



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA UNIDAD MICHOACÁN  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS ESPACIALES

**IONOSFERA TERRESTRE MEXICANA USANDO  
ESTACIONES GNSS Y MEXART**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
(FÍSICA ESPACIAL)

PRESENTA:

**Luis Gerardo Ugalde Calvillo**

TUTOR:

**Dr. Armando Carrillo Vargas**  
Instituto de Geofísica Unidad Michoacán

COMITÉ TUTOR:

Dr. Héctor Pérez de Tejada, Instituto de Geofísica UNAM.  
Dr. Román Pérez Enríquez, Centro de Geociencias UNAM.  
Dr. Mario Rodríguez Martínez, ENES Unidad Morelia, UNAM.  
M. en C. Miguel Sánchez Meraz, ESIME, IPN.

Juriquilla, Santiago de Querétaro, marzo de 2017



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.



---

.

---



Luis Gerardo Ugalde Calvillo: *Ionosfera terrestre mexicana usando estaciones GNSS y MEXART*, T E S I S, © México,  
marzo 2017

*El universo se rige por el orden estricto de sus propias leyes. Lo importante es pensar en cómo lo hace, no indagarle al universo nuestras ideas románticas.*

- Fragmento de la novela *Contacto* de Carl Sagan.

---

A mis padres, por su apoyo e infinita paciencia

# Agradecimientos

---

Las siguientes líneas son para agradecer a todos aquellos que estuvieron involucrados de alguna manera en este proyecto:

*De manera especial quiero agradecer a mi asesor, el Dr. Armando Carrillo Vargas por el apoyo que me brindó para llevar a cabo este trabajo a pesar de la distancia, por su confianza y por sus siempre atinados consejos. Gracias por el tiempo dedicado a la dirección de este trabajo.*

*Al comité tutorial, Dr. Héctor Pérez de Tejada, Dr. Román Pérez Enríquez, Dr. Mario Rodríguez y M. en C. Miguel Sánchez por sus sugerencias y correcciones que permitieron mejorar sustancialmente este trabajo.*

*Al Instituto de Geofísica y a la Unidad Michoacán por permitirme el uso de sus instalaciones y equipo de cómputo. A los encargados del MEXART por darme alojamiento y permitirme el uso de sus datos, sin los cuales no habría sido posible la realización de este trabajo.*

*Al Posgrado en Ciencias de la Tierra por aceptarme en su programa y por el apoyo económico brindado para la asistencia a congresos, al comité académico del mismo por la prórroga otorgada para la conclusión de este trabajo. En particular quiero agradecer a Araceli Chamán por su apoyo para realizar los trámites escolares.*

*A mis compañeros de clases, José Luis, Pablo y Héctor. A mis compañeros en la unidad Michoacán Charly, Elsa, Juan Pablo y Carlos (el otro Charly) por esas amenas pláticas acompañadas de café. A todos los involucrados en el proyecto Cansat, que fue un aliciente para este trabajo.*

*Al CONACYT por la beca otorgada para la realización de este trabajo.*

*Especialmente quiero agradecer a mis padres y hermanas porque fueron, son y seguirán siendo esenciales en mi vida.*





# Resumen

---

La ionosfera, región más externa de la atmósfera de la Tierra, es un plasma formado por la interacción del sol con la atmósfera que afecta la propagación de ondas de radio, siendo de particular interés el retraso temporal y el centelleo que surge cuando la onda atraviesa una región donde nubes de ionización en movimiento actúan como lentes o rejillas de difracción, produciendo fluctuaciones irregulares en la señal captada en la superficie.

El sistema global de navegación por satélite GNSS permite conocer el retraso temporal en sus señales de radio de modo que se puede medir el contenido total de electrones TEC de la ionosfera; este parámetro es esencial para conocer el estado general de la ionosfera. Por otro lado, para medir el grado de afectación de señales de radio a 140 MHz debido a la ionosfera se utilizó el radiotelescopio MEXART; con este instrumento es posible estudiar el centelleo en la señal proveniente de fuentes de radio naturales captadas a la frecuencia mencionada. Estas dos herramientas se utilizaron en este trabajo con el propósito de examinar las características de la ionosfera sobre el territorio mexicano durante el reciente máximo de actividad solar.

Se encontró que entre 2012 y 2014 el TEC sobre México presentó variaciones cíclicas con periodos de 1 año, 6 meses, 28 días y 24 horas y variaciones irregulares con duración de días consecuencia de actividad solar y geomagnéticas. Se estudió el comportamiento estacional del TEC y la respuesta de éste a la actividad geomagnética. Con los datos de MEXART se encontró que el centelleo en la señal de la radiofuente 3C144 es un fenómeno nocturno causado por irregularidades ionosféricas con tamaños entre 250 *m* y 1.5 *km* que se mueven a velocidades cercanas a 30 *m/s*, en condiciones magnéticas perturbadas se intensifica el centelleo y las velocidades superan los 100 *m/s*. Se describe finalmente la relación entre el TEC, el centelleo de 3C144 y la actividad geomagnética.

**Palabras clave** Ionosfera, TEC, centelleo, MEXART



# Abstract

---

The ionosphere, the outermost region of Earth's atmosphere, is a plasma formed by the interaction of the sun with the atmosphere that affects the propagation of radio waves, being of particular interest the temporal delay and the scintillation that arises when the wave passes through a region where moving ionization clouds act as lenses or diffraction grating, producing irregular fluctuations in the signal captured on surface.

The global navigation satellite system GNSS allows to know the temporal delay in radio signals, so the total electron content of the ionosphere TEC can be measured; this parameter is essential to know the general state of the ionosphere. On the other hand, to measure the degree of affectation of radio signals to 140 MHz due to the ionosphere was used the radio telescope MEXART; with this instrument it is possible to study the ionospheric scintillation in the signal coming from natural radio sources at the mentioned frequency. These two tools were used in this work with the purpose of examining the characteristics of the ionosphere on Mexican territory during the recent maximum solar activity.

