por la beca de maestría otorgada.

A la DGAPA-UNAM, en particular al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) que por medio del proyecto IN115423: Estudio del comienzo repentino (SC) en el índice Dst y la velocidad de respuesta del comportamiento del vTEC ionosférico ante tormentas geomagnéticas intensas del ciclo solar 24, que me otorgó una beca para la obtención de grado.

Al repositorio TLALOCNet (Cabral-Cano et al., 2018) del Servicio de Geodesia Satelital en colaboración con UNAVCO Inc. por los datos RINEX prestados para el análisis ionosférico realizado en esta investigación.

A los trabajos de investigación Seemala. (2012), Yasyukevich et al. (2015), Mylnikova et al. (2015), y Yasyukevich et al. (2015), que permitieron el desarrollo de los softwares GPS-TEC, Tec-suite y TayAbsTec utilizados en este trabajo.

A la Red de Estaciones Geomagnéticas de México (REGMEX) del Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE), por los datos del índice geomagnético Kmex.

Al Laboratorio de Ciencias Geoespaciales por brindarme la infraestructura en computo para el desarrollo de este trabajo.

Agradecimientos académicos

A mi asesor el Dr. Mario Rodríguez, por su guía, tiempo y apoyo durante el desarrollo de este proyecto de tesis. Por permitirme ser parte del Observatorio solar y del Laboratorio de Ciencias Geoespaciales.

A la Dra. Esmeralda Romero y al Dr. Ernesto, por ser parte del comité evaluador, por

sus recomendaciones, consejos y experiencia compartida a lo largo del desarrollo de esta tesis.

A mis sinodales: Dr. Miguel Herraiz, Dr. José Juan y a la Dra. Elsa Sánchez, por su tiempo, consejos y recomendaciones en la revisión de mi trabajo de investigación.

A mis profesores: Dra. Maria Seergeva, Dr. Pedro Corona, Dr. Julio Mejía y al Dr. Juan Américo González, por su paciencia, orientación y conocimientos.

A la Srta. Araceli Chaman y a la Mtra. Janette Huante, por su amabilidad, tiempo y apoyo en todos los procesos administrativos.

Agradecimientos personales

A mi mamá, no hay palabras para agradecer todo lo que has hecho por mí. He llegado hasta aquí gracias a ti, a tu amor y tu esfuerzo. Por no dejarme caer, por ayudarme a recuperar mi confianza, por creer en mí. Te amo mamá.

A papá, tu ausencia física duele, pero sé que estás presente en cada palabra y pagina de este trabajo. Todo lo que me enseñaste me ha guiado hasta aquí.

A Jair, tu amor y confianza me motivan siempre a esforzarme y ser mejor, a no tener miedo, a ser fuerte. Y cuando todo se pone oscuro, tu sonrisa ilumina y alegra tanto mi vida. Gracias por estar a mi lado y hacerme tan feliz.

A mi hermana Lala, por siempre cuidar de mí, por escucharme y saber cómo estoy.

A mis sobrinos Chris, Lalo y Beto, mi esfuerzo y trabajo son para poder ser un buen ejemplo para ustedes, para motivarlos. "El mundo es un lugar que se desentiende. Empéñate en salir adelante. Ésa es tu misión en este mundo difícil, mantener vivo tu amor y salir adelante, no importa lo que pase. Rehacerse y seguir, nada más".

A mi hermano Raúl y su familia, por su apoyo incondicional y fe en mí.

A Lore, Anita y Felipe, a pesar de los años y la lejanía, su amistad y ánimos me ayudaron a superar esta nueva etapa. Igual que antes, ¡qué suerte haber encontrado personas como ustedes!

A Amador, Hugo, Grace, Jaqui, Mateo y Raúl, que durante mi estancia en Morelia me brindaron su ayuda, momentos de alegría y sincera amistad.

Finalmente,

No hubiera sido posible sin ustedes; desde el comienzo y los que siguen hasta hoy...
¡Gracias, totales!"

Capítulo 1

Antecedentes

1.1. Introducción

El estudio de las TGs y sus características representativas ha sido un importante tema en la Relación Sol-Tierra. Así mismo, los estudios de la ionósfera terrestre han intentado investigar la estructura de las irregularidades de las regiones E y F, la actividad auroral y la respuesta de la ionósfera a las TGs, donde la densidad de electrones aumenta y disminuye en escalas de tiempo muy cortas (Cander, 2008). Sin embargo, estos estudios son limitados en territorio mexicano, debido a ello es necesario investigar más sobre el comportamiento de la ionósfera en el mismo.

Las TGs generan variaciones del campo magnético de la Tierra que se originan por la transferencia de energía del viento solar a la magnetósfera terrestre cuando hay reconexión magnética. Una TG tiene como característica primordial el decaimiento de la componente horizontal del campo magnético terrestre, seguida de una recuperación gradual cuya duración varía de un evento a otro (Gonzalez et al., 1994; Svalgaard, 1977; Cai et al., 2010; Rodríguez et al., 2014; Hernández, 2021; Lotz et al., 2021; Zhao et al., 2022). Durante las TGs, se producen alteraciones en la ionósfera que pueden impactar la transmisión de ondas de radio y obstaculizar el funcionamiento de los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS por sus siglas en inglés). El estudio y modelado de la respuesta de la ionósfera a estas tormentas resulta crucial para estimar sus efectos en la transmisión de ondas de radio y en los GNSS. Uno de los principales intereses en esta área es comprender la ocurrencia y la respuesta de la ionósfera a las TGs intensas en latitudes medianas y bajas.

Las tormentas ionosféricas se pueden analizar mediante el estudio de series temporales de variaciones en el Total Electron Content (TEC por sus siglas en inglés) que proporcionan un conocimiento significativo sobre la manifestación global de estas tormentas (Jodogne & Stankov, 2002). Estas variaciones están vinculadas a perturbaciones en el campo geomagnético, reflejando incrementos o decrementos en la concentración electrónica en comparación con el promedio. Estas alteraciones se manifiestan tras el SSC y pueden persistir desde horas hasta días (Cipagauta & Durand, 2010).

Durante la última década se ha puesto a disposición una metodología confiable y útil la cual utiliza una extensa base de datos, así como de cálculos para la medición ionosférica GNSS de cobertura global y para el cálculo de valores del TEC. Dicha metodología emplea observaciones GPS tanto espaciales como terrestres, una comprensión integral de las varia-

ciones anormales en diferentes escalas y la compleja interacción no lineal entre la termósfera, la ionósfera y la magnetósfera durante las diferentes fases de las TGs, lo cual sigue siendo un reto (Guleyva & Stanislawski, 2008; Shuanggen et al., 2017).

1.2. Conceptos básicos

Las siguientes consideraciones brindan un fundamento sólido para este trabajo de investigación y han sido ampliamente aceptadas en trabajos tanto nacionales (tales como Carrillo Vargas et al., 2016; López-Montes et al., 2012; López-Montes et al., 2015; Rodríguez-Martínez et al., 2014; González-Esparza et al., 2017; Romero-Hernández 2017, Bautista 2018, Hernández 2021, por mencionar algunos) como internacionales (Patari et al., 2019; Bapan et al., 2018; Bapan et al., 2019; Sastri et al., 2000; Bagiya et al., 2014; Galav et al., 2014; Basu et al., 2001; Baiju et al., 2020, entre otros). A continuación, se describen las más importantes:

1.2.1. Ionósfera

La ionósfera se define como la región de la atmósfera alta de la Tierra en donde están presentes altas concentraciones de electrones libres e iones. Está compuesta por un entorno cambiante, tanto espacial como temporal y se extiende desde aproximadamente los 60 a los 1000 km. Se divide en regiones (D, E, F1 y F2) de acuerdo con la fuente de ionización a diferentes alturas y a la composición neutra, además, forma una interfaz entre la atmósfera terrestre y el medio interplanetario (Sehu et al., 2017).

La composición de la ionósfera varía con el cambio de estaciones, el ciclo solar, la intensidad solar y las TGs (Basu et al., 2021). Las causas primordiales que generan la variación en la composición de la ionósfera son:

- Radiación solar.
- Partículas del viento solar.
- Eventos espaciales.
- Variaciones atmosféricas.
- Actividad geomagnética.
- Fenómenos meteorológicos o litosféricos intensos.
- Variabilidad estacional y geográfica.

A causa de esto se crea un plasma poco denso que se desarrolla como un medio de dispersión de ondas electromagnéticas y, en consecuencia, origina un retardo de tiempo en las señales de radio transionosféricas como las señales de los satélites GPS (Oiwendo et al, 2016). Esto provoca una variación en el número de electrones libres en la ionósfera. Además, en la densidad de electrones en ella. Es una de las razones importantes para la observación de la

mayor diferencia en la densidad electrónica del día y la noche. Esta densidad de electrones se define comúnmente como TEC (Basu et al., 2021), el cual varía en la ionósfera al depender de la latitud, la longitud y otros factores solares como erupciones solares, TGs extremas, las eyecciones de masa coronal (EMCs), entre otros (Sumitra-Mahajan, 2021).

1.2.2. TEC

El TEC es un parámetro que permite estudiar y representar el comportamiento integrado de la ionósfera. Se define como el número total de electrones en una columna vertical unitaria a lo largo de la línea de visión entre el satélite y el receptor, normalmente a 450 km (Imtiaz et al. 2019; Basu et al., 2021).

El TEC se mide en TECU, donde $1 \text{ TECU} = 1 \times 10^{16} \text{ electrones}/m^2$. Al estar asociado con la trayectoria satélite-receptor, se le denomina TEC oblicuo (sTEC por sus siglas en inglés) (Rohaida et al., 2020).

Algunos parámetros que forman parte de descripción del TEC son:

- sTEC: establece el número de electrones contenidos en una columna oblicua con una sección de un metro cuadrado que va desde el receptor hasta el satélite.
- vTEC: definido como la conversión del sTEC en su equivalente independiente del ángulo de elevación de la línea de visión.

El TEC es una función de la radiación solar incidente, por lo que varía con la altitud, latitud, longitud, tiempo universal, estación, ciclo solar y actividad magnética (Panda et al., 2012). En consecuencia de este último, es posible que la inyección de energía de la magnetósfera a la atmósfera alta provoque una severa alteración en la densidad electrónica de la región F de la ionósfera (Chakraborty et al., 2020).

En el transcurso de TGs intensas hay un aumento o disminución anómalo de TEC ionosférico (tormentas ionosféricas) que resulta en frecuentes fluctuaciones de amplitud y fase (semejante al patrón de una onda). Tal comportamiento puede dar lugar a errores en los cálculos de posición del GPS. El resultado del efecto ionosférico sobre las señales GPS proporciona así los datos necesarios para interpretar las variaciones temporales y espaciales de la ionósfera, así como sus efectos sobre la navegación. (Sehu et al., 2017). Por esta razón, hoy en día la medición del TEC a través de GPS es una herramienta importante para estudiar la ionósfera y juega un papel cada vez mayor en la determinación de las condiciones para el funcionamiento de los sistemas tecnológicos de navegación y comunicación (Kharakhashyan et al., 2021).

1.2.3. GNSS

Los GNSS proporcionan posicionamiento en cualquier parte del globo terrestre. GNSS es un término que hace referencia a la infraestructura desplegada en tierra/espacio que brinda servicio de posicionamiento-navegación-cronometría (PNT por sus siglas en inglés) de cobertura mundial a través del uso de señales electromagnéticas.

Sus componentes principales son:

- Segmento espacial.
- Segmento de Tierra o control.
- Usuarios.

Y los sistemas primarios que lo componen:

- GPS.
- GLONASS.
- BiOS/BEIDOU 2.

Los GNSS, además de tener fines de navegación y posicionamiento, tienen una gran aplicación para la investigación científica y son utilizados en multitud de campos como cambio climático, monitoreo sísmico, estudios de la ionósfera, entre otros.

GPS

El GPS o NAVSTAR-GPS es un GNSS que funciona por medio de una red de 32 satélites (1 de respaldo y 31 operativos) en órbita a 20.200 km, 6 veces al día, en 6 órbitas que cubren la superficie de la Tierra. Su invención se adjudica al gobierno francés; belga, cuya operación está a cargo del Departamento de Defensa de los Estados Unidos (Panda & Gedam, 2012; ECOMÉXICO, S.f.).

Dado que la naturaleza de sus señales, el GPS se han convertido en una herramienta muy útil para la investigación ionosférica, para la estimación de errores durante el posicionamiento. Además, las irregularidades de la densidad de electrones en la ionósfera pueden introducir fluctuaciones de amplitud y fase, proceso conocido como centelleo (Coster & Komjathy, 2008; Panda & Gedam, 2012; Chakraborty et al., 2020).

Los datos de aproximadamente 1000 receptores GPS están disponibles para monitorear diariamente la variabilidad espacio-tiempo de la ionósfera global. Se han desarrollado algoritmos para procesar estos datos de manera eficiente en el tiempo, lo que permite el monitoreo diario de la ionósfera tranquila y en tiempo de tormenta que afecta a los sistemas de radionavegación (Coster & Komjathy, 2008).

1.2.4. Formato RINEX

RINEX (Receiver Independent Exchange Format) es un formato de código de texto que almacena cálculos proporcionados por receptores GNSS como GPS, GLONASS, GALILEO, entre otros (Cheng et al., 2020). Dicho formato demanda un gran tamaño de archivo por el tipo de observación que realiza, aunque posteriormente en Hatanaka, (1996) se desarrolló una versión condensada del archivo RINEX en formato ASCII (Robles-Bravo, 2020).

Los registros principales que forman parte del formato RINEX (Werner, 2007) son:

- Observación (yyO).
- Navegación GPS (yyN).
- Datos meteorológicos (yyM).
- Navegación GLONASS (yyG).
- Navegación GEO (yyH).
- Estado de reloj (yyC).

En el que la nomenclatura para los archivos RINEX sigue la siguiente forma:

ssssddf.yyt.

donde:

- **t** es el tipo de archivo y puede ser:
 - **O** Archivo de Observación.
 - **N** Archivo de navegación GPS.
 - **M** Datos meteorológicos.
 - **G** Archivo de navegación GLO-NASS.
 - **L** Archivo de navegación Galileo.
 - **P** Archivo mixto de navegación GNSS.
 - **H** Archivo de navegación de carga útil.
 - **B** Archivos de transmisión.
 - **C** Archivo de reloj.
- **S** Archivo de Resumen.
- **yy**: Dígitos correspondientes al año.
- **f**: Número de secuencia dentro del día.
 - Archivo diario: f=0.
 - Archivos por hora:
 - f=a (primera hora:00h-01h)
 - f=b (segunda hora:01h-02h)
 - ...
 - f=x (24 h:23h-24h).
- **ddd**: día del año del primer registro.
- **ssss**: código de la estación.

Cada archivo consta principalmente de una sección de encabezado con información que describe el contenido de éste, además del tipo de archivo, nombre de la estación, tipos de observación a seguir, posición aproximada de la estación, altura de la antena y una sección que contiene los datos reales (Werner, 2007).

1.2.5. Relación Sol-Tierra

La física del espacio cercano a la Tierra es un campo importante de investigación en donde las condiciones dinámicas cambiantes en la atmósfera alta (magnetósfera-ionósfera) están relacionadas con la actividad solar y el medio interplanetario (Blagoveshchenskii, 2012). Se ha tratado de estimar el impacto de la actividad solar en este entorno, el cual está controlado por su interacción con el viento solar que modela el campo magnético terrestre. Debido a condiciones especiales, las líneas de campo magnético del viento solar se pueden conectar con el campo magnético de la Tierra permitiendo la entrada de partículas solares a la atmósfera terrestre por medio de un mecanismo denominado reconexión magnética en donde existe una acumulación de energía magnética que se libera en forma de calor, radiación y en algunos casos, pueden generar fenómenos en la Tierra como auroras polares (Mendoza, 2006; Alberti et al., 2020; Soloviev et al., 2021). Lo anterior puede provocar variaciones abruptas en la

intensidad del campo geomagnético y cambios en la densidad de plasma de la ionósfera generando TGs y ocasionalmente, tormentas ionosféricas, lo que puede causar efectos negativos en tecnologías de navegación, comunicación, redes eléctricas, entre otras (Gulyaeva, 2019; Lotz et.al., 2021; Redaa et al., 2022).

1.2.6. Viento Solar

Debido a las elevadas temperaturas en la atmósfera externa del Sol, la combinación de la fuerza gravitatoria solar y la ausencia de presión en el medio resulta en una expansión radial incontenible conocida como viento solar. Este flujo supersónico de gas ionizado se extiende más allá de la órbita de los planetas (hasta 100 UA ¹), lo que significa que nos encontramos inmersos en este gas en expansión que impregna todo el Medio Interestelar Primario (MIP), estableciendo así una conexión fundamental entre el Sol y los planetas.

El Sol exhibe áreas de distribución de campo magnético en su superficie, conocidas como hoyos coronales, capaces de generar viento solar rápido, con velocidades que oscilan entre 700 y 800 km/s. Además, se identifican regiones de viento solar lento, denominadas cascadas coronales, caracterizadas por velocidades inferiores a 400 km/s. Las propiedades específicas de estas regiones se detallan en la Tabla 1.1.

Viento	Velocidad (km/s)	Densidad electrónica (m^{-3})	Pérdida de masa a través de una esfera(kg/s)	Presión (Pa)
rápido	7.5×10^2	2.5×10^6	10^9	2.6×10^{-9}
lento	4×10^2	7×10^6	1.5×10^9	2.1×10^{-9}

Tabla 1.1: Propiedades básicas del viento solar rápido y lento a 1 UA (Meyer-Vernet, 2007).

Parámetros del viento solar

La actividad solar afecta a todo el MIP ya que la corona solar se expande permeando el MIP mediante el plasma del viento solar. Como éste es altamente conductor, el viento solar lleva consigo el campo magnético interplanetario (Echer et al., 2020).

En el MIP, las mediciones del plasma del viento solar se toman a bordo de naves espaciales y se utilizan para monitorear la actividad solar con el fin de detectar estructuras de gran escala como las Regiones de Interacción entre Corrientes, que perturban el medio ambiente de la Tierra y modulan la atmósfera superior terrestre al propagarse a alta velocidad e impactando el campo geomagnético unos 2-3 días después (Oludehinwa et al., 2021). El monitoreo de la actividad solar depende de la disponibilidad de datos que proporcionan las naves espaciales que vigila al Sol y el viento solar que está próximo a la Tierra. Los instrumentos a bordo de estas naves miden la velocidad, la densidad, el campo magnético, temperatura, presión y el parámetro β del plasma, entre otros (Troshichev & Sormakov, 2018; Soloviev et al., 2022; Lotz et al., 2022), los cuales están disponibles en la base de datos OMNI de la NASA (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>).

¹UA: Unidad astronómica que equivale ~ 149.6 millones de kilómetros

1.2.7. Regiones de interacción entre corrientes (RIC)

En el Sol, se originan flujos de plasma que contienen al viento solar y arrastran las líneas del campo magnético. Debido a la rotación diferencial del Sol, la posición longitudinal experimenta cambios con respecto a la región de origen, resultando en la curvatura de la línea del campo magnético que adopta una forma de espiral conocida como Espiral de Parker (Vogt et al., 2015).

En este contexto, es posible identificar diversas fuentes de viento solar con tiempos y configuraciones magnéticas variadas. Un escenario común involucra la interacción de un viento solar de alta velocidad, originado en un hoyo coronal, con un viento solar previo de menor velocidad, como se ilustra en la Figura 1.1. Aunque estos vientos solares interactúan entre sí, sus propiedades distintivas impiden una mezcla completa entre ellos debido a las características mencionadas anteriormente.

En la Figura 1.1 se muestra un esquema de la interacción del VS lento y rápido, esto produce dos regiones: una región de compresión (Forward shock) y una de rarefacción (reverse shock) ubicadas en la parte frontal y trasera de la corriente de alta velocidad (lugar donde el viento solar rápido alcanza al lento) lo que se conoce como Regiones de Interacción entre Corrientes (RIC) (Burlaga, 1995; Gosling & Pizzo, 1999; Voght et al., 2015; Sánchez-García, 2016 y referencias; Pérez-Rivera, 2021 y referencias).

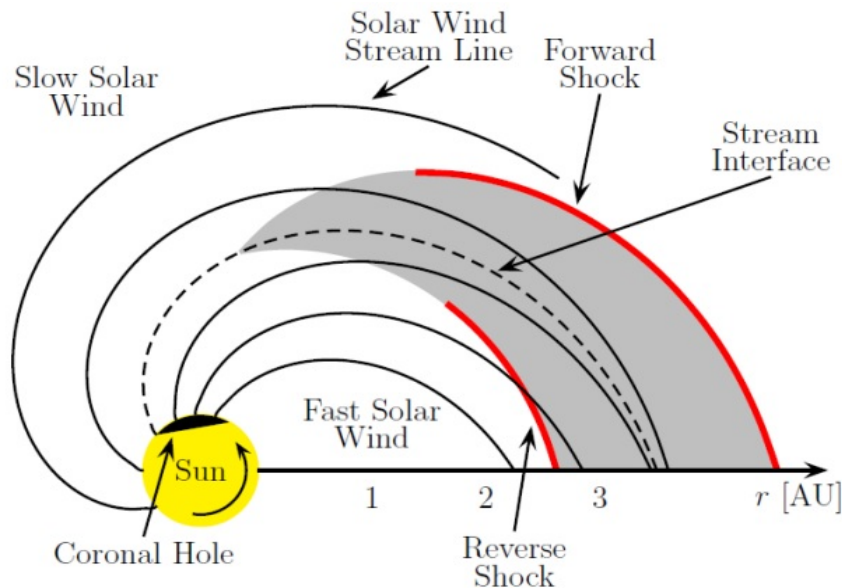


Figura 1.1: Diagrama de la configuración de las líneas de campo magnético que conforman a una RIC. Tomado de Voght et al. (2015).

1.2.8. Eyecciones de Masa Coronal (EMCs)

De acuerdo con Sahade, (2019), la definición formal de una EMC es: “cambio observable en la estructura coronal que involucra la aparición y el movimiento hacia afuera de

un elemento nuevo, discreto, brillante y de luz blanca en el campo de visión del coronógrafo”.

La actividad solar más intensa es causada por las EMCs a través de las cuales se eyecta una gran cantidad de material en forma de plasma y campo magnético de viento solar emitido por la corona hacia el MIP. Dicho plasma y campo pueden influir en el entorno geomagnético de la Tierra al interactuar con la magnetósfera terrestre (Gulyaeva, 2019; Lotz et.al., 2021; Redaa et al., 2022).

Estudios previos han mostrado que una EMC ocurre debido a variaciones del campo magnético del Sol en donde se puede dar una reconexión magnética, en la cual habrá una fuerte liberación de energía que se acelera hacia el MIP generada por el efecto tobera que provoca el decrecimiento de la gravedad con el cuadrado de la distancia. Esta aceleración dependerá de la fuerza de liberación de la energía (Sahade 2019; Gulyaeva 2019; Lotz et.al., 2021; Redaa et al., 2022).

Conforme a lo descrito en Corona-Romero, (2009) y Howard, (2011), estas estructuras pueden llevar consigo hasta 10^{13} kg de materia con velocidades entre 100 y 200 km/s y una energía cinética de 10^{25} J.

Las EMCs provienen de la capa externa del sol y suelen estar relacionadas con áreas cercanas al ecuador solar (especialmente cuando el sol está en un período de baja actividad). Durante el mínimo solar, se registra alrededor de una EMC, mientras que durante el máximo solar se pueden ver entre 4 o 5 de estas eyecciones. A pesar de esto, solo un pequeño número de ellas van hacia la Tierra (Howard, 2011).

Al llegar la EMC a la Tierra pueden ocurrir dos procesos principales:

- Si el campo magnético de la EMC se dirige hacia el sur en relación con el campo magnético de la Tierra, dará lugar a una reconexión magnética dejando expuesta a la atmósfera terrestre al plasma del viento solar en las zonas de los polos y el ecuador.
- Existe un aumento de presión debido a la interacción del viento solar con la magnetósfera, que hace que ésta se comprima.

Estos dos efectos tienen como resultado un aumento en la actividad geomagnética, generando una TG (Howard, 2011).

1.2.9. TG

Las TGs se pueden definir como una perturbación temporal del campo geomagnético. Una TG es el resultado de la interacción Sol-Tierra y se manifiesta en el geoespacio (véase Gonzalez et al., 1994; Svalgaard, 1977; Cai et al., 2010; Rodríguez et al., 2014; Lotz et al., 2021; Zhao et al., 2022). Las TGs suelen ser resultado del incremento de la velocidad y densidad del viento solar en el que la componente z del campo magnético interplanetario (B_z) tiene orientación hacia el Sur lo cual permite que la transferencia de energía del viento solar a la magnetósfera terrestre aumente por medio de la reconexión magnética (Cai et al., 2010; Abreu et al., 2014). Adicionalmente, cuando las partículas del viento solar penetran en el

campo geomagnético provocando afectaciones en la vida útil de los satélites, cortes de energía y modifica las comunicaciones de radio transionosféricas (Baker et al., 2004; Mansilla, 2008; Lin et al., 2022; Doha & Wathiq, 2019).

Una TG se define de acuerdo con la respuesta de una selección de observatorios geomagnéticos situados a lo largo del ecuador magnético (Lotz et al., 2021). Esta respuesta consta de tres fases impulsadas por diferentes mecanismos físicos, descritos en la Figura 1.2 (Bapan et al., 2018; Lotz et al., 2022; Carrillo-Vargas et al., 2016):

- Inicio repentino de la tormenta o SSC por sus siglas en inglés: se debe al aumento repentino de la presión dinámica del viento solar que incide en el lado diurno de la magnetósfera; esto provoca un marcado aumento de la fuerza del campo geomagnético visible como un pulso positivo en los distintos índices geomagnéticos. Aunque no es una condición necesaria para el desarrollo de una TG, ya que ésta puede ocurrir y desarrollarse con un inicio gradual de la tormenta.
- Fase principal: se lleva a cabo cuando la componente B_z tiene orientación hacia el sur, durante un período prolongado (desde minutos hasta horas), y generalmente viene acompañado de un viento solar rápido.
- Fase de recuperación: comienza después de que la componente B_z (aunque también cuando hay RICs hay giros hacia el norte, conocidos como fluctuaciones Alfvénicas) gira hacia el norte y la mayor parte del plasma del viento solar perturbado ha pasado y el campo magnético cambia de su valor mínimo a su valor de tiempo de reposo y puede durar tan solo 8 h o hasta 7 días.

Análisis previos (tales como Akasofu, 1981; Gonzalez et al., 1994; Svalgaard, 1977; Shuanggen et al., 2017; Lotz et al., 2021; Zhao et al., 2022, entre otros) encontraron principalmente tres tipos de eventos impulsores de viento solar en distintas fases del ciclo solar que pueden causar TGs. Los eventos pueden ser: flujos transitorios inducidos por eyecciones de masa coronal (EMCs) y corrientes de alta velocidad corrotantes (Figura 1.2). Sin embargo, las tormentas más intensas son impulsadas por EMCs, que pueden ocurrir de forma aislada. Así mismo, en una serie de erupciones en un período corto de tiempo o en combinación con eventos de múltiples impulsores que pueden ser de larga duración y de gran intensidad. La severidad de un TG se incrementa debido a que los procesos de recuperación dentro de la magnetósfera no absorben completamente el evento inicial antes de que un siguiente evento la perturbe (Lotz et al., 2021).

Firmas de una EMC y RIC

Para identificar los eventos impulsores de TGs es necesario analizar los parámetros del viento solar, como las distribuciones de la intensidad del campo magnético, la velocidad, la densidad y la temperatura del viento solar.

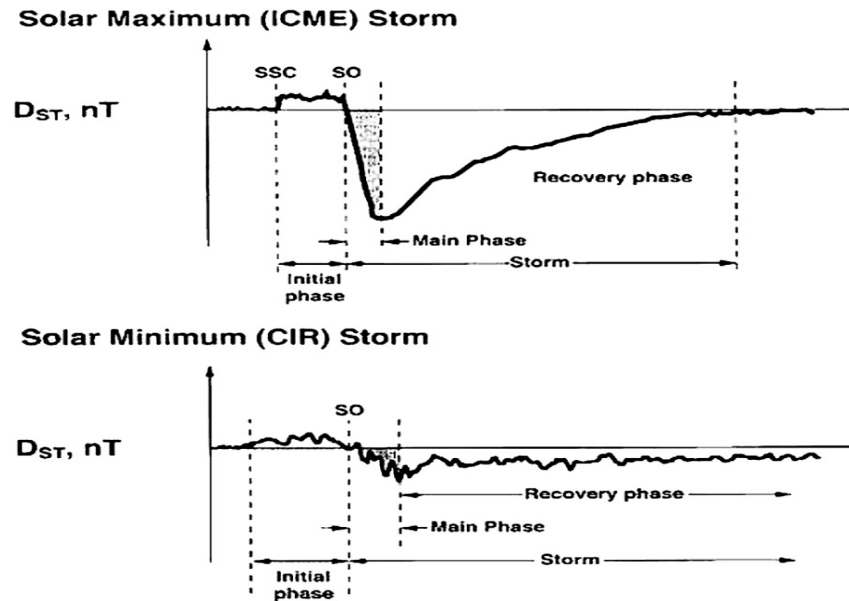


Figura 1.2: Esquema de una TG generada por una EMC (panel de arriba) y por una RIC (panel de abajo). Tomado de Tsurutani, 2000.

RIC

De acuerdo con la investigación de Burlaga, (1995), Gosling & Pizzo, (1999), Voght et al. (2015), Sánchez-García, (2016), Pérez-Rivera, (2021) y las referencias adicionales, es posible identificar las RICs mediante las siguientes características:

- Se registra una compresión del campo magnético interplanetario.
- El tiempo de recuperación del campo geomagnético es más largo (hasta dos semanas).
- Se observa un aumento en la velocidad del viento solar, esto debido a la compresión en donde se observa una “meseta” de velocidad constante.
- Existe un aumento abrupto en la densidad de electrones, seguido de un decremento.
- Antes de la onda de choque, se tiene una temperatura baja, después se observa la compresión y se capta un aumento de temperatura (debido a la transferencia de energía) y posteriormente ésta disminuye.
- Se observa un pico en la presión del viento solar.

EMC

- Se registra una alta concentración de partículas alfa.
- La temperatura de electrones es baja ($< 6 \times 10^4 \text{K}$).
- Se observa una densidad de partículas baja ($\leq 1 \text{cm}^{-3}$).

1.2.10. Tormenta ionosférica (TI)

Una TG intensa provoca en la capa F2 de la ionósfera una TI. Esta TI genera perturbaciones en la química y la dinámica del sistema acoplado de la termósfera y la ionósfera (Bapan et al., 2018), que consisten en una disminución o aumento de la concentración electrónica con respecto al promedio. Las disminuciones son llamadas efectos de fase negativa y los aumentos son los denominados efectos de fase positiva de la tormenta (Cipagauta-Durand, 2010).

Las tormentas ionosféricas (TIs) positivas están relacionadas con el incremento de la densidad de electrones producido por los cambios en el campo eléctrico, por cambios en la composición, por vientos termosféricos, o por transporte de ionización. Por otro lado, las fases de tormenta negativa se producen principalmente cambios en la composición de la ionósfera (Bapan et al., 2018; Galav et al., 2011).

Estudios previos reportan que solo las grandes TGs inducen TIs globales (Berenya et al., 2017). La configuración de una TI es compleja ya que la respuesta de la ionósfera para la misma tormenta depende de la latitud, del inicio de la TG y del tiempo local. De igual manera, una respuesta global de los efectos de TI difiere bastante de una tormenta a otra (Cipagauta-Durand, 2010).

Las TIs son uno de los temas principales para optimizar el modelado y pronóstico de las actividades ionosféricas, así como para entender la variación espacio-temporal de la ionósfera. Esto es indispensable para la detección de radares, la navegación por satélite, la comunicación por radio y otros sistemas que utilizan señales de ondas electromagnéticas (Shuanggen et al., 2017).

1.2.11. Burbujas de plasma ionosférico

Las burbujas de plasma ionosférico son configuraciones espaciales y temporales de plasma altamente ionizado en la ionósfera terrestre y tienen un efecto significativo en la propagación de ondas y radiocomunicación (véase Carvalho et al., 2022 y referencias ahí). Estas estructuras pueden ocurrir, específicamente en la capa F, por interacciones de la ionósfera, como partículas cargadas provenientes de la intensa actividad solar, el campo geomagnético y corrientes eléctricas en la ionósfera lo que produce la ionización de átomos y moléculas presentes en la capa F, generando a un plasma ionosférico activo y energético el cual se conglomeran formando burbujas, que se desplazan y se expanden en la ionósfera. (Gomes-Tarelho et al., 2014; Cander, 2006; Carvalho et al., 2022). En particular, se ha encontrado que las TGs pueden propiciar la formación de burbujas de plasma ionosférico (Picanço et al., 2022 y referencias ahí). Tales burbujas de plasma se generan principalmente durante la noche a latitudes ecuatoriales, cuando la ionósfera está más baja y densa, alcanzando su máxima actividad durante la madrugada. Cabe enfatizar que se han observado casos en los que se forman durante el día (Gomes-Tarelho et al., 2014; Vankadara et al., 2023). A latitudes ecuatoriales las burbujas de plasma ionosférico tienen un comportamiento peculiar debido a la presencia de la “corriente ecuatorial electrojet”. Esta corriente fluye de manera horizontal a una altitud cercana a los 100 km, y está asociada con la interacción entre la ionósfera y el campo magnético terrestre (Picanço et al., 2022).

1.3. Motivación del trabajo

La gran variabilidad en la actividad del Sol, así como los complicados fenómenos físicos que determinan la estructura y dinámica de la ionósfera terrestre, hacen que sea importante investigar las perturbaciones que ocurren en esta región de la atmósfera terrestre durante las TGs intensas. Se sabe que éstas interrumpen las comunicaciones de radio y/o causan grandes cambios en la ionización que pueden sobrestimar o subestimar las correcciones ionosféricas requeridas en algunas aplicaciones para fines de las telecomunicaciones (Jimoh et al., 2016).

Para cuantificar las variaciones del $vTEC$ sobre el territorio mexicano a partir de datos generados del GPS durante las TGs específicamente del ciclo solar 24, se estudiarán las TGs intensas que tuvieron lugar en el período de este ciclo solar, con la finalidad de cuantificar los efectos que produjeron en la ionósfera terrestre a partir del cálculo del $vTEC$ y los índices ionosféricos Δ , W y $ROTI$.

Se espera que exista una correlación entre los diferentes índices ionosféricos utilizados y la energía inyectada a la magnetósfera por la TG en cada uno de los eventos, es decir, a mayor inyección de energía por la TG intensa, mayor será el grado de perturbación en la ionósfera terrestre.

1.4. Objetivos

Para este estudio consideramos el siguiente objetivo primordial:

Estudiar y comprender estadísticamente la respuesta de la ionósfera ante la ocurrencia de TG intensas del ciclo solar 24 y de esta forma buscar la correlación entre los índices ionosféricos y la inyección de energía durante el inicio súbito de una TG.

1.5. Justificación

Particularmente, el estudio de la relación entre el inicio súbito de las TGs intensas y el tiempo en que observamos una alteración en índices ionosféricos en nuestras latitudes (14° y 33° al norte del ecuador) es de gran importancia, ya que, aunque recientemente se ha logrado un gran avance en el entendimiento de los orígenes de las TGs y las perturbaciones asociadas a ellas en la ionósfera (ver Rodríguez-Martínez et al., 2014 y referencias ahí), aún existen interrogantes en la comprensión actual de esta relación.

Cabe hacer mención que este estudio cobra relevancia debido a dos factores:

- La originalidad de éste, ya que no existen trabajos de investigación a nuestras latitudes, así como con nuestros propios instrumentos.
- El estudio de los índices en diferentes fases del ciclo solar 24 también pueden ser pieza clave en el entendimiento del comportamiento ionosférico. Inclusive, un trabajo a futuro derivaría en la comparación entre distintos ciclos solares.

El Laboratorio de Ciencias Geoespaciales (LACIGE, www.lacige.unam.mx) tiene una infraestructura necesaria para el desarrollo del proyecto. Cuenta con el acceso a los datos a través de la colaboración con el Laboratorio Nacional del Clima Espacial (LANCE), así como al código numérico GPS-TEC (Seemala, 2012), los softwares Tec-Suite y TayAbsTec. Con base en esta información el desarrollo de esta investigación pudo llevarse a cabo sin inconvenientes.

Capítulo 2

Índices geomagnéticos y ionosféricos

2.1. Índices geomagnéticos

Los índices geomagnéticos proporcionan información del estado de la actividad solar y el monitoreo eficiente del estado de la magnetósfera terrestre. Estos son fundamentales para describir las condiciones de la magnetósfera cuando hay una interacción de la actividad solar y la Tierra y están disponibles durante los últimos cinco ciclos solares (Siciliano et al., 2021; Bergin et al., 2022). Además, describen la intensidad de las perturbaciones geomagnéticas observadas durante las tormentas en un intervalo de tiempo. Sus efectos producidos sobre el campo geomagnético pueden ser monitoreados utilizando las variaciones temporales de éste en observatorios geomagnéticos en latitudes altas y bajas (Alberti et al., 2021; Siciliano et al., 2021).

2.1.1. Índice Dst

Los métodos para medir la intensidad de las TGs se basan en dos índices geomagnéticos: el índice planetario (K_p) y el índice de perturbación de TGs (Dst) (Rohaida et al., 2020). El centro mundial de datos para geomagnetismo de Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>), proporciona información sobre este índice, el cual permite determinar las variaciones del campo magnético terrestre provocadas por las RICs y EMCs en sitios definidos o a escala planetaria (Imtiaz et. al. 2019).

Durante el transcurso de una TG, el campo magnético calculado en la superficie de la Tierra decae y el índice Dst es una magnitud directamente proporcional a la media horaria de esta perturbación, el cual se basa en el valor medio de la componente horizontal del campo magnético de la Tierra. Cuanto más negativo es el valor de Dst, más intensa es la tormenta. (Ragini et al., 2021).

En la actualidad, este índice se determina de manera regular a partir de cuatro observatorios ubicados en latitudes medias y bajas: Honolulu (Longitud (E) 201.98° , Latitud 21.32°), San Juan (Longitud (E) 293.88° , Latitud 18.11°), Hermanus (Longitud (E) 19.22° , Latitud -34.40°) y Kakioka (Longitud (E) 140.18° , Latitud 36.23°). Cada observatorio informa la intensidad del campo geomagnético horizontal (H), y el Dst se construye a partir de estos

cuatro informes. (Martínez et al., 2016 y referencias ahí).

De acuerdo con los valores obtenidos, si se presentan valores negativos de Dst indican que una TG está en curso, siendo el Dst más negativo indicativo de la intensidad de la TG (Mansilla, 2008), teniendo la clasificación que se muestra en la Figura 2.1

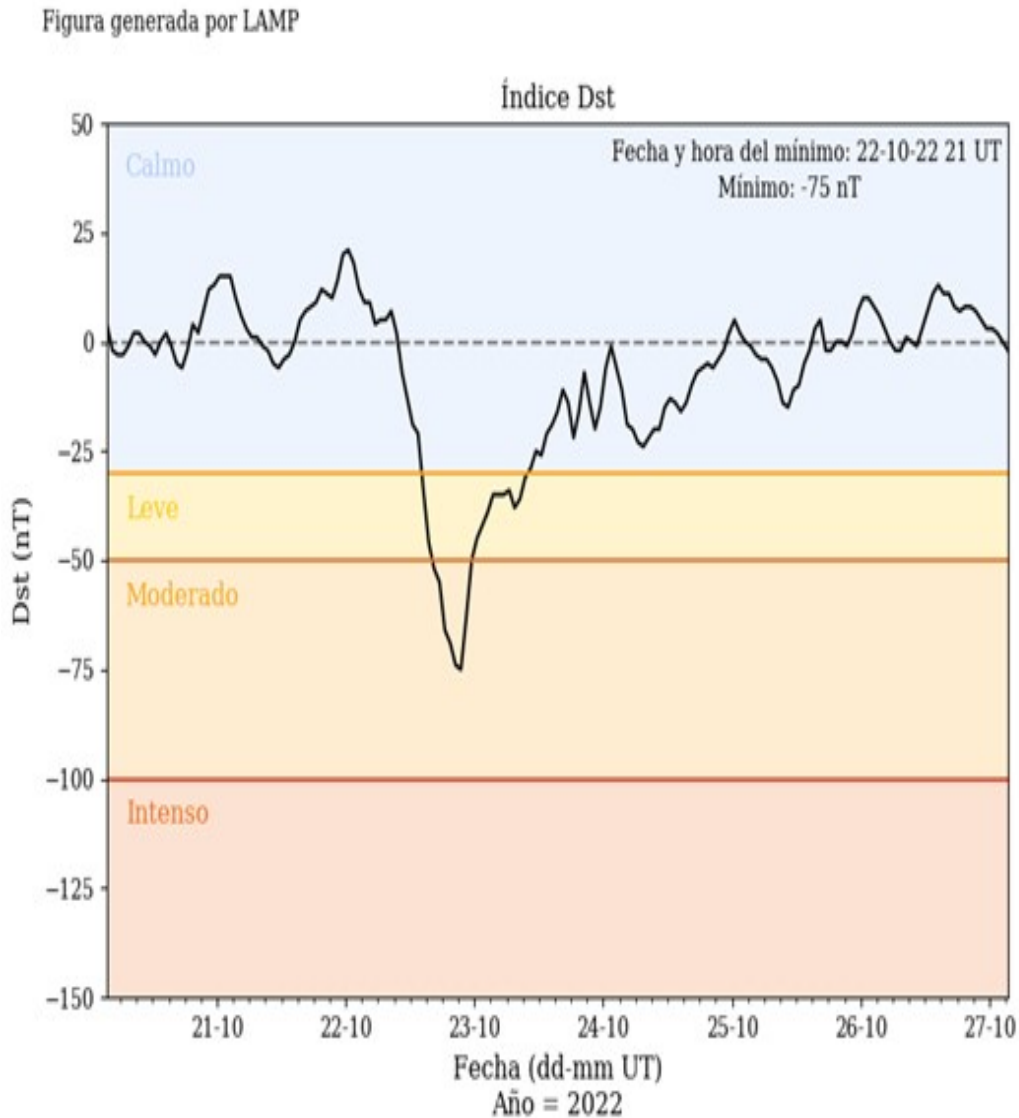


Figura 2.1: Clasificación de una TG de acuerdo con el índice Dst. Tomado de http://spaceweather.at.fcen.uba.ar/2/c_magnetico.html.

Además, el índice Dst se utiliza para especificar las diferentes fases de las TGs (inicial, principal y de recuperación) (Mansilla-Zossi, sf.). Para este estudio, los valores horarios de Dst se obtuvieron del World Data Center, Kyoto, Japón (<http://swdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/Dstdir>) y se enfocará en estudiar las TGs con caídas en el campo geomagnético más allá de -100nT (TGs intensas).

2.1.2. Índice SYM-H

Con el tiempo, se estableció una versión de mayor resolución del índice Dst, en contraste con la resolución de tiempo de 1 h de Dst, este nuevo índice tiene la ventaja de una resolución de tiempo de 1 min, el cual se denominó como índice SYM-H (Iyemori et al., 1992) que, además, utiliza las perturbaciones geomagnéticas de la componente H de 12 estaciones magnetométricas cerca del ecuador (Cai et al., 2010; James et al., 2016; Manu et al., 2022). Este índice es eficaz para emitir alertas de perturbaciones geomagnéticas rápidas y para estudiar y monitorear la dinámica y la topología de las TGs, el comportamiento a gran escala de la corriente del anillo y su relación con los fenómenos de fuentes solares (Alberti et al., 2021; Siciliano et al., 2021).