It was found that between 2012 and 2014, TEC over Mexico presented cyclical variations with periods of 1 year, 6 months, 28 days and 24 hours and irregular variations with duration of days resulting from solar and geomagnetic activity. The seasonal behavior of the TEC and its response to geomagnetic activity was studied. With MEXART data, it was found that ionospheric scintillation in 3C144 radio signal is a nocturnal phenomenon caused by ionospheric irregularities ranging from 250 *m* to 1.5 *km* that move at speeds near 30 *m/s*, under disturbed magnetic conditions the scintillation intensifies and the speeds exceed 100 *m/s*. The relationship between TEC, 3C144 scintillation and geomagnetic activity was finally described.

**Keywords** Ionosphere, TEC, scintillation, MEXART

# Índice general

---

<b>1. Introducción y motivación</b>	<b>1</b>
<b>2. Bases teóricas</b>	<b>7</b>
2.1. La ionosfera terrestre . . . . .	7
2.1.1. Propiedades generales de la ionosfera . . . . .	7
2.1.2. Formación de la ionosfera . . . . .	9
2.1.3. Modelo de Chapman . . . . .	11
2.1.4. El campo geomagnético . . . . .	14
2.1.5. Regiones de la ionosfera . . . . .	15
2.1.6. Tormentas geomagnéticas . . . . .	19
2.1.7. Tormentas ionosféricas . . . . .	21
2.2. El efecto de la ionosfera sobre las ondas de radio . . . . .	22
2.2.1. Índice de refracción y ecuación de Appleton-Hartree . . . . .	24
2.2.2. Propagación transionosférica . . . . .	26
2.2.3. El sistema global de navegación por satélite GNSS . . . . .	28
2.2.4. Medición del contenido total de electrones TEC . . . . .	29
2.2.5. Densidad de electrones integrada . . . . .	29
2.3. Irregularidades ionosféricas y centelleo . . . . .	31
2.3.1. Características globales del centelleo . . . . .	32
<b>3. Metodología</b>	<b>35</b>
3.1. Cálculo de TEC con el código <i>ionFR</i> . . . . .	35
3.1.1. Modelo de capa delgada y función de mapeo . . . . .	36
3.2. Centelleo ionosférico . . . . .	38
3.2.1. Difracción por una rejilla delgada . . . . .	38
3.2.2. Espectro de potencia del centelleo . . . . .	39
3.2.3. Efectos de las zonas de Fresnel . . . . .	41
3.2.4. Observaciones con el MEXART . . . . .	42
3.2.5. Índices de centelleo . . . . .	47

<b>4. Resultados</b>	<b>51</b>
4.1. El TEC sobre México . . . . .	51
4.1.1. Tormentas ionosféricas sobre México . . . . .	54
4.1.2. Reducción del TEC: Tormenta negativa . . . . .	56
4.1.3. Incremento del TEC: Tormenta positiva . . . . .	58
4.2. Centelleo ionosférico con el MEXART . . . . .	59
4.3. El centelleo y el TEC . . . . .	61
<b>5. Discusión y conclusiones</b>	<b>65</b>
5.1. Discusión: TEC sobre México . . . . .	65
5.2. Discusión: Centelleo ionosférico con el MEXART . . . . .	66
5.3. Conclusiones . . . . .	71
5.4. Trabajo a futuro . . . . .	72
<b>A. TEC sobre México durante el 2012</b>	<b>75</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>83</b>

# Índice de figuras

---

2.1.	Representación de la estructura de la ionosfera por capas incluyendo la variación diurna y el perfil de altura de la densidad electrónica $N_e(h)$ dada en partículas/cm <sup>3</sup> . Imagen adaptada de Goodman (1991). . . . .	8
2.2.	Representación idealizada de la tasa de ionización que ocurre en la ionosfera que muestra el balance entre la intensidad de la radiación y el decremento exponencial en la densidad atmosférica como función de la altura. Figura realizada a partir de las suposiciones antes mencionadas. . .	12
2.3.	Estructura global de la ionosfera por acción del campo geomagnético. Se señalan las tres regiones en que se divide la ionosfera global. La línea punteada indica el ecuador magnético. Imagen obtenida de Goodman (1991). . . . .	16
2.4.	Gráfica idealizada y normalizada del TEC vertical obtenida a partir de la ecuación 2.24 integrando la capa de Chapman (ecuación 2.7) como función del tiempo solar. . . . .	30
2.5.	Esquema de la intensidad del centelleo como función de la latitud magnética y la hora. Imagen obtenida de Aarons (1982) . . . . .	33
3.1.	Ejemplo de los mapas obtenidos con un archivo IONEX. Imagen tomada de (Sotomayor-Beltran y otros, 2013). . . . .	36
3.2.	Esquema del modelo de capa delgada que usa el código ionFR para calcular el TEC. Imagen tomada de Sotomayor-Beltran y otros (2013). . . .	37
3.3.	Esquema de la difracción de una onda plana que incide sobre una rejilla de difracción delgada (capa $F$ de la ionosfera). Figura adaptada de Hargreaves, 1992. . . . .	40
3.4.	Filtrado de Fresnel suponiendo $\nu_f = 0.05 \text{ Hz}$ . . . . .	42
3.5.	Modelado del espectro de potencia $P_f(\nu)$ suponiendo un filtrado de Fresnel y una ley de potencia en la región de altas frecuencias. . . . .	43
3.6.	Un día de observación con el MEXART. Se destacan las fuente de mayor flujo así como el Sol y el núcleo galáctico. Las líneas verticales son en su mayoría ruido por interferencia o tormenta eléctrica. . . . .	44
3.7.	Parámetros obtenidos de los tránsitos de 3C144: $\sigma_{off}$ , $\sigma_{on}$ , $A$ y $FWHM$ . . .	45