El índice SYM-H puede identificar las TGs de la siguiente manera:

Valor SYM-H	Clasificación de la tormenta
$-100 \text{ nT} \leq \text{SYM-H} \leq -50 \text{ nT}$	menores
$-300 \text{ nT} \leq \text{SYM-H} \leq -100 \text{ nT}$	intensas
$\text{SYM-H} \leq -300 \text{ nT}$	extremas

Tabla 2.1: Clasificación de las TGs de acuerdo con el índice SYM-H (Lotz et al., 2022 y referencias ahí).

2.1.3. Índice K

El índice K, introducido por J. Bartels en 1938, es un indicador de la intensidad de las perturbaciones geomagnéticas. Se basa en los datos trihorarios a partir de las 00:00 TU determinada por la mayor perturbación de la señal geomagnética registrada por estaciones en latitudes medias (Bartels et al., 1939; Mengyi et al., 2019; Lin et al., 2022; Zhao et al., 2022). El índice K es un índice cuasi logarítmico y de él se deriva el índice de actividad geomagnética global K_p , que se mide con magnetómetros terrestres (Mays et al 2020).

El Space Weather Prediction Center (SPWC por sus siglas en inglés) clasifica la actividad geomagnética en cuatro niveles: tranquila a inestable ($K_p < 4$); activa, ($K_p = 4$); tormenta menor, ($K_p = 5$) y tormenta mayor a severa ($K_p \geq 5$) para una actividad muy fuerte, así como estacional (invierno, verano y los equinoccios) (Tan et al., 2018; Paouris et al., 2020; Soloviev et al., 2021). Este índice es útil para los estudios del clima espacial y su relación con las perturbaciones geomagnéticas. Además, es adecuado para parametrizar modelos geo-espaciales, ya que se correlaciona con muchos parámetros en el espacio cercano a la Tierra (Matkza et al., 2021).

De acuerdo con Corona-Romero et al. (2017) actualmente, múltiples centros de clima espacial (como el LANCE) han iniciado la generación de índices K locales utilizando datos de magnetómetros localizados en territorio mexicano para el monitoreo y pronóstico del clima espacial local o regional.

2.1.4. Índice Kmex

Desde hace algunos años en México, el Servicio de Clima Espacial México (SCiESMEX), en colaboración con el Servicio Magnético Nacional (SMN), ambos pertenecientes a la Universidad Autónoma de México, trabajan en conjunto para estimar los cambios del campo geomagnético en territorio mexicano usando el índice Kmex (Corona-Romero et al., 2017; De la luz et al., 2018; LANCE, 2018). Este índice es una medida de la variabilidad trihoraria observada en el campo geomagnético mexicano. Utiliza una escala semilogarítmica donde el 0 se asocia a “un día geomagnéticamente quieto” y el valor más alto 9 a la variación en el campo magnético terrestre más alta detectada en transcurso de 3 h, con valores de $Kmex \geq 5$ alteran la capa F de la ionósfera terrestre provocando tormentas ionosféricas (Corona-Romero et al., 2017; De la luz et al., 2018; LANCE, 2018).

2.2. Índices ionosféricos

El clima espacial se distingue por los “ parámetros solares ” como medida de la actividad solar. Los “índices geomagnéticos” se usan para estimar el comportamiento de la magnetósfera y los “índices ionosféricos” son una medida de la variabilidad de la ionización de un plasma (Borries, et al, 2020). Su desarrollo es un tema de gran importancia para la comunidad científica desde que se empezó a estudiar el clima espacial y el monitoreo del rendimiento de los GNSS (Silva et al., 2022).

El objetivo de estos índices es el medir los efectos ionosféricos correspondientes a las burbujas de plasma ecuatorial, además de cuantificar las variaciones del TEC asociadas con los fenómenos meteorológicos espaciales (Silva et al., 2022).

2.2.1. Índice W

El índice W analiza las variaciones espaciales y temporales de los parámetros del plasma, como la densidad electrónica máxima de la capa F2 y el TEC. Estos parámetros son de un interés particular en aplicaciones GNSS establecidos en el espacio y son básicos ya que señalan las condiciones en la ionósfera y la plasmósfera o las perturbaciones a corto plazo del plasma ionosférico relacionadas con perturbaciones en el Sol y en la magnetósfera de la Tierra (Gulyaeva et al., 2008).

De igual manera que los índices magnéticos, la descripción del estado ionosférico es proporcionada por 4 niveles de índice W, estos son: estado tranquilo ionosférico, perturbación moderada, tormenta moderada o tormenta intensa asignados para umbrales específicos de acuerdo con las categorías (ver Tabla 2.2).

Para calcular dichas variaciones, es necesario implementar en escala logarítmica el cambio en el TEC (DTEC) de acuerdo con la ecuación:

$$DTEC = \text{Log}_{10} \left(\frac{TEC_{observado}}{TEC_{med}} \right), \quad (2.1)$$

en donde $TEC_{observado}$ es el TEC horario observado y TEC_{med} es la mediana del TEC registrado 27 días antes del período de análisis y a la misma hora del $TEC_{observado}$. También se puede hacer este cálculo utilizando la Frecuencia Máxima de F2 (NmF2), donde la única diferencia entre estos dos parámetros es la variación a partir de la cual se va a calcular el DTEC, es decir, con base en las variaciones de NmF2 o conforme las variaciones de TEC. Así mismo, la evaluación hecha con un parámetro u otro diferirá, ya que utilizando el parámetro NmF2, se obtendrán las perturbaciones ionosféricas presentes en la capa F2; caso contrario con el TEC, se evaluará las perturbaciones ionosféricas dependiendo del TEC. De acuerdo con este cálculo obtenido con la ecuación 2.1, el índice W se puede clasificar como:

DTEC	Índice W	Estado de la ionósfera
DTEC >0.30	4	actividad principal /(TI intensa positiva)
0.15 <DTEC ≤ 0.30	3	actividad moderada (TI)
0.04 <DTEC ≤ 0.15	2	actividad menor
0 <DTEC ≤ 0.04	1	estado tranquilo
DTEC =0.0	0	Estado tranquilo de referencia
-0.04 ≤ DTEC <0	-1	estado tranquilo
-0.15 ≤ DTEC <-0.04	-2	actividad menor
-0.30 ≤ DTEC <-0.15	-3	actividad moderada (TI)
DTEC <-0.30	-4	actividad principal /(TI intensa negativa)

Tabla 2.2: Especificación de la magnitud del índice W y el estado de la ionósfera relevante con el signo “ + ” para aumento de NmF2 o TEC y “ - ” para decremento de NmF2 o TEC.

El estudio de cómo se desarrolla la perturbación en el espacio y el tiempo crea una herramienta muy útil para aplicaciones operativas para el servicio regional.

2.2.2. Delta

Este índice evalúa la dispersión del vTEC. Matemáticamente se define como

$$\Delta = \frac{vTEC_{mx} - \langle vTEC \rangle}{\langle vTEC \rangle}, \quad (2.2)$$

Para valores $\Delta \geq 4$, se tiene un vTEC fuertemente perturbado (Rodríguez-Martínez et al., 2014).

2.2.3. ROTI

El índice de tasa de cambio de TEC (ROTI, por sus siglas en inglés) es una técnica propuesta por Pi et al. (1997) para cuantificar la amplitud de las fluctuaciones de fase del GNSS a pequeña escala, se usa comúnmente como una medida directa de la ocurrencia de burbujas de plasma ecuatorial (Silva et al., 2022).

Para describir la perturbación de la ionósfera en la serie de tiempo del TEC, se calcula

la tasa de cambio de inclinación TEC (Yang-Liu et al., 2019). Además, se ha propuesto un índice de la tasa de TEC inclinado, que considera la desviación estándar promedio de la tasa de TEC inclinado, en Pi et al. (1997) lo denominan ROTI. Considerando que el TEC inclinado está dado por

$$ROT = \frac{STEC_{k+1} - STEC_k}{\Delta t_k}, \quad (2.3)$$

donde $STEC_{k+1}$ y $STEC_k$ son el TEC inclinado en $k+1$ y k intervalos de tiempo. La unidad de ROT es $TECU/min$. ROTI está definido como:

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2}, \quad (2.4)$$

donde $\langle ROT \rangle$ indica el promedio de ROT durante n intervalos de tiempo. En la práctica, se estableció un umbral de $0.2\ TECU/min$ para determinar si existe una irregularidad.

Capítulo 3

Procesamiento de datos

En este Capítulo se muestra la metodología aplicada, las bases de datos y el software necesario para analizar los diferentes datos del ciclo solar 24. Se examinó el número de manchas solares para identificar el inicio y el fin del ciclo solar, así como sus máximos, mínimos, fases ascendentes y descendentes. A partir de esto, se identificaron las TGs intensas del ciclo de estudio analizando los índices Dst, SYM-H y Kmex, esto para contrastar entre la resolución de los datos y la medición del campo geomagnético a partir de observatorios ubicados a diferentes latitudes. Así mismo, a partir de este análisis, se pudieron clasificar las tormentas de acuerdo con la estación del año en que se presentaron. De igual forma, analizando el comportamiento de los parámetros del viento solar, se identificó el evento impulsor de dichas tormentas.

Posteriormente, conociendo las fechas en las que se presentaron las perturbaciones del campo geomagnético, se obtuvieron datos de GPS de distintas estaciones ubicadas en el territorio mexicano con las cuales se estudió el comportamiento del TEC presente en la ionósfera antes, durante y después de las TGs, así como su respuesta a diferentes latitudes.

3.1. Ciclo solar 24

El ciclo solar 24 comprendió el periodo de 2008 a 2019, intervalo deducido mediante los datos del número y comportamiento de manchas solares (ver Figura 3.1) obtenidas de la base de datos de *Solar Influences Data Analysis Center* y de diversos artículos tales como Liu et al. (2015) y referencias ahí, Manu et al. (2022) y referencias ahí; Gil et al. (2020).

Las TGs que ocurrieron durante el ciclo solar 24 fueron moderadas y poco frecuentes, a pesar de que el ciclo solar experimentó una alta tasa de ocurrencia de EMCs (Simi et al., 2021). Es importante mencionar que este ciclo solar fue ligeramente más pequeño en amplitud que los anteriores, por lo que no se presentaron tantos impactos de EMCs que pudieran generar TGs tan intensas o severas.

A través de la Figura. 3.1, se puede observar que este ciclo solar tuvo dos picos máximos, el primero durante el año 2012 y el segundo durante el año 2014, en este sentido, una de las formas de clasificar a las TGs será de acuerdo con el momento del ciclo solar en que se

presentaron.

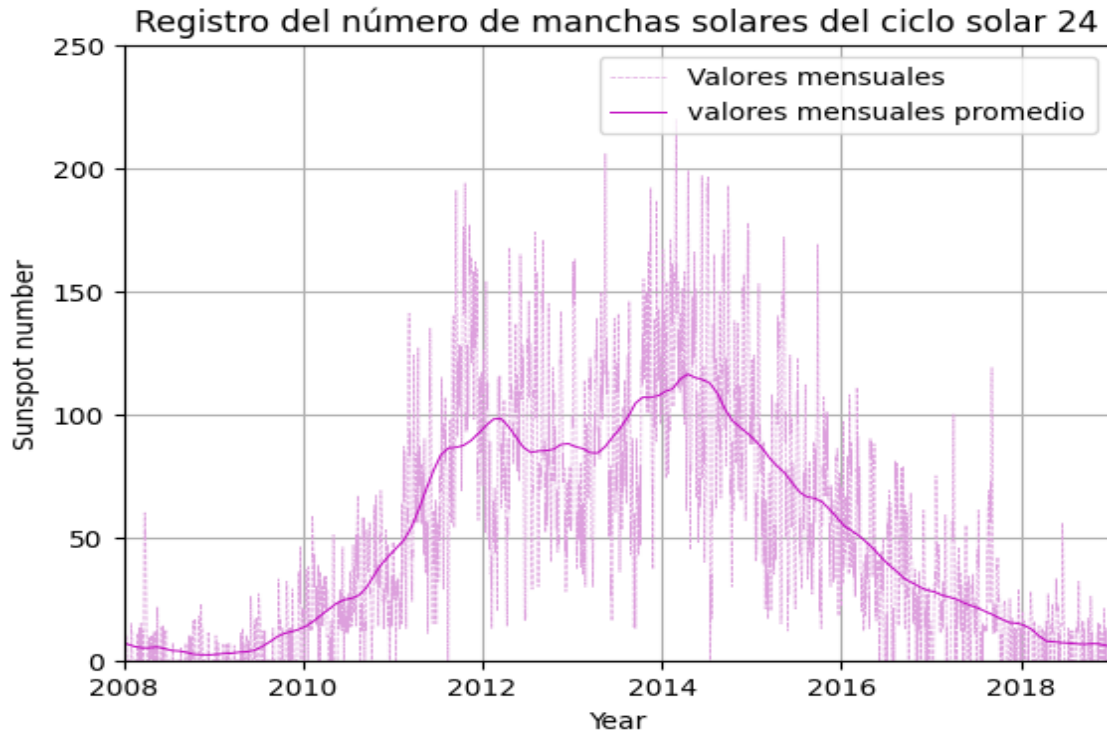


Figura 3.1: Gráfica del número de manchas solares por año correspondientes al ciclo solar 24. Se observan dos máximos, uno alrededor del 2012 y el otro alrededor del 2014. Elaborada con datos descargados de la página: <https://www.sidc.be/SILSO/datafiles>.

3.2. TGs intensas del ciclo solar 24

De acuerdo con las gráficas del comportamiento del campo geomagnético medido con los índices Dst y SYM-H (Figuras 3.2 y 3.3), construidas con la base de datos del Centro Mundial de Datos de Geomagnetismo de Kyoto (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) y con la base de datos de naves espaciales de <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>, se identificaron 11 tormentas intensas en las cuales se observó un SSC. Las características de estas tormentas se describen en la Tabla 3.1 que identifica las fases de cada una de las TGs, la magnitud del índice Dst característico de cada fase (máximo para el SSC, mínimo para la fase principal y máximo negativo para la fase de recuperación). La identificación precisa de estas fases en cada TG será fundamental para llevar a cabo los análisis subsecuentes.

Por otra parte, mediante el índice Kmex se identificaron 9 tormentas (Figura. 3.4) ya que, durante el año 2012, hubo una pérdida de datos debido a la transición entre las instituciones que proporcionaban los datos de campo geomagnético en territorio mexicano. Dichas gráficas muestran el comportamiento del campo geomagnético días previos a la TG, además de días posteriores a ellas, teniendo un total de 15 días graficados en donde se estudió el campo geomagnético y las fases de cada una de las TGs.

Para las gráficas de los índice Dst (1 dato/hora) y SYM-H (1 dato/minuto) y con objeto de tener una misma escala al analizar el índice SYM-H, se homogeneizó la escala del eje y de -250 nT a 100 nT, esto para tener una misma escala al momento de analizar el SSC de cada tormenta. De igual forma se hizo para las gráficas del índice Kmex, homogenizando el eje y de 0 a 9. Por otro lado, el eje x en las Figuras 3.2 y 3.3 muestra el día del año (DOY, por sus siglas en inglés) y en la Figura 3.4, el día del mes en formato trihorario y conforme al tiempo universal TU.

Con base en el análisis de las Figuras 3.2 y 3.3, así como la Tabla 3.1, se puede observar que los años con más TGs fueron el 2012 y 2015. Así mismo, la TG más intensa del ciclo solar 24 (examinada en este estudio) ocurrió el 17 de marzo de 2015 (Fig. 3.2, inciso d) y alcanzó un índice Dst mínimo de -234 nT a las 23:00 TU, un índice SYM-H de -234 nT (3.3, inciso d) a las 22:47 TU y un índice Kmex de 8 (3.4, inciso a) a las 6:00 TU. Esta tormenta, de acuerdo con el índice Dst, tuvo una duración de aproximadamente 5 días, teniendo lugar el SSC el 17 de marzo y la fase de recuperación el 20 de marzo. De igual forma, se clasificaron las TGs por estación del año en las que se presentaron, teniendo de esta forma: 2 TGs en primavera, 4 en verano, 2 en otoño y 3 en invierno. Es importante señalar que, en cuestiones de intensidad, las tormentas más intensas: TG del 17/03/15 con -234 nT y TG del 21/06/15 con -198 nT se presentaron en primavera e invierno. Sin embargo, la TG más débil (18/01/16 con -101 nT), también se presentó en invierno y la segunda más débil (TG del 13/10/16 -110 nT) en otoño.

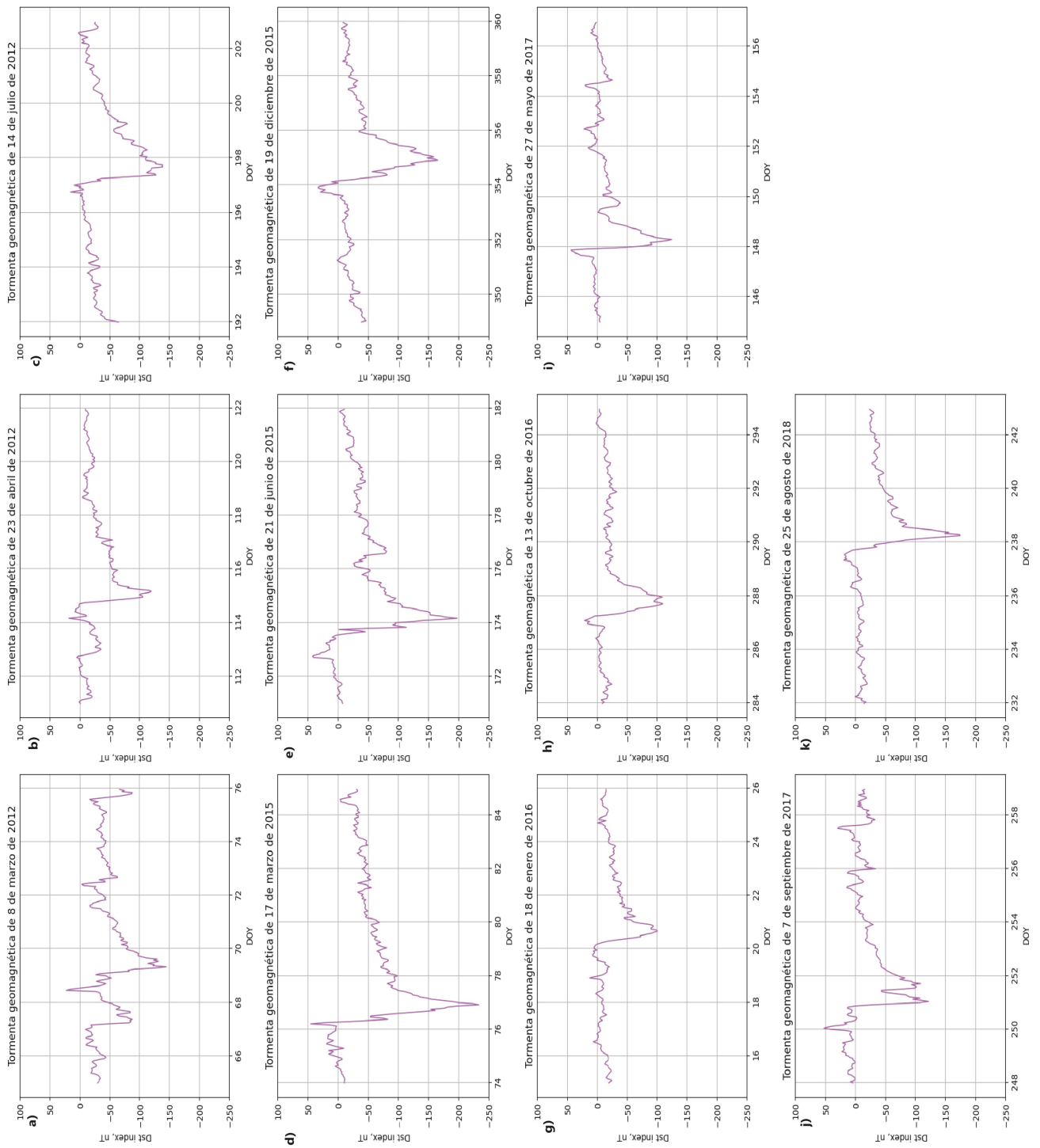


Figura 3.2: TGs intensas del ciclo solar 24 identificadas con el índice Dst, con resolución de 1 dato/hora. Cada uno de los incisos representa una TG diferente: (a) TG del 8/03/12 con -150 nT; (b) TG del 23/04/12 con -125 nT; (c) TG del del 14/07/12 con -130 nT; (d) TG del 17/03/15 con -234 nT; (e) TG del 21/06/15 con -198 nT; (f) TG del 19/12/15 con -166 nT; (g) TG del 18/01/16 con -101 nT; (h) TG del 13/10/16 con -110 nT; (i) TG del 27/05/17 con -125 nT; (j) TG del 07/09/18 con -122 nT e (k) TG del 25/08/18 con -206 nT.

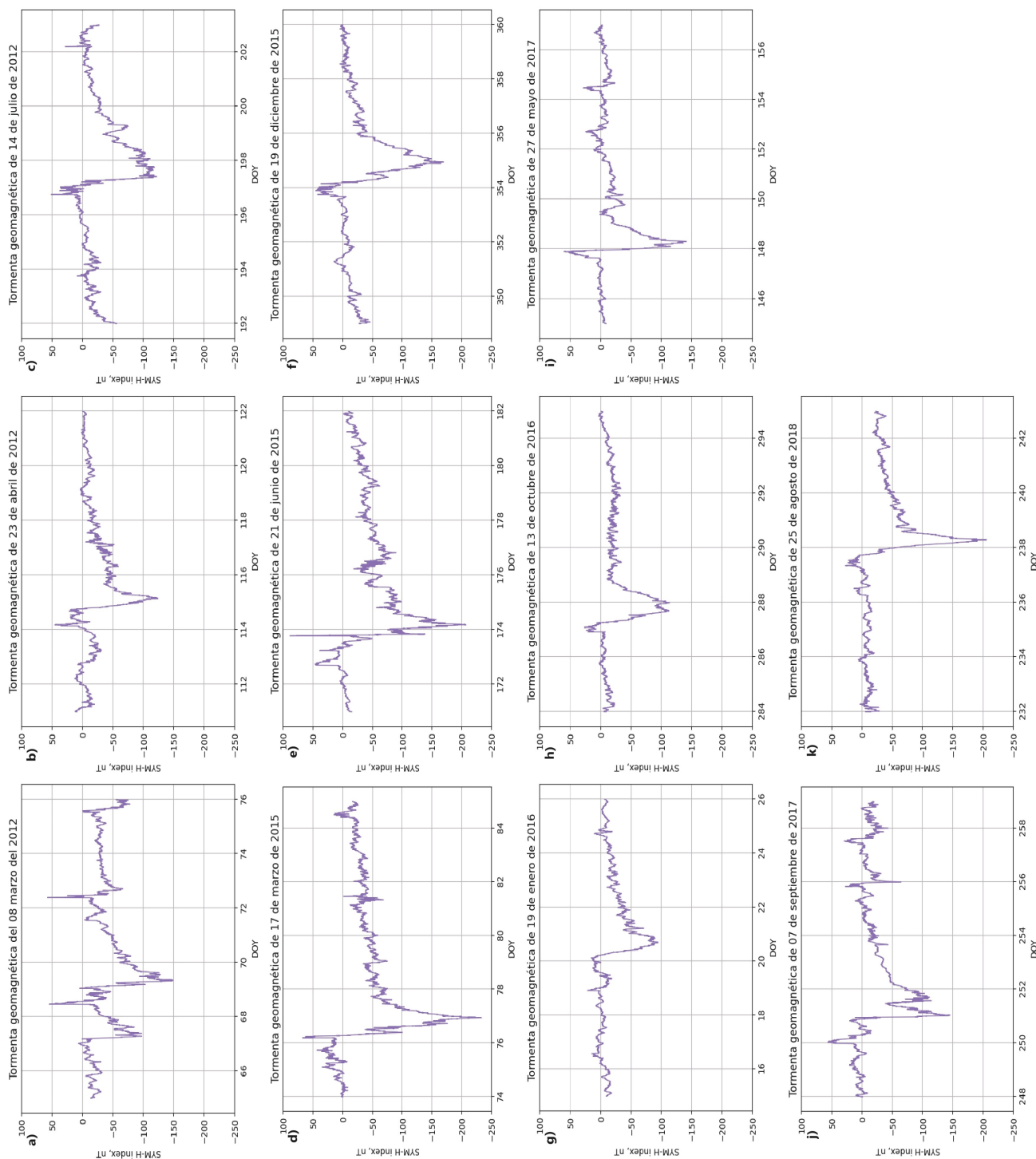


Figura 3.3: TGs intensas del ciclo solar 24 identificadas con el índice SYM-H, con una resolución de 1 dato/minuto. Cada uno de los incisos representa una TG diferente: (a) TG del 8/03/12 con -145 nT; (b) TG del 23/04/12 con -125 nT; (c) TG del del 14/07/12 con -123 nT; (d) TG del 17/03/15 con -234 nT; (e) TG del 21/06/15 con -208 nT; (f) TG del 19/12/15 con -170 nT; (g) TG del 18/01/16 con -101 nT; (h) TG del 13/10/16 con -114 nT; (i) TG del 27/05/17 con -142 nT; (j) TG del 07/09/18 con -146 nT e (k) TG del 25/08/18 con -206 nT.

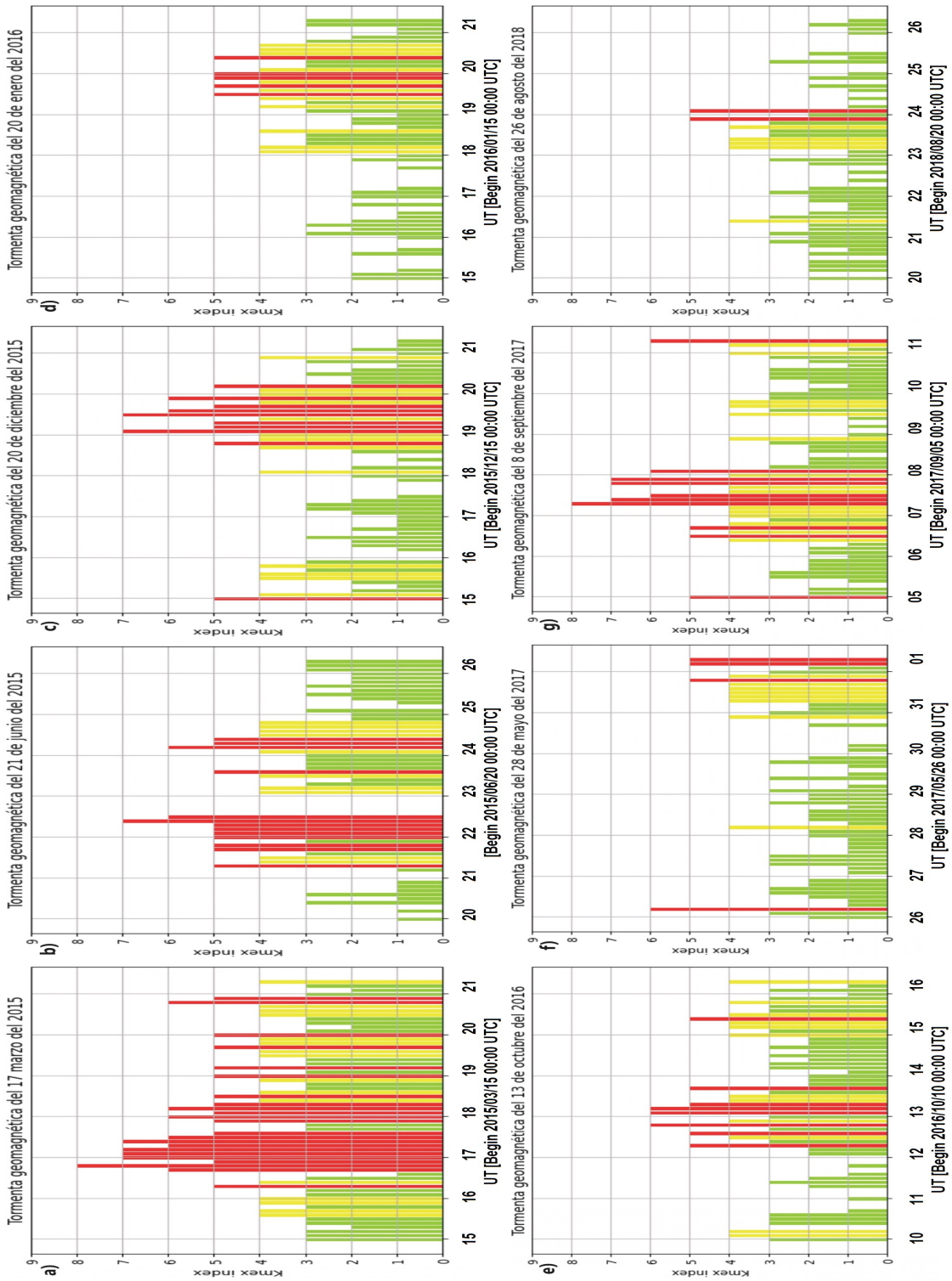


Figura 3.4: TGs intensas del ciclo solar 24 identificadas con el índice Kmex. Cada uno de los incisos representa una TG diferente: (a) TG del 17/03/15 con -234 nT; (b) TG del 21/06/15 con -198 nT; (c) TG del 19/12/15 con -166 nT; (d) TG del 18/01/16 con -101 nT; (e) TG del 13/10/16 con -110 nT; (f) TG del 27/05/17 con -125 nT; (g) TG del 07/09/18 con -122 nT e (h) TG del 25/08/18 con -206 nT.

Fecha	Hora de registro	Valor máx. y mín del índice Dst representativo de la fase	Fase de la tormenta	Fase ciclo solar
2012/03/08	12:00	22 (máx.)	SSC	
2012/03/09	09:00	-145 (mín.)	fase principal	1 ^{er} máximo solar
2012/03/11	16:00	-17 (máx.)	fase de recuperación	
2012/04/23	05:00	18 (máx.)	SSC	
2012/04/24	05:00	-120 (mín.)	fase principal	1 ^{er} máximo solar
2012/04/26	24:00	-23 (máx.)	fase de recuperación	
2012/07/14	19:00	15 (máx.)	SSC	
2012/07/15	19:00	-139 (mín.)	fase principal	1 ^{er} máximo solar
2012/07/18	15:00	-23 (máx.)	fase de recuperación	
2015/03/17	06:00	45 (máx.)	SSC	
2015/03/17	23:00	-234 (mín.)	fase principal	2 ^{do} máximo solar
2015/03/21	22:00	-40 (máx.)	fase de recuperación	
2015/06/21	19:00	42 (máx.)	SSC	
2015/06/23	05:00	-198 (mín.)	fase principal	2 ^{do} máximo solar
2015/06/25	06:00	-26 (máx.)	fase de recuperación	
2015/12/19	23:00	33 (máx.)	SSC	
2015/12/20	23:00	-166 (mín.)	fase principal	2 ^{do} máximo solar
2015/12/22	13:00	-17 (máx.)	fase de recuperación	
2016/01/18	23:00	12 (máx.)	SSC	
2016/01/20	17:00	-101 (mín.)	fase principal	Fase descendente
2016/01/22	18:00	-26 (máx.)	fase de recuperación	
2016/10/13	03:00	21 (máx.)	SSC	
2016/10/13	18:00	-110 (mín.)	fase principal	Fase descendente
2016/10/15	16:00	-14 (máx.)	fase de recuperación	
2017/05/27	22:00	43 (máx.)	SSC	
2017/05/28	08:00	-125 (mín.)	fase principal	Fase descendente
2017/05/29	10:00	-2 (máx.)	fase de recuperación	
2017/09/07	02:00	52 (máx.)	SSC	
2017/09/08	02:00	-122 (mín.)	fase principal	Fase descendente
2017/09/10	20:00	-17 (máx.)	fase de recuperación	
2018/08/25	09:00	19 (máx.)	SSC	
2018/08/26	07:00	-175 (mín.)	fase principal	mínimo solar
2018/08/28	23:00	-28 (máx.)	fase de recuperación	

Tabla 3.1: TGs intensas del ciclo solar 24 y sus fases. El índice Dst característico de cada fase representa el valor máximo del campo geomagnético para el SSC, el valor mínimo para la fase principal y el valor máximo negativo para la fase de recuperación.

De acuerdo con la Tabla 3.1 y al análisis de las fases de cada una de las 11 TGs, se distingue que, en promedio, las TGs de este ciclo tuvieron una duración de 3 días desde el

inicio del SSC hasta el término de la fase de recuperación.

Así mismo, 3 de las TGs intensas (08/03/12, 23/04/12 y 17/03/15) se presentaron durante el día (06:00-12:00 TU), 5 TGs (14/07/12, 21/06/15, 19/12/15, 18/01/16 y 27/05/17) durante la noche (19:00-23:00 TU) y 3 TGs intensas (23/04/12, 13/10/16 y 07/09/17) durante las primeras h del día (02:00-05:00 TU).

Relacionando las TGs con el ciclo solar, se puede notar que las tormentas del 2012 se originaron en el 1^{er} máximo del ciclo solar. Las tormentas del 2015 se generaron en el 2^{do} máximo solar. Las TGs de los años 2016 y 2017 se produjeron durante la fase descendente. Finalmente, la tormenta del 2018 en el mínimo solar.

El evento impulsor de las TGs intensas, así como las propiedades del plasma y viento solar que interactuaron con el campo geomagnético y dieron a lugar a éstas, se presentan en la siguiente Sección.

3.3. Parámetros del viento solar e índices geomagnéticos

En esta Sección se revisará los parámetros del viento solar para cada caso de estudio. La finalidad es poder identificar características o condiciones en el medio interplanetario que prevalecieron durante la TG.

Las mediciones de las naves espaciales que alimentan la base de datos OMNI-Web ¹, se emplearon para descargar los datos e identificar los impulsores de TGs. Estos datos se encuentran disponibles en varias páginas web² de la NASA. De acuerdo con el análisis de estos parámetros se pudo hacer la descripción de las 11 TGs intensas del ciclo solar 24. A continuación se presentan todos los casos de estudio de las TGs, mostrando los siguientes parámetros del viento solar y algunas características de las TGs.

3.3.1. TG del 08 de marzo del 2012 (invierno)

De acuerdo con los datos del MIP, el 8 de marzo a las 09:00 TU se detectó una densidad de partículas máxima con 26.2 partículas/cm³. Además, la componente B_z del campo alcanzó su valor mínimo de -18.5 nT a las 08:00 TU. Por otro lado, de acuerdo con los datos del campo geomagnético (Figuras 3.2 y 3.3, inciso a), el 9 de marzo a las 09:00 TU, se identificó el valor mínimo de los índices Dst y SYM-H, siendo de -145 y -150 nT, respectivamente. Durante el período de esta tormenta no hubo datos del índice Kmex. Respecto de la presión, ese mismo día se encontró un valor de 30.5 nPa a las 11:00 TU. De igual forma, la temperatura máxima que se midió tuvo un valor de 2.7×10^6 K a las 21:00 TU.

La velocidad máxima asociada al evento se registró a las 11:00 TU del 9 de marzo con un valor de 800.4 km/s y la magnitud del campo magnético alcanzó su valor máximo de

¹<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>

²<https://www.swpc.noaa.gov/products/real-time-solar-wind> y <https://www.swpc.noaa.gov/products/ace-real-time-solar-wind>

24.6 nT a las 21:00 TU. Esta tormenta fue impulsada por un evento complejo donde una RIC y una EMC interaccionaron dando a lugar la tormenta de esta fecha.

3.3.2. TG del 24 de abril del 2012 (primavera)

El evento que ocasionó el desarrollo de esta perturbación fue un evento complejo en donde una EMC y se obtuvieron los siguientes valores en los parámetros del viento solar:

El valor máximo de la presión se encontró a las 04:00 TU del 23 de abril registrando 16.4 nPa. Los índices Dst y SYM-H (Figuras 3.2 y 3.3, inciso b) registraron el valor mínimo a las 05:00 TU de -120 nT y -125 nT, para esta tormenta no hay datos del índice Kmex. La densidad de partículas se midió a las 04:00 TU con un valor de 53 partículas/ cm^3 . Igualmente, la componente B_z del campo alcanzó su valor mínimo de -15.3 nT a las 18:00 TU al igual que el valor máximo de la magnitud del campo magnético de 16 nT. La velocidad máxima del flujo de plasma se registró el 25 de abril a las 19:00 TU con un valor de 827.3 km/s . Por otra parte, la temperatura máxima se encontró a las 20:00 con un valor de 1.3×10^6 K.

3.3.3. TG del 14 de julio del 2012 (primavera)

El evento que impulsó la tormenta del 14 de julio fue una EMC que ocasionó lo siguiente: a las 18:00 TU se registró el máximo valor de la temperatura con 1.4×10^6 K y la presión más alta se encontró a las 23:00 TU con 28.4 nPa. La fase principal de la TG tuvo lugar el 15 de julio a las 19:00 TU con un índice Dst y SYM-H (Figuras 3.2 y 3.3, inciso c) de -130 nT y -123 nT cada uno. Para esta tormenta no hay datos del índice Kmex.

El valor máximo de la velocidad del flujo de plasma se observó a las 00:00 TU con un valor de 694.2 km/s , de igual forma a las 09:00 TU se presentó el valor máximo de la magnitud del campo magnético con 27.7 nT y la componente B_z tuvo un valor de -18.8 a las 08:00 TU. Así mismo, la densidad máxima de partículas se midió a las 06:00 con un valor de 35.8 partículas/ cm^3 .

3.3.4. TG del 17 de marzo del 2015 (invierno)

Como se mencionó anteriormente, esta fue la TG más intensa del ciclo solar 24, que fue impulsada por un evento complejo en donde se alcanzó un índice Dst y SYM-H de -234 nT y un índice Kmex de 8, éstos registrados el 17 de marzo a las 23:00 TU (Figuras 3.2 y 3.3, inciso (d), así como la Fig.3.4, inciso a). El valor mínimo de la componente B_z se encontró a las 13:00 con -27.8 nT, así como la máxima magnitud del campo con 32.9 nT. Además, la temperatura máxima alcanzada fue de 1.4×10^6 K, teniendo lugar a las 11:00 TU, la densidad de partículas máximas fueron 60.5 partículas/ cm^3 detectándose a las 13:00 TU y la presión alcanzó los 39.2 nPa a las 13:00 TU. La velocidad del viento solar máxima asociada al evento se registró el 18 de marzo a las 23:00 TU con un valor de 691.9 km/s .

3.3.5. TG del 21 de junio del 2015 (verano)

Esta perturbación fue la segunda más intensa y fue generada por un evento complejo, siendo el evento principal una RIC por la cual se alcanzó un índice Dst y SYM-H de -198 nT y -208 nT a las 05:00 TU del 23 de junio, además de un índice Kmex de 7 (Figuras 3.2 y 3.3, inciso (e), así como la Fig.3.4, inciso b).

El 22 de junio a las 19:00 TU, la componente B_z del campo registró el valor máximo mínimo de -40.1 nT, la presión captó su valor máximo de 59.8 nPa a las 19:00 TU al igual que la densidad de partículas máxima, con 71.2 partículas/ cm^3 . Así mismo, la temperatura máxima asociada a la tormenta se encontró a las 21:00 con un valor de 2.3×10^6 K. Por último, el valor máximo de la velocidad del viento solar asociado al evento se alcanzó el 24 de junio a las 14:00 TU con un valor de 792.9 km/s .

3.3.6. TG del 19 de diciembre del 2015 (otoño)

El evento complejo dio a lugar la TG el día 20 de diciembre de 2016 a las 22:00 TU en donde los índices Dst y SYM-H alcanzaron el valor mínimo de -166 nT y -170 nT, respectivamente (Figuras 3.2 y 3.3, inciso (f), así como la Fig. 3.4, inciso c).

Por otra parte, la componente B_z del campo magnético tuvo un valor de -18.5 nT a las 23:00 TU. Además, la densidad de partículas máxima de 71.9 partículas/ cm^3 se registró a las 08:00 TU, y la magnitud del campo magnético captó su valor máximo de 19.6 nT a las 23:00 TU. La temperatura máxima asociada al evento se observó el 19 de diciembre a las 16:00 TU registrando 5.6×10^5 K, Así mismo, la presión máxima de 25.6 nPa se registró a las 21:00 TU al igual que la velocidad máxima con un valor de 504.7 km/s .

3.3.7. TG del 18 de enero del 2016 (invierno)

Esta tormenta fue impulsada por un evento complejo en donde el valor mínimo de los índices Dst y SYM-H se debieron a una EMC y se alcanzaron valores de -101 nT a las 17:00 TU del 20 de enero, además de un índice Kmex de 6 (Figuras 3.2 y 3.3, inciso (g), así como la Fig. 3.4, inciso d).

El 21 de enero a las 21:00 se registró el valor mínimo de la componente B_z del campo magnético de -18.9 nT. La densidad de partículas máxima (33.7 partículas/ cm^3) se encontró a las 05:00 TU. Por otra parte, la temperatura máxima de 6×10^5 K se captó a las 21:00 TU, así como la presión máxima de 11.4 nPa. Por último, la velocidad máxima del viento solar asociada con esta tormenta alcanzó los 550.1 km/s a las 10:00 TU.

3.3.8. TG del 13 de octubre del 2016 (otoño)

El evento generador de esta perturbación fue una EMC que dio a lugar a las siguientes características:

A las 18:00 TU del 13 de octubre los índices Dst y SYM-H alcanzaron su mínimo valor

de -110 nT y -114 nT, de igual forma el índice Kmex fue de 6 (Figuras 3.2 y 3.3, inciso (h), así como la Fig. 3.4, inciso e). A las 05:00 TU, la presión máxima fue de 13.8 nT y la densidad de protones máxima fue de 35.7 partículas/ cm^3 . Por otra parte, el valor mínimo de la componente B_z fue de -20 nT y se registró a las 16:00 TU. Por último, la magnitud máxima del campo magnético fue de 24.6 nT a las 22:00 TU. El 15 de octubre a las 23:00 se registró la temperatura máxima con un valor de 5×10^5 K, así como la velocidad máxima asociada a la tormenta con 751.4 km/s registrada a las 22:00 TU.

3.3.9. TG del 27 de mayo del 2017 (verano)

Un evento complejo conformado por 2 EMCs dio a lugar que el 27 de mayo a las 23:00 se registrara el valor máximo de la magnitud del campo magnético, de la componente B_z y de la velocidad máxima del viento con 23.2 nT, -22.4 nT y 411.8 km/s , respectivamente. Así mismo, la presión máxima asociada con la tormenta y la densidad de partículas se captaron a las 21:00 con un valor de 20.4 nPa y 71.9 partículas/ cm^3 . El evento del 28 de mayo alcanzó un índice Dst, SYM-H y Kmex de -125, -142 nT y 6, respectivamente (Figuras 3.2 y 3.3, inciso (i), así como la Fig. 3.4, inciso f). A las 08:00 TU. Por otra parte, el 29 de mayo a las 01:00 la temperatura máxima asociada al evento tuvo un valor de 1×10^6 K.

3.3.10. TG del 07 de septiembre del 2017 (verano)

Para esta perturbación, el evento impulsor fue uno complejo en donde 3 EMCs interactuaron dando a lugar a los siguientes valores: el 7 de septiembre a las 01:00 TU se registró un pico en la presión con un valor de 13.5 nPa. Además de la máxima densidad de partículas de 19.5 partículas/ cm^3 asociado al evento. Igualmente, la componente B_z del campo fue de -32.1 nT a las 23:00 TU y la magnitud del campo magnético tuvo un valor de 32.8 nT. El evento ocurrió el 8 de septiembre a las 02:00 TU en donde el índice Dst y SYM-H alcanzaron su valor mínimo de -122 nT. Así mismo, el índice Kmex tuvo un valor de 8 (Figuras 3.2 y 3.3, inciso (j), así como la Fig. 3.4, inciso g). Por otra parte, la temperatura máxima de 4.5×10^6 K se alcanzó a las 02:00 TU. Así mismo, la velocidad máxima del viento solar alcanzó los 859.2 km/s a las 06:00 TU.

3.3.11. TG del 25 de agosto del 2018 (verano)

Esta fue la última perturbación intensa registrada del ciclo solar 24 impulsada por un evento complejo. Los índices Dst y SYM-H alcanzaron un valor de -175 nT y 206 nT, respectivamente (Figuras 3.2 y 3.3, inciso k). El 26 de agosto a las 07:00 TU, además de un valor de 5 para el índice Kmex (Fig.3.4 inciso i). Por otra parte, la presión tuvo un valor de 9.2 nPa a las 08:00 TU y la componente del campo magnético captó su valor máximo a las 09:00 con 19.1 nT. Así mismo, la componente B_z del campo registró su valor mínimo de -16.2 nT a las 05:00 TU. Igualmente, la densidad máxima de partículas de 33.9 partículas/ cm^3 se capturó a las 08:00 TU, la temperatura de 4.6×10^6 K se encontró a las 14:00 TU. La velocidad máxima del viento solar asociado al evento fue de 633.9 km/s a las 17:00 TU.

Tormenta	Evento impulsor	Hora de inicio TU	Estación del año	B_z (nT)	\bar{B} (nT)	Vel. (km/s)	N_e cm^{-3}	T K	Presión nPa	SYM-H (nT)	Dst (nT)	K_{mex}
09/03/12	complejo	12:00	invierno	-18.5	24.6	800.4	26.2	2.7×10^5	30.5	-145	-150	-
24/04/12	complejo	05:00	primavera	-15.3	16	827.3	53	1.3×10^6	16.4	-125	-125	-
15/07/12	EMC	19:00	primavera	-18.8	27.7	694.2	35.8	1.4×10^6	28.4	-123	-130	-
17/03/15	complejo	06:00	invierno	-27.8	32.9	691.9	60.5	1.4×10^6	39.2	-234	-234	8
23/06/15	RIC	19:00	verano	-40.1	44.8	792.9	71.2	2.3×10^6	59.8	-208	-198	7
20/12/15	complejo	23:00	otoño	-18.5	19.6	504.7	71.9	5.6×10^5	25.6	-170	-166	7
20/01/17	complejo	23:00	invierno	-18.9	21.6	5520.1	33.7	6×10^5	11.4	-101	-101	6
13/11/16	EMC	03:00	otoño	24.6	-20	751.4	35.7	5×10^5	13.9	-114	-110	6
28/05/17	EMC	22:00	verano	-22.4	23.2	411.8	71.9	1×10^6	20.4	-142	-125	6
08/09/17	EMC	02:00	verano	-32.1	32.8	859.2	19.5	4.5×10^5	13.5	-146	-122	8
26/08/18	complejo	09:00	verano	-16.2	19.1	633.9	33.9	5.8×10^5	9.2	-206	-206	5

Tabla 3.2: Parámetros de las 11 TGs intensas registradas en el ciclo solar 24 construida con la base de datos de la página <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>.

3.4. Red GPS

Para este estudio se utilizaron los datos RINEX de la red TLALOCNet. Esta es una red de GPS y estaciones meteorológicas en México, diseñada para el estudio de los procesos atmosféricos y de tierra sólida. TLALOCNet abarca la mayor parte del país con un fuerte enfoque en el sur y el oeste de México (véase Cabral-Cano et al., 2018). Las estaciones analizadas y su ubicación se presentan en la Figura 3.5 y Tabla 3.3, teniendo un total de 44 estaciones analizadas.

De acuerdo con el mapa, se puede observar que se tuvo más información del oeste, sur y noroeste de México. Además, se contó con una serie de datos con un intervalo de información cada 15 minutos.

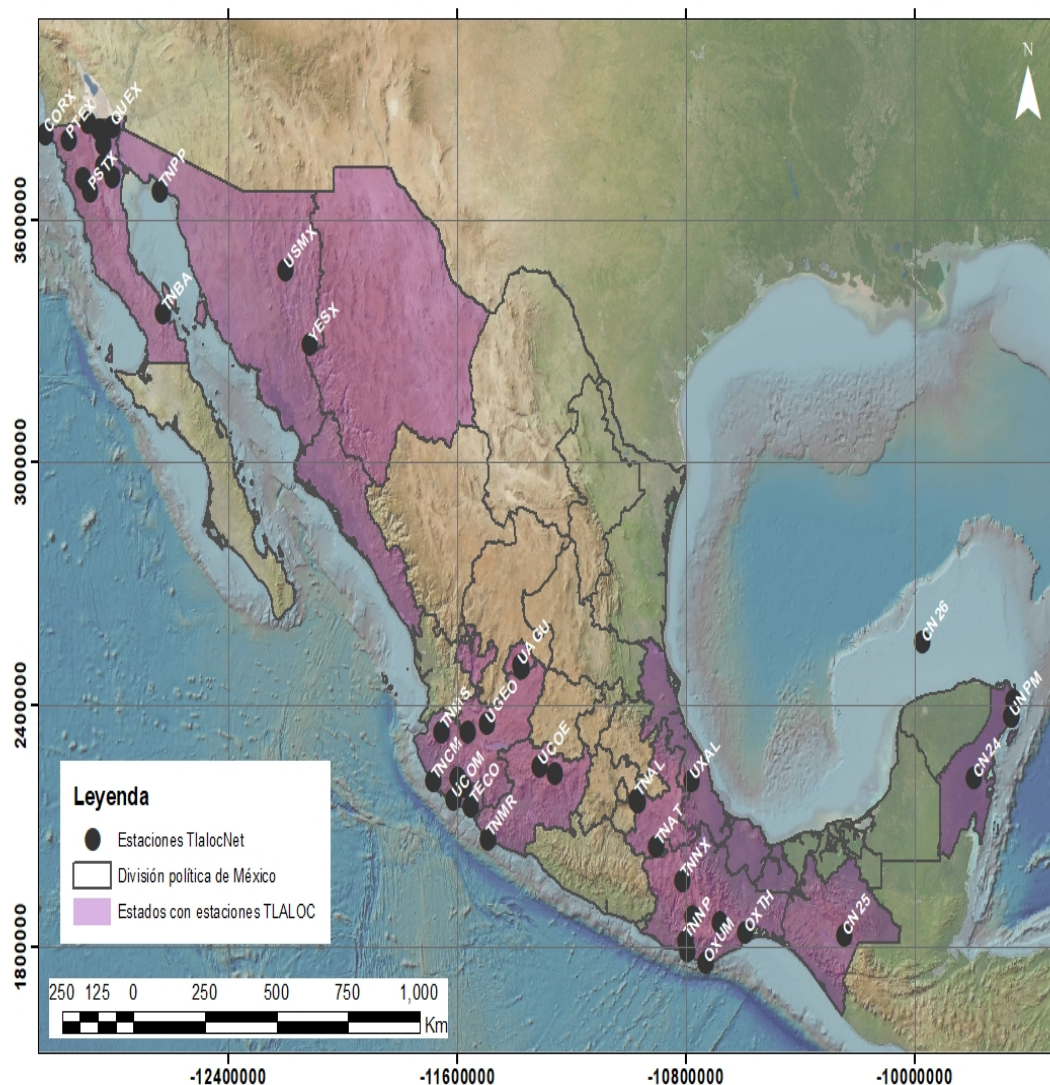


Figura 3.5: Localización de las estaciones GPS utilizadas. Este mapa se generó con ArcMap.

Sitio	Latitud	Longitud	Período de datos de datos
CN24	19.57	-88.05	2013-2022
CN25	16.23	-92.15	2014-2022
CN26	22.28	-89.68	2015-2022
CNC0	21.17	-86.820	2012-2022
CORX	32.41	-117.24	2017-2022
DAEX	32.22	-115.41	2007-2022
GUAX	28.88	-118.28	2015-2022
INEG	21.85	-102.28	2007-2022
OEXEC	16.52	-96.05	2015-2022
OXGU	16.63	-96.91	2007-2022
OXPE	15.88	-97.07	2005-2022
OXTH	16.28	-95.24	2007-2022
OXUM	15.66	-96.49	2010-2022
PALX	31.55	-116.06	2010-2022
PB2Y	32.61	-115.55	2016-2022
PENA	19.39	-104.10	2007-2022
PHJX	32.49	-115.55	2011-2022
PLPX	31.58	-115.15	2014-2022
PLTX	31.81	-115.43	2007-2022
POP1	19.06	-98.62	2016-2022
PSTX	31.31	-115.83	2014-2022
PTEX	32.28	-116.52	2012-2022
QUEX	32.54	-115.15	2015-2022
TECO	18.98	-103.86	2007-2022
TGMX	20.86	-86.69	2015-2022
TNAL	19.11	-98.65	2014-2022
TNAM	20.53	-103.96	2014-2022
TNAT	18.13	-98.04	2014-2022
TNBA	28.97	-113.54	2014-2022
TNMO	19.64	-101.22	2008-2022
TNMR	18.28	-103.34	2014-2021
TNMS	20.53	-104.79	2014-2022
TNNP	16.12	-97.14	2007-2022
TNPP	31.33	-113.63	2015-2022
UAGU	21.91	-102.31	2008-2022
UCOE	19.81	-101.69	2005-2022
UCOM	19.12	-104.40	2007-2022
UGEO	20.69	-103.35	2000-2022
UNPM	20.86	-86.86	2005-2022
USMX	29.82	-109.68	2004-2022
UXAL	19.51	-96.92	2005-2022
YESX	28.37	-108.91	2004-2022

Tabla 3.3: Coordenadas geográficas de las estaciones utilizadas en este estudio.

Así mismo, para propósitos de análisis de resultados, se dividió al territorio mexicano en zonas y con esto poder comparar lo obtenido entre zonas.

La “zona península” comprende las estaciones localizadas en el estado de Yucatán, siendo estas las estaciones *CNC0*, *CN24*, *CN26* y *UNPM* (ver Figura 3.6).

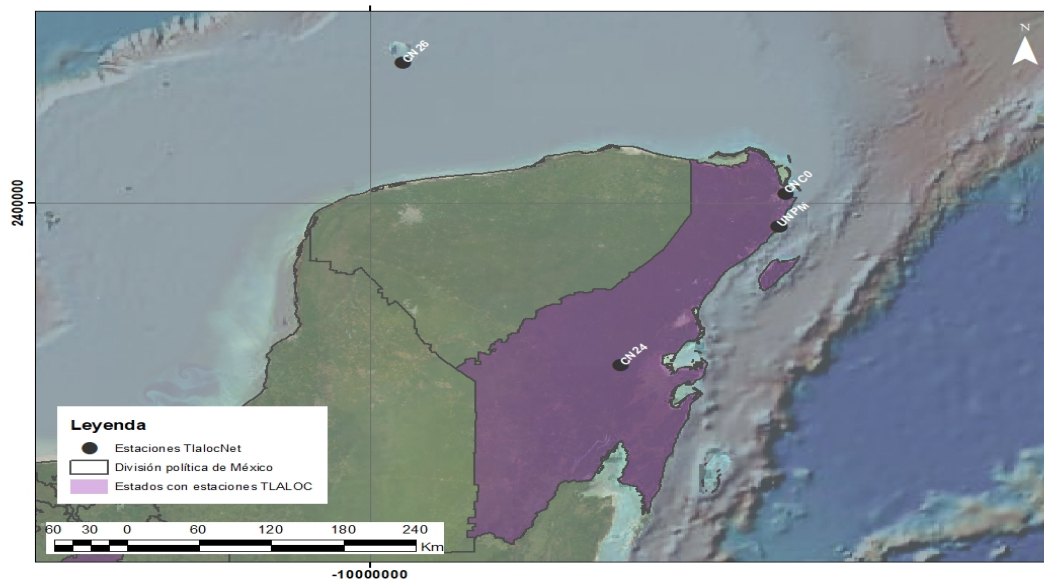


Figura 3.6: Localización de las estaciones GPS en la zona península. Este mapa se generó con ArcMap.

La “zona norte” corresponde a las estaciones ubicadas en los estados de Baja California Norte y Sonora, con las estaciones *CORX*, *GUAX*, *PTEX*, *PB2Y*, *PJZX*, *PALX*, *PLTX*, *PLPX*, *QUEX*, *TNPP*, *TNBA*, *USMX* y *YESX* (ver Figura 3.7).

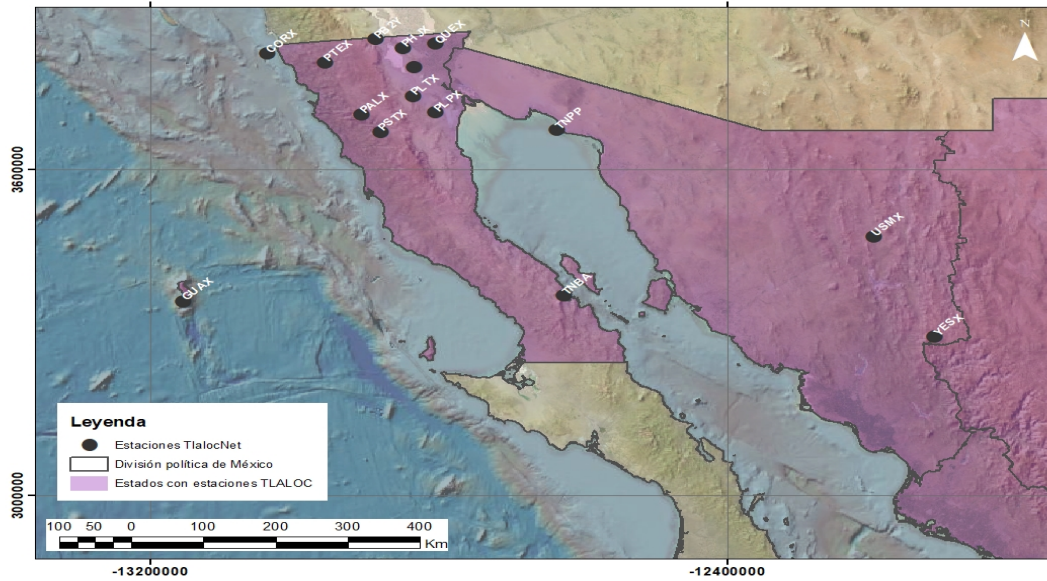


Figura 3.7: Localización de las estaciones GPS en la zona norte. Este mapa se generó con ArcMap.

Para la “zona oeste”, se muestran las estaciones ubicadas en los estados de Guadalajara, Aguascalientes y Michoacán, con las estaciones *TNAM*, *TECO*, *PENA*, *AUGU*, *UCOM*, *UGEO*, *UCOE* y *TNMO* (ver Figura 3.8).

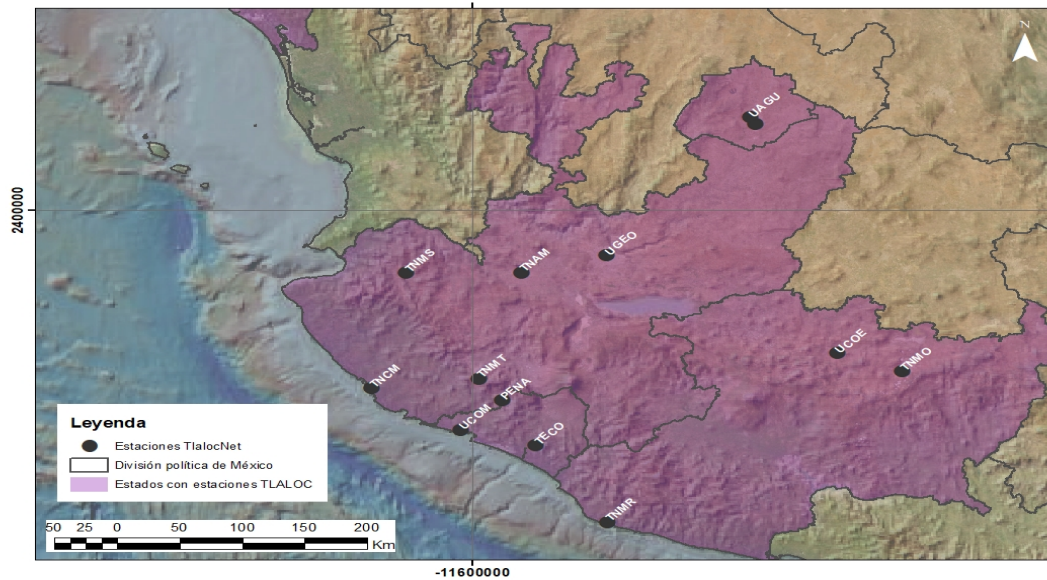


Figura 3.8: Localización de las estaciones GPS en la zona oeste. Este mapa se generó con ArcMap.

Finalmente, se tiene la zona “sur”, que comprende a los estados de Oaxaca, Puebla,

Veracruz y Chiapas, con las estaciones *CN25*, *OXPE*, *OXUM*, *OXEC*, *TNNP*, *TNAT*, *TNAL* y *UXAL* (ver Figura 3.9).

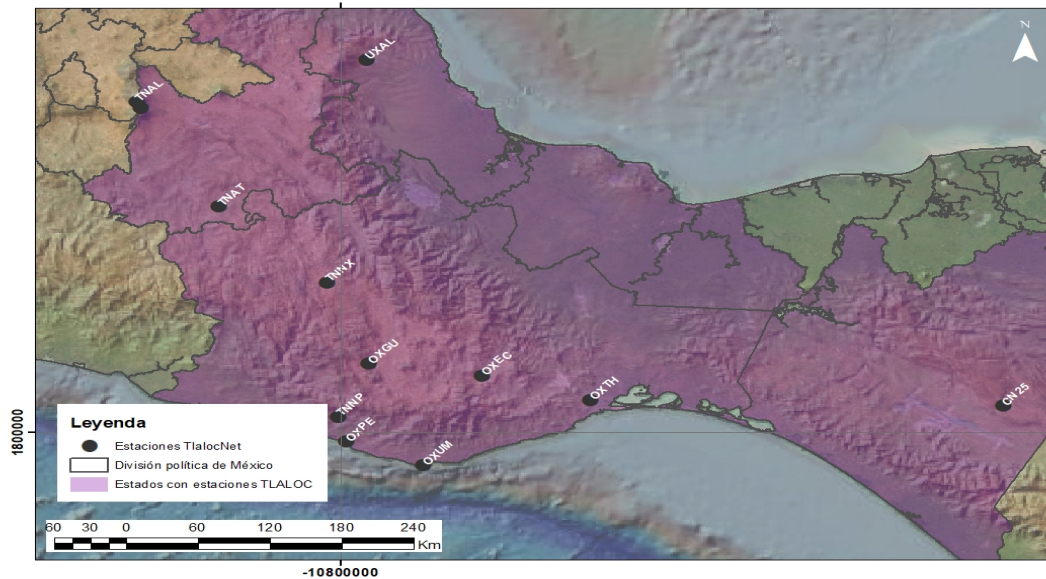


Figura 3.9: Localización de las estaciones GPS en la zona sur. Este mapa se generó con ArcMap.

3.5. GPS-TEC desarrollado por el Dr. Gopi Seemala

Los archivos de observación RINEX se pueden procesar mediante el software de aplicación de análisis GPS-TEC, desarrollado por el doctor Gopi Seemala del Instituto de Investigación Científica, Boston College, EE. UU. (Baiju et al., 2020).

Este software fue diseñado para el análisis de datos GPS, y tiene como características el poseer la capacidad para procesar por lotes los archivos de entrada, tales como archivos mensuales, anuales, de varias estaciones, etc.; también, calcula el valor TEC a partir de los datos de observación de GPS RINEX, Novatel, SCINDA (archivos. scn) y Leica. Además de calcular las desviaciones entre canales para diferentes satélites en el receptor, entre otras características (Seemala, 2012).

El software de análisis de TEC es capaz de procesar archivos de observación de RINEX. Archivos binarios de Novatel, archivos binarios de SCINDA, archivos binarios de Leica; y también necesita el archivo de navegación RINEX para la fecha de observación para calcular los ángulos de elevación y azimut de los satélites, que se requieren para el cálculo vertical de TEC ($v\text{TEC}$). Además, este software puede calcular el índice ionosférico S_4 .

Sin embargo, este software sólo calcula valores de TEC locales y no genera mapas (Seemala, 2012). Además, se ha observado que presenta dificultades para proporcionar resultados ciertos a latitudes medias y en fechas cercanas al mínimo solar, esto observado en trabajos

previos.

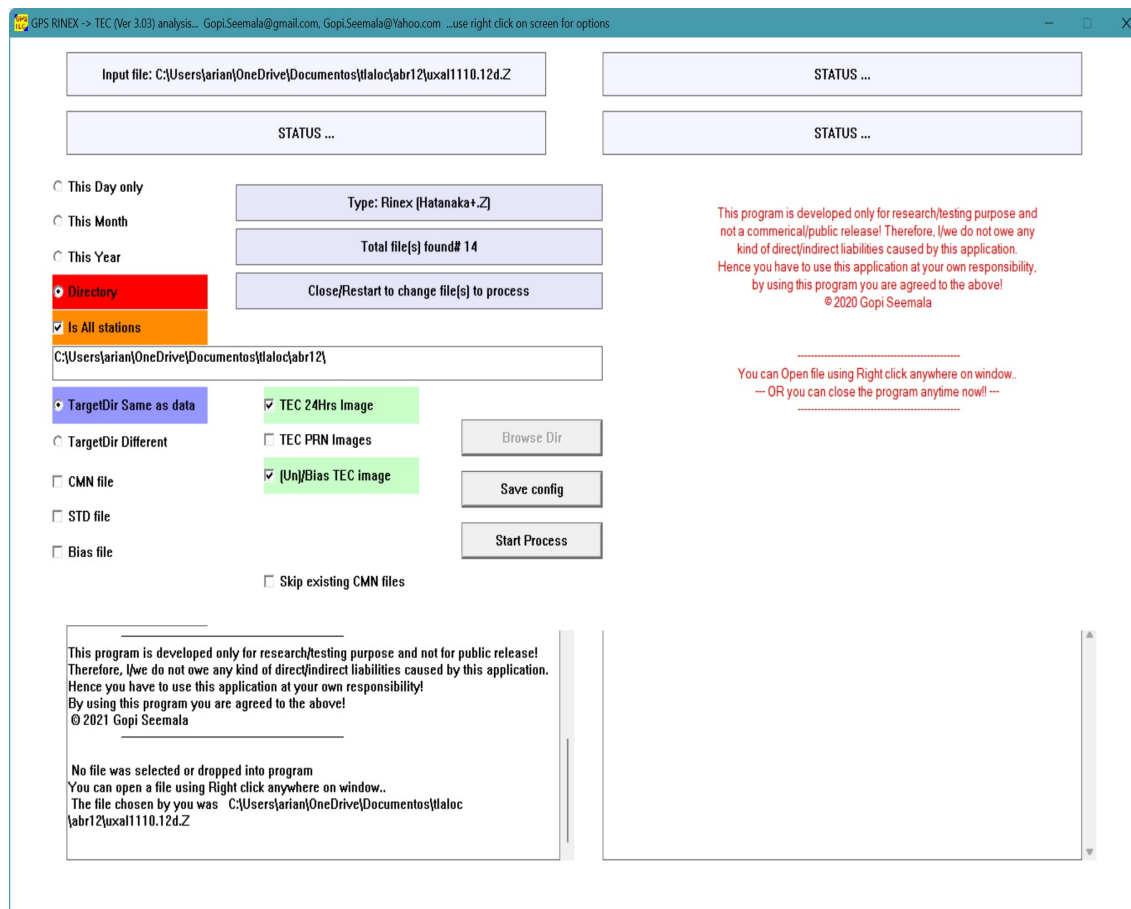


Figura 3.10: Entorno de ejecución del software GPS-TEC.

3.6. Tec-suite

Tec-suite es una técnica que permite el cálculo del sTEC (contenido total de electrones oblicuo) en la ionósfera, que utiliza datos de pseudorange de código y valores de fase portadora, ambos provenientes de los archivos RINEX de los sistemas de navegación, tales como GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, Geo e IRNSS (Yasyukevich et al., 2015; Mylnikova et al., 2015; Yasyukevich et al., 2015). Para este estudio se ocuparon archivos de la red de GPS.

Además, esta técnica genera una serie de carpetas de salida donde se almacenan, de acuerdo con el año de los datos procesados. Posteriormente, se enlista en carpetas correspondientes al día del año y finalmente, en carpetas pertenecientes a la estación GPS, en donde dentro de estas se generan 32 archivos correspondientes a la constelación GPS.

Para configurar los archivos de salida se utiliza un archivo *.cfg* en donde se le indica al software cómo trabajar, de acuerdo con la Figura 3.11 se puede describir cada una de las entradas de este archivo:

```

4  obsDir = C:\ionosfera_mexico\Software\TEC\obs
5  navDir = C:\ionosfera_mexico\Software\TEC\nav
6  # Output directory
7  outDir = tec
8
9  # Set and order of output file columns
10 recFields = 'tsn, hour, el, az, tec.lll2, tec.plp2, validity'
11
12 # Date/time format
13 datetimeFormat = '%Y-%m-%dT%H:%M:%S'
14
15 # Interval in seconds to pick values from an observation file (0 by default)
16 samplingInterval = 0
17
18 # Priority of search of navigation files for GPS, GEO and GLONASS
19 navPriorityGPS = brdc, auto, cnc0, uxal, daex, ineg, oxec, oxgu, oxlp, oxp, oxpe, oxtu, palx, pena, phjx, pjzx, plpx, pltx, pstx, ptax, ptex, puri, quex, sa27,
20 navPriorityGLO = mcct, brdc, cnc0, uxal, daex, ineg, oxec, oxgu, oxlp, oxpe, oxtu, palx, pena, pjzx, plpx, pltx, pstx, ptax, ptex, puri, sa27, tmno, uagu, uccn
21 navPriorityGEO = list, cnc0
22
23 # When 'True', absence of navigation files for all satellite systems besides
24 # GLONASS is ignored.
25 navIgnoreAbsence = False
26
27 # Sets logging level: DEBUG|INFO|WARNING|ERROR|CRITICAL
28 logLevel = WARNING
29

```

Figura 3.11: Entorno de configuración del software Tec-suite.

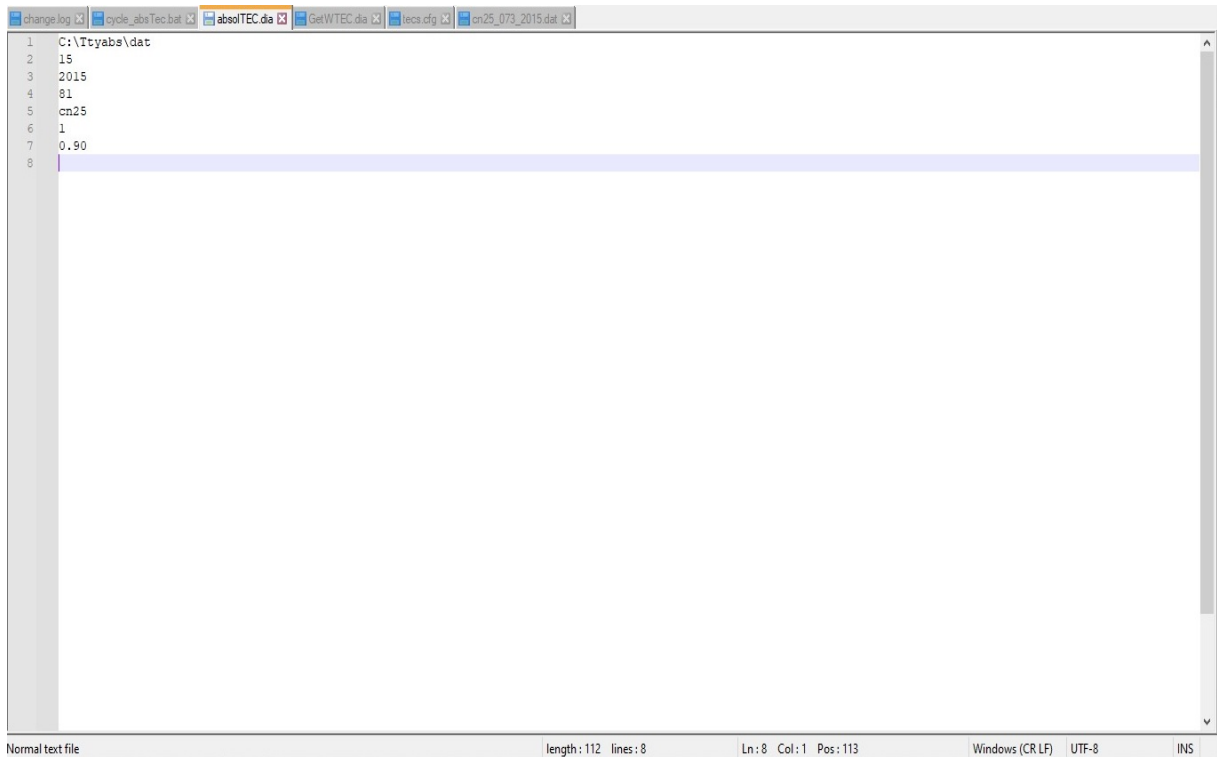
- Líneas 4 y 5: Indican la ubicación de los archivos RINEX de observación y navegación, respectivamente.
- Línea 7: Señala la carpeta en la que se guardarán los archivos de salida que contienen los valores de sTEC.
- Línea 10: Muestra el formato que deberán tener los archivos de salida, organizando su contenido por columnas iniciando con el UT, hora, elevación y azimut del satélite, el sTEC calculado en función de la fase portadora, el sTEC obtenido con el pseudorange de código y finalmente, la validación de los datos, es decir, si estos se generaron correctamente.
- Línea 13: Se indica el formato que debe tener la fecha del archivo de salida.
- Líneas 19, 20 y 21: Indican los archivos principales que se tomarán para los datos de navegación, en este caso, el nombre de las estaciones GPS.
- Las últimas líneas se utilizan para indicarle al software cómo proceder a falta de archivos de navegación.

3.7. TayAbsTec

TayAbsTec es un software para el cálculo del vTEC absoluto en el punto de intersección entre la capa o latitud en la que se concentra la mayor cantidad de electrones y la trayectoria

perpendicular desde el centro de la Tierra (Yasyukevich et al., 2015; Mylnikova et al., 2015; Yasyukevich et al., 2015). Este software se utiliza como entrada los archivos de salida de Tec-suite (sTEC) y por medio de series de Taylor, se obtiene el vTEC. Para configurar los archivos de salida de TayAbsTec, se pueden utilizar dos archivos: *absolTEC.dia* (Figura 3.12) y *cycleAbsTEC* (Figura 3.13). El primero se utiliza para procesar el archivo de salida de Tec-suite para un día (día de año) y una estación GPS, la descripción de este archivo, de acuerdo con la Figura 3.12 es la siguiente:

- Línea 1: Se indica la carpeta en donde se encuentran los archivos de salida de Tec-suite con los que se trabajarán.
- Línea 2: Señala el ángulo de elevación del satélite (cuanto mayor sea en ángulo, se tendrán menos errores y menos satélites que se tomarán para el cálculo, por otro lado, menor ángulo de elevación más errores y más satélites).
- Línea 3: Introduce el año con el que se trabajará.
- Línea 4: Se indica el día de año que se quiere procesar.
- Línea 5: Señala la estación GPS con la que se quiere calcular el vTEC absoluto.
- Línea 6: Indica el intervalo de tiempo en el que se va a hacer el cálculo. En el caso del ejemplo es 1 hora.
- Línea 7: Se trata de una magnitud proporcional a la latitud de la zona de estudio. Para México es 0.90.



```
1 C:\Ttayabs\dat
2 15
3 2015
4 81
5 cm25
6 1
7 0.90
8
```

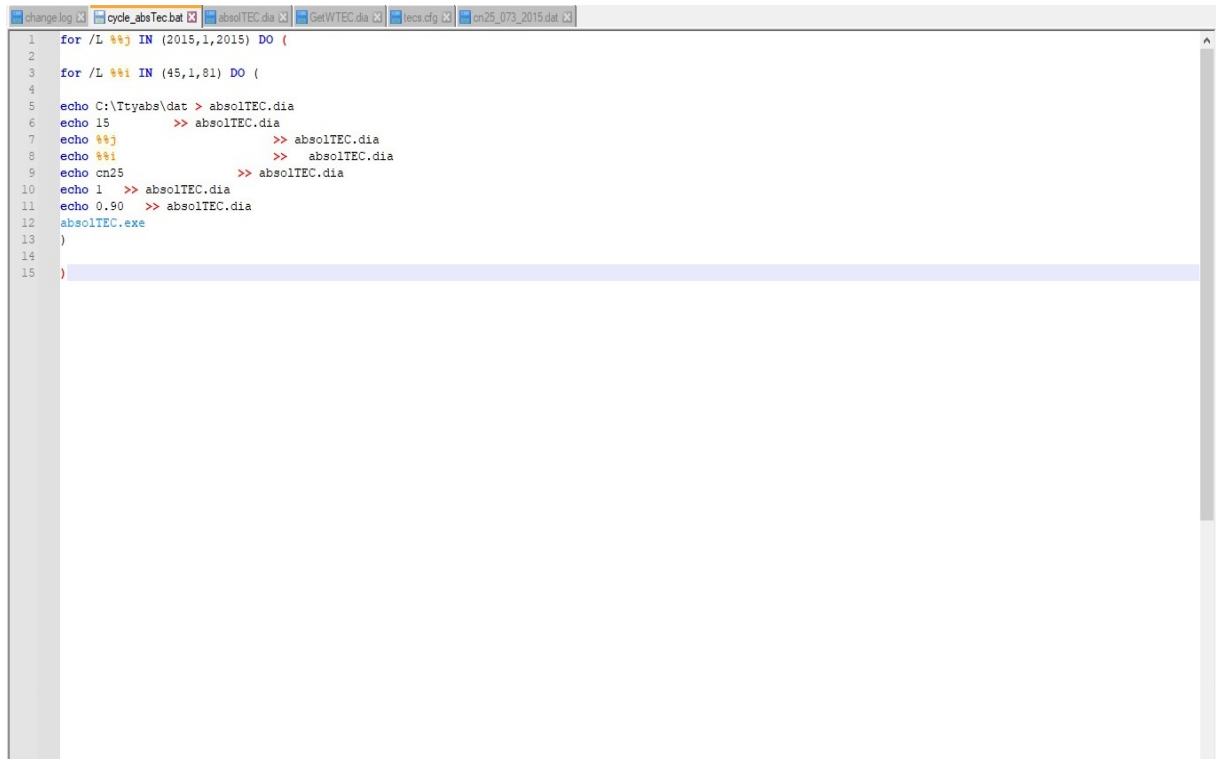
The screenshot shows a text editor window with a tab titled 'cycle_absTec.bat'. The editor contains eight lines of configuration data. The status bar at the bottom indicates 'Normal text file', 'length: 112 lines: 8', and 'Ln: 8 Col: 1 Pos: 113'. The window title bar shows 'Windows (CR LF)' and 'UTF-8' encoding.

Figura 3.12: Entorno de configuración del software TayAbsTec para procesar los datos de salida del software Tec-suite por día y estación.

De igual forma, *cycle_absTec* configura el archivo de salida del software TayAbsTec, con la diferencia que este último es un archivo de procesamiento por lotes con un límite de datos de un año por estación GPS.

De acuerdo con la Figura 3.13, la descripción de este archivo es la siguiente:

- Línea 1: se indica el año con el que se va a trabajar.
- Línea 2: Se introduce el rango de días del año que se procesarán.
- Línea 5: Señala la ruta en la que se encuentran los archivos de salida de Tec-suite.
- Línea 6: Indica el ángulo de elevación del satélite (entre mayor sea en ángulo, se tendrán menos errores y menos satélites que se tomaran para el cálculo, por otro lado, menor ángulo de elevación más errores y más satélites).
- Línea 9: Se introduce la estación GPS con la que se trabajará.
- Línea 10: Indica el intervalo de tiempo en el que se va a hacer el cálculo, en el caso del ejemplo es 1 hora.
- Línea 11: Se trata de una magnitud proporcional a la latitud de la zona de estudio. Para México es 0.90.



```
1 for /L %%j IN (2015,1,2015) DO (  
2  
3 for /L %%i IN (45,1,81) DO (  
4  
5 echo C:\Ttyabs\dat > absolTEC.dia  
6 echo %%j >> absolTEC.dia  
7 echo %%i >> absolTEC.dia  
8 echo %%i >> absolTEC.dia  
9 echo cn25 >> absolTEC.dia  
10 echo 1 >> absolTEC.dia  
11 echo 0.90 >> absolTEC.dia  
12 absolTEC.exe  
13 )  
14 )  
15 )
```

Figura 3.13: Entorno de configuración del software TayAbsTec para procesar los datos de salida del software Tec-suite por un rango amplio de días (hasta un año) y por estación.

Se tomó la decisión de utilizar las 3 metodologías, es decir, tanto la de los softwares Tec-suite y TayAbsTec como la de GPS-TEC desarrollado por el Dr. Gopi Seemala, ambas con la finalidad de observar, si existen, discrepancias en los valores calculados de $vTEC$, esto por las latitudes en la que se encuentra México, por estaciones del año, así como el momento del ciclo solar en la que se presentó la TG. Esto toma relevancia ya que se debe contar con un método certero que brinde resultados confiables para estudios a las latitudes en las que se encuentra el país y para el análisis de uno o varios ciclos solares. También es importante señalar que los 3 softwares utilizados trabajan en sistemas operativos Windows de Microsoft

Capítulo 4

Análisis y Resultados

En este Capítulo se presentarán de forma gráfica y analítica los resultados obtenidos con los métodos explicados en el Capítulo anterior. En las siguientes secciones se examinarán cada uno de los gráficos y se hará una comparación entre métodos. Cabe mencionar que este análisis se realizó para cada una de las 11 TGs intensas del ciclo solar 24, así como a cada estación GPS estudiada en este trabajo.

4.1. TEC

Una vez identificadas las fechas en las que se presentaron cada una de las 11 TGs intensas analizadas en este estudio, se obtuvo y verificó el comportamiento del TEC en la ionósfera haciendo uso de diferentes técnicas, las cuales se describieron en las secciones 3.5, 3.6 y 3.7.

Se calculó el sTEC a partir de los archivos RINEX y haciendo uso del software GPS-TEC, el cual lo transforma al vTEC, y mediante los archivos de salida de este programa, se observó el valor máximo alcanzado durante el período de análisis para una estación fija GPS.

Por otra parte, con base en los cálculos del vTEC obtenidos por los softwares Tec-suite TayAbsTec se graficó el comportamiento del vTEC correspondiente a cada estación a diferentes latitudes para cada una de las TGs (Apéndice A) y se realizó una comparación entre los cálculos obtenidos mediante cada software (Apéndice B). Por medio de estos gráficos y resultados se presentará un análisis previo de la presencia de tormentas ionosféricas asociadas al comportamiento del vTEC.

En las siguientes secciones se describen los resultados obtenidos por el software de ambas metodologías.

4.1.1. Comportamiento del vTEC durante la TG del 8 de marzo de 2012

Resultados del software GPS-TEC

Es importante mencionar que las series de vTEC se obtuvieron para ésta y las otras tormentas tomando en consideración 27 días previos. Esto permitirá tener un valor promedio

de esta serie, que podrá compararse con los días perturbados de la ionósfera durante la TG.

La comparación entre el día perturbado con el valor promediado a 27 días se llevó a cabo en específico a través de diferentes índices del contenido total de electrones que se presentarán más adelante. Esto permite cuantificar de mejor manera el grado de perturbación de la ionósfera terrestre medible por la instrumentación utilizada.

Con base en la Tabla 4.1, la cual se destaca el vTEC máximo calculado para cada estación, siendo las de mayor magnitud: *TECO*, *TNMO*, *UAGU*, *UCOE*, *UNIP* y *UNPM* con una magnitud de vTEC de 65.5, 63.3, 62.9, 65.5, 69.1 y 68.8 *TECU*, respectivamente. Las estaciones con una menor magnitud de vTEC fueron *PJZX*, *QUEX*, *PTEX* y *SA27* con un vTEC de 32.5, 40.1, 41.2 y 41.4 *TECU*, respectivamente. A partir de estos resultados se pudo observar una mayor respuesta de la ionósfera en parte suroeste del territorio mexicano, y una menor respuesta en la parte norte de México.

Estación	vTEC máximo (TECU)	Hora en la que se presentó el valor máximo	Tiempo que le llevó a la ionósfera responder a la TG
CNC0	45	20:00	8 h
DAEX	43.8	20:00	8 h
INEG	37.1	-	-
OXEC	53	22:00	10 h
OXGU	48.3	22:00	10 h
OXLP	59.7	22:00	10 h
OXPE	59.3	-	-
OXTU	58.6	-	-
PALX	44.8	20:00	8 h
PENA	53	22:00	10 h
PHJX	45.3	20:00	8 h
PJZX	32.5	20:00	8 h
PLPX	43.4	-	-
PLTX	45.7	19:00	7 h
PSTX	42.5	22:00	10 h
PTAX	43.8	20:00	8 h
PTEX	41.2	20:00	8 h
PURI	49.4	22:00	10 h
QUEX	40.1	20:00	8 h
SA27	41.4	-	-
TECO	65.5	22:00	10 h
TNMO	63.3	22:00	10 h
UAGU	62.9	21:00	9 h
UCOE	65.5	21:00	9 h
UCOM	57.9	20:00	8 h
UNIP	69.1	20:00	8 h
UNPM	68.8	20:00	8 h
UXAL	46.7	18:00	6 h

Tabla 4.1: Estaciones GPS y el vTEC máximo calculado con el software GPS-TEC para la tormenta del 8 de marzo de 2012.

Así mismo, al observar el comportamiento del vTEC de cada estación durante esta perturbación geomagnética, se identificó la hora en la que se presentó el vTEC máximo y se contrastó con la hora en que se dio a lugar el SSC de esta TG, que, para el caso de la tormenta del 08 de marzo de 2012, el vTEC máximo se registró entre las 18:00 y 22:00 TU, teniendo una respuesta de la ionósfera ante la perturbación entre 6 y 10 h después del SSC.

Resultados de los softwares Tec-suite y TayAbsTec

De forma general, los resultados obtenidos con los softwares Tec-suite y TayAbsTec muestran el vTEC máximo calculado para cada estación GPS descrita en este estudio, en donde

se puede observar las estaciones con un registro de $vTEC$ mayor, tales como *OXGU*, *OXTU*, *OXPE*, *OXEC*, *TECO* y *PENA* con valores $vTEC$ de 65.27 hasta 68.56 *TECU*.

Por otra parte, el registro de un valor de $vTEC$ menor se observó en las estaciones *PALX*, *PLTX*, *PJZX* Y *DAEX* con valores que van desde 39.8 hasta 41.5 *TECU*.

Así mismo, se observó la discrepancia entre los datos calculados por el software *GPS-TEC* y *TayAbsTec* en donde la mayor diferencia se observó en las estaciones *INEG* y *OXGU* teniendo una diferencia de 13 y 20 *TECU* aproximadamente.