3.8. Comparativo de la señal original de 3C144 (panel izquierdo) con el ajuste gaussiano (línea roja) y la señal sin tendencia (panel derecho). . . . .	47
4.1. TEC vertical sobre México calculado en las coordenadas geográficas (Lat, Lon) = (+ 19° 48' 47", - 101° 41' 39") con el código <i>ionFR</i> de enero 2012 a octubre 2014. . . . .	52
4.2. Perfil diario del TEC para diciembre 2012. Se observa la variación diurna del TEC. . . . .	53
4.3. Perfiles acumulados del TEC evaluado en (Lat, Lon) = (+ 19° 48' 47", - 101° 41' 39") como función de la hora local para diciembre 2012. . . . .	53
4.4. Promedio mensual del perfil de TEC y la variabilidad relativa del TEC evaluado en (Lat, Lon) = (+ 19° 48' 47", - 101° 41' 39") como función de la hora local para diciembre 2012. . . . .	54
4.5. Variación del TEC durante una tormenta ionoférica típica de latitudes medias. Se incluyen como referencia los índices <i>Dst</i> y <i>K<sub>p</sub></i> . . . . .	55
4.6. Tormenta con fase negativa prolongada en el mes de julio de 2012. El TEC y el TEC promedio mensual (parte inferior del gráfico en línea negra y gris respectivamente) esta referenciado al eje de la izquierda. El índice <i>Dst</i> (en línea azul) se refiere con el eje de la derecha. . . . .	57
4.7. Tormenta con fase positiva durante el mes de enero de 2012. El TEC y el TEC promedio mensual (parte inferior del gráfico en línea negra y gris respectivamente) esta referenciado al eje de la izquierda. El índice <i>Dst</i> (parte superior del gráfico en línea azul) se mide con el eje de la derecha. . . . .	58
4.8. Tránsitos de la radiofuente 3C144 captados por el MEXART entre 2012 y 2014. El acomodo y amplitud de las señales es arbitrario. . . . .	59
4.9. Comparación de los espectros de potencia de cielo frío (off-source - línea roja segmentada) y sobre la fuente 3C144 (on-source - línea negra continua) el día 6 de diciembre de 2012. Los parámetros del centelleo se aprecian en el recuadro de la derecha. . . . .	60
4.10. Relación entre la variabilidad en el TEC y el centelleo detectado por el MEXART. . . . .	64
5.1. Espectro de amplitud del vTEC. . . . .	65
5.2. Comparación entre el número de manchas solares y el TEC promedio. . . . .	66
5.3. Comparativo entre centelleo de 3C144 el día 14 (panel <i>a</i> ) y 15 (panel <i>b</i> ) de enero 2013. . . . .	67
5.4. Grafico que muestra el comportamiento de $S_4$ y la velocidad de deriva $V_f$ . Se distinguen en los recuadros las tres clases de centelleo. . . . .	68
5.5. Diferencias entre el espectro de la fuente y el modelo de ajuste (ley de potencia). . . . .	70



---

A.1. Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para enero 2012. . . . .	75
A.2. Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para febrero 2012. . . . .	76
A.3. Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para marzo 2012. . . . .	76
A.4. Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para abril 2012. . . . .	77
A.5. Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para mayo 2012. . . . .	77
A.6. Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para junio 2012. . . . .	78
A.7. Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para julio 2012. . . . .	78
A.8. Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para agosto 2012. . . . .	79
A.9. Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para septiembre 2012. . . . .	79
A.10. Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para octubre 2012. . . . .	80
A.11. Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para noviembre 2012. . . . .	80
A.12. Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para diciembre 2012. . . . .	81
A.13. Perfiles mensuales de TEC entre enero y junio 2012. . . . .	81
A.14. Perfiles mensuales de TEC entre julio y diciembre 2012. . . . .	82



# Índice de tablas

---

2.1. Estimación de los efectos máximos de dos señales de 100 y 1000 MHz al pasar por la ionosfera tomando como referencia un ángulo de incidencia menor a 30°. Datos tomados de Goodman (2005). . . . .	27
3.1. Propiedades generales de 3C144 entre 2012 y 2014 para ciertas fechas de tránsito nocturno de la fuente. Los corchetes $\langle \rangle$ indican valor promedio sobre las fechas señaladas. . . . .	46
3.2. Conversión del índice $P_{fluc}$ a $S_4$ . Los valores se tomaron del manual de la ITU (1995) . . . . .	49
4.1. Valores de los índices de centelleo $D$ , $P_{fluc}$ , $S_4$ y los parámetros de difracción de Fresnel $v_f$ y $V_f$ . Los valores de $v_f$ con el símbolo $(\dagger)$ indican los registros en los que se aprecian convincentemente las oscilaciones de Fresnel. . . . .	62

# Introducción y motivación

---

CON el inicio de la era espacial y la implementación de las radiocomunicaciones a nivel mundial, se volvió indispensable conocer el estado inmediato de las condiciones atmosféricas ya que la dinámica de la atmósfera terrestre afecta las telecomunicaciones en frecuencias de radio. En particular, las ondas de radio con frecuencias menores a 5 GHz son particularmente susceptibles a la región más alta de la atmósfera que se encuentra en estado de plasma por la radiación solar que incide sobre ella. Esta región, conocida como ionosfera terrestre, es un componente fundamental de las relaciones Sol-Tierra porque todo fenómeno que inicia en el Sol y que tiene como destino la Tierra terminará distorsionando la ionosfera. La complicada dinámica solar determina su estructura y formación, de ahí que sea tan importante su estudio.