Tomando en cuenta estos resultados, se puede apreciar una mayor perturbación de la ionósfera debido a esta TG en latitudes al suroeste del territorio mexicano y perturbación menor en el norte de México. De manera concreta, la Figura 5.1 inciso (a), se puede observar el incremento del $vTEC$ asociado a esta tormenta a partir del día 68 (8 de marzo), seguido de una disminución y de nuevo, una pequeña subida de este, lo cual se puede asociar a la fase positiva de una TI. También se destaca la discordancia entre el comportamiento del $vTEC$ a diferentes latitudes y el comportamiento irregular del mismo a partir de la TG. Por último, la Figura muestra el $vTEC$ asociado a la TG del 8 de marzo, que se detectó entre las 18:00 y 20:00. Tomando en cuenta que el SSC se presentó a las 12:00 TU, la respuesta de la ionósfera se percibió 6 h después de éste.

4.1.2. Comportamiento del $vTEC$ durante la TG del 23 de abril de 2012

Resultados del software GPS-TEC

Después de examinar la tormenta del 23 de abril de 2012, se construyó la Tabla 4.2 en la cual se resalta el $vTEC$ máximo calculado para cada estación, siendo las de mayor magnitud las estaciones *INEG*, *OXEC*, *OXLP* y *CNC0* con una magnitud de $vTEC$ de 69.9, 69.2, 69.7 y 68.4 *TECU*, respectivamente.

Las estaciones con una menor magnitud de $vTEC$ fueron *QUEX*, *PLTX*, *PTAX*, *PLPX* y *PTEX* con un $vTEC$ de 44.6, 47, 49, 49.6 y 49.9 *TECU*, respectivamente.

Tomando en cuenta estos resultados se puede observar una mayor respuesta de la ionósfera en la parte centro y sur del territorio mexicano, y una menor respuesta en la parte norte de la república.

El análisis del comportamiento del $vTEC$ para cada estación arrojó la hora TU en la que se presentó el $vTEC$ máximo y se contrastó con la hora en que se tuvo lugar el SSC de esta TG (05:00 TU) que, para el caso de la tormenta del 23 de abril de 2012, el $vTEC$ máximo se registró entre las 18:00 y 22:00 TU, teniendo una respuesta de la ionósfera ante la perturbación entre 14 y 17 h después del SSC.

Estación	vTEC máximo (TECU)	Hora TU en la que se presentó el valor máximo	Tiempo que le llevó a la ionósfera responder a la TG
CNC0	68.4	22:00	17 h
DAEX	56.	22:00	17 h
INEG	69.9	21:00	16 h
OXEC	69.2	17:00-21:00	12-16 h
OXGU	50.2	21:00	16 h
OXLP	69.7	21:00	16 h
PALX	50.3	21:00	16 h
PENA	65.7	22:00	17 h
PHJX	52.5	21:00	16 h
PJZX	57.6	21:00	16 h
PLPX	49.6	22:00	17 h
PLTX	47	22:00	17 h
PSTX	49.5	22:00	17 h
PTAX	49	22:00	17 h
PTEX	49.9	21:00	16 h
PURI	64.2	21:00	16 h
QUEX	44.6	22:00	17 h
SA27	58.6	22:00	17 h
TECO	60.1	21:00	16 h
TNMO	60.4	22:00	17 h
UAGU	60.5	21:00	16 h
UCOE	60.4	21:00	16 h
UCOM	58.1	21:00	16 h
UNIP	59.3	21v00	16 h
UNPM	53.1	-	-
UXAL	64.3	19:00	14 h

Tabla 4.2: Estaciones GPS y el vTEC máximo calculado con el software GPS-TEC para la tormenta del 23 de abril de 2012.

Resultados de los softwares Tec-suite y TayAbsTec.

Con base en los datos obtenidos con los softwares Tec-suite y TayAbsTec se puede notar que las estaciones con una mayor diferencia entre el vTEC calculado con el software GPS-TEC y TayAbsTec, las estaciones son *DAEX*, *OXGU*, *PJZX* y *SA27* con una diferencia de entre 14 y 19 *TECU*.

Se registraron las estaciones con un vTEC más alto: *OXEC*, *OXGU*, *OXPE* y *OXLP* ubicadas en la zona sur del territorio mexicano y con un vTEC de $\sim 69TECU$. Las estaciones con un vTEC más bajo fueron *PTEX* (41.9 *TECU*), *PLTX* (42), *PTAX* (42.1), *PJZX* (42.5) y *SA27* (43.4), situadas en el norte de la república mexicana. Por otra parte, la Figura 5.1 inciso (b), mostró el comportamiento del vTEC durante la TG, la cual se presentó el DOY

113, en donde se puede observar un aumento del $vTEC$ constante, lo cual posiblemente se asocie a la fase positiva de la TI. Así mismo, se rectificó el comportamiento constante del $vTEC$ durante la TG, además de la diferencia entre magnitudes entre latitudes, siendo las menores las pertenecientes a estaciones ubicadas al norte del país. Por último, se observó el $vTEC$ máximo asociado a la TG del 23 de abril se registró el 24 de abril entre las 20:00 y 22:00 TU (39 h posteriores al SSC).

4.1.3. Comportamiento del $vTEC$ durante la TG del 14 de julio de 2012

Resultados del software GPS-TEC

De acuerdo con la Tabla 4.4 del $vTEC$ para la tormenta del 14 de julio de 2012, se destaca el $vTEC$ máximo calculado para cada estación, siendo las estaciones de mayor magnitud *INEG*, *OXGU* y *CNC24* con una magnitud de $vTEC$ de 73.6, 72.4 y 69.9 *TECU*, respectivamente. Las estaciones con una menor magnitud de $vTEC$ fueron *PJZX*, *CN25*, *QUEX*, *PLPX*, *PLTX*, *PALX*, *SA27* y *PSTX* con un $vTEC$ de 31.3, 33.4, 35.6, 35.6, 36.7, 37.2, 37.4 y 38.3 *TECU*, respectivamente. A partir de estos resultados se puede observar una mayor respuesta de la ionósfera en parte centro y sur del territorio mexicano, y una menor respuesta en la parte norte de México.

Tomando en consideración la evaluación del comportamiento del $vTEC$ para cada estación, de forma general, se identificó la hora en la que se presentó el $vTEC$ máximo y se contrastó con la hora en que se dio a lugar el SSC de esta TG (19:00 TU), para el caso de la tormenta del 23 de abril de 2012. El $vTEC$ máximo se registró entre las 22:00 y 24:00 TU, teniendo una respuesta de la ionósfera ante la perturbación entre 3 y 5 h después del SSC.

Estación	vTEC máximo (TECU)	Hora TU en la que se presentó el valor máximo	Tiempo que le llevó a la ionósfera responder a la TG
CN24	69.9	-	-
CN25	33.4	-	-
DAEX	54.9	23:00	4 h
INEG	73.6	23:00	4 h
OXEC	45	23:00	4 h
OXGU	72.4	24:00	5
OXLP	57.8	23:00	4 h
OXP2	51.8	24:00	5 h
OXPE	58.7	23:00	4 h
OXTU	48	-	-
PALX	37.2	23:00	4 h
PENA	57.9	23:00	4 h
PHJX	41.3	23:00	4 h
PJZX	31.3	23:00	4 h
PLPX	35.6	23:00	4 h
PLTX	36.7	23:00	4 h
PSTX	38.3	-	-
PTAX	56.7	23:00	4 h
PTEX	54.5	23:00	4 h
PURI	45	23:00	4 h
QUEX	35.6	23:00	4 h
SA27	37.4	-	-
TNMO	58.9	23:00	4 h
UAGU	59.4	23:00	4 h
UCOM	58.1	23:00	4 h
UNIP	60	23:00	4 h
UNPM	59.9	22:00	3 h
UXAL	59	-	-

Tabla 4.3: Estaciones GPS y el vTEC máximo calculado con el software GPS-TEC para la tormenta del 14 de julio de 2012.

Resultados de los softwares Tec-suite y TayAbsTec

Se identificó la diferencia entre las magnitudes del vTEC calculado con el software GPS-TEC y TayAbsTec, siendo las estaciones *DAEX*, *OXGU*, *OXPE*, *PTAX* y *PTEX* las que tuvieron una mayor diferencia entre cálculos (~ 19 TECU). Por otro lado, las estaciones con un mayor vTEC fueron las estaciones *OXGU*, *OXEC* y *OXLP* (ubicadas en la parte sur de México) *PENA*, *TNMO* e *INEG* (estas últimas tres se encuentra en la parte oeste de la república) con un valor de entre 52 y 56 TECU. Caso contrario, las estaciones con un vTEC menor fueron *PTAX*, *PJZX*, *PLTX* y *DAEX* (con ~ 34 TECU) todas éstas situadas en la parte norte del territorio mexicano.

La diferencia entre el $vTEC$ calculado por las estaciones GPS a diferentes latitudes se puede observar en la Figura 5.1 inciso (c) donde se puede apreciar la desigualdad entre estaciones en el comportamiento del $vTEC$. Así mismo, se puede observar el $vTEC$ máximo registrado después del SSC de la tormenta (DOY 196), y posteriormente, el descenso súbito del mismo, lo que podría estar relacionado con la fase negativa de una TI. Para concluir, la Figura 5.1, inciso (b) muestra el $vTEC$ máximo registrado para esta perturbación, el cual se identificó el día 14 de julio (DOY 196) entre las 19:00 y 21:00 TU, es decir, casi inmediatamente después del SSC (19:00 TU) de esta tormenta. En este sentido, se pudo notar una magnitud de $vTEC$ mucho más alta a latitudes correspondientes al sur de la república mexicana que en latitudes del centro y norte del territorio.

4.1.4. Comportamiento del $vTEC$ durante la TG del 14 de julio de 2012

Resultados del software GPS-TEC

De acuerdo con la Tabla 4.4 del $vTEC$ para la tormenta del 14 de julio de 2012, se destaca el $vTEC$ máximo calculado para cada estación, siendo las de mayor magnitud *INEG*, *OXGU* y *CNC24* con una magnitud de $vTEC$ de 73.6, 72.4 y 69.9 *TECU*, respectivamente. Las estaciones con una menor magnitud de $vTEC$ fueron *PJZX*, *CN25*, *QUEX*, *PLPX*, *PLTX*, *PALX*, *SA27* y *PSTX* con un $vTEC$ de 31.3, 33.4, 35.6, 35.6, 36.7, 37.2, 37.4 y 38.3 *TECU*, respectivamente. A partir de estos resultados se puede observar una mayor respuesta de la ionósfera en parte centro y sur del territorio mexicano, y una menor respuesta en la parte norte de México.

Tomando en consideración la evaluación del comportamiento del $vTEC$ para cada estación, de forma general, se identificó la hora en la que se presentó el $vTEC$ máximo y se contrastó con la hora en que se dio a lugar el SSC de esta TG (19:00 TU), para el caso de la tormenta del 23 de abril de 2012. El $vTEC$ máximo se registró entre las 22:00 y 24:00 TU, teniendo una respuesta de la ionósfera ante la perturbación entre 3 y 5 h después del SSC.

Estación	vTEC máximo (TECU)	Hora TU en la que se presentó el valor máximo	Tiempo que le llevó a la ionósfera responder a la TG
CN24	69.9	-	-
CN25	33.4	-	-
DAEX	54.9	23:00	4 h
INEG	73.6	23:00	4 h
OXEC	45	23:00	4 h
OXGU	72.4	24:00	5 h
OXLP	57.8	23:00	4 h
OXP2	51.8	24:00	5 h
OXPE	58.7	23:00	4 h
OXTU	48	-	-
PALX	37.2	23:00	4 h
PENA	57.9	23:00	4 h
PHJX	41.3	23:00	4 h
PJZX	31.3	23:00	4 h
PLPX	35.6	23:00	4 h
PLTX	36.7	23:00	4 h
PSTX	38.3	-	-
PTAX	56.7	23:00	4 h
PTEX	54.5	23:00	4 h
PURI	45	23:00	4 h
QUEX	35.6	23:00	4 h
SA27	37.4	-	-
TNMO	58.9	23:00	4 h
UAGU	59.4	23:00	4 h
UCOM	58.1	23:00	4 h
UNIP	60	23:00	4 h
UNPM	59.9	22:00	3 h
UXAL	59	-	-

Tabla 4.4: Estaciones GPS y el vTEC máximo calculado con el software GPS-TEC para la tormenta del 14 de julio de 2012.

Resultados de los softwares Tec-suite y TayAbsTec

Se identificó la diferencia entre el vTEC calculado con el software GPS-TEC y TayAbsTec, siendo las estaciones *DAEX*, *OXGU*, *OXPE*, *PTAX* y *PTEX* las que tuvieron una mayor diferencia entre cálculos (~ 19 TECU). Por otro lado, las estaciones con un mayor vTEC fueron las estaciones **OXGU**, **OXEC** y **OXLP** (ubicadas en la parte sur de México) PENA, TNMO e INEG (estas últimas tres se encuentra en la parte oeste de la república) con un valor de entre 52 y 56 TECU. Caso contrario, las estaciones con un vTEC menor fueron *PTAX*, *PJZX*, *PLTX* y *DAEX* (con ~ 34 TECU) todas éstas situadas en la parte norte del territorio mexicano.

La diferencia entre el $vTEC$ calculado por las estaciones GPS a diferentes latitudes se puede observar en la Figura 5.1 inciso (c) donde se puede apreciar la desigualdad entre estaciones en el comportamiento del $vTEC$. Así mismo, se puede observar el $vTEC$ máximo registrado después del SSC de la tormenta (DOY 196), y posteriormente, el descenso súbito del mismo, lo que podría estar relacionado con la fase negativa de una TI. Para concluir, la Figura 5.1, inciso (b) muestra el $vTEC$ máximo registrado para esta perturbación, el cual se identificó el día 14 de julio (DOY 196) entre las 19:00 y 21:00 TU, es decir, casi inmediatamente después del SSC (19:00 TU) de esta tormenta. En este sentido, se pudo notar una magnitud de $vTEC$ mucho más alta a latitudes correspondientes al sur de la república mexicana que en latitudes del centro y norte del territorio.

4.1.5. Comportamiento del $vTEC$ durante la TG del 17 de marzo de 2015

Resultados del software GPS-TEC

Para la tormenta del 17 de marzo de 2015, se construyó la Tabla 4.5, en donde el $vTEC$ máximo de mayor magnitud pertenece a las estaciones *OXPE*, *OXUM* y *PENA* con una magnitud de $vTEC$ de 82.5, 81.4 y 74.5 *TECU*, respectivamente.

Las estaciones con una menor magnitud de $vTEC$ fueron *PSTX*, *PTAX*, *PTEX* y *QUEX* con un $vTEC$ de 22.9, 22.2, 23.3 y 21.7 *TECU*, respectivamente. A partir de estos resultados se puede observar una mayor respuesta de la ionósfera en parte centro y sur del territorio mexicano, y una menor respuesta en la parte norte de México. Conforme al análisis del comportamiento del $vTEC$ para cada estación, se estableció la hora en la que se presentó el $vTEC$ máximo y se contrasta con la hora en que se dio a lugar el SSC de esta TG (06:00 TU), para el caso de la tormenta del 17 de marzo de 2015. El $vTEC$ máximo se registró entre las 15:00 y 18:00 TU, teniendo una respuesta de la ionósfera ante la perturbación entre 9 y 13 h después del SSC.

Estación	vTEC máximo (TECU)	Hora TU en la que se presentó el valor máximo	Tiempo que le llevó a la ionósfera responder a la TG
CN24	55.9	17:00	11 h
CN25	48.4	18:00	12 h
DAEX	49.8	19:00	13 h
INEG	63.6	18:00	12 h
NVLX	23.2	16:00	10 h
OXPE	82.5	18:00	12 h
OXUM	81.4	18:00	12 h
PALX	22.9	18:00	12 h
PB2Y	40.2	-	-
PENA	74.5	18:00	12 h
PHJX	23.5	18:00	12 h
PJZX	23.6	15:00	9 h
PLPX	30.3	-	-
PLTX	32.9	-	-
PSTX	22.9	18:00	12 h
PTAX	22.2	15:00	9 h
PTEX	23.3	15:00	9 h
QUEX	21.7	15:00	9 h
TGMX	68	-	-
TNAL	68.8	-	-
TNAM	66.6	-	-
TNAT	69.8	-	-
TNBA	63.4	-	-
TNCM	62.5	-	-
TNCU	60.9	-	-
TNHM	60.9	-	-
TNMO	65	18:00	12 h
TNMR	61.1	-	-
TNMS	65.4	-	-
TNNX	62.6	-	-
UAGU	60.5	18:00	12 h
UCOE	45.5	18:00	12 h

Tabla 4.5: Estaciones GPS y el vTEC máximo calculado con el software GPS-TEC para la tormenta del 17 de marzo de 2015.

Resultados de los softwares Tec-suite y TayAbsTec

Para la TG del 17 de marzo del 2015, se encontró una diferencia entre el vTEC calculado por los antes mencionados, siendo las estaciones de mayor magnitud *CN25*, *NVLX*, *OXPE*, *OXUM*, *PALX*, *PHJX*, *PJZX*, *PLPX*, *PLTX*, *PTEX* y *QUEX* con una diferencia de entre 11 y 26 *TECU*.

Además, las estaciones con un $vTEC$ mayor calculado con TayAbsTec (69.8-69.7 $TECU$) fueron *CN25*, *OXUM*, *TECO*, *TNCM* y *TNMO*, éstas localizadas en el sur y oeste de nuestro país. Así mismo, las estaciones con un menor $vTEC$ fueron *TNPP* (48.5 $TECU$) y *QUEX* (48.9 $TECU$), ubicadas en la parte norte de la república mexicana.

La Figura 5.1 inciso (d), muestra el comportamiento del $vTEC$ durante la TG, donde sobresale el $vTEC$ máximo asociado a ésta, seguido de un descenso paulatino del mismo lo que probablemente se deba al efecto negativo de una TI. También, se exhibe la desigualdad entre el $vTEC$ a diferentes latitudes, siendo las que se ubican cerca del ecuador las de mayor magnitud, y en contraste, las estaciones próximas al norte del país, las de menor magnitud. De esta forma, la Figura 5.1 inciso (d), expone el $vTEC$ máximo vinculado a esta TG, registrándose entre las 16:00 y 19:00 TU del día 76 (17 de marzo), esto es, 10 h más tarde del SSC. Las estaciones *CN25*, *OXUM*, *OXPE*, *PLPX*, *TECO*, *TNAM*, *TNAL*, *UGEO*, *TNNX* y *UXAL* presentan una falta de datos entre las 17 y 19 TU de ese mismo día. Además, la estación *TNMR* se comportó de manera errática, al presentar una caída abrupta en ese mismo intervalo de tiempo. Por otra parte, se puede observar cómo durante el día de la tormenta (DOY 76 o 17 de marzo) se presenta un ligero incremento en el Contenido Total de Electrones, seguido de una ligera disminución, sin embargo, el $vTEC$ vuelve a aumentar teniendo un pico máximo, esto se puede deber a dos factores: el tiempo que duró la fase de recuperación y el hecho que durante esta fase se registró una TG moderada ($\geq -50nT \leq -100nT$).

4.1.6. Comportamiento del $vTEC$ durante la TG del 21 de junio de 2015

Resultados del software GPS-TEC

Tomando en cuenta el análisis de la tormenta del 21 de junio de 2015 realizado con la Tabla 4.6 el $vTEC$ máximo calculado para cada estación se registró en las estaciones *UCOE*, *PENA* y *TNAT* con una magnitud de $vTEC$ de 59.6, 59.4 y 59.1 $TECU$, respectivamente. Las estaciones con una menor magnitud de $vTEC$ fueron *NVLX* y *PTEX* con un $vTEC$ de 43 y 42.3 $TECU$, respectivamente. De acuerdo con estos resultados se puede observar una mayor respuesta de la ionósfera en parte centro y sur del territorio mexicano, y una menor respuesta en la parte norte de México.

En función del análisis del comportamiento del $vTEC$ para cada estación, se analizó la hora en la que se presentó el $vTEC$ máximo y se contrasta con la hora en que se dio a lugar el SSC de esta TG (19:00 TU), para el caso de la tormenta del 21 de junio de 2015. El $vTEC$ máximo se registró entre las 20:00 y 22:00 TU, teniendo una respuesta de la ionósfera ante la perturbación entre 25 y 27 h después del SSC.

Estación	vTEC máximo (TECU)	Hora TU en la que se presentó el valor máximo	Tiempo que le llevó a la ionósfera responder a la TG
CN24	55.8	-	-
CN25	52.9	20:00	25. h
DAEX	45.2	21:00	26 h
INEG	55.6	20	25 h
NVLX	43	21:00	28 h
OXPE	51	20:00	25 h
OXUM	50.8	20:00	25 h
PALX	55.7	21:00	26 h
PB2Y	45.4	-	-
PENA	59.4	20:00	25 h
PHJX	54.2	21:00	26 h
PJZX	48.1	21:00	26 h
PLPX	50.9	21:00	26 h
PLTX	44.4	21:00	26 h
POP	57.4	-	-
PSTX	45.7	20:00	25 h
PTAX	47.7	22:00	27 h
PTEX	42.3	21:00	26 h
QUEX	44.8	21:00	26 h
TGMX	57.4	-	-
TNAL	58.6	-	-
TNAM	58.4	-	-
TNAT	59.1	20:00	25 h
TNBA	50.7	-	-
TNCM	56.8	-	-
TNCU	52.3	-	-
TNMH	50.0	-	-
TNMR	58.4	18:00	12 h
TNMS	54.3	-	-
TNNX	53.0	-	-
UAGU	55.8	-	-
UCOE	59.6	20:00	25 h

Tabla 4.6: Estaciones GPS y el vTEC máximo calculado con el software GPS-TEC para la tormenta del 21 de junio de 2015.

Resultados de los softwares Tec-suite y TayAbsTec

En función de la comparación de los cálculos realizados por los softwares GPS-TEC y TayAbsTec se puede apreciar que las estaciones con una mayor diferencia entre magnitudes calculadas por cada uno de los softwares (≥ 15 TECU), *OXPE*, *OXUM*, *PALX*, *PHJX*, *PJZX*, *TNBA* y *TNMS*. Así mismo, las estaciones con un vTEC mayor fueron CN25 (66.2),

OXPE (66), OXTH (67.1) y OXUM (66.5). Por otra parte, las estaciones que registraron un vTEC menor (35 – 37 TECU) fueron *PB2Y*, *PHJX* y *PJZX*.

En la Figura 5.2, inciso (a) se presenta el vTEC a lo largo de la TG, se observa el aumento del vTEC ligado a la misma y la disminución abrupta de éste, lo que quizá está asociado a la fase negativa de una TI. Por otra parte, se pudo registrar la divergencia entre el vTEC calculado a diferentes latitudes, siendo las estaciones ubicadas en el sur de la nación las que presentan una magnitud mayor que las estaciones a latitudes más altas. Es importante señalar que las estaciones *CN24*, *PTEX*, *POP1*, *QUEX*, *TECO*, *TGMX* y *TNAL* presentan una pérdida de datos durante los días 172, 173 y 175. Finalmente, se resalta el vTEC máximo relacionado con esta TG, registrándose entre las 19:00 y 21:00 TU, esto quiere decir que la respuesta de la ionósfera se presentó poco después del SSC (19:00 TU).

4.1.7. Comportamiento del vTEC durante la TG del 19 de diciembre de 2015

Resultados del software GPS-TEC

Conforme de los análisis correspondientes a la tormenta del 19 de diciembre de 2015, realizado con la Tabla 4.7 e destaca el vTEC máximo calculado para cada estación, siendo las de mayor magnitud las estaciones *OXTH*, *CN25*, *CNC0*, *PENA*, *INEG* y *CN24* con una magnitud de vTEC de 50.5, 49, 48.7, 47.8, 47.5 y 46.4 *TECU*, respectivamente. Las estaciones con una menor magnitud de vTEC fueron *NVLX* y *PB2Y* con un vTEC de 25.9 y 16.7 *TECU*, respectivamente. A partir de estos resultados se puede observar una mayor respuesta de la ionósfera en parte centro y sur del territorio mexicano, y una menor respuesta en la parte norte de México.

Tomando en cuenta el análisis del comportamiento del vTEC para cada estación, se estableció la hora en la que se presentó el vTEC máximo y se contrasta con la hora en que se dio a lugar el SSC de esta TG (23:00 TU del 19 de diciembre), para el caso de esta tormenta. El vTEC máximo se registró entre las 16:00 y 21:00 TU del 20 de diciembre, teniendo una respuesta de la ionósfera ante la perturbación entre 16 y 21 h después del SSC.

Estación	vTEC máximo (TECU)	Hora TU en la que se presentó el valor máximo	Tiempo que le llevó a la ionósfera responder a la TG
CN24	46.4	18:00	19 h
CN25	49	16:00	17h
CNC0	48.7	21:00	22 h
DAEX	35.3	20:00	21 h
INEG	47.5	16:00 y 21:00	17 y 22 h
NAYX	39.1	20:00	21 h
NVLX	25.9	20:00	21 h
OXTH	50.5	17:00	18 h
PALX	34.2	20:00	21 h
PB2Y	16.7	-	-
PENA	47.8	16:00	17 h
PHJX	33	20:00	21 h

Tabla 4.7: Estaciones GPS y el vTEC máximo calculado con el software GPS-TEC para la tormenta del 19 de diciembre de 2015.

Resultados de los softwares Tec-suite y TayAbsTec

En el caso de los resultados para esta TG, las estaciones con un mayor vTEC calculado por TayAbsTec fueron *CN25* y *OXTH* (ambas localizadas en el sur del país) con 60.9 y 58.5 *TECU*, respectivamente; caso contrario, las estaciones con un menor vTEC calculado fueron *PB2Y*, *PHJX* y *PJZX*, todas situadas en el norte del territorio mexicano.

La Figura 5.2 inciso (b), muestra el comportamiento del vTEC 27 durante y después de la TG, en la cual se pudo apreciar el aumento del vTEC durante el día 20 de enero (llegando a ~ 44 *TECU*, seguida de la disminución paulatina del mismo (probablemente fase negativa de la TI, así como una mayor homogeneidad del vTEC calculado a diferentes latitudes. De igual forma, se percibió el aumento del vTEC, seguido del descenso de éste. Además, se destaca con mayor detalle la homogeneidad del vTEC en distintas latitudes. Finalmente, se pudo identificar el día y hora en el que se alcanzó el vTEC máximo. Esta tormenta inició el 18 de enero a las 23:00 TU y se llegó al vTEC máximo el 20 de enero entre las 16:00 y 18:00 TU (después de que se presentara el valor mínimo del campo geomagnético), es decir, la respuesta de la ionósfera a esta perturbación se registró 42 h después de ésta.

4.1.8. Comportamiento del vTEC durante la TG del 18 de enero de 2016

Resultados del software GPS-TEC

Para la tormenta del 18 de enero de 2016, la Tabla 4.8 muestra que las estaciones con un vTEC mayor fueron *OXUM* y *PHJX* que alcanzaron una magnitud de vTEC de 48 y 46 *TECU*, respectivamente. Las estaciones con una menor magnitud de vTEC fueron *DAEX* y *NVLX* con un vTEC de 17.1 *TECU*, respectivamente. Basándose en estos resultados se

puede observar una mayor respuesta de la ionósfera en parte centro y sur del territorio mexicano, y una menor respuesta en la parte norte de México.

Conforme al análisis del comportamiento del $vTEC$ para cada estación, de forma general, se identificó la hora en la que se presentó el $vTEC$ máximo y se contrasta con la hora en que se dio a lugar el SSC de esta TG (23:00 TU del 18 de enero), para el caso de esta tormenta. El $vTEC$ máximo se registró entre las 19:00 y 20:00 TU del 20 de enero, teniendo una respuesta de la ionósfera ante la perturbación entre 43 y 44 h después del SSC.

Estación	$vTEC$ máximo (TECU)	Hora TU en la que se presentó el valor máximo	Tiempo que le llevó a la ionósfera responder a la TG
CN24	40	20:00	44 h
CN25	39.4	19:00	43 h
CNC0	37.6	19:00	43 h
DAEX	17.1	-	-
INEG	41.8	20:00	44 h
NAYX	37.4	19:00	43 h
NVLX	17.1	-	-
OXTH	42.1	19:00	43 h
OXUM	48	-	-
PALX	40.7	19:00	43 h
PB2Y	43.6	19:00	43 h
PENA	42.6	20:00	44 h
PHJX	46	19:00	43 h

Tabla 4.8: Estaciones GPS y el $vTEC$ máximo calculado con el software GPS-TEC para la tormenta del 18 de enero de 2016.

Resultados de los softwares Tec-suite y TayAbsTec

De acuerdo con los cálculos del $vTEC$, la estación *DAEX* muestra una diferencia del $vTEC$ calculado de ~ 26 TECU.

Por otra parte, el $vTEC$ máximo se detectó en las estaciones *NAYX* (44.5 TECU), *QUEX* (44.6 TECU), *TNAM* (44.1 TECU) y *TNMS* (45 TECU) ubicadas en el norte y oeste de México. De forma contraria, las estaciones *UCOE* (29.4 TECU) y *CN24* (36.4 TECU) registraron un $vTEC$ menor.

En la Figura 5.2 inciso (c) se pudo apreciar el aumento del $vTEC$ durante el día 20 de enero (llegando a ~ 44 TECU, seguida de la disminución de este (posiblemente fase negativa de la TI), así como una mayor homogeneidad del $vTEC$ calculado a diferentes latitudes.

Así mismo, se pudo identificar el día y hora en el que se alcanzó el $vTEC$ máximo. Esta tormenta inició el 18 de enero a las 23:00 TU y se llegó al $vTEC$ máximo el 20 de enero entre

las 16:00 y 18:00 TU (después de que se presentara el valor mínimo del campo geomagnético), es decir, la respuesta de la ionósfera a esta perturbación se registró 42 h después de ésta.

4.1.9. Comportamiento del vTEC durante la TG del 13 de octubre de 2016

Resultados del software GPS-TEC

De acuerdo con el análisis de la tormenta del 13 de octubre de 2016, realizado a través de la Tabla 4.9, se registró el vTEC máximo de mayor magnitud para *INEG* y *CN24*, con una magnitud de vTEC de 62.3 y 61.2 *TECU*, respectivamente. La estación con una menor magnitud de vTEC fue *DAEX* con un vTEC de 34.9 *TECU*, respectivamente. A partir de estos resultados se pudo observar una mayor respuesta de la ionósfera en parte centro y sur del territorio mexicano, y una menor respuesta en la parte norte de México.

En función del análisis del comportamiento del vTEC para cada estación, se registró la hora en la que se presentó el vTEC máximo y se contrasta con la hora en que se dio a lugar el SSC de esta TG (03:00 TU), para el caso de esta tormenta. El vTEC máximo se asentó entre las 19:00 y 21:00 TU de ese mismo día, teniendo una respuesta de la ionósfera ante la perturbación entre 16 y 18 h después del SSC.

Estación	vTEC máximo (TECU)	Hora TU en la que se presentó el valor máximo	Tiempo que le llevó a la ionósfera responder a la TG
CN24	61.2	20:00	17 h
CN25	59.4	21:00	18 h
CNC0	59.7	19:00	16 h
DAEX	34.9	-	-
GUAX	47.5	20:00	17 h
INEG	62.3	20:00	17 h

Tabla 4.9: Estaciones GPS y el vTEC máximo calculado con el software GPS-TEC para la tormenta del 13 de octubre de 2016.

Resultados de los softwares Tec-suite y TayAbsTec.

Conforme a los resultados obtenidos, las estaciones con una mayor discrepancia entre el cálculo del vTEC fueron *CN24* y *CN25* con una diferencia de entre 19 y 21 *TECU*.

Adicionalmente, se registró un vTEC mayor (60-63 *TECU*) en las estaciones *OXTH*, *OXEC*, *OXUM*, *OXPE* y *TNNP* ubicadas en la parte sur del país. En cambio, las estaciones que registraron un menor vTEC (31-33 *TECU*) fueron *PHJX*, *PTAX*, *PLPX* y *PLTX*, todas éstas situadas en el norte de la república mexicana.

Para la Figura 5.2 inciso (d), se analiza el vTEC a lo largo de la TG de esta fecha, cuyos resultados mostraron el aumento del vTEC asociado a la misma, seguido de un pequeño

descenso y de nuevo un aumento para posteriormente descender nuevamente (esto debido quizá a la fase negativa de una TI). Además, se puede apreciar la diferencia entre latitudes. También, se denota la pérdida de datos en todas las estaciones estudiadas excepto *CN24*, *CN25*, *CNC0*, *GUAX* e *INEG*, así mismo, las estaciones que registraron un mayor vTEC fueron *OXEC*, *OXTH*, *OXUM*, *TNNP*, *UXAL* y *POP1*. Por último, se muestra el día donde se detectó la magnitud más alta del vTEC, siendo el 13 de octubre (DOY 287) a las 20:00 TU (17 h posteriores al SSC) y de igual forma se puede visualizar la diferencia de vTEC entre latitudes.

4.1.10. Comportamiento del vTEC durante la TG del 27 de mayo de 2017

Resultados del software GPS-TEC

Para la tormenta del 27 de mayo de 2017 se construyó la Tabla 4.10 en donde el vTEC máximo de mayor magnitud se registró en las estaciones *INEG*, *CN24*, *CNC0* y *CN25*, con una magnitud de vTEC de 62.3, 61.2, 59.7 y 59.4 *TECU*, respectivamente.

La estación con una menor magnitud de vTEC fue *DAEX* con un vTEC de 34.9 *TECU*, respectivamente. Partiendo de estos resultados se puede observar una mayor respuesta de la ionósfera en parte centro y sur del territorio mexicano, y una menor respuesta en la parte norte de México.

Conforme en el análisis del comportamiento del vTEC para cada estación, de forma general, se identificó la hora en la que se presentó el vTEC máximo y se contrasta con la hora en que se dio a lugar el SSC de esta TG (22:00 TU del 27 de mayo), para el caso de esta tormenta. El vTEC máximo se registró entre las 01:00 y 04:00 TU del 28 de mayo, teniendo una respuesta de la ionósfera ante la perturbación entre 27 y 30 h después del SSC.

Estación	vTEC máximo (TECU)	Hora TU en la que se presentó el valor máximo	Tiempo que le llevó a la ionósfera responder a la TG
CN24	33.9	01:00	27
CN25	33.1	00:00	26
CNC26	32.6	00:00	26
CNC0	32.4	01:00	27
DAEX	17.4	-	-
GUAX	35.8	04:00	30
INEG	38.7	04:00	30

Tabla 4.10: Estaciones GPS y el vTEC máximo calculado con el software GPS-TEC para la tormenta del 27 de mayo de 2017.

Resultados de los softwares Tec-suite y TayAbsTec

De acuerdo con el análisis del vTEC se pudo observar un vTEC mayor en las estaciones *CN25*, *OXUM*, *TNAM*, *OXEC*, *OXPE*, *OXTH* (ubicadas al sur del territorio mexicano y *TECO* (localizada en el oeste del país), además de las estaciones con un vTEC menor como *PALX*, *CN26*, *NAYX*, *PJZX*, *PHJZ*, *PTEX* y *QUEX*, todas éstas al norte de la república.

En la Figura 5.3 inciso (a) se pudo apreciar el aumento del vTEC entre los días 27 y 28 de mayo (llegando a ~ 43 TECU, seguida de una pequeña disminución de éste (probablemente la fase negativa de la TI), así como la diferencia entre el comportamiento del vTEC a latitudes cercanas al ecuador y latitudes más al norte. Además, se pudo identificar el día y hora en el que se alcanzó el vTEC máximo, donde esta tormenta tuvo inicio el 27 de mayo (DOY 250) a las 22:00 TU y se llegó al vTEC máximo entre ese mismo día (entre las 16:00 y 22:00 TU) para las estaciones con latitudes cercanas al ecuador y el 28 de mayo (entre las 2:00 y 4:00 TU) para estaciones más al norte del país (antes de que se presentara el valor mínimo del campo geomagnético), es decir, la respuesta de la ionósfera a esta perturbación se registró inmediatamente para las estaciones más al sur del territorio y 5 h después de para las estaciones más alejadas.

4.1.11. Comportamiento del vTEC durante la TG del 7 de septiembre de 2017

Resultados del software GPS-TEC

Basándose en el análisis del vTEC para la tormenta del 7 de septiembre de 2017, se construyó la Tabla 4.10 en la cual se destaca el vTEC máximo calculado para cada estación, siendo la de mayor magnitud *CN25* con un vTEC de 49.9 TECU, respectivamente. Las estaciones con una menor magnitud de vTEC fueron *DAEX* y *GUAX* con un vTEC de 25.3 y 25.1 TECU, respectivamente. A partir de estos resultados se puede observar una mayor respuesta de la ionósfera en parte centro y sur del territorio mexicano, y una menor respuesta en la parte norte de México.

Con base en el análisis del comportamiento del vTEC para cada estación, se observó la hora en la que se presentó el vTEC máximo y se contrasta con la hora en que se dio a lugar el SSC de esta TG (02:00 TU del 7 de septiembre), para el caso de esta tormenta. El vTEC máximo se registró entre las 19:00 y 24:00 TU, teniendo una respuesta de la ionósfera ante la perturbación entre 17 y 22 h después del SSC.

Estación	vTEC máximo (TECU)	Hora TU en la que se presentó el valor máximo	Tiempo que le llevó a la ionósfera responder a la TG
CN24	37.6	19:00	17 h
CN25	49.9	20:00	18 h
CNC26	37.1	20:00	18 h
CNC0	36.8	20:00	18 h
DAEX	25.3	-	-
GUAX	25.1	24:00	22 h
INEG	30.2	19:00	17 h

Tabla 4.11: Estaciones GPS y el vTEC máximo calculado con el software GPS-TEC para la tormenta del 08 de septiembre de 2017.

Resultados de los softwares Tec-suite y TayAbsTec

Considerando los cálculos para el vTEC de este software, se pudo examinar que las estaciones con un valor vTEC más alto se encontraron al sur de México (estaciones *OXUM*, *OXEC*, *TNNP* y *OXGU*). Por otra parte, las estaciones con un valor vTEC más bajo fueron *PB2Y*, *PHJX*, *PJZX* y *TNPP*, ubicadas al norte del territorio mexicano.

En la Figura 5.3 se pudo apreciar el aumento del vTEC el día 08 de septiembre (registrando entre 55 y 26TECU) para estaciones a latitudes cercanas al ecuador y alejadas a éste, respectivamente. Así mismo, se pudo notar un decremento abrupto del vTEC en la mayoría de las estaciones (fase negativa de una TI), exceptuando a las que se ubican en el norte del país. Así mismo, se pudo identificar el día y hora en el que se alcanzó el vTEC máximo, donde esta tormenta tuvo inicio el 7 de septiembre (DOY 250) a las 2:00 TU y se registró el valor máximo de vTEC el 8 de septiembre (DOY 251) entre las 21:00 y 22:00 TU, este aumento solo se pudo observar en estaciones con latitudes cercanas al ecuador, es decir, la respuesta de la ionósfera a esta perturbación se observó 31 h después del SSC.

4.1.12. Comportamiento del vTEC durante la TG del 25 de agosto de 2018

Resultados del software GPS-TEC

En función de la Tabla 4.12 en la cual se destaca el vTEC máximo calculado para cada estación, siendo las de mayor magnitud *CORX*, con una magnitud de vTEC de 27.3 TECU, respectivamente. La estación con una menor magnitud de vTEC fue *CNC0* con un vTEC de 24.3 TECU, respectivamente. De acuerdo con estos resultados se puede observar una mayor respuesta de la ionósfera en parte centro y sur del territorio mexicano, y una menor respuesta en la parte norte de México.

Tomando en cuenta el análisis del comportamiento del vTEC para cada estación, se observó la hora en la que se presentó el vTEC máximo y se contrasta con la hora en que se dio a lugar el SSC de esta TG (09:00 TU), para el caso de esta tormenta. El vTEC máximo

se registró a las 24:00 TU, teniendo una respuesta de la ionósfera ante la perturbación 15 h después del SSC.

Estación	vTEC máximo (TECU)	Hora TU en la que se presentó el valor máximo	Tiempo que le llevó a la ionósfera responder a la TG
CORX	27.3	24:00	15 h
CN24	26.8	24:00	15 h
CN25	26.3	24:00	15 h
CNC0	24.3	-	-

Tabla 4.12: Estaciones GPS y el vTEC máximo calculado con el software GPS-TEC para la tormenta del 25 de agosto de 2018.

Resultados de los softwares Tec-suite y TayAbsTec

Con base en el vTEC calculado con este software, las estaciones al sur de la república mexicana (*OXPE*, *OXTH* y *OXUM*) registraron un vTEC más alto, en contraste, en las estaciones ubicadas al norte de México (*PHJX*, *PJZX*, *PLPX*, *PLTX*, *PTEX* y *QUEX*) se obtuvo un vTEC menor.

La Figura 5.3 inciso (c) muestra el vTEC calculado para cada estación, destacando las estaciones que se encuentran en el sur y oeste del país, donde la magnitud del vTEC es un poco mayor que en estaciones al norte del territorio. De igual manera, se observa un pequeño aumento del TEC durante el SSC de esta perturbación (DOY 237) seguido de un decremento gradual (fase negativa de la TI). A partir del análisis de la Figura 5.3 inciso c, se puede constatar una magnitud de vTEC más alta a latitudes correspondientes al sur de la república mexicana que en latitudes del centro y norte del territorio, donde éstas se registraron a las 21:00 TU (9 h después del SSC de la tormenta).

4.1.13. Resumen Sección 4.1

Finalmente, el cálculo del vTEC realizado en esta Sección se utilizó para hacer el cálculo de los índices ionosféricos Δ , *ROTI* y *W* para las 11 TGs intensas y para cada estación GPS analizada, utilizando las ecuaciones explicadas en el Capítulo 2.

El análisis de cada índice ionosférico se presenta en la siguiente Sección.

4.2. Correlación entre Índices ionosféricos-Índice Dst

En esta Sección, se presenta la correlación entre los índices ionosféricos Δ , *ROTI* y *W* (calculado con la metodología descrita en el Capítulo 2) con las fases de las 11 TGs intensas analizadas en este trabajo con el índice Dst. Al igual que en el análisis del vTEC, se encontró una mayor respuesta en la parte sur y oeste del territorio mexicano.

Aplicando la teoría descrita en el Capítulo 2 sobre cálculo de los índices geomagnéticos, se considera que se presentó una perturbación del plasma ionosférico (índice W) si los valores de DTEC son ≥ 0.1 ; una dispersión del vTEC (Δ) con un valor ≥ 4 y la ocurrencia de burbujas de plasma ecuatorial (ROTI) con un valor ≥ 0.2 TECU/min.

La correlación para cada tormenta se presenta a continuación:

4.2.1. TG del 8 de marzo de 2012

De acuerdo con los resultados plasmados en la Tabla 4.13 y Figura 4.1, se presentó una perturbación del plasma ionosférico en todas las estaciones analizadas, específicamente, se registró una TI positiva el día 10 de marzo (DOY 70) a las 12:00 TU (24 h después del SSC). También, se pudo observar un DTEC mayor en las estaciones a latitudes bajas (OXEC y OXLP).

De igual forma, con los resultados del ROTI se pudo notar la ocurrencia de burbujas de plasma en la estación OXEC el día 10 de marzo (DOY 70) a las 23:00 TU, esto es 36 h posteriores al SSC.

Por otra parte, no se encontró alguna estación que presentara dispersión en el vTEC.

Estación GPS	Δ	Índice ROTI	DTEC	Índice W	Estado de la ionósfera de acuerdo con el índice W
CNC0	0.1	0.1	0.2	3	TI moderada
DAEX	0.1	0.1	-0.5	-4	TI intensa negativa
OXEC	0.3	0.2	0.9	4	TI intensa positiva
OXGU	0.1	-	-	-	-
OXLP	0.4	0.6	-0.8	4	TI intensa positiva
PJZX	0.1	0.2	-0.4	4	TI intensa positiva
PTEX	0.1	0.2	-0.5	4	TI intensa positiva
TECO	0.1	0.1	-0.3	4	TI intensa positiva
UNPM	0.1	0.1	0.2	3	TI moderada

Tabla 4.13: Datos de los índices Δ , ROTI y W, así como clasificación de las TI de acuerdo con el DTEC, obtenidos para el período de la TG del 8 de marzo de 2012.