El Sol es un elemento primordial para todas las actividades humanas no sólo porque es la fuente principal de energía de la Tierra, sino que además es el precursor de un sinnúmero de fenómenos que ocurren en nuestro planeta, por eso su entendimiento es prioridad en las ciencias espaciales. Al conjunto de fenómenos que ocurren en el Sol se le llama *actividad solar*. Hoy en día, el interés científico por la actividad solar ha crecido porque fenómenos solares de gran escala como ráfagas, corrientes de viento solar o eyecciones de masa coronal (EMC) pueden repercutir de algún modo sobre nuestro planeta, sobre todo en cuanto a telecomunicaciones se refiere. El Sol libera energía en forma de radiación, partículas y plasma en expansión conocido como *viento solar*, que arrastra consigo el campo magnético solar. Todas estas formas de energía alteran de diferente manera a la Tierra. Al estudio de la variación diaria del plasma y radiación de origen solar en el entorno espacial terrestre se le llama meteorología del espacio o *clima espacial*.

Para contener las partículas energéticas y el viento solar, la Tierra cuenta con un campo magnético generado en el interior del planeta que se extiende hacia espacio formando una cavidad magnética que envuelve al planeta llamada *magnetosfera terrestre*. Se extiende desde la superficie hasta aproximadamente  $12 R_T$ <sup>1</sup> del lado día y más allá de  $200 R_T$  el lado noche de acuerdo a Kivelson y Russell (1995). La magnetosfera funciona

---

<sup>1</sup> $R_T$  significa *radio terrestre*, es igual a 6,378 km sobre el ecuador.

como un escudo terrestre natural que contiene al viento solar, mientras que partículas cargadas de alta energía que logran penetrar el campo magnético por las regiones polares y radiación electromagnética de alta frecuencia (rayos de extremo ultravioleta y rayos X) termina incidiendo en la parte más alta de la atmósfera, de modo tanto el campo magnético como la ionosfera de la Tierra son los responsables de proteger los sistemas humanos. En ese sentido, el estudio detallado del clima espacial se ha convertido en una pieza fundamental para pronosticar el grado de afectación de la actividad solar sobre los sistemas de comunicaciones y así intentar minimizar, en la medida de lo posible, sus consecuencias más severas.

La ionosfera de la Tierra es la región de la atmósfera que se encuentra entre 60 y 1000 *km* aproximadamente sobre la superficie. Históricamente es relevante porque es la principal fuente del plasma confinado dentro de la magnetosfera y sobre todo por ser la región que afecta la propagación de ondas de radio. Su existencia se debe a la incidencia de radiación electromagnética de alta energía (ultravioleta y rayos X principalmente) y en menor medida a choques de partículas energéticas con moléculas atmosféricas. Los componentes atmosféricos se ven desprendidos de uno o más electrones de tal manera que la atmósfera pasa a ser un gas parcialmente ionizado o plasma. Las propiedades eléctricas del plasma ionosférico son determinantes en los procesos de transferencia de energía entre la magnetosfera terrestre y la atmósfera. Así, la ionosfera es una región de vital importancia en el sistema Sol-Tierra.

Los estudios de la ionosfera iniciaron a principios del siglo pasado con su fortuito descubrimiento. En 1902 el italiano G. Marconi consiguió transmitir la letra S (en clave Morse) desde Cornwall Inglaterra a través del Atlántico a Terranova EUA usando ondas de radio. Marconi realizó su experimento a pesar del escepticismo de los científicos que aseguraban que la radiación no podía dar la vuelta a la curvatura de la tierra. Cuando alcanzó el éxito, los científicos se dieron a la tarea de explicar como era esto posible. Meses más tarde O. Heaviside y A. E. Kennelly, de forma independiente, retomaron la idea que años antes había expuesto B. Stuart sobre una región conductora en la atmósfera superior para explicar ciertos fenómenos geomagnéticos, pero propuesta como medio responsable de la reflexión de ondas de radio de forma que hiciera posible la comunicación a largas distancias (Boyd, 1960). Años más tarde V. Appleton modeló matemáticamente el efecto del campo magnético sobre la reflexión de ondas de radio en la ionosfera. Marconi y Appleton fueron acreedores al premio Nobel de Física en 1909 y 1947 respectivamente por sus trabajos.

Appleton y otros demostraron la existencia de varias capas ionizadas en la atmósfera. La radioexploración de la atmósfera realizada con sondeos de incidencia vertical mostraron que la altura de reflexión tenía valores diferentes entre el día y la noche, además ondas radio de diferente frecuencia se reflejaban a diferentes alturas. Ondas con frecuencias en-

---

tre 1 y 2  $MHz$  se reflejaban aproximadamente a 100  $km$  de altura. Cuando la frecuencia alcanzaba un valor de 3  $MHz$  las ondas comenzaban a reflejarse a una altura aproximada de 200  $km$  (Appleton y Barnett, 1925). Para frecuencias mayores a 10  $MHz$  las ondas ya no regresaban, de manera que la ionosfera debía estar constituida por dos capas, denotadas como  $E$  y  $F$  respectivamente (nombres dados por Appleton). Cuando realizaban estos sondeos a medio día las cosas eran un poco distintas. La capa  $F$  parecía dividirse en dos regiones (diferenciadas como  $F_1$  y  $F_2$ ) con alturas cercanas a los 200  $km$  y 330  $km$  respectivamente (Smith, 1990).