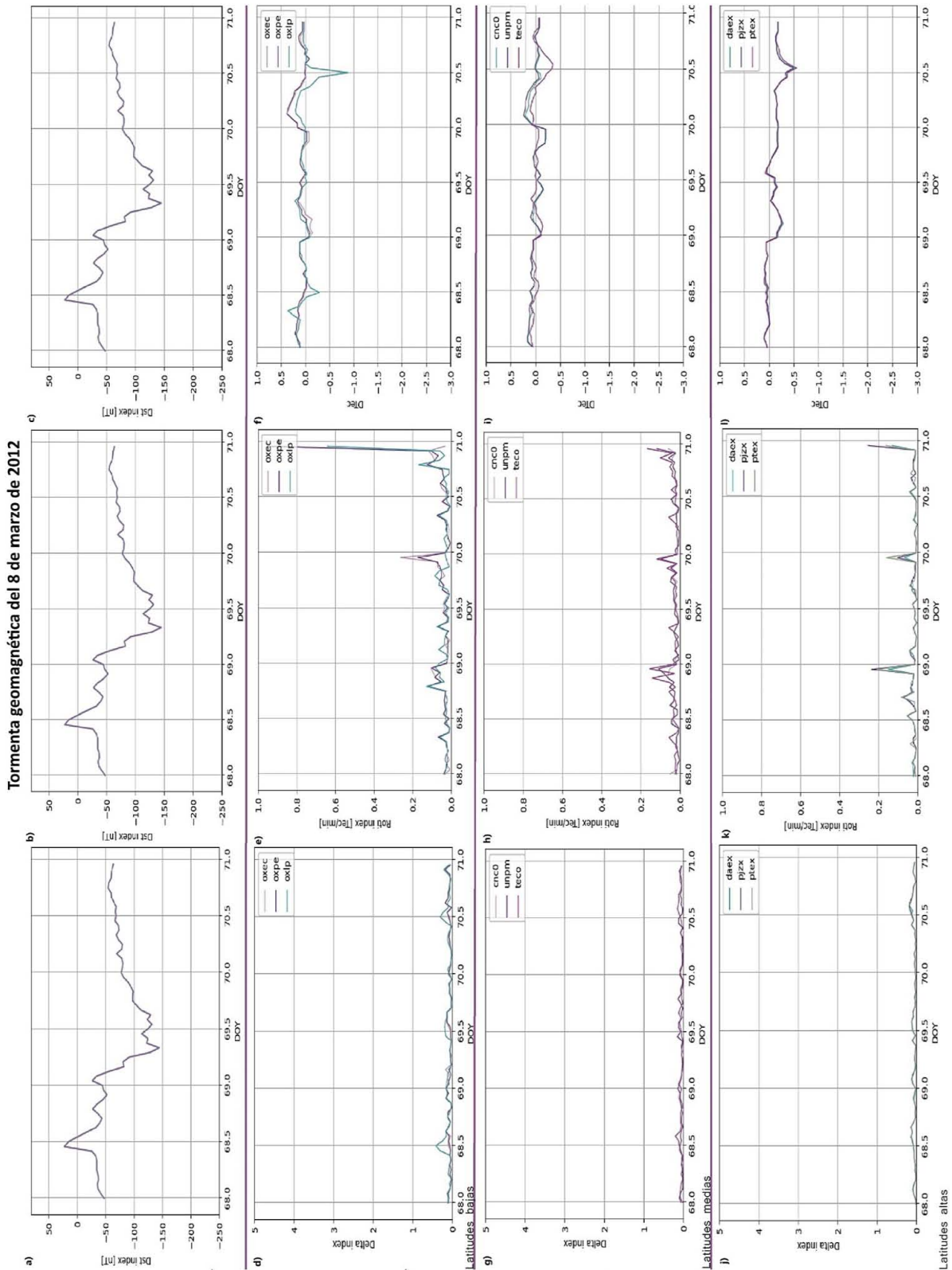


Figura 4.1: Índices Delta, ROTI y W calculados y su comparación con el SSC de la TG del 8 de marzo de 2012. Las gráficas a), b) y c) muestran el comportamiento del campo geomagnético medido con el índice Dst. Las gráficas d), g) y j) señalan el comportamiento de Δ a latitudes bajas, medias y altas. Por otra parte, las gráficas e), h) y k) exhiben el comportamiento del ROTI observándose una mayor respuesta de éste en las gráficas e) y h). Por último, las gráficas f), i) y l) presentan el comportamiento del DTEC en donde se detectó la presencia de una TI negativa con mayor presencia en la gráfica f).

4.2.2. TG del 23 de abril de 2012

Con base en la Tabla 4.14 y Figura 4.2, se registró una TG positiva con un DTEC máximo de 0.4 para la estación OXEC y 0.5 para la estación OXLP (ambas en la zona sur del país) durante el 24 de abril (DOY 115) llegando a su punto máximo a las 06:00 TU, es decir, 25 h después del SSC; de igual forma, se presentó una TI moderada positiva en la parte norte del territorio mexicano el 23 de abril (DOY 114), con DTEC de 0.2.

En cuanto al ROTI, se observó la presencia de burbujas de plasma el 24 de abril (DOY 115) a las 17:00 TU (36 h después del SSC) en la zona de la península, del sur y oeste de la república mexicana, con una magnitud de 0.2-0.4 *Tec/min*.

Por último, se detectó la dispersión de $vTEC$ en las estaciones *OXEC* y *OXLP*. Sin embargo, ésta se presentó el 22 de abril (DOY 112) entre las 19:00 y 20:00 TU, por lo cual, no estaría asociado a esta TG.

Estación GPS	Δ	Índice ROTI	DTEC	Índice W	Estado de la ionósfera de acuerdo con el índice W
CNC0	0.1	0.2	-0.5	4	TI intensa negativa
DAEX	0.1	0.1	0.5	3	TI moderada
OXEC	4	0.3	0.4	4	TI intensa positiva
OXGU	1.5	0.2	-	-	-
OXLP	4	0.1	0.5	4	TI intensa positiva
OXTH	1.5	0.4	-	-	-
PALX	0.1	0.1	0.2	3	TI moderada
PENA	0.2	0.4	0.3	4	TI intensa positiva
PJZX	0.1	0.1	0.2	3	TI moderada
PTEX	0.1	0.1	0.2	3	TI moderada
TECO	0.2	0.2	0.3	4	TI intensa positiva
UNPM	0.1	0.2	0.3	4	TI intensa positiva
UXAL	0.2	0.2	0.3	4	TI intensa positiva

Tabla 4.14: Datos de los índices Δ , ROTI y W, así como clasificación de las TI de acuerdo con el DTEC, obtenidos para el período de la TG del 23 de abril de 2012.

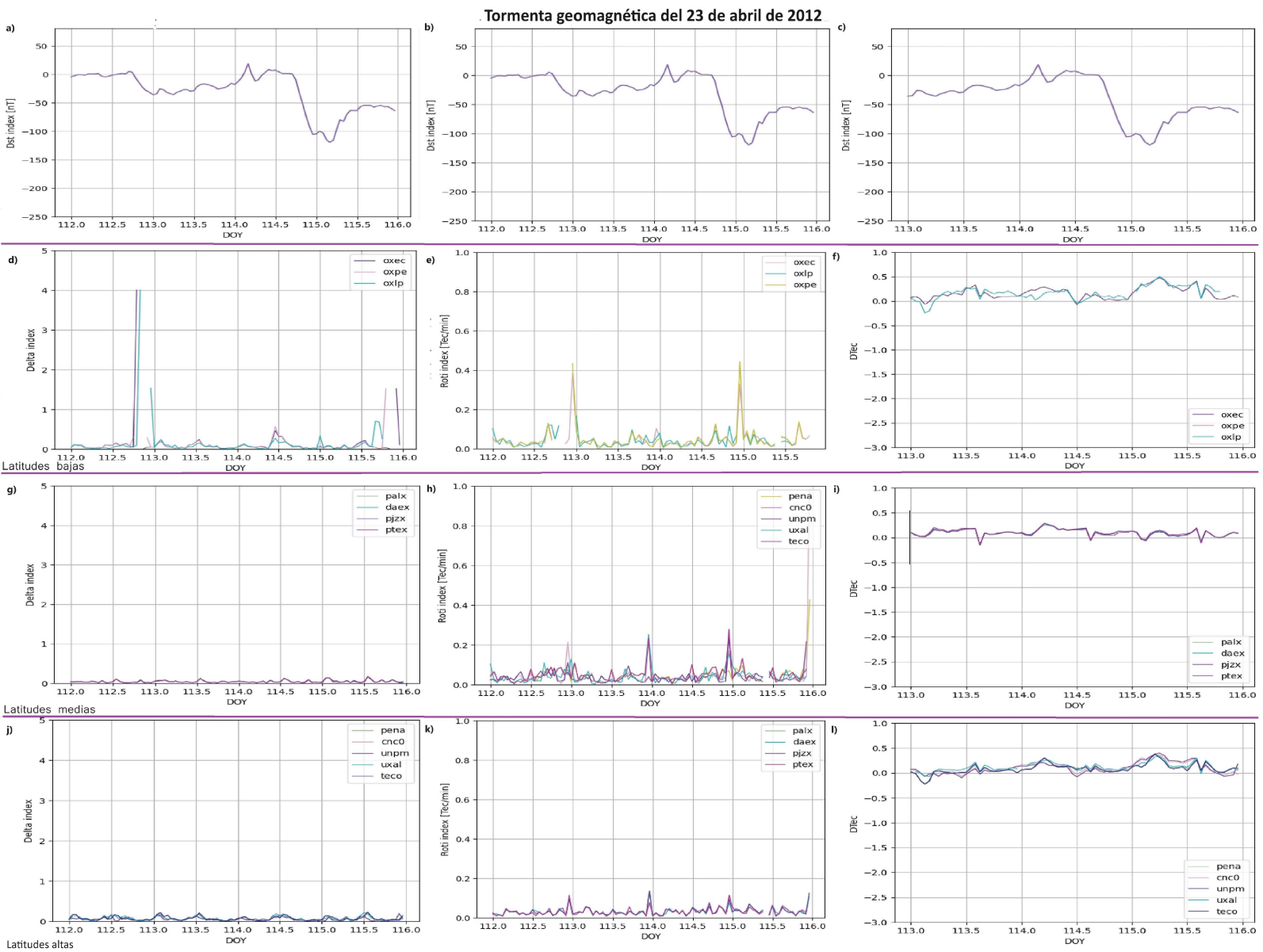


Figura 4.2: Índices Delta, ROTI y W calculados y su comparación con el SSC de la TG del 23 de abril de 2012. Las gráficas a), b) y c) muestran el comportamiento del campo geomagnético medido con el índice Dst. Las gráficas d), g) y j) señalan el comportamiento de Δ a latitudes bajas, medias y altas donde la gráfica d) registra la presencia de dispersión del VTEC a latitudes bajas. Por otra parte, las gráficas e), h) y k) exhiben el comportamiento del ROTI observándose una mayor respuesta de éste en las gráficas e) y h). Por último, las gráficas f), i) y l) presentan el comportamiento del DTEC el cual indica la presencia de una TI positiva con una mayor magnitud a latitudes bajas.

4.2.3. TG del 14 de julio de 2012

En este caso, la Figura 4.4 y Tabla 4.15 señalan lo siguiente:

Con respecto al índice W, se presentó una TI intensa negativa en donde la magnitud del DTEC máxima se presentó el 16 de julio (DOY 198) a la 01:00 TU (30 h después del SSC) en las estaciones PENA, UXAL, UNPM, OXEC, CNC0, OXPE y OXLP (DTEC de -0.6, -0.6, -0.6, -0.4, -0.3, -0.3 y -0.3, respectivamente), es decir, en estaciones ubicadas en el sur, península y oeste de la nación.

Para el ROTI, se encontraron burbujas de plasma en las estaciones ubicadas al sur del país donde el ROTI de mayor magnitud se encontró el 15 de julio (DOY 197) a las 23:00 TU (28 h después del SSC).

Por otra parte, no se encontró dispersión del vTEC en ninguna estación.

Estación GPS	Δ	Índice ROTI	DTEC	Índice W	Estado de la ionósfera de acuerdo con el índice W
CNC0	0.2	0.2	-0.3	-4	TI intensa negativa
DAEX	0.1	0.3	-0.3	-4	TI intensa negativa
OXEC	0.2	0.6	-0.4	-4	TI intensa negativa
OXGU	0.2	0.6	-	-	-
OXLP	0.2	0.8	-0.3	-4	TI intensa negativa
OXPE	0.2	0.3	-0.3	-4	TI intensa negativa
PALX	0.1	0.6	-0.3	-4	TI intensa negativa
PENA	0.2	0.7	-0.6	-4	TI intensa negativa
PJZX	0.1	0.5	-0.3	-4	TI intensa negativa
PTEX	0.1	0.5	0.2	-3	TI moderada
UNPM	0.3	0.7	-0.6	-4	TI intensa negativa
UXAL	0.2	0.8	-0.6	-4	TI intensa negativa

Tabla 4.15: Datos de los índices Δ , ROTI y W, así como clasificación de las TI de acuerdo con el DTEC, obtenidos para el período de la TG del 14 de julio de 2012.

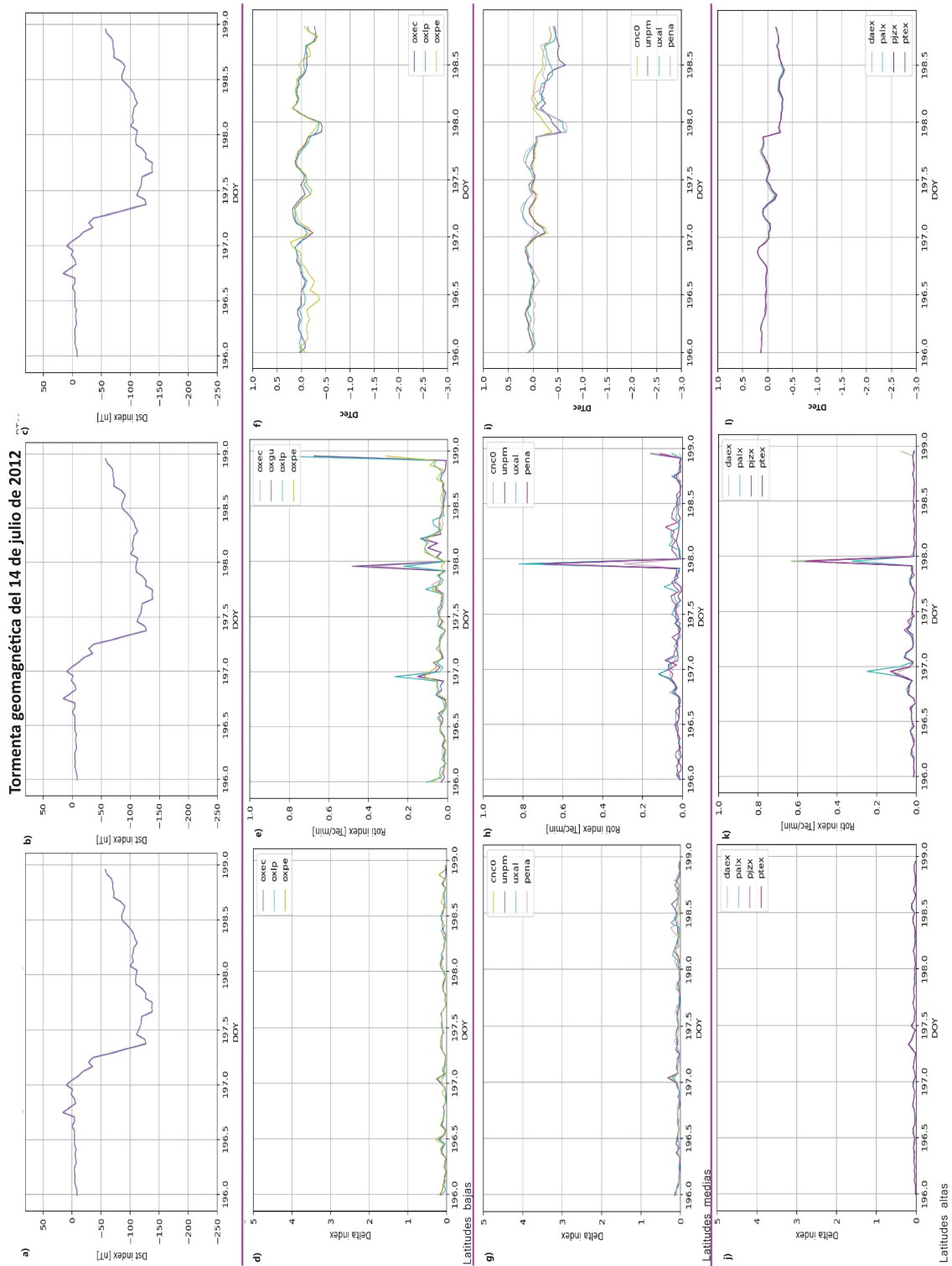


Figura 4.3: Índices Delta, ROTI y W calculados y su comparación con el SSC de la TG del 14 de julio de 2012. Las gráficas a), b) y c) muestran el comportamiento del campo geomagnético medido con el índice Dst. Las gráficas d), g) y j) señalan el comportamiento de Δ a latitudes bajas, medias y altas donde la gráfica d) registra la presencia de dispersión del v TEC a latitudes bajas. Por otra parte, las gráficas e), h) y k) exhiben el comportamiento del ROTI y en este caso, las 3 registraron la presencia de burbujas de plasma el DOY 198. Por último, las gráficas f), i) y l) presentan el comportamiento del DTEC el cual indica la presencia de TI alternando entre positiva y negativa.

4.2.4. TG del 17 de marzo de 2015

Con los resultados descritos en la Tabla 4.16 y Figura 4.4, se registraron dos eventos relacionados con el índice W: primero, una TI moderada negativa, en donde el DTEC mínimo se identificó en las estaciones *PJZX*, *USMX*, *PTEX* y *PENA* con un valor de -0.2, -0.2, -0.2 y -0.2 el día 17 de marzo (DOY 76) a las 20:00 TU, esto quiere decir que se tuvo una perturbación del plasma ionosférico 14 h posterior al SSC). Es importante señalar que, a diferencia de las TI hasta ahora analizadas, ésta presentó una perturbación del plasma ionosférico en las estaciones ubicadas al norte del país.

El segundo evento se trató de una TI intensa positiva en estaciones ubicadas al sur de la república mexicana el día 18 de marzo a las 13:00 TU (31 h más tarde del SSC).

Para el ROTI, se observaron magnitudes de entre 0.2-0.8 *TEC/min* en estaciones ubicadas al sur y oeste del territorio mexicano (estaciones *OXTH*, *OXUM*, *PENA*, *POP1*, *TECO*, *TNAL*, *TNAM* y *UNPM*). Estas magnitudes se registraron entre el 17 de marzo (DOY 76) entre las 17:00 y 18:00 TU (11 y 12 h después del SSC) y el 19 de marzo (DOY 78) a las 02:00 TU (44 h posteriores al SSC).

Finalmente, Δ indicó la dispersión del vTEC en las estaciones *CN25*, *OXPE*, *OXTH*, *TNAL* y *OXUM*. En las primeras 4 se registró esta dispersión en día 17 de marzo (DOY 76) entre las 17:00 y 18:00 TU, esto significa que se tuvo una respuesta de la ionósfera a la TG entre 11 y 12 h después del SSC. En contraste, en la estación *OXUM* se asentó la dispersión el día 16 de marzo, por lo cual no estaría asociado a la TG.

Estación GPS	Δ	Índice ROTI	DTEC	Índice W	Estado de la ionósfera de acuerdo con el índice W
CN25	4	-	0.3	4	TI intensa positiva
OXPE	4	-	0.4	4	TI intensa positiva
OXTH	4	0.8	-0.1	-3	TI moderada
OXUM	4	0.3	-	-	-
PALX	0.2	0.1	-0.2	-3	TI moderada
PENA	0.3	0.2	-0.2	-3	TI moderada
PJZX	0.2	0.1	-0.2	-3	TI moderada
POP1	1.6	0.4	-0.2	-3	TI moderada
PTEX	0.2	0.1	-0.2	-3	TI moderada
TECO	1.5	0.3	-0.1	-3	TI moderada
TNAL	4	0.2	-0.1	-3	TI moderada
TNAM	0.2	0.2	-0.2	-3	TI moderada
TNBA	0.1	0.1	-0.2	-3	TI moderada
UNPM	0.2	0.2	0.2	-3	TI moderada
USMX	0.2	0.1	-0.2	-3	TI moderada
UXAL	1.5	0.1	0.1	2	perturbación

Tabla 4.16: Datos de los índices Δ , ROTI y W, así como clasificación de las TI de acuerdo con el DTEC, obtenidos para el período de la TG del 17 de marzo de 2015.

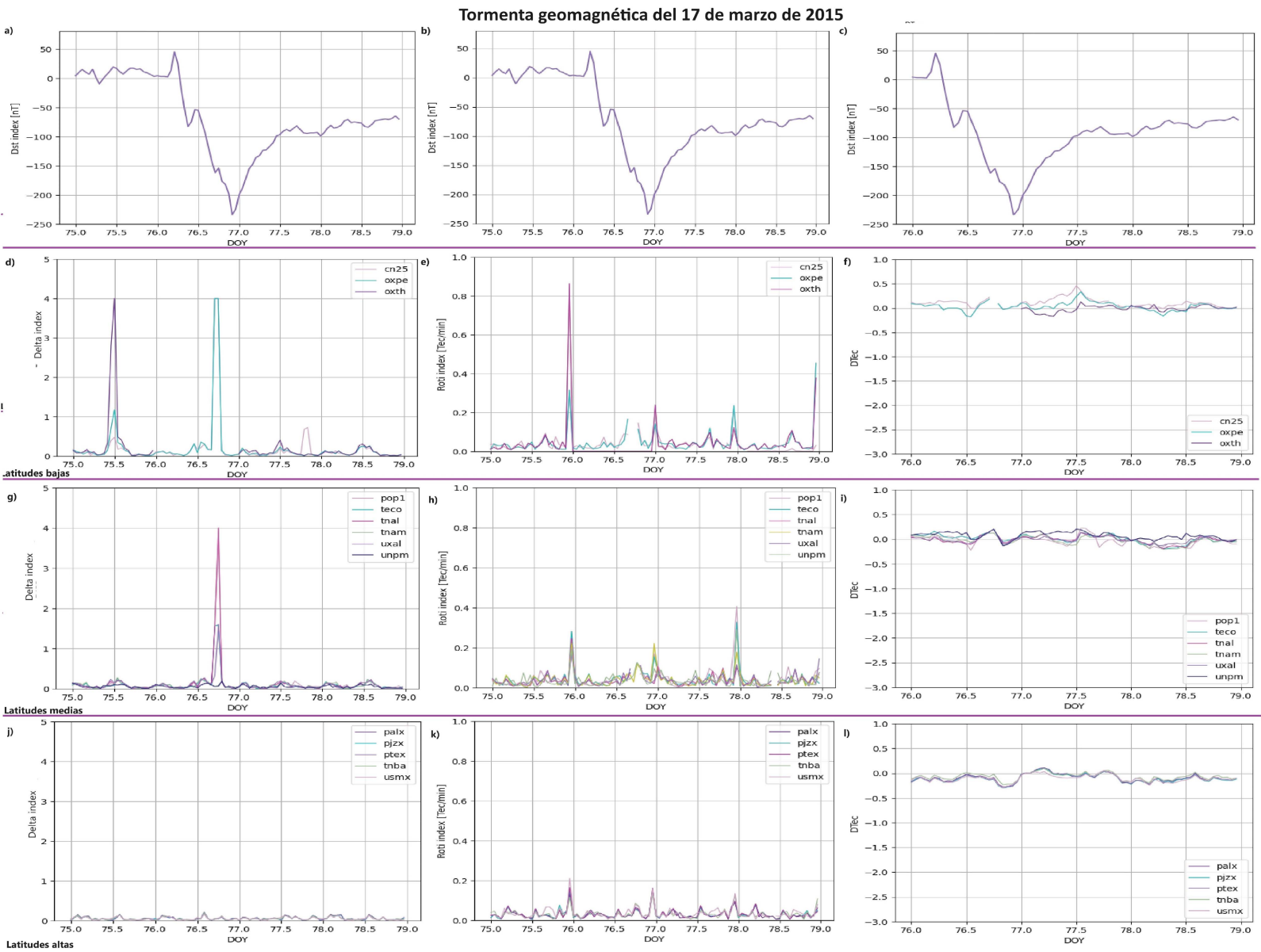


Figura 4.4: Índices Delta, ROTI y W calculados y su comparación con el SSC de la TG del 17 de marzo de 2015. Las gráficas a), b) y c) muestran el comportamiento del campo geomagnético medido con el índice Dst. Las gráficas d), g) y j) señalan el comportamiento de Δ a latitudes bajas, medias y altas donde en las gráficas d) y g) detectaron la dispersión de vTEC. Por otra parte, las gráficas e), h) y k) exhiben el comportamiento del ROTI observándose una mayor respuesta de éste en las gráficas e) y h). Por último, las gráficas f), i) y l) presentan el comportamiento del DTEC en donde se detectó la presencia de una TI positiva con mayor presencia en la gráfica f).

4.2.5. TG del 21 de junio de 2015

Por medio de los datos de la Tabla 4.17 y la Figura 4.5 se puede observar lo siguiente:

A partir de los resultados del índice W se determinó la incidencia de una TI negativa registrada en todas las estaciones de estudio, teniendo la magnitud mínima en la estación *OXPE* con un DTEC de -2.5. De igual forma, en las demás estaciones analizadas se alcanzaron valores de DTEC bajos en donde estos se presentaron el día 23 de junio (DOY 174) a las 09:00 TU, esto es (39 h posteriores al SSC).

En cuanto al ROTI, las magnitudes obtenidas para las estaciones analizadas indican la presencia de burbujas de plasma, se alcanzó un Tec/min máximo de 0.9 en la estación *CN24* el 21 de junio (DOY 172) a las 19:00 TU (al mismo tiempo que el SSC). Por otra parte, la magnitud máxima de las estaciones restantes se alcanzó igualmente el 22 de junio, pero a las 23:00 TU (28 h posteriores al SSC).

Por otra parte, Δ mostró la dispersión del $vTEC$ en las estaciones *CN24* y *CN25* el 21 y 22 de junio 172 y 173 a las 19:00 (junto con el SSC) y 22:00 TU (2 h después del SSC), respectivamente.

Estación GPS	Δ	Índice ROTI	DTEC	Índice W	Estado de la ionósfera de acuerdo con el índice W
CN24	4	0.9	-0.5	-4	TI intensa negativa
CN25	4	0.7	-0.7	-4	TI intensa negativa
DAEX	0.2	0.2	-0.6	-4	TI intensa negativa
OXPE	1.5	0.6	-2.5	-4	TI intensa negativa
OXTH	0.4	0.6	-0.5	-4	TI intensa negativa
OXUM	0.8	0.6	-	-	-
PALX	0.4	0.2	-0.6	-4	TI intensa negativa
PENA	0.8	0.4	-	-	-
PJZX	0.4	0.2	-0.6	-4	TI intensa negativa
POP1	1	0.7	-1	-4	TI intensa negativa
TECO	0.8	0.4	-1.1	-4	TI intensa negativa
TNAL	0.5	0.4	-0.5	-4	TI intensa negativa
TNAM	0.5	0.4	-0.	-4	TI intensa negativa
TNBA	0.4	0.2	-0.6	-4	TI intensa negativa
UNPM	0.4	0.5	-0.6	-4	TI intensa negativa
USMX	0.2	0.1	-0.5	-4	TI intensa negativa

Tabla 4.17: Datos de los índices Δ , ROTI y W , así como clasificación de las TI de acuerdo con el DTEC, obtenidos para el período de la TG del 21 de junio de 2015.

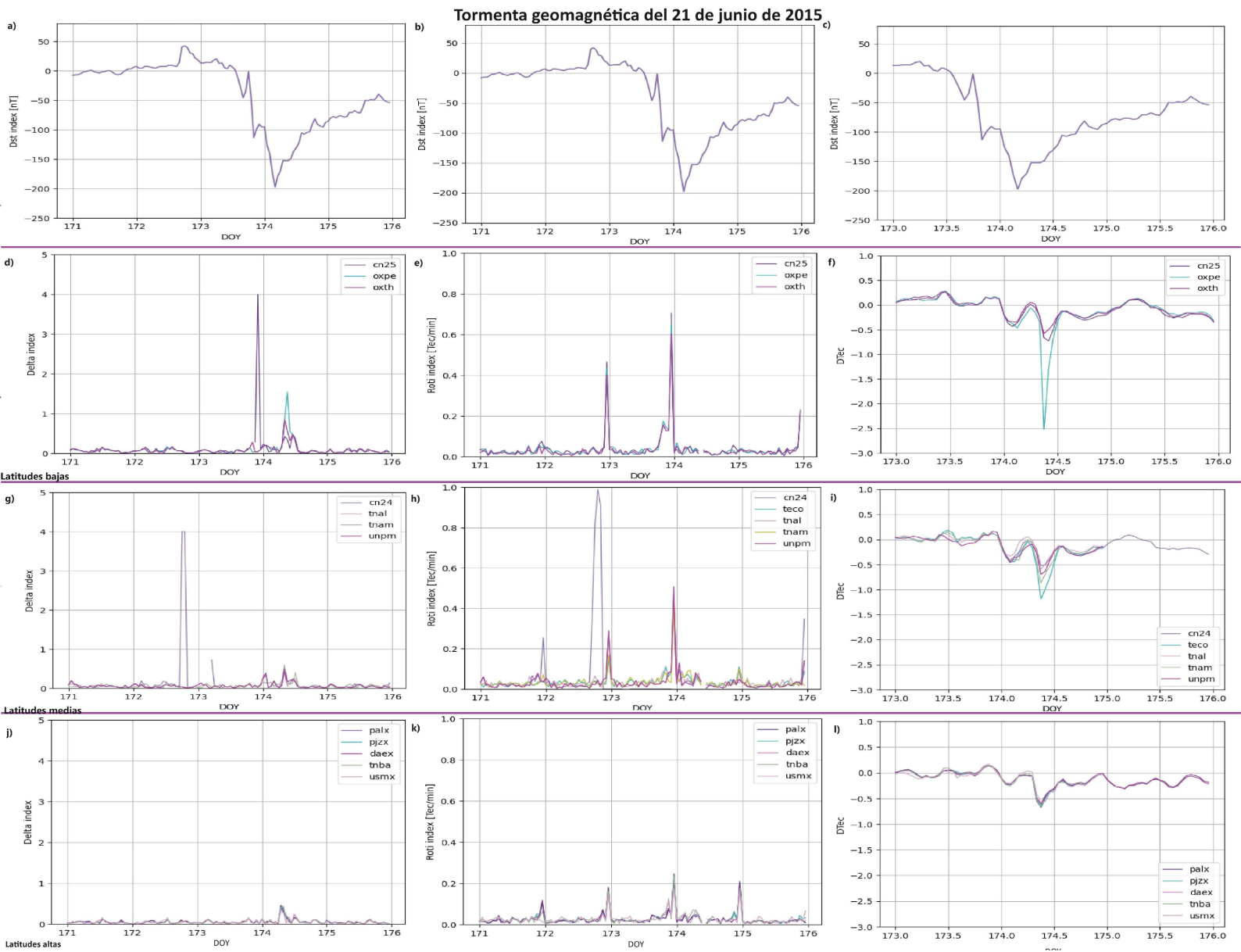


Figura 4.5: Índices Delta, ROTI y W calculados y su comparación con el SSC de la TG del 21 de junio de 2015. Las gráficas a), b) y c) muestran el comportamiento del campo geomagnético medido con el índice Dst. Las gráficas d), g) y j) señalan el comportamiento de Δ a latitudes bajas, medias y altas donde en las gráficas d) y g) detectaron la dispersión de vTEC. Por otra parte, las gráficas e), h) y k) exhiben el comportamiento del ROTI observándose una mayor respuesta de éste en las gráficas e) y h). Por último, las gráficas f), j) y l) presentan el comportamiento del DTEC en donde se detectó la presencia de una TI negativa con mayor presencia en la gráfica f).

4.2.6. TG del 19 de diciembre de 2015

Partiendo de la Tabla 4.18 y la Figura 4.6 se puede observar la ocurrencia de una TI positiva en la mayoría de las estaciones estudiadas, con un DTEC mayor en las estaciones ubicadas en el sur y oeste del país, así mismo, ésta se presentó el día 20 de diciembre (DOY354) a las 04:00, 16:00 y 20:00 TU (entre 4 y 20 h después del SSC). De igual forma, al analizar el ROTI se encontraron burbujas de plasma en las estaciones estudiadas donde la estación *POP1* registró un ROTI de $0.9 \text{ Tec}/\text{min}$ el 20 de diciembre a las 21:00 TU, esto implica una respuesta a la TG 22 h posteriores al SSC. Sin embargo, las demás estaciones registraron este pico en el ROTI el 19 de diciembre casi al instante del SSC.

Finalmente, Δ indicó la dispersión del $v\text{TEC}$ en la estación *OXTH* el 21 de diciembre a las 00:00 TU, es decir, 49 h después del SSC.

Estación GPS	Δ	Índice ROTI	DTEC	Índice W	Estado de la ionósfera de acuerdo con el índice W
CN24	0.4	0.4	0.3	4	TI intensa positiva
CN25	0.4	0.5	0.5	4	TI intensa positiva
DAEX	0.1	0.3	0.2	3	TI moderada
OXTH	4	0.6	0.6	4	TI intensa positiva
PB2Y	0.1	0.3	0.2	3	TI moderada
PENA	0.2	0.6	0.5	4	TI intensa positiva
POP1	3	0.9	0.3	4	TI intensa positiva
PTEX	0.1	0.3	0.2	3	TI moderada
TECO	0.2	0.5	0.5	4	TI intensa positiva
TNAL	0.2	0.6	0.5	4	TI intensa positiva
TNAM	0.2	0.6	0.4	4	TI intensa positiva
TNBA	0.1	0.4	0.3	4	TI intensa positiva
UNPM	0.3	0.4	0.3	4	TI intensa positiva
USMX	0.1	0.2	0.3	4	TI intensa positiva
UXAL	0.3	0.6	0.4	4	TI intensa positiva

Tabla 4.18: Datos de los índices Δ , ROTI y W, así como clasificación de las TI de acuerdo con el DTEC, obtenidos para el período de la TG del 19 de diciembre de 2015.

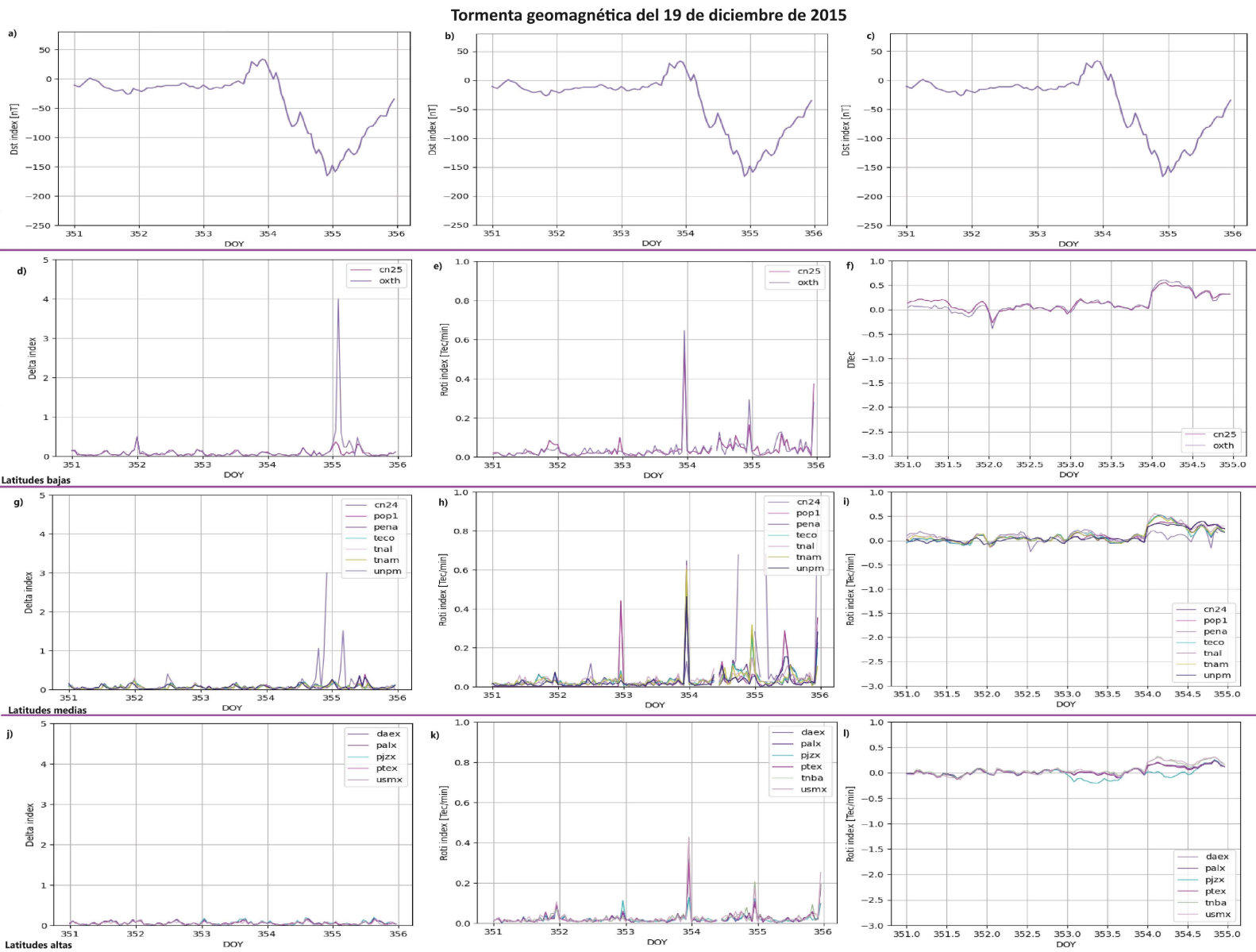


Figura 4.6: Índices Delta, ROTI y W calculados y su comparación con el SSC de la TG del 19 de diciembre de 2015. Las gráficas a), b) y c) muestran el comportamiento del campo geomagnético medido con el índice Dst. Las gráficas d), g) y j) señalan el comportamiento de Δ a latitudes bajas, medias y altas donde en las gráficas d) y g) detectaron la dispersión de vTEC. Por otra parte, las gráficas e), h) y k) exhiben el comportamiento del ROTI observándose una mayor respuesta de éste en las gráficas e) y h). Por último, las gráficas f), i) y l) presentan el comportamiento del DTEC en donde se detectó la presencia de una TI positiva con mayor presencia en la gráfica f).

4.2.7. TG del 18 de enero de 2016

Similarmente, al analizar la Figura 4.8 y la Tabla 4.19 se obtuvo lo siguiente:

El cálculo del DTEC mostró la presencia de una TI intensa y positiva. Es importante señalar que ésta se detectó en todas las latitudes y con “poca” variación entre las magnitudes. Además, solo dos estaciones ubicadas en la península de Yucatán mostraron una menor respuesta al registrar una TI moderada. Ambos eventos se presentaron el 20 de enero a las 02:00 TU, esto quiere decir, 27 h posteriores al SSC.

Para el ROTI, se detectó la presencia de burbujas de plasma en todas las estaciones analizadas para esta tormenta. Si bien, la estación *PENA* presentó 0.8 *Tec/min*, éste no está relacionado con el SSC de la tormenta. Sin embargo, un pico en el comportamiento del $vTEC$ de las estaciones *CN25*, *OXTH*, *CN24*, *UXAL*, *PENA*, *TECO*, *TNAL*, *TNAM* y *UNPM*, todas registrando este máximo el 19 de enero a las 23:00 TU, esto es al mismo tiempo que el SSC.

Finalmente, no se presentó dispersión en el $vTEC$.

Estación GPS	Δ	Índice ROTI	DTEC	Índice W	Estado de la ionósfera de acuerdo con el índice W
CN24	0.2	0.2	0.2	3	TI moderada
CN25	0.2	0.3	0.3	4	TI intensa positiva
CNC0	0.1	0.2	0.3	4	TI intensa positiva
DAEX	0.1	0.2	0.3	4	TI intensa positiva
OXTH	0.2	0.3	0.3	4	TI intensa positiva
PB2Y	0.1	0.2	0.3	4	TI intensa positiva
PENA	0.2	0.8	0.3	4	TI intensa positiva
PJZX	0.1	0.2	0.3	4	TI intensa positiva
PTEX	0.2	0.2	0.3	4	TI intensa positiva
TECO	0.2	0.4	0.3	4	TI intensa positiva
TNAL	0.2	0.3	0.3	4	TI intensa positiva
TNAM	0.2	0.4	0.3	4	TI intensa positiva
TNBA	0.2	0.2	0.3	4	TI intensa positiva
UNPM	0.2	0.2	0.2	3	TI moderada
USMX	0.2	0.2	0.3	4	TI intensa positiva
UXAL	0.1	0.3	0.3	4	TI intensa positiva

Tabla 4.19: Datos de los índices Δ , ROTI y W, así como clasificación de las TI de acuerdo con el DTEC, obtenidos para el período de la TG del 18 de enero de 2016.