### Estado de la cuestión

Después de la segunda guerra mundial, la tecnología en cohetes y radar desarrollados durante de guerra se orientó hacia el desarrollo científico para el estudio de la atmósfera y en particular, la ionosfera. Se volvió rutinario el lanzamiento de cohetes con instrumentos necesarios para determinar las variaciones diurnas, estacionales y geográficas en la distribución de la densidad electrónica en la ionosfera (Smith, 1990). Aunque los estudios de ionosfera se llevaron a cabo a la par de los avances en radioastronomía, en México los trabajos iniciaron en 1958 con la puesta en marcha de la estación de radio-sondeo ionosférico ubicada en la ex-hacienda de San Antonio del Cerrillo, a 17  $km$  de la ciudad de Toluca con motivo del año geofísico internacional (AGI) en 1958 (Adem, 1962). Se instaló una ionosonda con la cual, entre abril de 1958 y abril de 1959, se hicieron sondeos verticales con pulsos de potencia de 10  $kW$  entre 1 y 25  $MHz$  cada 15 minutos registrando con el eco frecuencias críticas y altura de las capas que componen la ionosfera. La ionosonda del Cerrillo formó parte de una red mundial de ionosondas que recolectaron información de la ionosfera durante el periodo del máximo de actividad solar. En los años posteriores fue posible conocer el comportamiento de la ionosfera sobre México a través de la medición de la frecuencia crítica y altura de cada capa ionosférica (ver por ejemplo Araujo-Pradere, 1994) así como el efecto de tormentas magnéticas sobre la ionosfera sobre México con los datos de dicha ionosonda (ver Cipagauta-Lara y Durand-Manterola, 2010). Por muchos años los trabajos de ionosfera en México tuvieron sustento únicamente en la estación de radiosondeo del Cerrillo (Pérez-de Tejada, 1973).

En fechas más recientes, los estudios de ionosfera en México se han enfocado en el cálculo del contenido total de electrones TEC haciendo uso de estaciones GPS ubicadas en territorio mexicano. Por ejemplo, López-Montes (2010) hace un estudio del comportamiento del TEC en México asociado a ráfagas solares de rayos X. A diferencia de las ionosondas que permiten desglosar la información de la ionosfera por capas, el TEC provee solamente el panorama general de la misma, de manera que resulta necesario complementar los estudios de TEC con otra herramienta. En 2012, Carrillo-Vargas y otros muestran que el radiotelescopio MEXART, cuyo objetivo principal estudiar el centelleo interplanetario generado por variaciones espaciales del viento solar a 140  $MHz$ , se puede usar también para estudiar la ionosfera a través del *centelleo ionosférico*.

Los trabajos de López-Montes (2010) y Carrillo-Vargas y otros (2012) han sido la base para estudios posteriores relacionados con el TEC (ver por ejemplo López-Montes y otros, 2015 y Ibarra-Ortega, 2016) y el uso de MEXART como herramienta complementaria (ver por ejemplo Ugalde-Calvillo, 2014; Rodríguez-Martínez y otros, 2014 y Carrillo-Vargas y otros, 2016) para el entendimiento de la ionosfera y la influencia que tiene la actividad solar sobre ella. Aunque la producción de trabajos que tienen como objetivo el estudio de la ionosfera sobre México ha ido en aumento en años recientes, es necesario ampliar el volumen de información. Por un lado, los trabajos mencionados que centran su estudio en el TEC tienen la desventaja de enfocarse en analizar su comportamiento en intervalos de tiempo específicos sin mencionar en el carácter general y la fuerte dependencia local que tiene el TEC. Por otro lado, los trabajos que usan datos de MEXART tienen un problema de metodología ya que la técnica de centelleo tiene como fin hacer estimaciones de velocidad y densidad del plasma a partir de un modelo de turbulencia, lo cual no ha sido implementado para el estudio de la ionosfera con este instrumento. El presente trabajo se propone hacer un estudio más general y local de la ionosfera sobre México con el TEC y a la vez implementar una metodología sobre los datos de MEXART basada en un modelo de difracción de Fresnel.

Esta tesis se divide en dos partes, la primera corresponde al estudio del TEC y la segunda se centra en el estudio del centelleo ionosférico usando datos de MEXART. El objetivo general de la primera parte de este trabajo es examinar el comportamiento del TEC durante el reciente máximo de actividad solar entre enero de 2012 y octubre de 2014 sobre el territorio mexicano haciendo uso de estaciones GNSS ubicadas alrededor del planeta con uso de software libre. Los objetivos particulares, derivados del anterior, son los siguientes: Identificar variaciones regulares e irregulares del TEC en escalas de tiempo desde 24 horas hasta un año, mostrar la influencia que tiene la actividad solar, en particular, el número de manchas solares sobre el TEC y distinguir los mecanismos que alteran la ionosfera de nuestro país debido a la actividad geomagnética. La hipótesis es que el TEC sobre México tiene un comportamiento cíclico debido a la rotación y traslación del planeta (alrededor del Sol); al llevarse a cabo este estudio durante el reciente máximo de actividad solar, se espera una modulación adicional a las dos mencionadas anteriormente. En escala de días, se esperan cambios en el TEC debidos a la dinámica de la atmósfera neutra y a actividad geomagnética.

Por otro lado, el objetivo general de la segunda parte es implementar una nueva metodología para estudiar el centelleo captado por el MEXART en la señal de la fuente 3C144 tomando como base el estudio hecho por Rufenach (1971). Se pretende estimar la escala espacial de las estructuras ionosféricas causantes del centelleo y en base a eso calcular la velocidad con que se desplazan y relacionar este cálculo con la intensidad del centelleo. De ser posible estimar la velocidad con que se mueven las irregularidades en

---

la ionosfera, la hipótesis es que a mayor velocidad de desplazamiento se incrementa la probabilidad de que el fenómeno de difracción se lleve a cabo más eficientemente y por lo tanto se note un incremento en la intensidad del centelleo. Los objetivos particulares son los siguientes: Adaptar un modelo de difracción de Fresnel en una dimensión para explicar algunas características del centelleo observado con el MEXART, establecer un criterio que permita definir de forma contundente la frecuencia de Fresnel, parámetro elemental para estudiar el centelleo y relacionar las variaciones de TEC con la ocurrencia e intensidad del centelleo.

Finalmente, se hace una descripción breve de los capítulos subsecuentes:

Capítulo 2, *La ionosfera terrestre*, describe las propiedades generales, formación y regiones que componen la ionosfera de nuestro planeta, hace un repaso del modelo de Chapman y trata brevemente la influencia de la actividad geomagnética sobre la ionosfera.