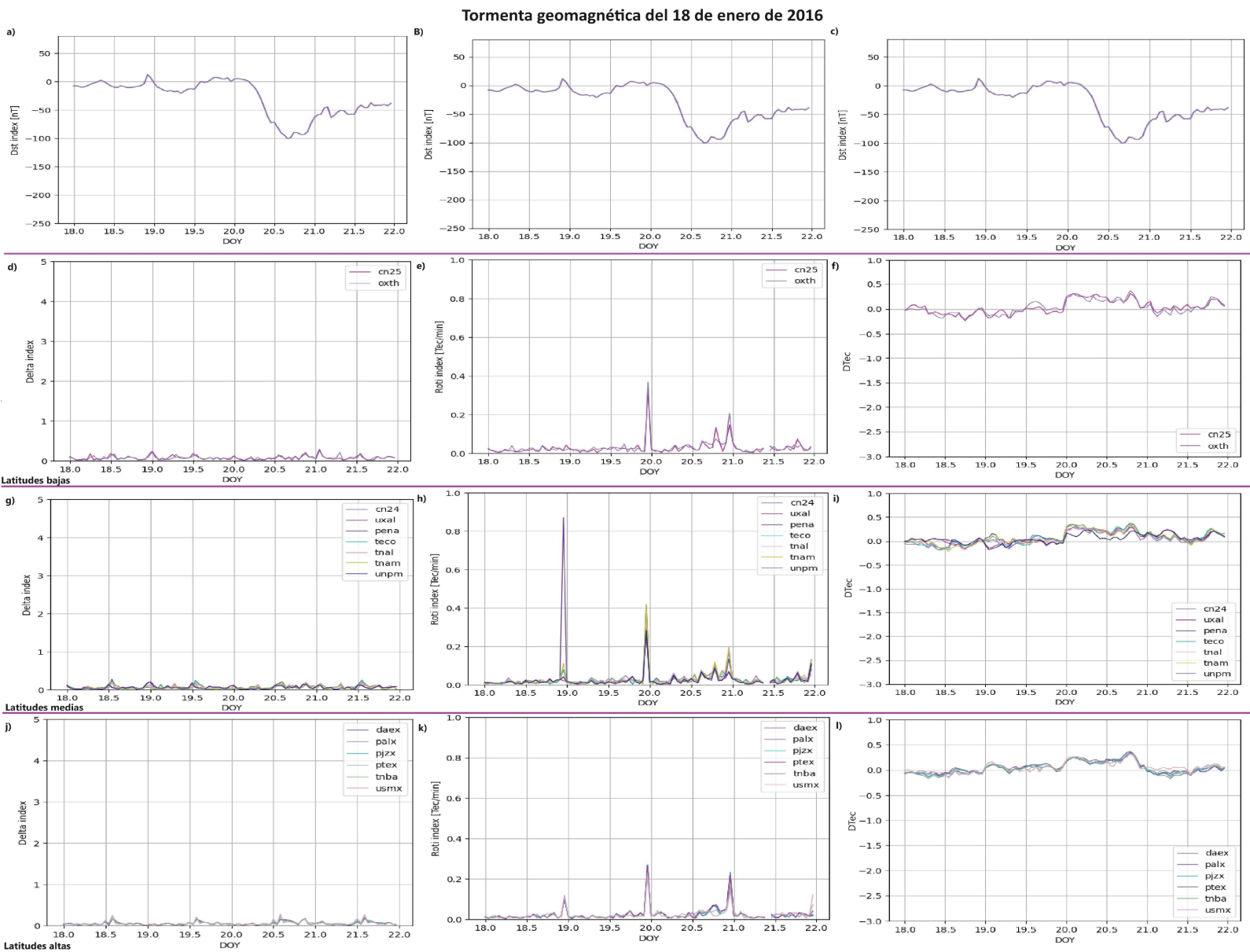


Figura 4.7: Índices Delta, ROTI y W calculados y su comparación con el SSC de la TG del 18 de enero de 2016. Las gráficas a), b) y c) muestran el comportamiento del campo geomagnético medido con el índice Dst. Las gráficas d), g) y j) señalan el comportamiento de Δ a latitudes bajas, medias y altas. Por otra parte, las gráficas e), h) y k) exhiben el comportamiento del ROTI observándose una mayor respuesta de éste en las gráficas e) y h). Por último, las gráficas f), i) y l) presentan el comportamiento del DTEC en donde se detectó la presencia de una TI positiva con mayor presencia en la gráfica f).

4.2.8. TG del 13 de octubre de 2016

El índice W calculado y descrito en la Tabla 4.20 y Figura 4.9 exhibe un comportamiento interesante del DTEC:

- El 14 de octubre entre las 00:00 y 03:00 TU se presentó una TI intensa positiva en todas las latitudes.
- Posteriormente se registró una TI intensa negativa el día 15 de octubre a las 03:00 TU con una mayor afectación en estaciones ubicadas en el oeste y sur del país (estaciones *OEXEC, TNBA, OXUM* y *OXTH*).
- Ese mismo día se notó de nuevo una TI intensa positiva a las 14:00 TU.

- Finalmente, el 16 de octubre a las 02:00 TU se encontró la presencia de otra TI positiva. Estos eventos pueden ser resultado de la interacción de varios factores, tales como una EMC, la incidencia de 3 fulguraciones de clase C, comportamiento del vTEC, entre otros.

Por otra parte, el cálculo del ROTI mostró la presencia de burbujas de plasma en todas las estaciones estudiadas con una mayor magnitud (entre 0.60 y 0.64 *Tec/min* en las estaciones *CN25, CN24, OXGU* y *OXTH* el 13 de octubre a las 23:00 y un segundo pico máximo el 15 de octubre a las 23:00 TU.

Por último, no se encontró la incidencia de dispersión del vTEC.

Estación GPS	Δ	Índice ROTI	DTEC	Índice W	Estado de la ionósfera de acuerdo con el índice W
CN24	0.4	0.6	-0.3	-4	TI intensa negativa
CN25	0.4	0.6	-0.4	-4	TI intensa negativa
OXEC	0.8	0.5	-0.9	-4	TI intensa negativa
OXGU	0.4	0.6	-0.5	-4	TI intensa negativa
OXPE	0.7	0.5	-1.2	-4	TI intensa negativa
OXTH	0.4	0.6	-0.6	-4	TI intensa negativa
OXUM	0.4	0.5	-0.6	-4	TI intensa negativa
PALX	0.1	0.2	0.3	-4	TI intensa positiva
PENA	3.8	0.5	-0.7	-4	TI intensa negativa
POP1	1.9	0.5	-0.5	4	TI intensa negativa
PTEX	0.2	0.5	0.2	-4	TI intensa positiva
TECO	0.8	0.5	-0.6	-4	TI intensa negativa
TNAM	1.2	0.5	-1.3	-4	TI intensa negativa
TNBA	0.1	0.5	0.2	-4	TI intensa positiva
UNPM	0.3	0.6	-0.3	-4	TI intensa negativa
USMX	0.2	0.5	-0.3	-4	TI intensa negativa
UXAL	0.4	0.6	-0.4	-4	TI intensa negativa

Tabla 4.20: Datos de los índices Δ , ROTI y W, así como clasificación de las TI de acuerdo con el DTEC, obtenidos para el período de la TG del 13 de octubre de 2016.

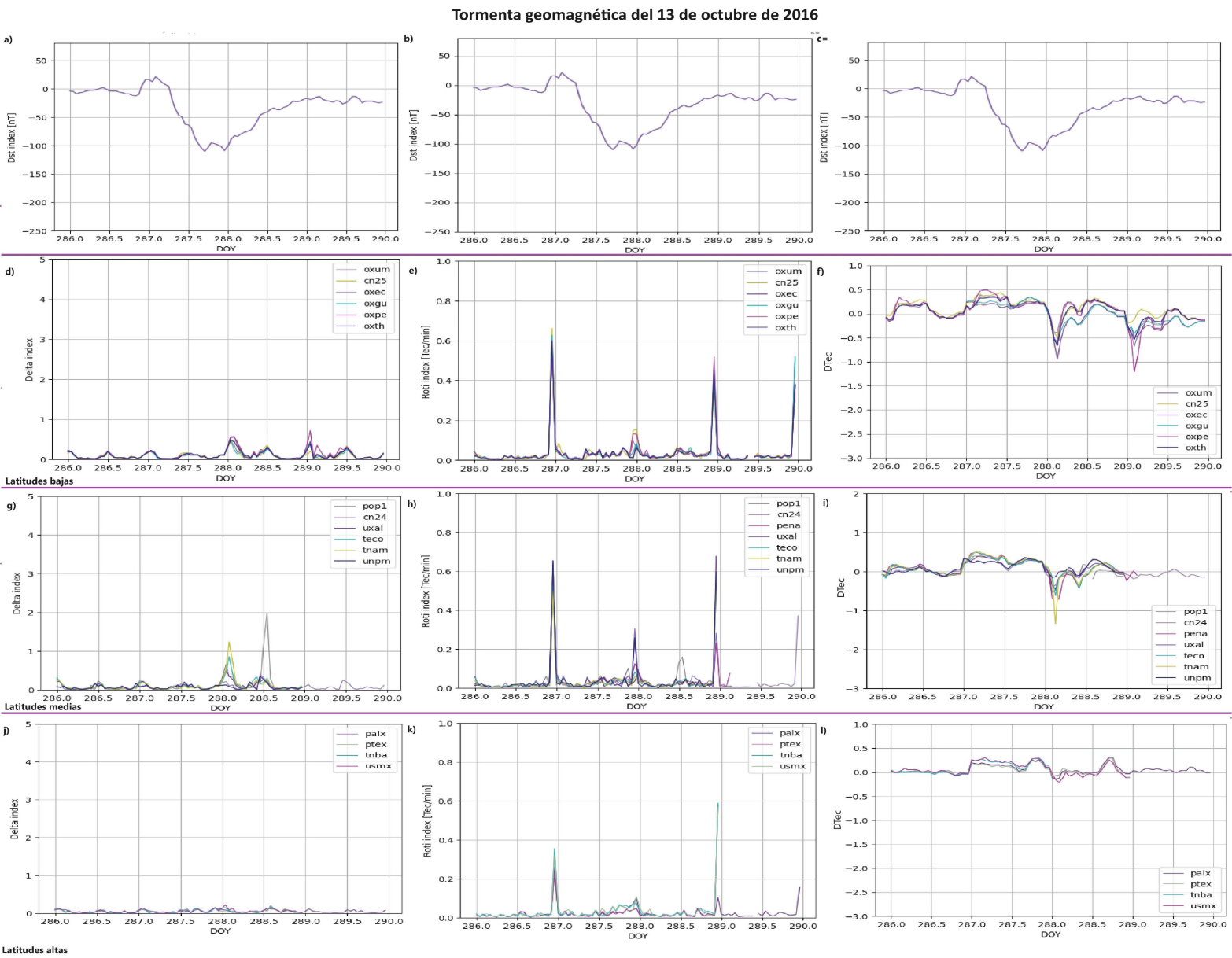


Figura 4.8: Índices Delta, ROTI y W calculados y su comparación con el SSC de la TG del 19 de octubre de 2016. Las gráficas a), b) y c) muestran el comportamiento del campo geomagnético medido con el índice Dst. Las gráficas d), g) y j) señalan el comportamiento de Δ a latitudes bajas, medias y altas. Por otra parte, las gráficas e), h) y k) exhiben el comportamiento del ROTI y en este caso, las 3 registraron la presencia de burbujas de plasma el DOY 198. Por último, las gráficas f), i) y l) presentan el comportamiento del DTEC el cual indica la presencia de TI alternando entre positiva y negativa.

4.2.9. TG del 27 de mayo de 2017

La Tabla 4.21 y Figura 4.10 muestran lo siguiente: Para el índice W se encontró la ocurrencia primero, de una TI intensa positiva el 28 de mayo a entre las 04 y 05:00 TU (6 h después del SSC), después, se presentó una TI intensa negativa el mismo día a las 12:00 TU la cual se detectó solo en la parte sur y oeste del territorio mexicano.

Con respecto al ROTI, se presentó un máximo en su magnitud, pero este no está asociado al SSC de la tormenta, el siguiente máximo indica la presencia de burbujas de plasma el 28 de mayo a las 23:00 TU en gran parte del país, ya que tanto estaciones al sur como al norte presentaron magnitudes que señalan la presencia de burbujas de plasma.

Por otra parte, no se registró la dispersión del vTEC para esta tormenta.

Estación GPS	Δ	Índice ROTI	DTEC	Índice W	Estado de la ionósfera de acuerdo con el índice W
CN24	0.2	0.8	0.5	4	TI intensa positiva
CN25	0.6	0.8	0.7	4	TI intensa positiva
CNC0	0.2	0.4	-	-	-
OXEC	1.8	0.5	-	-	-
OXGU	1.7	0.5	-	-	-
OXPE	1.9	0.1	0.6	4	TI intensa positiva
OXTH	0.7	0.1	0.7	4	TI intensa positiva
OXUM	1.6	0.1	-	-	-
PB2Y	0.2	0.2	0.3	4	TI intensa positiva
PENA	0.3	0.4	0.6	4	TI intensa positiva
PJZX	0.2	0.2	-0.5	-4	TI intensa negativa
PTEX	0.2	0.2	-0.3	-4	TI intensa negativa
TECO	0.3	0.3	-0.5	-4	TI intensa negativa
TNAL	0.5	0.3	-0.5	-4	TI intensa negativa
TNAM	0.3	0.4	0.7	4	TI intensa positiva
TNBA	0.1	0.3	-0.5	-4	TI intensa negativa
UNPM	0.1	0.1	-0.3	-4	TI intensa negativa
USMX	0.1	0.4	-0.7	-4	TI intensa negativa
UXAL	0.5	0.3	-0.4	-4	TI intensa negativa

Tabla 4.21: Datos de los índices Δ , ROTI y W, así como clasificación de las TI de acuerdo con el DTEC, obtenidos para el período de la TG del 27 de mayo de 2017.

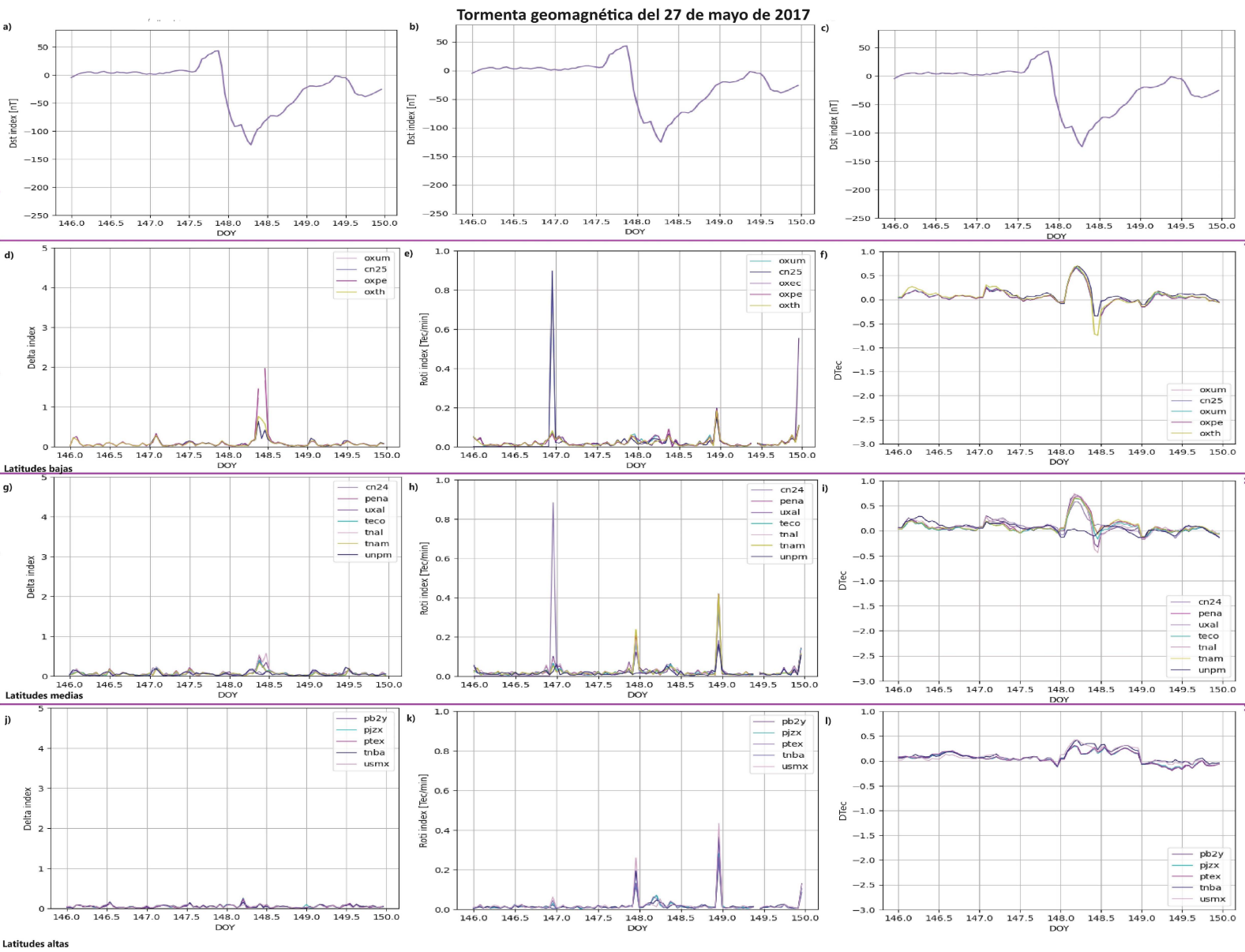


Figura 4.9: Índices Delta, ROTI y W calculados y su comparación con el SSC de la TG del 27 de mayo de 2017. Las gráficas a), b) y c) muestran el comportamiento del campo geomagnético medido con el índice Dst. Las gráficas d), g) y j) señalan el comportamiento de Δ a latitudes bajas, medias y altas. Por otra parte, las gráficas e), h) y k) exhiben el comportamiento del ROTI observándose una mayor respuesta de éste en las gráficas e) y h). Por último, las gráficas f), i) y l) presentan el comportamiento del DTEC en donde se detectó la presencia de una TI positiva con mayor presencia en las gráficas f) e i).

4.2.10. TG del 07 de septiembre de 2017

Similarmente y de acuerdo con la Tabla 4.22 y la Figura 4.10 expone la incidencia en las estaciones *TECO*, *TNAL*, *TNAM* y *UXAL* de una TI negativa el 6 de septiembre a las 03:00 TU, si bien el SSC tuvo lugar el 7 de septiembre a las 02:00 TU, esta tormenta presentó aumento en la magnitud del campo geomagnético prolongado iniciando el 5 de septiembre a las 21:00 TU y el SSC el 7 de septiembre a las 02:00 TU.

Posteriormente se presentó una TI intensa negativa registrada en las estaciones ubicadas en el sur y oeste del territorio mexicano el 8 de septiembre a las 04:00 TU (26 h después del SSC). Por otro lado, el cálculo del ROTI señala la incidencia de burbujas de plasma solo en latitudes bajas y medias los días 8 y 9 de septiembre (DOY 251 y 252) a las 23:00 TU, respectivamente, esto implica una respuesta 20 y 44 h posteriores al SSC. Por último, no se registró la dispersión del $vTEC$.

Estación GPS	Δ	Índice ROTI	DTEC	Índice W	Estado de la ionósfera de acuerdo al índice W
CN24	0.4	0.5	0.4	4	TI intensa positiva
CN25	3.3	0.5	0.7	4	TI intensa positiva
CNC0	0.2	-	0.7	4	TI intensa positiva
OXUM	0.5	0.6	0.7	4	TI intensa positiva
PB2Y	0.1	0.1	0.1	2	perturbación moderada
PJZX	0.1	0.1	0.1	3	TI moderada
PTEX	0.1	0.2	0.1	3	TI moderada
TECO	0.4	0.5	0.6	4	TI intensa positiva
TNAL	0.5	0.5	-0.6	-4	TI intensa negativa
TNAM	0.3	0.3	-0.7	-4	TI intensa negativa
TNBA	0.1	0.1	-0.5	-4	TI intensa negativa
UNPM	0.5	0.5	-0.4	-4	TI intensa negativa
USMX	0.1	0.1	-0.3	-4	TI intensa negativa
UXAL	0.4	0.47	0.4	4	TI intensa positiva

Tabla 4.22: Datos de los índices Δ , ROTI y W, así como clasificación de las TI de acuerdo con el DTEC, obtenidos para el período de la TG del 8 de septiembre de 2017.

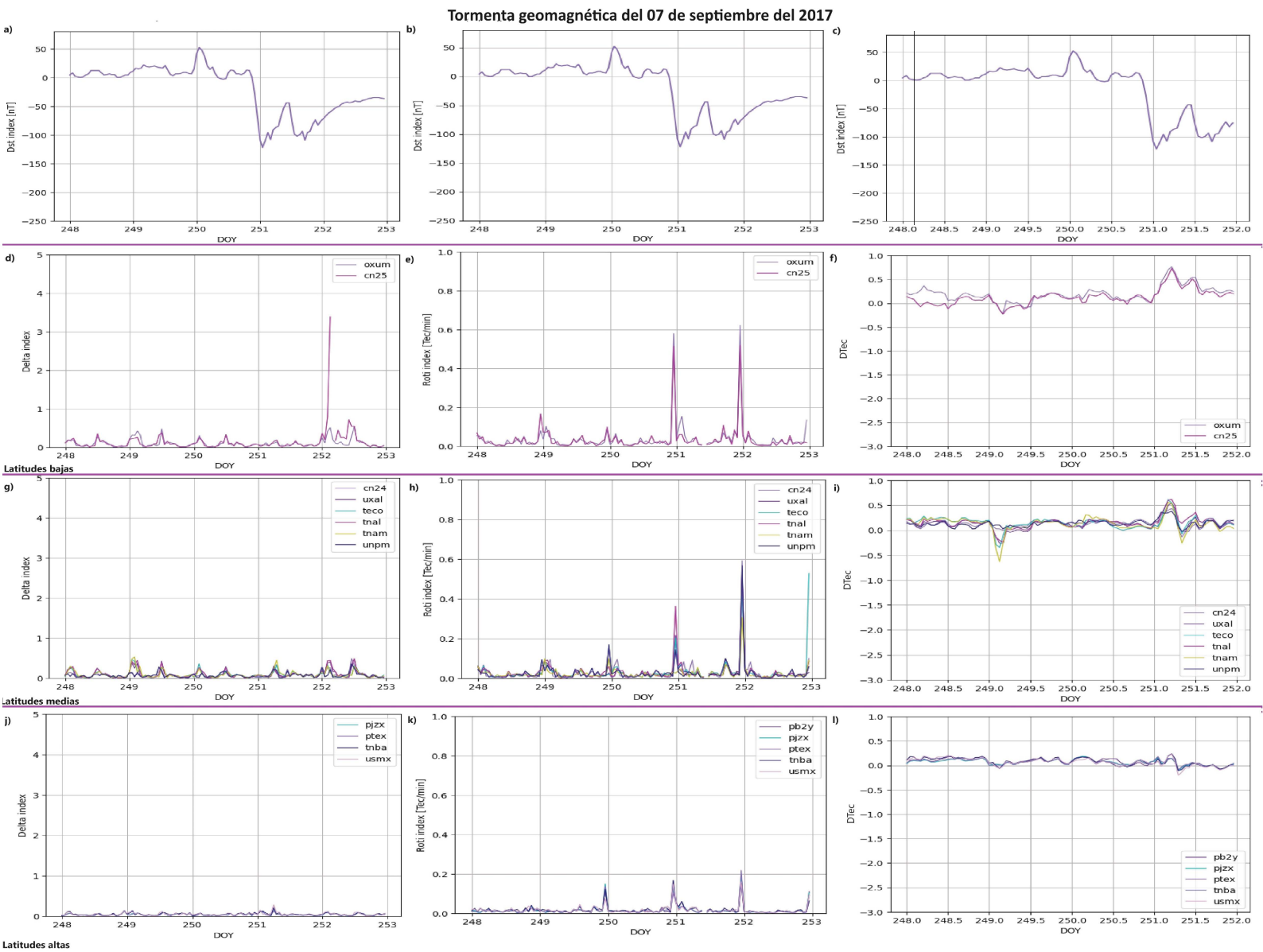


Figura 4.10: Índices Delta, ROTI y W calculados y su comparación con el SSC de la TG del 09 de septiembre de 2017. Las gráficas d), g) y j) señalan el comportamiento de Δ a latitudes bajas, medias y altas. Por otra parte, las gráficas e), h) y k) exhiben el comportamiento del ROTI observándose una mayor respuesta de éste en las gráficas e) y h). Por último, las gráficas f), i) y l) presentan el comportamiento del DTEC en donde se detectó la presencia de una TI negativa el DOY 249 y posteriormente, una TI positiva el DOY 251, ambas con mayor presencia en las gráficas f) e i).

4.2.11. TG del 25 de agosto de 2018

Para finalizar, el análisis del cálculo de los índices Δ , ROTI y W plasmados en la Tabla 4.23 y Figura 4.11 señalan el siguiente comportamiento del índice W:

- El 25 de agosto entre las 05:00 y 06:00 TU (3 h antes del SSC, pero durante el aumento del campo geomagnético) se registró una TI intensa positiva con mayor afectación en el oeste del país.
- Posteriormente, el 26 de agosto a las 3:00 TU (18 h después del SSC) se identificó solo en tres estaciones (*CNC0*, *TNAL* y *UXAL*) la presencia de una TI intensa negativa.
- Finalmente, el 27 de agosto a las 06:00 TU se presentó en las estaciones *OXPE*, *TECO* y *TNAL* una TI intensa positiva, al igual que una TI moderada positiva en el sur, oeste y en la península de Yucatán.

Por otro lado, el cálculo del ROTI indicó la ocurrencia de burbujas de plasma el 26 de agosto a las 23:00 TU (14 h más tarde del SSC) en el sur y oeste del país. Además, el comportamiento de Δ no indicó la dispersión del vTEC a ninguna latitud.

Estación GPS	Δ	Índice ROTI	DTEC	Índice W	Estado de la ionósfera de acuerdo con el índice W
CN25	0.5	0.2	-0.3	-4	TI intensa negativa
CNC0	0.6	0.1	-0.4	-4	TI intensa negativa
DAEX	0.3	0.2	-0.4	-4	TI intensa negativa
OXPE	1.8	0.9	-0.5	-4	TI intensa negativa
OXTH	0.4	0.2	-0.3	-4	TI intensa negativa
PENA	0.4	0.2	-0.4	-4	TI intensa negativa
PJZX	0.3	0.2	-0.6	-4	TI intensa negativa
PTEX	0.3	0.2	0.4	4	TI intensa positiva
TECO	0.3	0.2	0.5	4	TI intensa positiva
TNAL	0.6	0.1	0.4	4	TI intensa positiva
TNAM	0.4	0.2	0.5	4	TI intensa positiva
TNBA	0.4	0.1	-0.6	-4	TI intensa negativa
UNPM	0.6	0.1	0.4	4	TI intensa positiva
USMX	0.3	0.1	-0.5	-4	TI intensa negativa
UXAL	0.5	0.2	0.3	4	TI intensa positiva

Tabla 4.23: Datos de los índices Δ , ROTI y W, así como clasificación de las TI de acuerdo con el DTEC, obtenidos para el período de la TG del 26 de agosto de 2018.

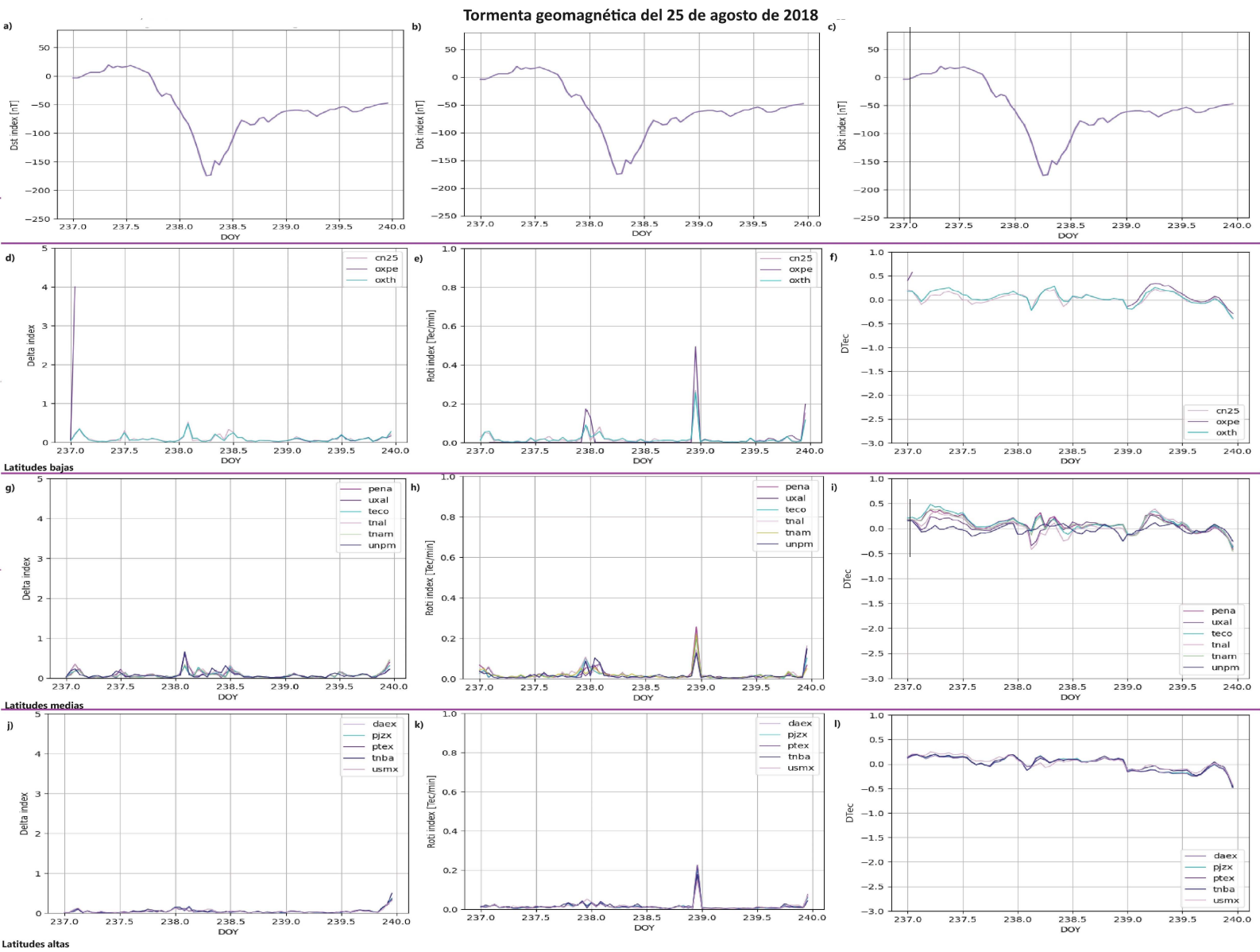


Figura 4.11: Índices Delta, ROTI y W calculados y su comparación con el SSC de la TG del 25 de agosto de 2018. Las gráficas a), b) y c) muestran el comportamiento del campo geomagnético medido con el índice Dst. Las gráficas d), g) y j) señalan el comportamiento de Δ a latitudes bajas, medias y altas. Por otra parte, las gráficas e), h) y k) exhiben el comportamiento del ROTI teniendo una mayor incidencia en las gráficas e) y h). Por último, las gráficas f), i) y l) presentan el comportamiento del DTEC el cual indica la presencia de TI alternando entre positiva y negativa.

4.3. Cálculo de la energía inyectada durante el SSC

De acuerdo con Wang et al. (2014) y referencias ahí, “*la entrada de energía a la magnetósfera procedente del viento solar impulsa muchos fenómenos meteorológicos espaciales y también es la fuente de la dinámica del sistema magnetósfera-ionósfera*”. La interrogante de ¿cuánta energía solar en estas TGs se inyecta a la magnetósfera durante el SSC?, ha sido ampliamente estudiada desde principios de los años sesenta (Wang et al., 2014 y referencias ahí; Doha & Watiq, 2019 y referencias ahí). En ese sentido, en este trabajo se propuso la siguiente metodología para su estudio con datos RINEX provenientes de estaciones GPS en nuestro territorio.

4.3.1. Regresión polinomial

Se graficó el comportamiento de los índices Dst y SYM-H durante los días (o fracción de día) el SSC de las 11 TGs intensas analizadas. Posteriormente, mediante el método de regresión polinomial, se encontró la curva de ajuste para los datos antes descritos (Figuras 4.12, 4.13 y 4.14) y la función que la describe, encontrando así el área bajo la curva de estas gráficas lo que nos permitió “medir” este incremento de energía.

El grado del polinomio característico de las curvas de ajuste identificadas con los índices Dst y SYM-H, el área bajo la curva, el error cuadrático medio y el “degree of freedom” (dof) obtenidos para cada TG intensa se presentan en la Tabla 4.24 y la Tabla 4.25. Se puede observar como para los datos del índice Dst, se tiene un error cuadrático medio entre 0.7 y 1, lo que indica que el modelo de ajuste es bueno. Por otra parte, para los datos del índice SYM-H, el error cuadrático va desde 0.3 hasta 0.93, donde los valores menores a 0.5 indican que el ajuste no fue el mejor. Sin embargo, el cálculo del dof nos indica que el polinomio era el indicado.

Además, la mayoría de los modelos están ajustados a un polinomio de grado cuatro.

Tormenta geomagnética	Grado del polinomio	Error cuadrático medio	Degree of freedom	área bajo la curva (energía)
08 de marzo de 2012	3	1	4	1.8
23 de abril de 2012	4	0.9	10	1.9
14 de julio de 2012	4	0.9	8	1.4
17 de marzo de 2015	4	0.7	21	8.3
21 de junio de 2015	4	0.7	8	14.2
19 de diciembre de 2015	4	0.8	10	14.8
19 de enero de 2016	4	0.8	12	10.2
13 de octubre de 2016	4	0.8	11	4.6
27 de mayo de 2017	4	0.9	45	11.7
07 de septiembre de 2017	4	0.9	11	3.4
25 de agosto de 2018	4	0.8	15	5.5

Tabla 4.24: Áreas bajo las curvas de los inicios súbitos de cada TGs intensa, identificadas con el índice Dst.

Tormenta geomagnética	Grado del polinomio	Error cuadrático medio	Degree of freedom	área bajo la curva (energía)
08 de marzo de 2012	3	0.8	154	2.7
23 de abril de 2012	4	0.4		0.2
14 de julio de 2012	4	0.3		8.9
17 de marzo de 2015	5	0.4	1353	22
21 de junio de 2015	4	0.5	1364	9.3
19 de diciembre de 2015	4	0.5	730	19.8
19 de enero de 2016	4	0.4	915	4.1
13 de octubre de 2016	3	0.6	489	11.3
27 de mayo de 2017	4	0.9	993	11.3
07 de septiembre de 2017	4	0.8	337	2.6
25 de agosto de 2018	4	0.6	746	3.5

Tabla 4.25: Áreas bajo las curvas de los inicios súbitos de cada TGs intensa, identificadas con el índice SYM-H.

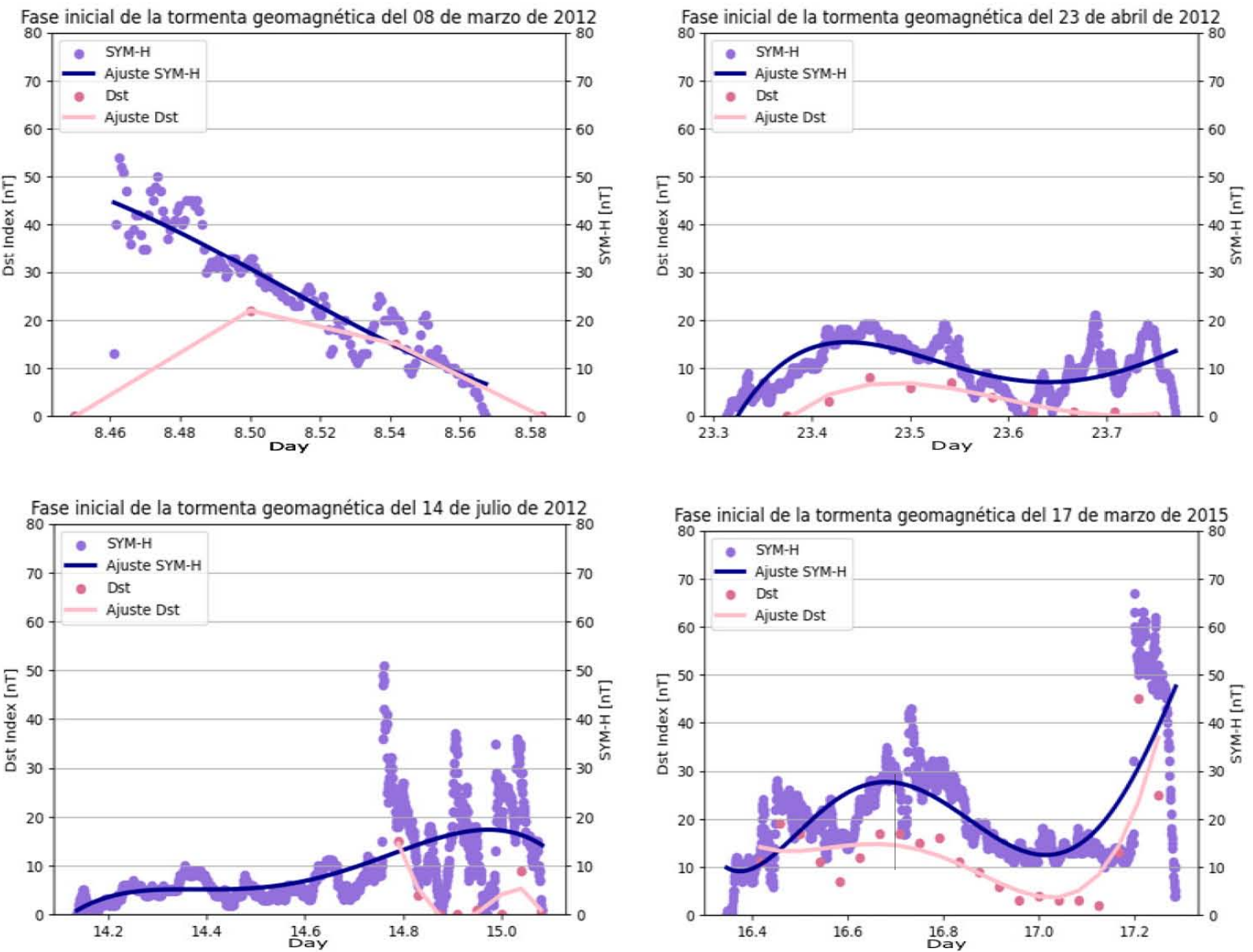


Figura 4.12: Comportamiento de los índices Dst y SYM-H para el comienzo súbito de las tormentas del 8 de marzo de 2012 (superior izquierda), 23 de abril de 2012 (superior derecha), 14 de julio de 2012 (inferior izquierda) y del 17 de marzo de 2015 (inferior derecha) y la línea de ajuste de los índices para cada una de ellas.

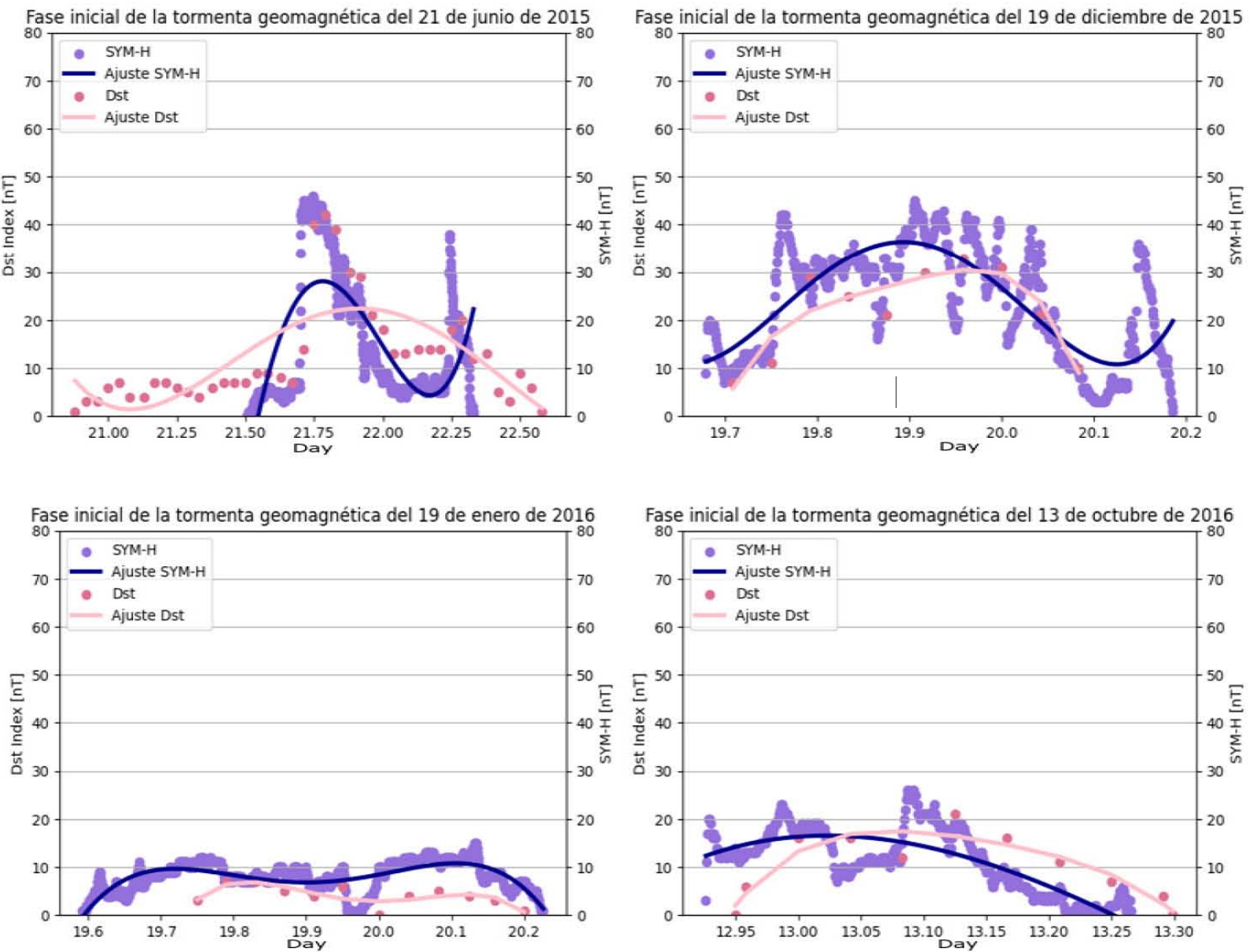


Figura 4.13: Comportamiento de los índices Dst y SYM-H para el comienzo súbito de las tormentas del 21 de junio de 2015 (superior izquierda), 19 de diciembre de 2015 (superior derecha), 19 de enero de 2016 (inferior izquierda) y del 13 de octubre de 2016 (inferior derecha) y la línea de ajuste de los índices para cada una de ellas.

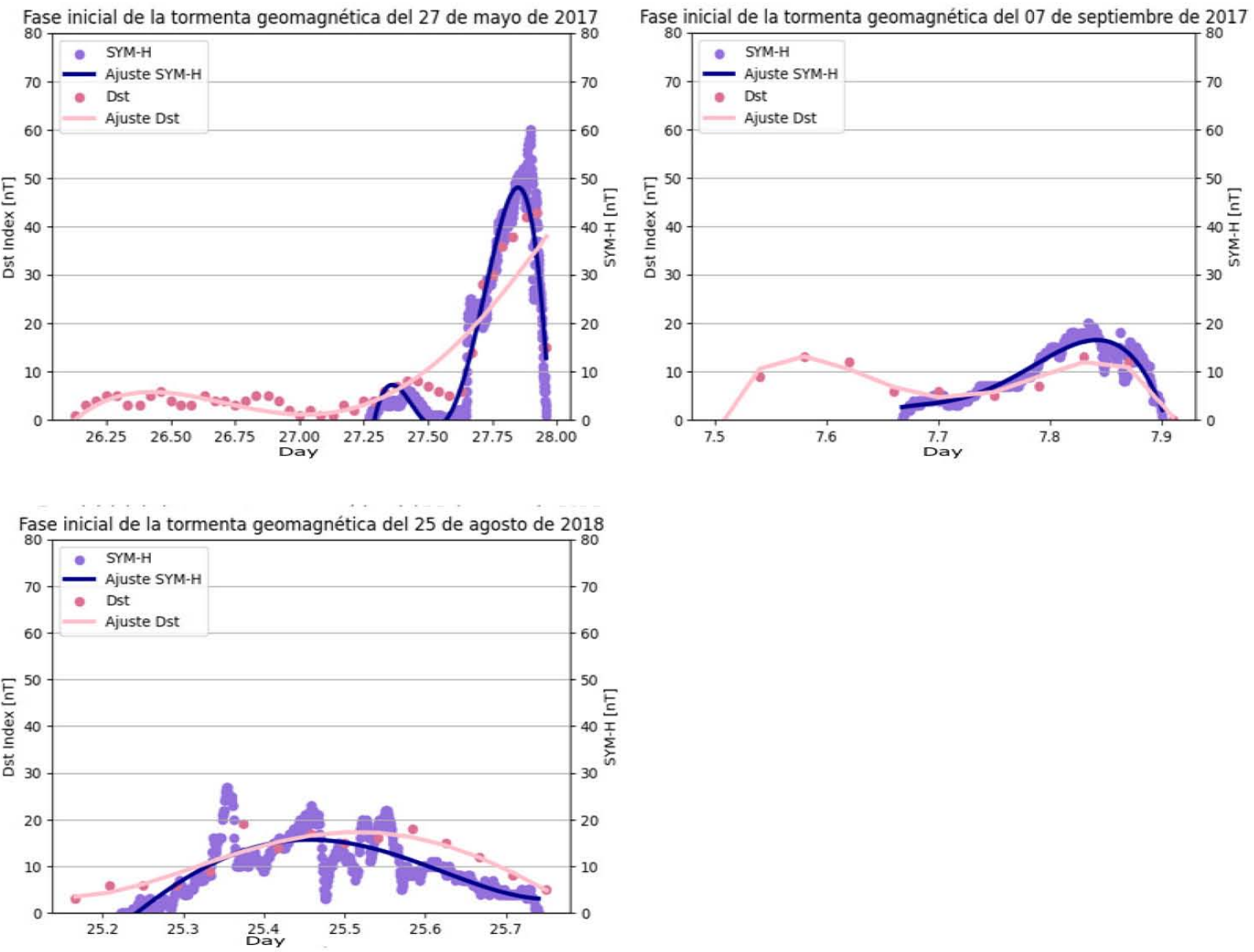


Figura 4.14: Comportamiento de los índices Dst y SYM-H para el comienzo súbito de las tormentas del 25 de mayo de 2017 (superior izquierda), 07 de septiembre de 2017 (superior derecha) y 25 de agosto de 2018 (inferior izquierda) y la línea de ajuste de los índices para cada una de ellas.