Capítulo 3, *Radio propagación ionosférica y el TEC sobre México*, hace un breve repaso de los efectos de la ionosfera sobre las ondas de radio, en particular, aquellas que la atraviesan; presenta el estado actual de los sistemas de navegación GNSS y su importancia para estudios ionosféricos a la vez que describe el método usado para calcular el TEC sobre México y muestra el comportamiento del mismo durante el reciente máximo de actividad solar.

Capítulo 4, *Centelleo ionosférico*, presenta las características y origen del centelleo en ondas de radio a su paso por la ionosfera; desarrolla el modelo de difracción de Fresnel usado para analizar el centelleo en la señal de fuentes de radio cósmicas captado por el radiotelescopio MEXART; presenta la metodología, basada en el análisis espectral, usada para tratar los datos y la posterior discusión de los resultados obtenidos.

Capítulo 5, *Conclusiones y trabajo a futuro*, resume los resultados más importantes de este trabajo y las conclusiones que de ellos se derivan. Finalmente propone algunas ideas que pueden ser interesantes para futuros trabajos.





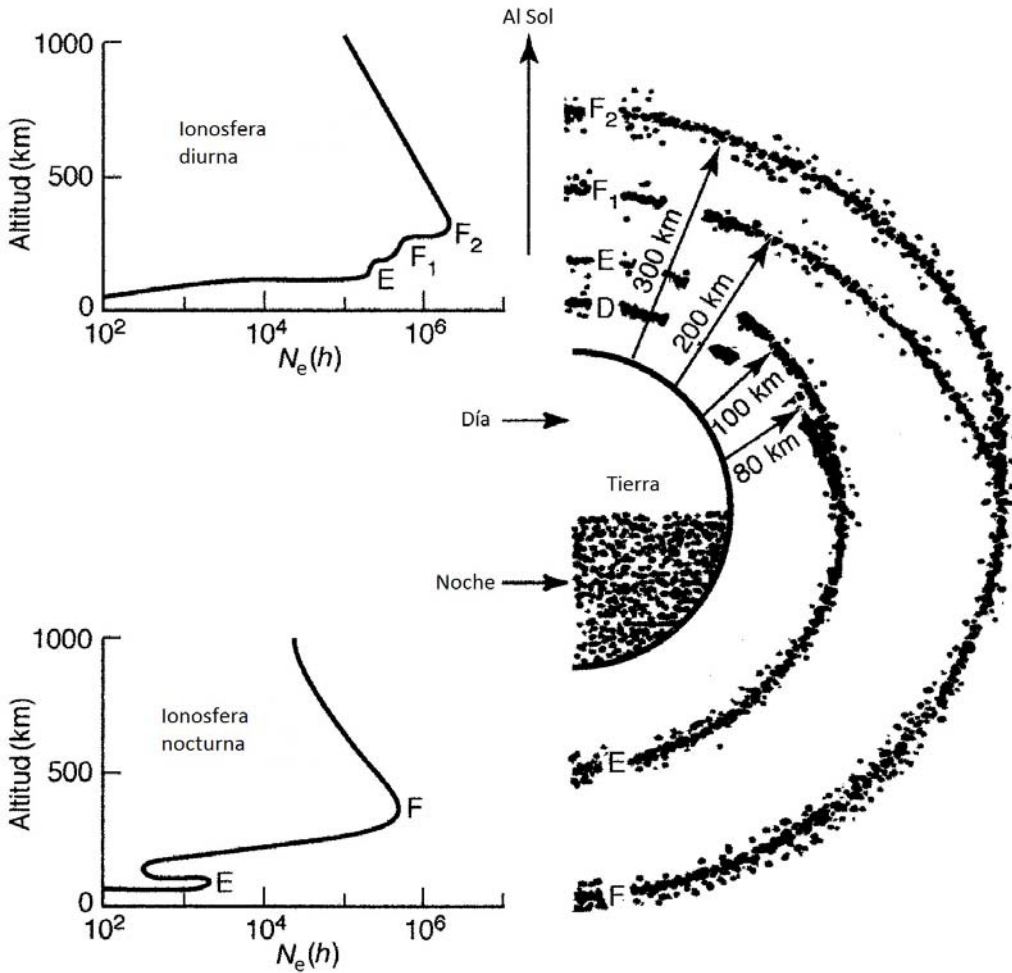
## 2.1. La ionosfera terrestre

LA ionosfera terrestre es la región más externa de la atmósfera donde el gas se encuentra parcialmente ionizado por la absorción de radiación solar de alta frecuencia como rayos X y ultravioleta y en menor medida por la colisión de partículas de alta energía; tanto la radiación como las partículas arrancan uno o varios electrones del gas atmosférico produciendo pares de partículas ion-electrón (mecanismo que se conoce como ionización), convirtiendo el gas neutro de la alta atmósfera en un plasma susceptible a fuertes corrientes eléctricas que surgen como resultado del acoplamiento entre iones y electrones con el campo magnético terrestre, esto permite que sean las fuerzas electromagnéticas las que determinen su comportamiento e interacción con la radiación. Fue descubierta a principios del siglo XX al reflejar ondas de radio de cierta frecuencia y es precisamente la afectación que causa sobre las ondas de radio la herramienta usada para su estudio. La ionosfera, por lo tanto, juega un papel importante en el estudio de las ciencias espaciales.

### 2.1.1. Propiedades generales de la ionosfera

De manera general, el plasma que constituye la ionosfera abarca el intervalo entre 60 - 1000 *km* sobre la superficie terrestre. Esta compuesto de igual número de electrones libres e iones positivos, aunque es la cantidad de electrones la que determina en gran medida su comportamiento. Los electrones arrancados de las moléculas del gas están sujetos a: fuerzas de atracción por parte de los iones recién formados, la dinámica de la atmósfera neutra y dependen a su vez de la altura y la ubicación geográfica. Los iones moléculares y atómicos también son susceptibles a estos efectos pero al ser más masivos que los electrones sus efectos dinámicos muchas veces son despreciables, por eso los electrones determinan en buena medida la dinámica y estructura de la ionosfera. El plasma ionosférico tiene la peculiaridad de estar embebido en el campo magnético terrestre, que influye de manera importante en la distribución y movimiento del plasma, por esa razón la ionosfera es descrita en coordenadas geomagnéticas y no geográficas.

La distribución de electrones históricamente ha sido descrita primeramente como función de su perfil vertical, el cual varía diurna y estacionalmente además de ser afectado por la actividad solar. En la figura 2.1 se representan genéricamente las regiones en que esta dividida la ionosfera incluyendo la transición de día a noche con su respectivo perfil de densidad de electrones como función de la altura  $N_e(h)$  en unidades de electrones/cm<sup>3</sup>. No se toman en cuenta efectos estacionales ni la actividad solar.



**Figura 2.1:** Representación de la estructura de la ionosfera por capas incluyendo la variación diurna y el perfil de altura de la densidad electrónica  $N_e(h)$  dada en partículas/cm<sup>3</sup>. Imagen adaptada de Goodman (1991).

De acuerdo a Davies (1990) la ionosfera diurna se divide en 3 capas *refractivas* conocidas como capa E, capa F<sub>1</sub> y capa F<sub>2</sub> más una región de *absorción* denominada como capa D. Del lado día, el intervalo de altura y densidad electrónica (en electrones/cm<sup>3</sup>) de

cada capa es (ver capítulo 2 de Hunsucker y Hargreaves, 2003):

- $D$ , 60-90  $km$ ,  $N_e$   $10^2$ - $10^4$
- $E$ , 100-160  $km$ ,  $N_e$   $10^5$
- $F_1$ , 160-200  $km$ ,  $N_e$   $10^5$ - $10^6$
- $F_2$ , 200-500  $km$ ,  $N_e$   $10^6$ , el máximo se alcanza a 350  $km$  aproximadamente,

sin embargo, estos valores son altamente variables. Como se puede ver en la figura 2.1 durante la noche la capa  $D$  desaparece, la capa  $E$  se desvanece (no totalmente) y las capas  $F_1$  y  $F_2$  se combinan para dar lugar a una sola capa  $F$ .

### 2.1.2. Formación de la ionosfera

La radiación solar de alta energía que incide sobre el tope de la atmósfera determina buena parte de la dinámica ionosférica. De todo el espectro electromagnético, sólo el intervalo de luz visible y parte del radio alcanzan la superficie, el resto es absorbido por las capas superiores de la atmósfera, provocando cambios en ella a diferentes alturas. La cantidad de energía que será absorbida por la alta atmósfera para crear la ionosfera depende principalmente de la altitud, intensidad de la radiación, composición y densidad del gas atmosférico. A partir de la superficie hasta los 100  $km$  de altura la turbulencia atmosférica mantiene los gases bien mezclados, el  $N_2$  y  $O_2$  son las especies que constituyen el 99% del gas atmosférico, el 1% restante lo componen trazas de otros gases como  $CO_2$ , vapor de agua y elementos más pesados (Tascione, 1988). A esta región se le conoce como *homosfera*.

Por encima de los 100  $km$  (región llamada *heterosfera*) la cantidad de iones y electrones libres aumenta considerablemente debido a dos factores: primero, la densidad gaseosa (y la frecuencia de colisión entre partículas) disminuye, hay una separación difusiva de los distintos tipos de gases (se distribuyen de acuerdo a su peso molecular) perdiéndose así la homogeneidad. Al disminuir el número de colisiones entre partículas, iones y electrones tardan más tiempo en formar especies neutras. En segundo lugar, el proceso de disociación del  $O_2$  (separación de  $O_2$  en sus dos componentes atómicos) alcanza su máxima eficiencia, ocasionando que el oxígeno monoatómico ( $O$ ) sea la especie más numerosa por encima de 100  $km$ , lo cual implica una mayor densidad electrónica porque es precisamente el  $O$  el elemento que más electrones provee a la ionosfera (Tascione, 1988). A mayores alturas, el porcentaje de partículas ligeras aumenta y el de partículas más pesadas disminuye a tal grado que por encima de 500  $km$  el hidrógeno y el helio son los gases más abundantes.

Los procesos fisico-químicos que determinan la formación y el estado de ionización de la ionosfera pueden ser divididos en 2 categorías: *fotoquímicos*, que comprenden

la fotodisociación, fotoionización y recombinación de las distintas especies gaseosas y *fenómenos de transporte* que consisten en movimientos colectivos de iones y electrones. La trascendencia de estos procesos radica en la altitud. Por debajo de 100 km los fenómenos de transporte pueden ser ignorados, entre 100 y 200 km existe un balance entre ambos procesos y por encima de 200 km los procesos fotoquímicos no juegan un papel importante. A continuación se hace una breve descripción de estos procesos, para más información se sugiere consultar los trabajos de Budden, (1955), Rishbert y Garriot, (1969) y Hines y otros, (2001).

La *fotodisociación* es el proceso mediante el cual la radiación solar intensa (ultravioleta principalmente) incide sobre el gas poliatómico ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $NO$  son las principales especies poliatómicas de la ionosfera) y lo separa en sus componentes atómicas (por ejemplo,  $O_2 + h\nu \rightarrow O + O$  siendo  $h\nu$  un fotón de luz ultravioleta con longitud de onda  $\lambda \sim 2000 \text{ \AA}^1$ ) (Hines y otros, 2001). Este fenómeno alcanza su máxima eficiencia a los 100 km aproximadamente y es importante para explicar el aumento de temperatura que se tiene a esa altura.