Con este método se buscó una aproximación entre el área bajo la curva descrita durante el SSC de una TG con la energía inyectada durante esta misma fase, lo que permitirá buscar la relación entre este parámetro y los índices ionosféricos calculados en este trabajo.

4.3.2. Parámetro ϵ

De acuerdo con Tenfjord & Øtsgaard, 2013 “*la función de acoplamiento de energía más ampliamente utilizada es el parámetro ϵ de Akasofu. El parámetro ϵ es un parámetro semi-empírico que representa la tasa de entrada de energía (W , J/s). El parámetro se parametrizó asumiendo que la energía para alimentar el sistema magnetosfera-ionosfera es proporcionada por el viento solar*”. Matemáticamente se expresa como:

$$\epsilon = 4\pi/\mu_0 V B^2 \sin^4(\theta/2) I_0^2, \quad (4.1)$$

donde V , B , θ y I_0^2 son la velocidad y magnitud del campo magnético del viento solar, así como el “clock angle” y área efectiva de interacción.

Para este trabajo se utilizaron datos del viento solar adquiridos durante el SSC de las 11 TGs intensas analizadas y durante la fase principal de las mismas para realizar el cálculo de este parámetro.

4.3.3. Integración numérica

La integración numérica es un método para calcular la integral definida de una serie de datos representados en los ejes x e y . Consiste en aproximar el área bajo la curva de los datos mediante técnicas numéricas y es útil cuando no se dispone de una función analítica para la curva, pero se tienen datos discretos.

En ese sentido, el eje x representa la escala de tiempo en la que duró la TG y el eje y el comportamiento del índice Dst durante la TG analizada.

4.4. Correlación entre los índices ionosféricos y el cálculo de la energía inyectada durante el SSC a partir del índice geomagnético Dst

Finalmente, y para englobar todo lo que se ha realizado en este trabajo, se buscó la correlación entre la energía inyectada a la magnetósfera durante el SSC, calculada en la Sección 4.3, con los índices ionosféricos obtenidos para cada estación (Sección 4.2), ambos parámetros calculados para las 11 TGs intensas del ciclo solar 24.

Para encontrar dicha correlación, se realizó en el análisis mediante una regresión lineal a través del método mínimos cuadrados y se calculó el coeficiente de correlación entre la energía calculada por los distintos métodos y los índices ionosféricos Δ , W (DTEC) y ROTI de cada estación para latitudes bajas (sur del país) medias (oeste) y altas (norte del país) (ver Tabla 4.26). Al comparar el coeficiente de correlación obtenido para cada método (véase

Tabla 4.26 se puede observar que la mejor correlación se presenta entre los índices ionosféricos y el método de regresión polinomial. En este sentido, se presenta de manera gráfica la correlación entre la energía calculada con el método de regresión polinomial y los índices ionosféricos para cada estación, la línea de regresión y la diferencia entre latitudes geográficas (Figuras 4.15, 4.16 y 4.17).

La Figura 4.15 muestra la correlación entre Δ y la energía calculada a diferentes latitudes y para las 11 tormentas geománticas analizadas. Se puede observar la dispersión de los datos para cada estación, donde conforme a la Tabla 4.26, el coeficiente de correlación para este índice va de 0.1 para latitudes medias, 0.2 para latitudes altas y 0.37 para latitudes bajas, esto es, se obtuvo un mejor modelo para latitudes bajas.

Índice	Latitud	Coef. de corr. (regresión polinomial)	Coef. de corr. (parámetro ϵ)	Coef. de corr. (int. numérica)
Δ	baja	0.4	0.1	0
	media	0.3	0.7	0.2
	alta	0.3	0.2	0.1
DTEC	baja	0	-0.4	-0.1
	media	0	0	-0.3
	alta	0	-0.5	-0.4
ROTI	baja	-0.4	0	0.1
	media	0.2	0	-0.4
	alta	0.3	0.3	0.2

Tabla 4.26: Coeficiente de correlación calculado a diferentes latitudes para evaluar el modelo que relaciona los índices ionosféricos y la energía inyectada a la magnetósfera durante el SSC.

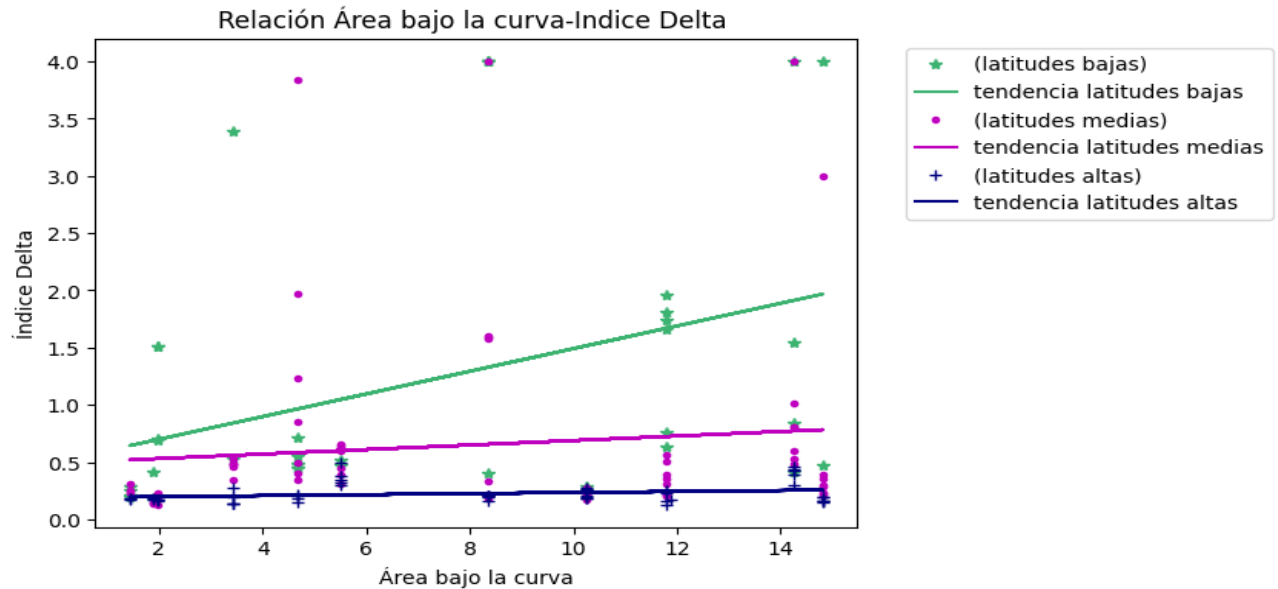


Figura 4.15: Gráfica que ilustra el ajuste lineal entre Δ de cada estación estudiadas y la energía calculada para las 11 TGs intensas del ciclo solar 24.

En el caso del parámetro DTEC, la Figura 4.16 muestra una mayor homogeneidad entre el comportamiento a diferentes latitudes, pero una mayor dispersión de los datos en todas las latitudes, ya que el coeficiente de correlación fue de -0.03 para latitudes bajas, 0.01 para latitudes medias y 0.04 para latitudes altas (Tabla 4.26), lo que quiere decir que no se obtuvo un buen modelo para este parámetro.

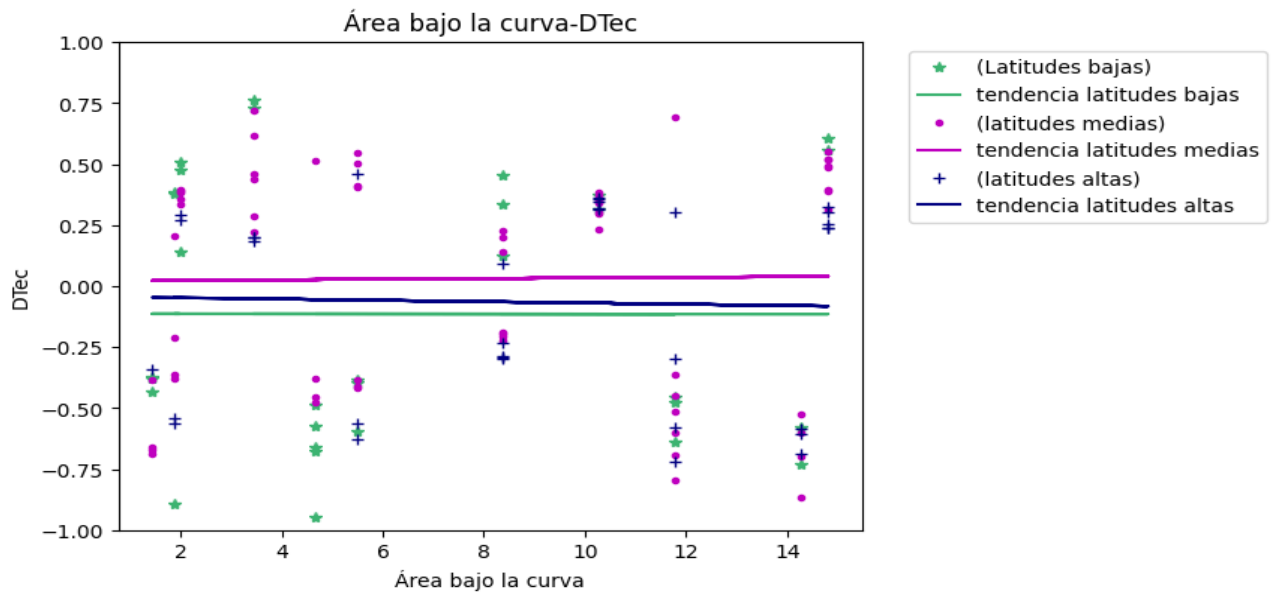


Figura 4.16: Gráfica que ilustra el ajuste lineal entre el índice W (DTEC) de cada estación estudiadas y la energía calculada para las 11 TGs intensas del ciclo solar 24.

Por último, la Figura 4.17 exhibe una mayor diferencia entre el comportamiento de los datos obtenidos a diferentes latitudes, donde la correlación a latitudes bajas se comportó de forma contraria a las demás latitudes de tal forma que la correlación con el ROTI (Tabla 4.26) mostró un coeficiente de correlación de -0.28 para latitudes bajas, 0.31 para latitudes medias y 0.25 para latitudes altas.

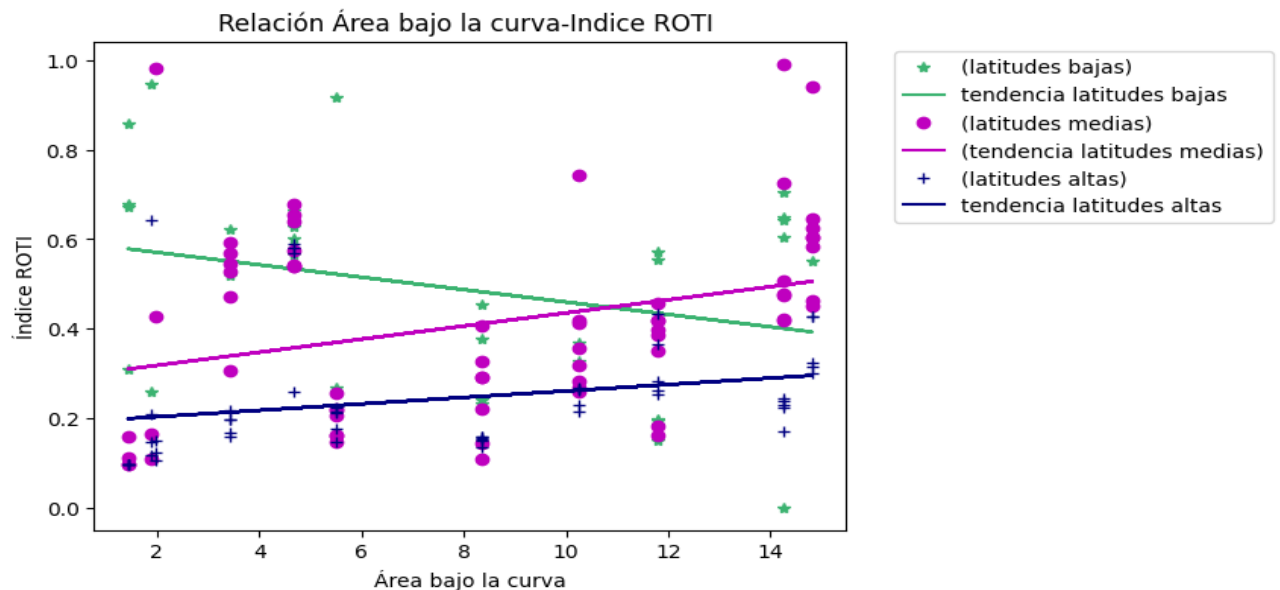


Figura 4.17: Gráfica que ilustra el ajuste lineal entre el ROTI de cada estación estudiadas y la energía calculada para las 11 TGs intensas del ciclo solar 24.

De forma general, en este Capítulo se analizó el impacto de las TGs en la ionósfera y como parámetros como el $vTEC$ y algunos índices ionosféricos registraron estas perturbaciones en la ionósfera, dependiendo de la intensidad, duración y estación del año en las que las TGs se presentaron, esto como resultado de aplicar la metodología descrita en los Capítulos 2 y 3.

Capítulo 5

Conclusiones

La hipótesis principal de esta investigación está sustentada en la idea de que la intensidad de las TGs se correlaciona con el grado de perturbación observada en la ionósfera como respuesta a dichas tormentas. Esto significa que en general, a mayor intensidad de las TGs mayor debe ser el grado de perturbación en la ionósfera. Además, hay que tomar en cuenta que el presente trabajo busca destacar esto en las latitudes del territorio mexicano con instrumentación propia en el país.

Durante el proceso de esta investigación se ha buscado la mejor forma de medir ese grado de perturbación en la ionósfera a través del uso de distintos índices que existen en la literatura (ver Capítulo 2). Se ha observado es que todos estos índices son afectados de distintas formas y responden de forma distinta según sea la posición (latitud) de las estaciones receptoras.

A continuación, se presentan las conclusiones más importantes basadas en el análisis de datos, la revisión bibliográfica y modelos matemáticos empleados en este trabajo. Con ellos ha sido posible identificar algunas características importantes del comportamiento del vTEC y de los índices ionosféricos a latitudes en las que se encuentra México:

1. Con respecto al análisis de los índices geomagnéticos, y tal como se describió en el Capítulo 2, Sección 2.1, los índices globales Dst, SYM-H, así como el índice local Kmex identifican y clasifican las perturbaciones geomagnéticas en una región específica, cada uno con resoluciones de tiempo distintas: 1 hora, 1 min y trihorario, respectivamente (Tan et al., 2018; Zhao et al., 2022). De acuerdo con esto, se concluye lo siguiente:
 - Al analizar dichos índices se pudo identificar que los 3 pusieron de manifiesto la perturbación del campo geomagnético el mismo día, con pequeñas diferencias en la hora que detectadas, debido probablemente a la resolución temporal de los datos. Debido a lo anterior se concluye que independientemente de la resolución espacial y temporal, existe una correlación entre el tiempo de detección entre los índices geomagnéticos analizados, así como en el registro de la intensidad del campo magnético indicadora de TGs intensas.
 - Al identificar las TGs de acuerdo con la intensidad del campo geomagnético (Alberti et al., 2021 y referencias ahí; Siciliano et al., 2021 y referencias ahí) se

identificó que las TGs más intensas estudiadas (-234 y -198 nT) se presentaron en primavera e invierno durante el segundo máximo del ciclo solar 24, a su vez, la tormenta más débil de las estudiadas (-101) nT (fase descendente del ciclo solar 24) de igual forma se presentó en invierno y la segunda más débil registrada también en la fase descendente del ciclo solar 24 (-110 nT), en otoño. Es decir, no se encontró una relación entre la intensidad del campo magnético con las estaciones del año sino con las fases del ciclo solar 24 y con la ocurrencia de EMCs, RICs o eventos complejos tal como se describe en Liu et al. (2015), Manu et al. (2022), Gil et al. (2020) y Simi et al. (2021).

2. Por otra parte, se sabe que el estudio del comportamiento del $vTEC$ a diferentes latitudes y a lo largo de un ciclo solar ya ha sido estudiado en algunos trabajos, tales como Balan et al. (2000), Kutiev et al. (2005), Chen et al. (2008), Romero-Hernández et al. (2020) y Shinboni et al. (2022), por mencionar algunos en donde se define que la variación diaria de la ionósfera y de sus capas está ligada a la actividad solar, dependiendo de la latitud en la que se realice el estudio. A partir de los resultados obtenidos con los softwares GPS-TEC desarrollado por el Dr. Gopi Seemala y TayAbsTec:
 - Se pudo observar un mayor incremento (amplitud) del $vTEC$ a latitudes bajas (sur de México) así como latitudes medias (oeste del territorio mexicano) y una magnitud menor en la parte norte de México, lo que se relaciona con la entrada de partículas de la zona del anillo de corriente que afecta más a las latitudes en las que se encuentra México.
 - Se encuentra una relación entre el momento del ciclo solar en el que se produce la TG y el comportamiento del $vTEC$, ya que al encontrarse en la fase mínima del ciclo solar 24, la variación del $vTEC$ fue mínima registrándose valores del $vTEC$ no mayores a 45 TECU para las estaciones GPS estudiadas.
 - La diferencia máxima entre los cálculos hechos por GPS-TEC, Tec-suite y TayAbsTec varía desde 19 hasta 26 TECU. Estas diferencias solo tuvieron lugar en algunas estaciones ubicadas en distintos puntos del país y en distintas fases del ciclo solar 24, por lo tanto, se puede determinar que ambos programas son fiables, en primera aproximación para su uso en estudios en la zona de México y en todas las fases de un ciclo solar.
 - Finalmente, se encontró para la TG del 17 de marzo de 2015, que el valor máximo aproximado registrado fue de 70 TECU comparado con un valor de 30 TECU para el promedio de los días no perturbados estudiados en cada caso.
3. De acuerdo con lo descrito en el Capítulo 2 Sección 2.2, cada uno de los índices ionosféricos estudian una perturbación diferente en la ionósfera, tales como variaciones espaciales y temporales de los parámetros de plasma (índice W) Gulyaeva et al. (2008), la ocurrencia de burbujas de plasma (ROTI) Pi et al. (1997), así como la dispersión del $vTEC$ (Δ) Rodríguez-Martínez et al. (2014). En ese sentido, este trabajo cobra relevancia ya que, aunque existen algunos artículos donde se comparan algunos índices como en Beach & Kintner. (1999), Carrano et al. (2019), entre otros, no se cuenta con

trabajos previos donde se comparen estos 3 índices ionosféricos en específico. Con base en los resultados obtenidos en el Capítulo 4, se deduce lo siguiente:

- Conforme a la respuesta espacial de la ionósfera ante la presencia de TGs intensas, se deduce:
 - a) Índice W (DTEC): La perturbación del plasma ionosférico al que hace referencia este índice se identificó con mayor intensidad en latitudes bajas, en menor medida a latitudes medias y muy poco a latitudes altas, esto debido a la influencia de la corriente de anillo, como se mencionó anteriormente.
 - b) ROTI: La presencia de burbujas de plasma se localizaron en mayor medida a latitudes bajas seguido de latitudes medias y con menor afectación, a latitudes altas. Esto es congruente con lo que se explicó en el Capítulo 1, Sección 1.2.12, en donde se explica que las burbujas de plasma se generan principalmente a latitudes ecuatoriales. Sin embargo, en la TG del 14 de julio de 2012, se tuvo una mayor respuesta en latitudes altas que en bajas, esto puede ser debido a la incidencia de una fulguración clase M y X. Además de los fenómenos solares impulsores de esta TG que se describieron en el Capítulo 3, Sección 3.3.
 - c) Δ : Solo se presentó en 2 TGs (21 de junio y 19 de diciembre de 2015) donde se registró en estaciones a latitudes bajas (primordialmente) y latitudes medias (península de Yucatán) se sugiere que este índice se emplee con TGs con valores menores a $-150 nT$.
- Con respecto a la respuesta temporal de la ionósfera ante la presencia de TGs intensas, se deriva lo siguiente:
 - a) $vTEC$: La magnitud máxima del $vTEC$ se registró principalmente entre 3 y 44 h después del SSC de cada tormenta, siendo la de menor tiempo la tormenta del 14 de julio de 2012 y la de mayor tiempo, la del 23 de enero del 2016.
 - b) Índice W: Se observó el valor del DTEC indicador de una TI entre 2 y 31 h posteriores al SSC, siendo el menor tiempo perteneciente a la tormenta del 9 de septiembre de 2017 y la de mayor tiempo la de marzo del 2015.
 - c) ROTI: el valor que señala la presencia de burbujas de plasma se detectó entre 4 (TG del 14 de julio de 2012) y 36 h (TG del 8 de marzo y 23 de abril de 2012) después del SSC.
Al igual que en el análisis espacial, el análisis temporal de éste índice corresponde con lo descrito en el Capítulo 1, Sección 1.2.12, ya que las burbujas de plasma se presentaron primordialmente a las 23:00 TU.
 - d) Δ : Solo se registró en dos tormentas, las cuales lo detectaron entre 4 y 49 h después del SSC, es importante destacar que éste se presentó durante el 2^{do} máximo solar.
- Con respecto a la correlación entre índices ionosféricos y las estaciones del año en que se presentaron las TGs, no se encontró relación en magnitud o temporalidad. Para cada índice se concluye lo siguiente:

- a) Índice W: las fases negativas o positivas de las TI registradas no pertenecen a una sola estación del año y no son más intensas en una estación que otra, pero sí se observa que las TI del verano y otoño del mínimo solar tienen un comportamiento errático que va de fase negativa a fase positiva, pero esto también puede estar asociado a otros eventos como fulguraciones, eventos impulsores (véase Capítulo 3, Sección 3.3), entre otros.
 - b) ROTI: La magnitud máxima registrada de este índice no está ligada a una estación del año, aunque estas magnitudes se presentaron en su mayoría en invierno y primavera, también lo hicieron en verano.
 - c) Δ : Partiendo de que este índice solo se presentó en 3 de las 11 TGs intensas analizadas, estas tres pertenecen a estaciones totalmente diferentes 17 de marzo (invierno), 21 de junio (verano) y 19 de diciembre (otoño).
4. Para el cálculo de la energía inyectada a la magnetósfera durante el SSC de una TG es importante tener en consideración algunos parámetros como el cálculo del flujo de energía del viento solar mediante la velocidad, presión y densidad del viento solar (véase Tenfjord & Ostgaard, 2013 y referencias ahí; Huang et al., 2014 y referencias ahí y Wang et al., 2014 y referencias ahí).

Además, se puede calcular la energía inyectada utilizando el cálculo del área bajo la curva descrita durante el SSC (como se hizo en este estudio), pero comparando dichos resultados con los que se pueden obtener a través del índice de perturbación geomagnética (DP) y el índice de perturbación de radio (Rp) descritos en Hughes & Singh, (2012) y referencias ahí.

Al evaluar la metodología propuesta para el cálculo de la energía explicado en el Capítulo 4, Sección 4.4, se deriva lo siguiente:

- La calidad del ajuste para la correlación entre los índices ionosféricos y el cálculo de la energía inyectada muestra un valor bajo para el coeficiente de correlación, esto significa que el cálculo del área bajo la curva y los índices ionosféricos no tienen una relación entre las variables utilizadas, excepto a latitudes altas (para Δ) lo cual se puede deber a que no hubo una gran dispersión en el vTEC para la mayoría de las TGs en ninguna estación a esa latitud.
- Lo anterior puede tener una explicación basada en que el cálculo de la energía inyectada es un procedimiento complejo y en el caso de este estudio, se realizó mediante el cálculo del área bajo la curva. Por sí solo, no engloba todos los procesos que tienen lugar en la magnetósfera de la Tierra y su interacción con el viento solar. Por lo tanto, para tener una mejor correlación será necesario hacer este cálculo tomando en cuenta estos procesos y de esta manera, ver si mejora la correlación entre las variables. Incluso sería importante tomar en consideración la fase de desarrollo de la TG.
- La correlación entre los índices ionosféricos y la energía, hecho con el parámetro ϵ presenta un mejor coeficiente de correlación que el cálculo hecho mediante integración numérica. Sin embargo, el cálculo de esta relación hecho con el método de regresión polinomial presenta un mejor coeficiente de correlación que los dos métodos mencionados.

5.1. Recomendaciones y trabajo futuro

De acuerdo con los alcances de esta investigación, para un trabajo a futuro se sugiere seguir analizando la respuesta de la ionósfera a diferentes latitudes del globo terráqueo, así como trabajar con bases de datos y modelos de otros países, en específico, de España, para así lograr una mejor comprensión de la ionósfera y de las TGs que la perturban.

Adicionalmente, se recomienda trabajar con bases de datos de archivos RINEX con una resolución mayor para tener un mejor análisis espacial y temporal de las perturbaciones ionosféricas. También se podría utilizar índices como S_4 que asigna un valor de centelleo ionosférico en señales GNSS en regiones ecuatoriales y de baja latitud. Se considera que el centelleo es débil cuando el índice S_4 está por debajo de 0.2. Del mismo modo, un valor del índice S_4 entre 0.2 y 0.5 se considerará centelleo ionosférico medio (véase Mengying et al., 2019 y Silva et al., 2022 y referencias ahí). Este análisis puede ayudar a una mayor comprensión de los efectos de las TGs en la ionósfera y la propagación de señales en esta región.

Por otro lado, se sugiere tomar en consideración el hacer una comparación entre ciclos solares, ya que como se mencionó en este trabajo, el ciclo solar 24 es considerado como uno de los ciclos con actividad solar más débil y, por lo tanto, sería interesante aplicar la metodología utilizada en esta investigación con eventos solares más intensos y, de esta forma tener una mejor estadística y correlación entre los parámetros estudiados. Además de incluir, por ejemplo, el efecto de fulguraciones y, de manera más detallada, el de las EMCs.

Por otra parte, para el cálculo de la energía inyectada a la magnetósfera durante el SSC de una TG y en el caso de los índices geomagnéticos, se propone trabajar con datos con resoluciones mayores a 1 minuto que permitan hacer cálculos de energía usando el método de *wavelets*. Esta técnica crea modelos no lineales para sistemas dinámicos complejos como lo es la inyección de energía por medio del viento solar a la magnetósfera (Wei et al., 2004 y referencias ahí). Además, proporciona información sobre las escalas temporales de las perturbaciones ionosféricas.

Referencias y Bibliografía

- [1] ABDU, M. A., & BATISTA I. S. (2012), “*Equatorial ionospheric irregularities and scintillations: Recent observations and future challenges*”. IEE Transactions On Aerospace And Electronic Systems Vol. 58, Doi. No. 10.1109/Taes.2022.3188741.
- [2] ABREU A.J; FAGUNDES P.R; GENDE M. BOLAJI O.S; DE JESUS R & BRUNINI C. (2014), “*Investigation of ionospheric response to two moderate geomagnetic storms using GPS–TEC measurements in the South American and African sectors during the ascending phase of solar cycle 24*”. Departamento de Física e Astronomia, Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), São José´ dos Campos, São Paulo, Brazil.
- [3] AKASOFU S.I. & AHN B.H. (1981), “*Distribution of the field-aligned currents, ionospheric currents, and electric fields in the polar region on a very quiet day and a moderately disturbed day*”. Journal of Geophysical Research, Vol. 86, no. A2, Pages 753-760.
- [4] ALBERTI T; CONSOLINI G & DE MICHELIS P.(2020), “*Complexity measures of geomagnetic indices in the last two solar cycles*”. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105583>.
- [5] BAGIYA M. S; HAZARIKA R; LASKAR F. I; SUNDA S; GURUBARAN S; CHAKRABARTY D; BHUYAN P. K; SRIDHARAN R; VEENADHARI B & PALLAMRAJU D. (2014), “*Effects of prolonged southward interplanetary magnetic field on low-latitude ionospheric electron density*”. J. Geophys. Res. Space Physics, Vol. 119, pp. 5764–5776.
- [6] BAIJU D., BAPAN P. & GALAV P. (2020), “*Ionospheric response to the second strongest geomagnetic storm of the solar cycle 24: first results from the Arabian Peninsula*”. IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE).
- [7] BAKER D. N, EAMONN DALY, IOANNIS DAGLIS, JOHN G. KAPPENMAN & MIKHAIL PANASYUK (2004), “*Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*”. Space Weather. <https://doi.org/10.1029/2003SW000044>.
- [8] BALAN, N., OTSUKA, Y., FUKAO, S., ABDU, M. A., & BAILEY, G. J. (2000), “*Annual variations of the ionosphere: A review based on MU radar observations*”. Advances in Space Research, 25(1), 153–162. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(99\)00913-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(99)00913-8).

- [9] BAPAN P; BARIN K & ANIRBAN G. (2018), “*Latitudinal variation of F-region ionospheric response during three strongest geomagnetic storms of 2015*”. Acta Geod. Geophys. Vol. 53, páginas 579–606.
- [10] BAPAN P., PATARI A., KUMAR DE B. & ANIRBAN G., (2019), “*Response of the Earth’s equatorial ionosphere during the severe G4-class geomagnetic storm of 8th September 2017*” Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1330, DOI 10.1088/1742-6596/1330/1/012005.
- [11] BARTELS, J., N. H. HECK, & H. F. JOHNSTON (1939), “*The three-hour-range index measuring geomagnetic activity*”. Terr. Magn. Atmos. Elec., Vol. 44, páginas 411-454.
- [12] BASU SU; GROVES K.M; YEH H. C; SU S. Y; RICH F. J; SULTAN P. J & KESKINEN M. J. (2001), “*Response of the equatorial ionosphere in the South Atlantic region to the magnetic storm of 15 July 2000*”. Geophys. Res. Lett. Vol. 18, pp. 3577-3580.
- [13] BASU D.V; NARAYAN P. C; BALARAM K. GAMBIR B; KARAN B & ADITAY S.T. (2021), “*GPS TEC Scintillations and TEC depletion as seen from Hetauda and NAST, Nepal for 2016*”. BIBECHANA. Vol. 18(2), páginas 87–94. DOI: <https://doi.org/10.3126/bibechana.v18i2.33405>.
- [14] BAUTISTA HERNÁNDEZ, ANA MARÍA (2018), “*Estudio de las tormentas geomagnéticas que han afectado a México y los eventos que las provocaron*”. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [15] BÉNIQUEL Y. (2019), “*Ionospheric scintillations: Indices and modeling*”. Radio Science, 54, 618–632. <https://doi.org/10.1029/2018RS006655>.
- [16] BERENYIA K.A, BARTA V & KIS A. (2017), “*Midlatitude ionospheric F2-layer response to eruptive solar events-caused geomagnetic disturbances over Hungary during the maximum of the solar cycle 24: A case study*”. Research Centre for Astronomy and Earth Sciences, GGI, Hungarian Academy of Sciences, Sopron, Hungary.
- [17] BERGIN, A; CHAPMAN, S. C; MOLONEY, N. R & WATKINS, N. W. (2022), “*Variation of geomagnetic index empirical distribution and burst statistics across successive solar cycles*”. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 127, e2021JA029986.
- [18] BLAGOVESHCHENSKII D.V (2012), “*Effect of Geomagnetic Storms (Substorms) on the Ionosphere: A Review*”. Geomagnetism and Aeronomy, Vol 53, No. 3, pp 275-290.
- [19] BORRIES C; WILKEN V; JACOBSEN K. S; GARCÍA-RIGO A; DZIAL-JANKOWSKA B; KERALISHVILI G; JAKOWSKI N; TSAGOURI I; HERNÁNDEZ-PAJARES M; FERREIRA A.A & HOQUE M. M. (2020), “*Assessment of the capabilities and applicability of ionospheric perturbation indices provided in Europe*” a German Aerospace Center, Neustrelitz, Germany.
- [20] BURLAGA LF. (1995), “*Interplanetary magnetohydrodynamics, International Series in Astronomy and Astrophysics*”. New York: Oxford University Press.

- [21] CAI L.; MA S. Y & ZHOU Y. L. (2010), “*Prediction of SYM-H index during large storms by NARX neural network from IMF and solar wind data*” *Ann. Geophys*; 28, 381–393.
- [22] CANDLER L. R (2008), “*Ionospheric research and space weather services*”. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. Vol. 70, páginas 1870-1878.
- [23] CABRAL-CANO E. , X. PÉREZ-CAMPOS, B. MÁRQUEZ-AZÚA, M. A. SERGEEVA, L. SALAZAR-TLACZANI, C. DEMETS, D. ADAMS, J. GALETZKA, K. FEAUX, Y. L. SERRA, G. S. MATTIOLI, & M. MILLER, (2018), “*TLALOC-Net: A Continuous GPS-Met Backbone in Mexico for Seismotectonic, and Atmospheric Research*”. *Seismological Research Letters*, Vol. 89, n. 2da, p. 373-381. <https://doi.org/10.1785/0220170190>.
- [24] CARVALHO O.; ARAUJO DA SILVA DE ALMEIDA NAVA ALVES P.A.; DE LA CRUZ-CUEVA R.Y. & BARRADAS-FILHO A. O. (2022), “*Nowcasting of Amplitude Ionospheric Scintillation Based on Machine Learning Techniques*” . *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 58, no. 6, pp. 4917-4927, Dec. 2022, doi: 10.1109/TAES.2022.3188741.
- [25] CARRILLO-VARGAS A.; PÉREZ-ENRÍQUEZ R.; LÓPEZ-MONTES R.; RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ R. & UGALDE-CALVILLO L.G (2016), “*Radio signal anomalies detected with MEXART in 2012 during the recovery phase of geomagnetic storms*”. *Advances in Space Research* Volume 58, Issue 10, Pages 2057-2066 <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.05.014>.
- [26] CHAKRABORTY, S.; RAY S.; DATTA A. & PAUL, A. (2020), “*Ionospheric response to strong geomagnetic storms during 2000–2005: An IMF clock angle perspective*”. *Radio Science*. Vol. 55. DOI 10.1029/2020RS007061.
- [27] CHEN, Y., LIU, L., & LE, H. (2008), “*Solar activity variations of nighttime ionospheric peak electron density.*”. *Journal of Geophysical Research*, 113, A11306. <https://doi.org/10.1029/2008JA013114>.
- [28] CHENG Y.; CHU H. & WANG D. (2020), “*C++ Language Program Implementation of BINEX-Format to RINEX-Format for Trimble Board*”. 12th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN), pp. 252-258, doi: 10.1109/ICCSN49894.2020.9139100.
- [29] CIGAPAUTA-LARA E.C & DURAND-MATEROLA H.J. (2010), “*Efectos de tormentas geomagnéticas sobre la ionósfera de las estaciones El Cerrillo (Toluca, México) y Boulder (Colorado, EUA)*”. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 27, núm. 2, 2010, p. 366-373.
- [30] CORONA-ROMERO PEDRO (2009), “*Evolución de Eyecciones de Masa Coronal y Ondas de Choque Interplanetarias: Impulsión, Desacoplamiento y decaimiento*”. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [31] CORONA-ROMERO P.; SERGEEVA M.; GONZÁLEZ-ESPARZA J.A.; CIFUENTES-NAVA G. HERNÁNDEZ-QUINTERO E.; CACCAVARI A. & SANCHEZ-GARCIA E. (2017), “*Mexican geomagnetic K Index*”. *Latinmag Letters*, Volume 7, Special Issue (2017), GEP01, 1-6.

- [32] COSTER A. J. & KOMJATHY A. (2008), “*Space Weather and the Global Positioning System*”. SPACE WEATHER, Vol. 6, S06D04, doi:10.1029/2008SW000400.
- [33] DAVIES, K. & FINSCHI, M. (2001), “*Ionospheric effects of solar-terrestrial disturbances*”. Springer Science & Business Media.
- [34] DE LA LUZ V.; GONZALEZ-ESPARZA J. A.; SERGEEVA M.A.; CORONA-ROMERO P.; GONZÁLEZ L. X.; MEJIA-AMBRIZ J.C.; VALDÉS-GALICIA J.F.; AGUILAR-RODRIGUEZ E.; RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ M.; ROMERO-HERNANDEZ E.; ANDRADE E.; VILLANUEVA P.; HUIPE-DOMRATCHEVA E.; CIFUENTES G, HERNANDEZ E, & MONSTEIN CH. (2018), “*First joint observations of space weather events over Mexico*”. Ann. Geophys.; 36, 1347–1360, 2018 <https://doi.org/10.5194/angeo-36-1347-2018>.
- [35] DOHA AL-FEADH & WATHIQ AL-RAMDHAN (2019), “*Large Geomagnetic Storms Drives by Solar Wind in Solar Cycle 24*”. J. Phys. Conf. Ser. 1234 012004 DOI 10.1088/1742-6596/1234/1/012004.
- [36] DONNELLY R.F (1979), “*Solar Terrestrial Predictions Proceedings*”. US Dept. of Commerce, Vol II.
- [37] EATHER W.G., ELFORD W.K & ROACH J.G. (1953), “*Propagation Studies Using the Ionospheric Index S₄*”. Journal of Research of the National Bureau of Standards.
- [38] ECHER E.; BOLZAN M.J.A.; FRANCO A.M.S. (2020), “*Statistical analysis of solar wind parameter variation with heliospheric distance: Ulysses observations in the ecliptic plane*”. Advances in Space Research 65 (2020) 2846–2856, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.036> 0273-1177/Ó.
- [39] EQUIPOS Y CONSUMIBLES DE OESTE S.A DE C.V (S.F.), “*Sistema de Posicionamiento GPS*”. Manual Técnico.
- [40] FEJER, J. A., SCHERLIESS, L., & DE PAULA, E. R. (1999), “*Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F*”. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 104(A9), 19859-19869.
- [41] GALAV P.; SHARMA S.; GORDIYENKO G. & PANDEY R. (2011), “*Ionospheric response to the geomagnetic storm of 15 May 2005 over midlatitudes in the day and night sectors simultaneously*”. J. Geophys. Res. Space Physics, Vol. 119, pp. 5020-5031.
- [42] GALAV P.; RAO S. S.; SHARMA S.; GORDIYENKO G. & PANDEY R. (2014), “*Ionospheric response to the geomagnetic storm of 15 May 2005 over midlatitudes in the day and night sectors simultaneously*”. J. Geophys. Res. Space Physics, Vol. 119, pp. 5020-5031.
- [43] GIL, A., MODZELEWSKA, R., MOSKWA, S., SILUSZYK, A., SILUSZYK, M. & WAWRZYNCZAK, A. (2020), “*The solar event of 14 – 15 July 2012 and its geoeffectiveness*”. Solar Physics, 295(10), 135.
- [44] GONZALEZ W.D.; JOSELYN J.A.; KAMIDE Y.; KROEHL H.W.; ROSTOKER G.; TSURUTANI B.T. & VASYLIUNAS V.M. (1994), “*What is a geomagnetic storm?*”. Journal of Geophysical Research Vol. 99, No. A4, Pages 5771-5792.

- [45] GONZALEZ-ESPARZA, J. A., SERGEEVA, M. A., CORONA-ROMERO, P., MEJIA-AMBRIZ, J. C., GONZALEZ, L. X. & DE LA LUZ, V. (2018), “*Space weather events, hurricanes, and earthquakes in Mexico in September 2017*”. *Space Weather*, 16, 2038–2051. <https://doi.org/10.1029/2018SW001995>.
- [46] GOSLING J.T. & PIZZO V.J (1999), “*Formation and Evolution of Corotating Interaction Regions and their Three-Dimensional Structure*”. *Space Science Reviews* 89, 21–52 (1999). <https://doi.org/10.1023/A:1005291711900>.
- [47] GULYAEVA, T.L.; STANISLWSKA, I.; & TOMASIK, M (2008), “*Ionospheric weather: Cloning missed foF2 observations for derivation of variability index*”. *Annales Geophysicae*, 26(2), 315-321.
- [48] GULYAEVA, T.L. (2019), “*Predicting indices of the ionosphere response to solar activity for the ascending phase of the 25th solar cycle*”. *Advances in Space Research* 63 1588–1595 <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.11.002>.
- [49] HATANAKA YUKI, (1996), “*A RINEX Compression Format and Tools*”. International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation pp. 177-183.
- [50] HATANAKA YUKI, (2008), “*A Compression Format and Tools for GNSS Observation Data*”. *Bulletin of the GSI*, Vol. 55, pp. 21-30.
- [51] HERNÁNDEZ A. S. (2021), “*Estudio comparativo entre MAGIC y GIM ante la respuesta del vTEC ionosférico debida a tormentas geomagnéticas ocurridas durante el 2017*”. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [52] HOWARD TIMOTHY (2011), “*Coronal Mass Ejections. An Introduction*”. *Astrophysics and Space Science Library*, Vol 376, DOI 10.1007/978-1-4419-8789-1.
- [53] HUANG, C. Y., Y.-J. SU, E. K. SUTTON, D. R. WEIMER, & R. L. DAVIDSON (2014), “*Energy coupling during the August 2011 magnetic storm*”. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 1219–1232, doi:10.1002/2013JA019297.
- [54] HUNDHAUSEN A. J.; SAWYER C. B.; HOUSE L.; ILLING R. M. E. & WAGNER W. J. (1984), “*Coronal mass ejections observed during the Solar Maximum Mission: Latitude distribution and rate of occurrence*” *Journal of Geophysical Research*, 89, 2639.
- [55] IMTIAZ N.; YOUNAS W. & KHAN M. (2019), “*Response of low to mid latitude ionosphere to the geomagnetic storm of September 2017*”. *Articles*, Volume 38, issue two. 359–372.
- [56] IYEMORI, T., T. ARAKI, T. KAMEI, & M. TAKEDA, (1992), “*Mid-Latitude geomagnetic indices ASY and SYM (provisional)*”. Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Faculty of Science, Kyoto University, Kyoto, Japan.
- [57] JAMES A. & SHOWALTER M. (2006), “*High-resolution global storm index: Dst versus SYM-H*”. *Journal of Geophysical Research*, Vol 111, A02202, doi:10.1029/2005JA011034.
- [58] JIMOH O.E.; YESUFU T.K. & ARIYIBI E.A.(2016), “*Investigation of Ionospheric Response to Geomagnetic Storms over a Low Latitude Station, Ile-*

- Ife, Nigeria*". Acta Geophys. 64, Vol. 64, no. 3, June 2016, pp. 772-795, DOI: 10.1515/acgeo-2016-0013.
- [59] JODOGNE J.C & STANKOV S. (2002), "Ionosphere-plasmasphere response to geomagnetic storms studied with the RMI-DOurbes comprehensive database". Vol. 45 No. 5 (2002) <https://doi.org/10.4401/ag-3529>.
- [60] KHARAKHASHYAN A. & MALTSEVA O. (2021), "Forecasting the total electron content TEC of the ionosphere using space weather parameters". IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE).
- [61] KUTIEV I., WATANABE S., OTSUKA Y. & SAITO A. (2005), "Total electron content behavior over Japan during geomagnetic storms". Journal of Geophysical Research: Space Physics Volume 110 <https://doi.org/10.1029/2004JA010586>.
- [62] LIAO Y. & ZOU Y. (2021), "Impact of Radio Frequency Interference on GNSS Ionospheric Scintillation Data Analysis". IEEE DOI: 10.1109/ISAPE54070.2021.9752919.
- [63] LIN M.M.; KORNANAT HOZUMI, SUSUMU SAITO & PORNCHEI SUPNITHI (2022), "Analysis of local geomagnetic index under the influence of equatorial electrojet (EEJ) at the equatorial Phuket geomagnetic station in Thailand", Advances in Space Research 70 (2022) 1429–1440.
- [64] LIU Y.D., H, H., WANG R., YANG Z., ZHU B. & LIU Y. A. (2015), "Plasma and magnetic field characteristics of solar coronal mass ejections in relation to geomagnetic storm intensity and variability". The Astrophysical Journal Letters, 809(2), L34.
- [65] LÓPEZ-MONTES R.; PÉREZ-ENRÍQUEZ R. & ARAUJO-PRADERE E.A. (2012), "The impact of large solar events on the total electron content of the ionosphere at mid latitudes". Advances in Space Research, Volume 49, Issue 7, Pages 1167-1179, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.01.008>.
- [66] LÓPEZ-MONTES R.; PÉREZ-ENRÍQUEZ R.; ARAUJO-PRADERE E.A. & CRUZ-ABEYRO J.A. (2015), "Fractal and wavelet analysis evaluation of the mid latitude ionospheric disturbances associated with major geomagnetic storms". Volume 55, Issue 2, Pages 586-596, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.10.037>.
- [67] LOTZ S.; DE WAAL A. & LE ROUX C. (2021), "Estimation of copulas between solar wind parameters and a geomagnetic index during intense geomagnetic storms". IEEE 24th International Conference on Information Fusion (FUSION), Sun City, South Africa, 2021, pp. 1-8, doi: 10.23919/FUSION49465.2021.9626857.
- [68] MAGSI H., AHMED A. & HUSSAIN A. (2019), "Real-Time monitoring and logging of ionospheric scintillation and total electron content", 6th Int. Conf. Aerosp. Sci. Eng. ICASE.
- [69] MANSILLA GUSTAVO (2008), "Solar wind and IMF parameters associated with geomagnetic storms with $Dst - 50 nT$ ". Laboratorio de Ionósfera, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Universidad Nacional de Tucumán. Phys. Scr. 78 (2008) 045902 (4pp) doi:10.1088/0031-8949/78/04/045902.

- [70] MANSILLA G. & ZOSSI M. M. (S.F.), “*Ionospheric disturbances at high latitudes during geomagnetic storms*”. Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.
- [71] MANU, V.; BALAN, N.; ZHANG, Q.-H. & XING, Z.-Y. (2022), “*Association of the main phase of the geomagnetic storms in solar cycles 23 and 24 with corresponding solar wind-IMF parameters*”. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030747. <https://doi.org/10.1029/2022JA030747>.
- [72] MARTÍNEZ B, LÉNICA J, MENDOZA O. B & HERNÁNDEZ Q. E. (2016), “*Relationship between the minima of the horizontal magnetic component measured in Mexico and the Dst and SYM-H indices for geomagnetic storms with $Dst \leq -100nT$ during the descending phase of solar cycle 23*”. *Geofísica Internacional*.; Vol. 55 No. 2, 2016. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/4102141>.
- [73] MAYS M. AL-GBORY & NAJAT M.; R. (2020), “*Geomagnetic Kp Index and Planetary Magnetosphere Size Relationship: for Mercury and Jupiter During two Types of Geomagnetic Conditions*”. *Science Journal*, 17(3):806-817 DOI: <http://dx.doi.org/10.21123/bsj.2020.17.3.0806>.
- [74] MATZKA, J.; STOLLE, C.; YAMAZAKI, Y.; BRONKALLA, O. & MORSCHHAUSER, A. (2021), “*The geomagnetic Kp index and derived indices of geomagnetic activity*”. *Space Weather*, 19, e2020SW002641. <https://doi.org/10.1029/2020SW002641>.
- [75] MENDOZA B (2006), “*Actividad Solar y Clima*”. Monografías del Instituto de Geofísica, No 8.
- [76] MENGYIN FU, JIAPENG KANG, LIU TONG, LI XINGYU1 & WANG KAI (2019), “*The Kp Index Nowcast Method based on Neural Network*”. Proceedings of the 38th Chinese Control Conference.
- [77] MEYER VERNET N. (2007), “*Basics of the solar Wind*”. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511535765.
- [78] MISHRA, V. K., MISHRA, A. K., MAURYA, A. K., & CHAUBEY, A. K. (2015), “*Ionospheric plasma bubbles*”. In *Earth and Planetary Sciences* (pp. 151-163). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [79] MOHAN, R., & SASTRY, D. V. (2018), “*Ionospheric Plasma Bubbles: the Negative and Positive Effects on Radio Communication*”. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 4(3), 135-139.
- [80] MYLNIKOVA A.A. , YU.V. YASYUKEVICH, V.E. KUNITSYN, A.M. PADOKHIN. (2015), “*Variability of GPS/GLONASS differential code biases*”. *Results in Physics*, Vol. 5, P. 9–10. 2015. doi:10.1016/j.rinp.2014.11.002.
- [81] OLUDEHINWA I. A.; OLU SOLA O. I.; BOLAJI O. S.; ODEYEMI O. O. & NJAH A. N. (2021), “*Magnetospheric chaos and dynamical complexity response during storm time disturbance*”. *Nonlin. Processes Geophys.*, 28, 257-270, doi.org/10.5194/npg-28-257-2021.

- [82] OLWENDO O.J.; YAMAZAKI Y.; CILLIERS P.J.; BAKI P. & DOHERTY P. (2016), “*A study on the variability of ionospheric total electron content over the East African low-latitude region and storm time ionospheric variations*”. RESEARCH ARTICLE DOI: 10.1002/2015RS005785.
- [83] PANDA S.K. & GEDAM S.S (2012), “*GPS derived spatial ionospheric total electron content variation over South-Indian latitudes during intense geomagnetic storms*”. Remote Sensing.
- [84] PAOURIS E.; ABUNINA M.; BELOV A. & MAVROMICHALAKI H. (2021), “*Statistical analysis on the current capability to predict the Ap Geomagnetic Index*”. <https://doi.org/10.1016/j.newast.2021.101570>.
- [85] PATARI A.; DE B. K, GUHA A.; BAPAN P. (2019), “*Conjugate hemispheric response of earth’s ionosphere due to geomagnetic storms occurred during two equinox periods*”. J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 1330, pp. 012004.
- [86] PÉREZ RIVERA MARCO ANTONIO (2021), “*Modelos teóricos y observaciones de regiones de interacción entre corrientes de viento solar (SIRs)*”. Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia, UNAM, Tesis.
- [87] PI, X., MANNUCCI, A., LINDQWISTER, U. & HO, C. (1997), “*Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network*”. Geophysical Research Letters, 24(18), 2283– 2286. <https://doi.org/10.1029/97GL02273>.
- [88] PICANÇO G.A.S., DENARDINI C.M., NOGUEIRA P.A.B., BARBOSA-NETO P.F., RESENDE L.C.A., CHEN S. S., CARMO C.S., MORO J., ROMERO-HERNÁNDEZ E. & SILVA R.P. (2021), “*Equatorial ionospheric response to storm-time electric fields during two intense geomagnetic storms over the Brazilian region using a Disturbance Ionosphere index*”. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105734>.
- [89] PICANÇO G.A.S., DENARDINI C.M., NOGUEIRA P.A.B., BARBOSA-NETO P.F., RESENDE L.C.A., CHEN S. S., CARMO C.S., MORO J. & ROMERO-HERNÁNDEZ E. (2022), “*Study of the equatorial and low-latitude total electron content response to plasma bubbles during solar cycle 24–25 over the Brazilian region using a Disturbance Ionosphere index*”. Ann. Geophys., 40, 503–517, 2022 <https://doi.org/10.5194/angeo-40-503-2022>.
- [90] POŻOGA M.; CIECHOWSKA H.; MATYJASIAK B.; ROTHKAEHL H.; GRZESIAK M.; WRONOWSKI R. TOMASIK L. & BUDZINSKA K. (2021), “*Ionospheric Scintillation Diagnostic on LOFAR ILT Network in Single Station Mode*”. Signal Processing Symposium (SPSymo), LODZ, pp. 220-225, doi: 10.1109/SPSymo51155.2020.9593637.
- [91] RAGINI N.; CHEN L.J.; WANG S. & FOK M.C.; (2021), “*Correlating the interplanetary factors to distinguish extreme and major geomagnetic storms*”. Earth and Planetary Physics 5: 180–186, 2021S. SPACE PHYSICS: MAGNETOSPHERIC PHYSICS doi: 10.26464/epp2021015.
- [92] REDAA R.; GIOVANNELLIA L. & ALBERTI T. (2022), “*On the time lag between solar wind dynamic parameters and solar activity UV proxies*”. Advances in Space Research, 2022, 0273-1177, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.10.011>.

- [93] ROBLES-BRAVO (2020), “*Interoperabilidad GNSS usando la Red Geodésica Activa*”. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
- [94] RODRÍGUEZ M.; HERRAIZ M.; RODRÍGUEZ G. & RADICELLA S. M. (2014), “*Efecto de la tormenta geomagnética del 23 de abril de 2012 en el contenido electrónico total de la ionósfera sobre la región mediterránea*”. Física de la Tierra Vol. 26, 101-117.
- [95] RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ, M.; PÉREZ-ENRÍQUEZ, H. R.; CARRILLO-VARGAS, A.; LÓPEZ-MONTES, R.; ARAUJO-PRADERE, E.; CASILLAS-PÉREZ, G. A. & CRUZ-ABEYRO L. J. A.: (2014), “*Solar Physics*”. Volume 289, 2677-2695.
- [96] ROHAIDA M.A.; MARDINA A.; KALAIVNI C.; SITI A, B. & MARIYAM J. H. RAFIDAH N. (2020), “*Forecasting Ionospheric Total Electron Content During Geomagnetic Storms*”. IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD) 27-28 September 2020, Johor, Malaysia.
- [97] ROMERO-HERNANDEZ E.; GONZALEZ-ESPARZA J.A.; RODRIGUEZ-MARTINEZ M.; SERGEEVA MA.; AGUILAR-RODRIGUEZ E.; MEJIA-AMBRIZ J.C & DE LA LUZ V. (2017,) “*Study of ionospheric disturbances over Mexico associated with transient space weather events*”. Advances in Space Research, Volume 60, Issue 8, páginas 1838-1849, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.06.042>.
- [98] ROMERO-HERNANDEZ E. DENARDINI C.M., JONAH O.F., ESSIEN P., PIANÇO G.A.S., NOGUEIRA P.A.B., RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ M., RESENDE L.C.A., DE LA LUZ V., AGUILAR-RODRÍGUEZ E., SERGEEVA M., GONZÁLEZ-ESPARZA J.A., TAKAHASHI H. & PÉREZ-TIJERINA E. (2020), “*Nighttime Ionospheric TEC Study Over Latin America During Moderate and High Solar Activity*”. JGR Space Physics. Volume125, Issue 10. <https://doi.org/10.1029/2020JA028210>.
- [99] RUÍZ-VANOYE J.A, AMBROCIO-CRUZ P. & DÍAZ-PARRA O. (2017), “*¿Cómo nos afecta el clima solar?*”. Comunicaciones libres, volumen 68 número 4.
- [100] SAHADE ABRIL (2019), “*Dinámica de eyecciones coronales de masa: simulaciones numéricas y su comparación con observaciones*”. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional de Córdoba.
- [101] SÁNCHEZ GARCÍA ELSA (2016), “*Geoeffectividad de regiones de interacción de corrientes de viento solar usando mediciones remotas e in-situ*” Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [102] SASTRI J. H.; JYOTI N.; SOMAYAJULU V. V.; CHANDRA H. & DEVASIA, C. V (2000), “*Ionospheric storm of early November 1993 in the Indian equatorial region*”. J. Geophys. Res.; Vol. 105, pp. 18443–18455.
- [103] SCHWENN R. (1996), “*The association of coronal mass ejections with their effects near the Earth*”. Ap and SS, 243, 187.
- [104] SEEMALA G. K. (2012), “*GPS-TEC analysis software*”. Indian Institute of Geomagnetism.
- [105] SEHU M.U., SAID R.S. & OKORO E.C. (2017), “*The trend of ionospheric total electron content near the equator*”. GoShehu Idris College of Health Sciences and Technology Makarfi, P.M.B. 1050, Kaduna State Nigeria.

- [106] SEKAR R., GUPTA S.P. & CHAKRABARTY D. (2014), “*Characteristics of E-region background ionosphere and plasma waves measured over the dip equator during total solar eclipse campaign*”. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 114, páginas 58-65, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.04.006>.
- [107] SHINBORI A., OTSUKA Y., SORI T., TSUGAWA T. & NISHIOKA M. (2022), “*Statistical Behavior of Large-Scale Ionospheric Disturbances From High Latitudes to Mid-Latitudes During Geomagnetic Storms Using 20-yr GNSS-TEC Data: Dependence on Season and Storm Intensity*”. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* Volume 127 <https://doi.org/10.1029/2021JA029687>.
- [108] SHIVA K. N. & INDIRA SRILATHA INDIRA DUTT V. B. S. (2022), “*Analysis of Ionospheric Perturbations during the Significant Earthquake using GNSS Data*”. *International Conference on Breakthrough in Heuristics And Reciprocation of Advanced Technologies (BHARAT)*, Visakhapatnam, India, 2022, pp. 13-17, doi: 10.1109/BHARAT53139.2022.00014.
- [109] SHUANGGEN J.; RUI J. & KOTOGLU H. (2017), “*Positive and negative ionospheric responses to the March 2015 geomagnetic storm from BDS observations*”. *J Geod* (2017) 91:613–626 DOI 10.1007/s00190-016-0988-4.
- [110] SHUBIN, V. & CANDER, L. (2006), “*Modeling of Ionospheric Plasma Bubbles and Scintillations*”. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(3-4), pp.180-184.
- [111] SICILIANO, F.; CONSOLINI, G.; TOZZI, R.; GENTILI, M.; GIANNATTASIO, F. & DE MICHELIS, P. (2021), “*Forecasting SYM-H index: A comparison between long short-term memory and convolutional neural networks*”. *Space Weather*, 19, e2020SW002589. <https://doi.org/10.1029/2020SW002589>.
- [112] SILVA P.G.A.; DENARDINI C.M.; BROMZATO N.P.A.; ARAUJO R.L.C.; SOUSA C.C.; SU CHEN S.; BARBOSA-NETO F. & ROMERO-HERNANDEZ E. (2022), “*Study of the equatorial and low-latitude total electron content response to plasma bubbles during solar cycle 24–25 over the Brazilian region using a Disturbance Ionosphere index*”. *Ann. Geophys.*, 40, 503–517, 2022 <https://doi.org/10.5194/angeo-40-503-2022>.
- [113] SIMI K.G.; AKALA A.O.; SIVA KRISHNA K.; AMAECHI P.O.; OGWALA A.; VENTAKA RANAM D. & OYEDOKUN O.J. (2021), “*Responses of the Indian Equatorial Ionization Anomaly to two CME-induced geomagnetic storms during the peak phase of solar cycle 24*”. Department of Physics, VTM NSS College, Dhanuvachapuram, University of Kerala, India.
- [114] SOLOVIEV A.; BOGOUTDINOV S. & NISILEVICH M. (2021), “*On the Frequency Distribution of Geomagnetic K Indices in the Northwestern Pacific Region Over the 19–24 Solar Cycles*”. *Pure Appl. Geophys.* 179 4179–4196.
- [115] SULUNGU D. E, UIISO C. (2019), “*Ionospheric TEC Response to Geomagnetic Storms Occurred on 15-20 March 2013 and 2015 over the Eastern Africa Region*”. Volume 3, 103-111.

- [116] SUMITRA IYER & ALKA MAHAJAN (2021), “*Predicting total electron content in ionosphere using vector autoregression model during geomagnetic storm*”. <https://doi.org/10.1515/jag-2021-0015>.
- [117] SVALGAARD L. (1977), “*Geomagnetic Activity: Dependence on Solar Wind Parameters*”. Colorado Association University Press, Boulder, pp. 371-432.
- [118] TAKEDA, S., SHIOKAWA, K., OTSUKA, Y., KUBOTA, M., & OYAMA, S. (2008), “*Super DARN HF radar observations of equatorial ionospheric plasma bubbles*”. *Annales Geophysicae*, 26(2), 457-467. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-457-2008>.
- [119] TAN, Y.; HU, Q.; WANG, Z. & ZHONG, Q. (2018), “*Geomagnetic index Kp forecasting with LSTM*”. *Space Weather*, 16, 406–416. <https://doi.org/10.1002/2017SW001764>.
- [120] TARELHO L. V. G., DE ANDRADE-GARCIA, BARATTO A. C., DE SOUZA R. S. L., RAYMUNDO E. V. & JUNQUEIRA S., (2014), “*Evaluation of environmental effects on GPS signals by submitting RINEX files to online PPP software*”. European Frequency and Time Forum (EFTF), Neuchatel, Switzerland, 2014, pp. 118-120, doi: 10.1109/EFTF.2014.7331441.
- [121] TENFJORD P. & OSTGAARD N. (2013) “*Energy transfer and flow in the solar wind-magnetosphere-ionosphere system: A new coupling function*”. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: SPACE PHYSICS*, Vol. 118, 5659–5672, doi:10.1002/jgra.50545.
- [122] TORDESILLAS GARCÍA-LILO J.M, 2011 “*Registro Histórico de Tormentas Magnéticas*”. Instituto Geográfico Nacional. Jornada Técnica sobre Clima Espacial.
- [123] TROSHICHEV O.A & SORMAKOV D.A, (2018) “*PC index as a proxy of the solar wind energy that entered into the magnetosphere: 3. Development of magnetic storms*”. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 180 páginas 60-77, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.012>.
- [124] TSUNODA, R. T. (2012), “*High-latitude & equatorial airglow modulations by sudden stratospheric warming events*”. *ANS All-Hazards Bulletin*, 8(2), 1-10.
- [125] TSURUTANI, B.T., ARBALLO, J.K., GALVAN, C., ZHANG, L.D., ZHOU, X.-Y., LAKHINA, G.S., HADA, T., GONZALEZ, W.D., PICKETT, J.S. & GURNETT, D.A.: (2000). “*Polar cap boundary layer waves: An auroral zone phenomenon*”. *J. Geophys. Res.*, in press.
- [126] VANKADARA R.K., DEVANABOYINA V. R. & PANDA S.K (2022) “*Zonal Irregularity Drift Characteristics of Ionospheric Scintillations from two closely-spaced Global Navigation Satellite System receivers at an Indian Low Latitude location*”. *IEEE 11th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)* DOI: 10.1109/CSNT54456.2022.9787613.
- [127] VOGHT A., EFFENBERGER F., FICHTNER H., HEBER B., KLEIMANN J., KOPP A., POTGIETER M.S., STERNAL O. & WIENGARTEN T. (2015), “*Modelling the Influence of Corotating Interaction Regions on Jovian MeV-electrons*”. *Journal of Physics: Conference Series* 632 (2015) 012082 doi:10.1088/1742-6596/632/1/012082.

- [128] WANG, G., LIU, L., WAN, W., HAN, Y., & YUE, X. (2016), “Space weather effects on different regions of the equatorial ionosphere”. *Earth-Science Reviews*, 155, 41-57.
- [129] WANG, C., J. P. HAN, H. LI, Z. PENG & J. D. RICHARDSON (2014), *Solar wind-magnetosphere energy coupling function fitting: Results from a global MHD simulation*, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 6199–6212, doi:10.1002/2014JA019834. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* Volume 109, Issue A7 doi:10.1029/2003JA010332.
- [130] WEI H. L. , BILLINGS S. A. & BALIKHIN M. (2014), “*Prediction of the Dst index using multiresolution wavelet models*”. *JGR Space Physics*. Volume 109, Issue A7. <https://doi.org/10.1029/2003JA010332>.
- [131] WERNER GURTNER. (1994), “*RINEX: The Receiver Independent Exchange Format*”. Astronomical Institute, University of Bern Wetter.
- [132] WERNER GURTNER. (2007), “*RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11*” Astronomical Institute, University of Bern Wetter.
- [133] YASYUKEVICH YU V., MYLNIKOVA A.A., KUNITSYN V.E., & PADOKHINA A.M. (2015), “*Influence of GPS/GLONASS differential code biases on the determination accuracy of the absolute total electron content in the ionosphere*”. *Geomagnetism and Aeronomy*, 55(6): 763–769. doi:10.1134/S001679321506016X.
- [134] ZHAO, M.-X.; WANG, J.-S. & ZHAO, X.-W. (2022), “*A New Index to Describe the Response of Geomagnetic Disturbance to the Energy Injection from the Solar Wind*”. *Universe* 2022, 8, 506. <https://doi.org/10.3390/universe8100506>.

Apéndice A

Gráficas obtenidas con los softwares Tec-suite y Ta-yAbsTec

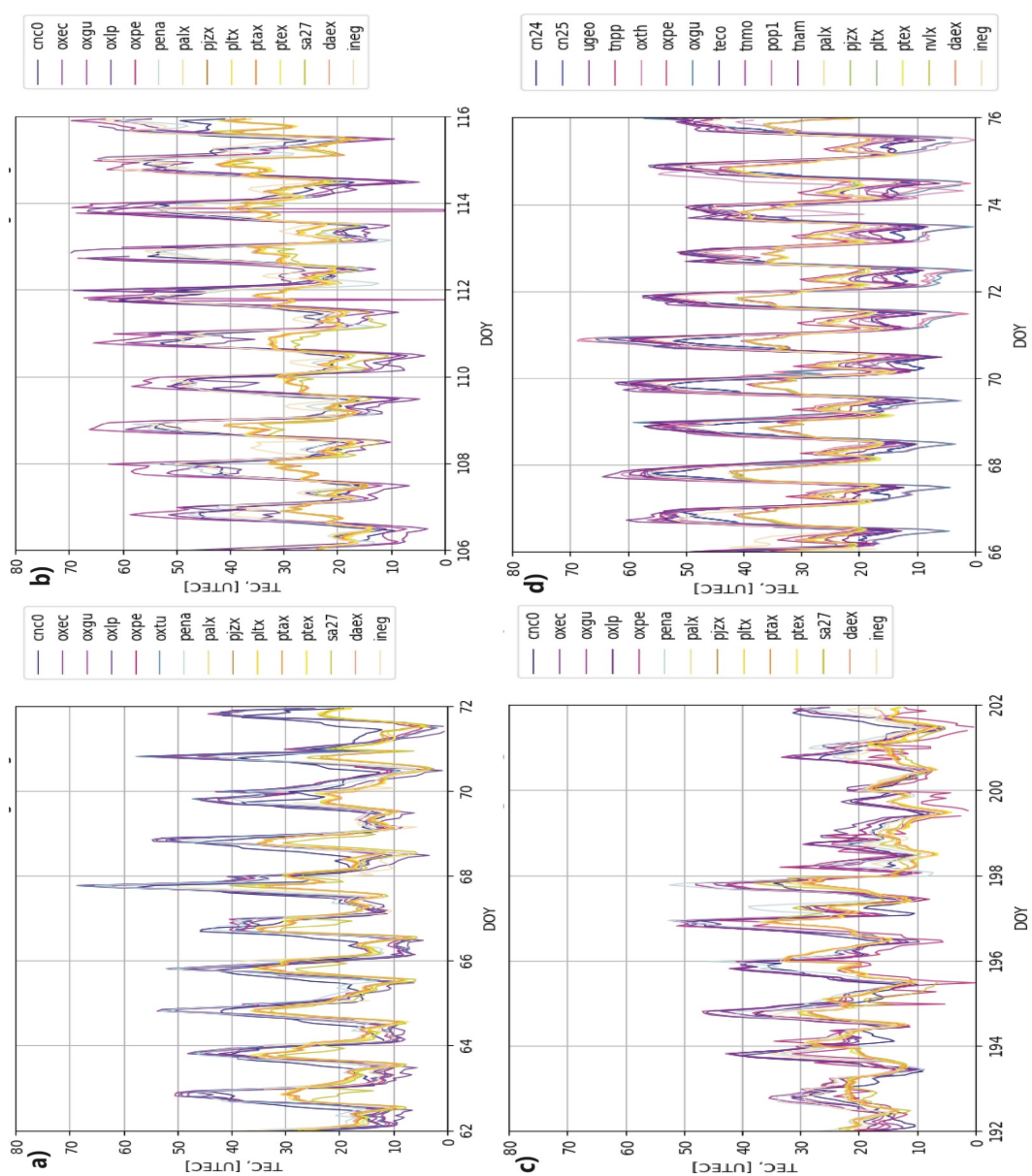


Figura 5.1: Comportamiento del $vTEC$ a diferentes latitudes. En cada figura se muestran las estaciones consideradas en este estudio, donde las estaciones con tonalidades azul-moradas pertenecen a latitudes bajas (zona sur) y latitudes medias (zona oeste) del territorio mexicano. cuya gráfica muestra la variación de $vTEC$ 27 días antes, durante y después de la TG indicada en cada gráfica.

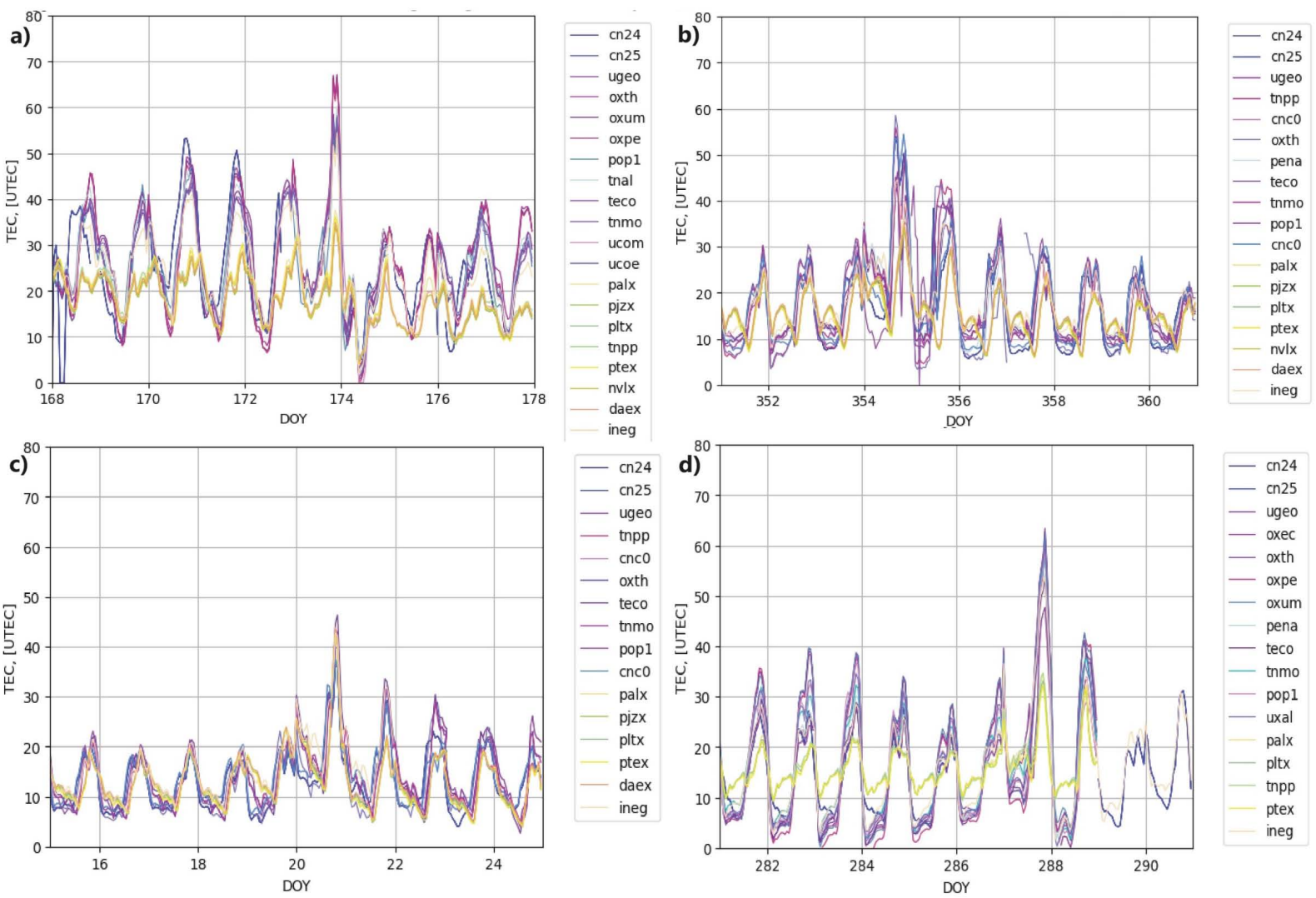


Figura 5.2: Comportamiento del $VTEC$ a diferentes latitudes. En cada figura se muestran las estaciones consideradas en este estudio, donde las estaciones con tonalidades azul-moradas pertenecen a latitudes bajas (zona sur) y latitudes medias (zona oeste) del territorio mexicano, cuya gráfica muestra la variación de $VTEC$ 27 días antes, durante y después de la TG indicada en cada gráfica.

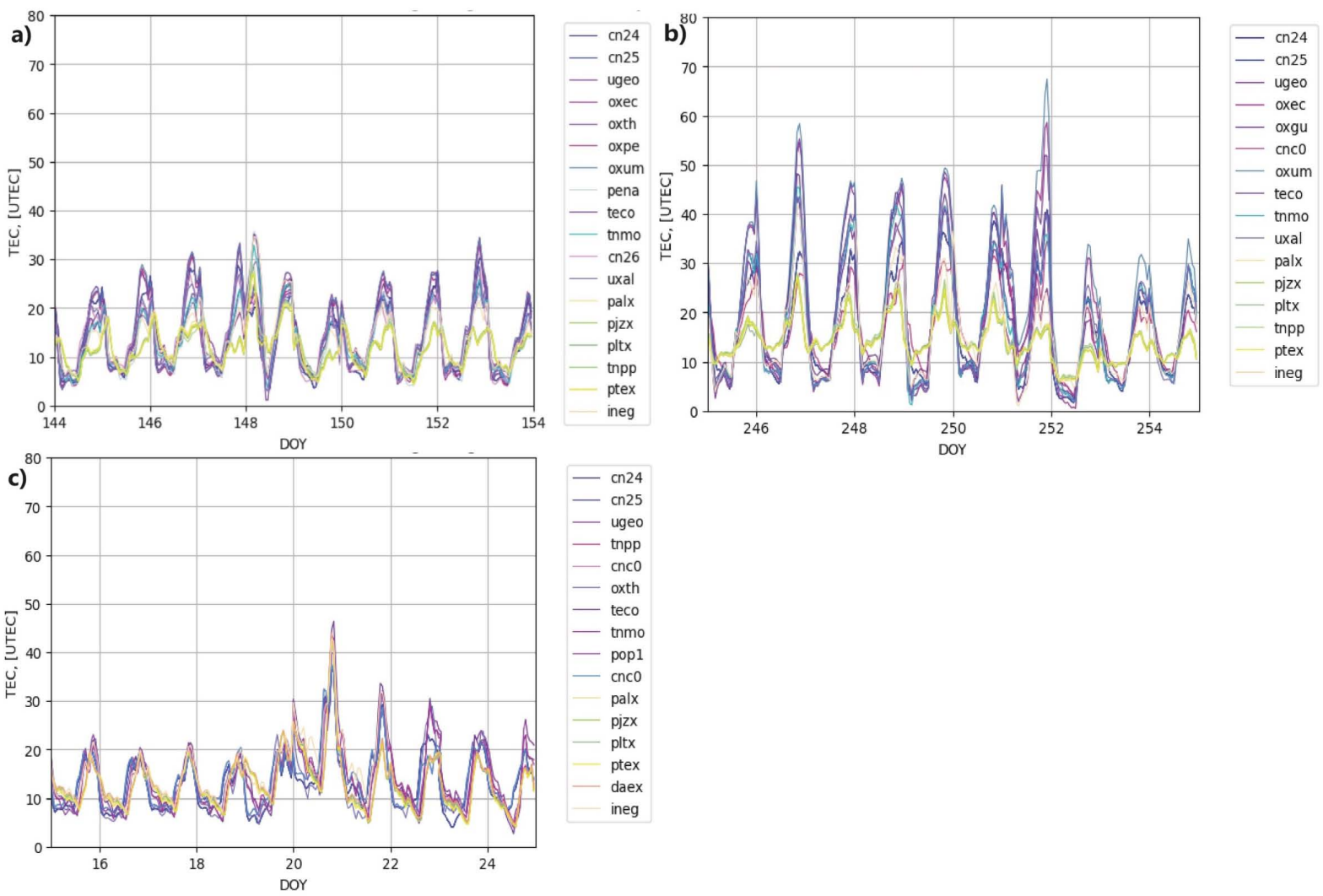


Figura 5.3: Comportamiento del $vTEC$ a diferentes latitudes. En cada figura se muestran las estaciones consideradas en este estudio, donde las estaciones con tonalidades azul-moradas pertenecen a latitudes bajas (zona sur) y latitudes medias (zona oeste) del territorio mexicano. cuya gráfica muestra la variación de $vTEC$ 27 días antes, durante y después de la TG indicada en cada gráfica.

Apéndice B

Comparación entre los cálculos obtenidos por los softwares GPS-TEC desarrollado por el doctor Gopi Seemala y TayAbsTec

Tormenta	08/03/2012		23/04/2012		14/07/2012		17/03/2015	
	Vtec máx (gps-tec por el dr. Gopi)	Vtec máx (Tec-suite y TayAbsTec)	Vtec máx (gps-tec por el dr. Gopi)	Vtec máx (Tec-suite y TayAbsTec)	Vtec máx (gps-tec por el dr. Gopi)	Vtec máx (Tec-suite y TayAbsTec)	Vtec máx (gps-tec por el dr. Gopi)	Vtec máx (Tec-suite y TayAbsTec)
CN24	-	-	-	-	-	-	55.9	65.3
CN25	-	-	-	-	-	-	48.4	69.4
CNCO	45	57.4	68.4	60.6	-	51.4	-	-
DAEX	43.8	41.5	56	44.6	54.9	35.7	49.8	49.9
INEG	37.1	50.2	69.9	64.2	73.6	65	63.6	61.9
NVLX	-	-	-	-	-	-	23.2	49.1
OEXEC	53	66.3	69.2	69.5	45	52.5	-	-
OXGU	48.3	68.5	50.2	69.5	72.4	56.2	-	-
OXLP	59.7	62	69.7	69.1	57.8	52.8	-	-
OXPE	59.3	67.4	-	-	58.7	49.2	82.5	68.2
OXTU	58.6	68.3	-	-	-	-	-	-
PALX	44.8	39.8	50.3	42.2	37.2	37.2	22.9	48.8
PB2Y	-	-	-	-	-	-	23.5	49.1
PENA	53	65.2	65.7	62.4	57.9	52.9	-	-
PJZX	32.5	41	57.6	47.5	31.3	35.1	23.6	49.4
PLTX	45.7	41.2	47	42	36.7	35.7	32.9	49.7
PTAX	43.8	40.8	49	42.1	56.7	34.9	-	-
PTEX	41.2	40.2	49.9	41.9	54.5	36.2	23.3	49.5
QUEX	-	-	-	-	-	-	21.7	48.9
Sa27	41.4	40.5	58.6	43.4	37.4	37.8	-	-
TECO	65.5	66.1	60.1	66.8	-	-	-	69.7
TGMX	-	-	-	-	-	-	68	60.7
TNAL	-	-	-	-	-	-	68.8	68.1
TNAM	-	-	-	-	-	-	66.6	66.5
TNAT	-	-	-	-	-	-	69.8	68
TNBA	-	-	-	-	-	-	63.4	50
TNCM	-	-	-	-	-	-	62.5	69.4
TNMO	63.3	64	60.4	62	58.9	52.8	65	69.9
TNMR	-	-	-	-	-	-	61.1	66
TNMS	-	-	-	-	-	-	65.4	67.6
TNNX	-	-	-	-	-	-	62.6	67.1
TNPP	-	-	-	-	-	-	-	48.5
UAGU	62.9	60.9	-	-	-	-	-	-
UCOM	57.9	56.5	58.1	64.1	58.1	55.1	-	60.4
UNPM	58.8	56.7	53.1	60.9	59.9	50.3	-	60.9
USMX	-	-	-	-	-	-	-	53.6
UXAL	-	-	64.3	61.6	59	52.5	-	65.7
YESX	-	-	-	-	-	-	-	52.7

Figura 5.4: Estaciones GPS y el vTEC máximo calculado con los softwares GPS-TEC - desarrollado por el Dr. Gopi Seemala, Tec-suite y TayAbsTec para las TGs de marzo, abril y julio del 2012, así como la TG de marzo del 2015.

Tormenta Estación	21/06/2015		19/12/2015		19/01/2016		13/10/2016	
	Vtec máx (gps-tec por el dr. Gopi)	Vtec máx (Tec-suite y TayAbsTec)	Vtec máx (gps-tec por el dr. Gopi)	Vtec máx (Tec-suite y TayAbsTec)	Vtec máx (gps-tec por el dr. Gopi)	Vtec máx (Tec-suite y TayAbsTec)	Vtec máx (gps-tec por el dr. Gopi)	Vtec máx (Tec-suite y TayAbsTec)
CN24	55.8	60.2	46.4	54	40	36.4	61.2	40.3
CN25	52.9	66.2	49	60.9	39.4	38.9	59.4	45.2
CNC0	-	-	48.7	54.4	37.6	37.4	59.7	51.8
DAEX	45.2	38.5	35.3	35.4	17.1	43.8	47.5	37.9
INEG	55.6	54.4	47.5	44.6	41.8	42.7	62.3	53.7
NVLX	-	-	25.9	34.4	-	-	-	-
OEXEC	-	-	-	-	-	-	-	62.7
OXGU	-	-	-	-	-	-	-	-
OXLP	-	-	-	-	-	-	-	-
OXPE	51	66	-	-	-	-	-	60.1
OXTU	-	-	-	-	-	-	-	-
PALX	55.7	40.9	34.2	36.2	40.7	42.8	-	34.5
PB2Y	45.4	35.9	16.7	33.1	43.6	43.2	-	-
PENA	-	-	47.8	45.5	-	-	-	54.2
PJZX	48.1	37.1	-	33.7	-	43.1	-	-
PLTX	44.4	38.5	-	35.1	-	42.8	-	33.2
PTAX	47.7	37.7	-	34	-	43.2	-	31.7
PTEX	42.3	38.5	-	34.2	-	43.3	-	32.3
QUEX	44.8	37.4	-	34.9	-	44.6	-	-
Sa27	-	-	-	-	-	-	-	-
TECO	-	58.4	-	43.6	-	46.3	-	53.4
TGMX	57.4	63.9	-	54	-	37.5	-	51.8
TNAL	58.6	62.1	-	52.4	-	42.3	-	-
TNAM	58.4	56.1	-	43.1	-	44.1	-	51.8
TNAT	59.1	63.3	-	52.5	-	41.1	-	-
TNBA	50.7	41.2	-	39.2	-	41	-	38.5
TNCM	56.8	57.5	-	-	-	40	-	51.5
TNMO	-	54.1	-	45	-	41.3	-	57.9
TNMR	58.4	59.7	-	45	-	41.6	-	55.9
TNMS	54.3	45.4	-	41.5	-	45	-	53.9
TNNX	53	63.4	-	55.4	-	40	-	46.4
TNPP	-	38	-	56	-	-	-	34.7
UAGU	-	56.3	-	-	-	-	-	-
UCOM	-	56.3	-	54.2	-	-	-	-
UNPM	-	64.3	-	-	-	37.7	-	51.9
USMX	-	41.3	-	40.7	-	42.9	-	38.7
UXAL	-	-	6	-	-	38.7	-	59.9
YESX	-	-	-	41.4	-	41.1	-	42

Figura 5.5: Estaciones GPS y el vTEC máximo calculado con los softwares GPS-TEC - desarrollado por el Dr. Gopi Seemala, Tec-suite y TayAbsTec para las TGs de junio y diciembre del 2015, así como las TGs de enero y octubre de 2016.

Tormenta Estación	27/05/2017		07/09/2017		25/08/2018	
	Vtec máx (gps-tec por el dr. Gopi)	Vtec máx (Tec-suite y TayAbsTec)	Vtec máx (gps-tec por el dr. Gopi)	Vtec máx (Tec-suite y TayAbsTec)	Vtec máx (gps-tec por el dr. Gopi)	Vtec máx (Tec-suite y TayAbsTec)
CN24	33.9	31.4	37.6	40.8	26.8	21.9
CN25	33.1	43.5	49.9	34.4	26.3	32.1
CNCO	32.4	28.7	-	-	24.3	23
DAEX	-	-	25.3	28.5	-	18.8
INEG	38.7	34.6	30.2	42	-	22.5
NVLX	-	-	-	-	-	-
OXEC	-	-	-	58.6	-	-
OXGU	-	-	-	55.2	-	-
OXLP	-	-	-	-	-	-
OXPE	-	35.7	-	-	-	63.8
OXTU	-	-	-	-	-	-
PALX	-	19.5	-	28.1	-	19.1
PB2Y	-	-	-	26.6	-	-
PENA	-	35.6	-	-	-	26.1
PJZX	-	26.8	-	26.9	-	18.1
PLTX	-	27.2	-	27.5	-	18.4
PTAX	-	-	-	-	-	-
PTEX	-	27	-	27.1	-	18.8
QUEX	-	27.6	-	27.3	-	18.5
Sa27	-	-	-	-	-	-
TECO	-	35.1	-	48.2	-	26.9
TGMX	-	28.7	-	35.6	-	23.3
TNAL	-	30.6	-	45.3	-	27.5
TNAM	-	36.1	-	43	-	23.1
TNAT	-	30.1	-	48.4	-	28.9
TNBA	-	30.9	-	29.4	-	19.4
TNCM	-	37.3	-	44.7	-	-
TNMO	-	32.8	-	45.4	-	26.3
TNMR	-	34	-	49.8	-	28
TNMS	-	38	-	43.2	-	23.6
TNNX	-	32	-	51.58	-	-
TNPP	-	28.8	-	27.9	-	19.2
UAGU	-	22.6	-	41.7	-	22.4
UCOM	-	-	-	-	-	-
UNPM	-	28.8	-	36.1	-	32.1
USMX	-	33	-	28.9	-	20.9
UXAL	-	29.6	-	43.4	-	27.1
YESX	-	35.2	-	32.9	-	-

Figura 5.6: Estaciones GPS y el vTEC máximo calculado con los softwares GPS-TEC - desarrollado por el Dr. Gopi Seemala, Tec-suite y TayAbsTec para las TGs de mayo y septiembre de 2017, así como la TG de agosto de 2018.