La *fotoionización* por su parte, es el principal mecanismo de liberación de electrones ionosféricos. Consiste en la ionización o desprendimiento del electrón en la órbita más externa de una molécula o un átomo neutro como  $NO$ ,  $N_2$ ,  $O$  o  $N$  por la incidencia de radiación UV o rayos X que disponen de suficiente energía como para liberar al electrón del amarre electrostático del núcleo (por ejemplo,  $O + h\nu \rightarrow O^+ + e^-$ ) (Hines y otros, 2001). Éste mecanismo es el responsable de la existencia de las capas ionosféricas  $D$ ,  $E$  y  $F_1$ , aunque no es el único mecanismo de producción de electrones puesto que la ionización de componentes atmosféricos por impacto de partículas energéticas también desprende electrones del gas neutro aunque este mecanismo únicamente es importante cerca de los polos.

Cuando la acción solar no está presente, las fuerzas eléctricas se vuelven importantes en la ionosfera puesto que se encargan de unir iones positivos con los electrones, proceso conocido como *recombinación*. El proceso que se efectúa con mayor rapidez es la *recombinación disociativa*. Ocurre cuando una partícula cargada (ion o electrón) colisiona con una molécula neutra, separando las especies involucradas (disociación) además de haber intercambio de carga (por ejemplo,  $O_2^+ + N \rightarrow NO^+ + O$ , o bien  $NO^+ + e^- \rightarrow N + O$ ) (Hines y otros, 2001). Este mecanismo es el responsable del descenso en el número de electrones en las capas bajas de la ionosfera, donde la mayor densidad causa que la recombinación sea más rápida.

El proceso contrario a la fotoionización es la *recombinación radiativa* que consiste en la unión de un electrón con un ion para formar una partícula neutra y la posterior emisión

---

<sup>1</sup> 1 ångström (Å) equivale a  $10^{-10}$  metros

de un fotón (por ejemplo  $O^+ + e^- \rightarrow O + h\nu$ ) (Hines y otros, 2001). La recombinación radiativa es la responsable de la luminiscencia nocturna o airglow. En contraste, la emisión de luz que se observa durante las auroras boreales ocurre cuando electrones ligados con el nitrógeno y oxígeno atmosféricos son excitados y desplazados a niveles de mayor energía por colisiones de partículas aceleradas en la magnetosfera. Cuando los electrones regresan a su estado de menor energía emiten la luz que forma la aurora (Milantiev y Temko, 1983).

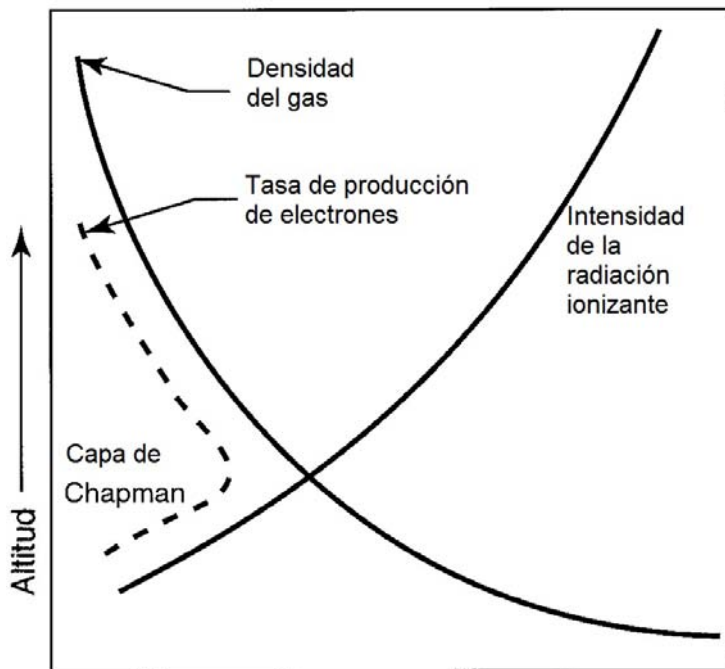
Si se integra sobre todo el espectro electromagnético, el flujo total de radiación que llega al tope de la atmósfera es aproximadamente de  $3 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ . En particular, la radiación con  $\lambda$  menor a  $2000 \text{ \AA}$ , que es la responsable de la existencia de la ionosfera, es apenas  $1/10^5$  parte del flujo total (Hargreaves, 1992). Dentro de este intervalo de radiación ionizante existen algunas líneas de emisión que son igualmente importantes para fines ionosféricos. La línea de emisión Lyman  $\alpha$  ( $\lambda = 1216 \text{ \AA}$ ), que corresponde a la transición entre el primer estado excitado y el estado base del átomo de hidrógeno, alcanza una potencia comparable con la suministrada por el resto de las longitudes de onda menores a  $1000 \text{ \AA}$  (Rishbert y Garriot, 1969) y es responsable de buena parte de la ionización de la parte baja de la ionosfera. Estos valores cambian sustancialmente con el ciclo solar. Se sabe que entre mínimo y máximo de actividad solar, el flujo de radiación ultravioleta (UV) puede llegar a duplicarse, el de rayos X a triplicarse y la radiación con  $\lambda < 10 \text{ \AA}$  llega a ser 30 veces más intensa (Hargreaves, 1992). La potencia de Lyman  $\alpha$  varía hasta un 50% en un ciclo de actividad solar.

### 2.1.3. Modelo de Chapman

La atmósfera experimenta un calentamiento cuando absorbe radiación solar que provoca disociación de moléculas y liberación de electrones. Este proceso es dependiente de la concentración del gas, la intensidad de la radiación incidente y la altura; mientras en el tope de la atmósfera la radiación es máxima y la concentración del gas es mínima, ocurre el caso opuesto en la superficie (ver figura 2.2). En ambas fronteras hay una baja producción de electrones, por lo cual existe un punto intermedio donde se alcanza el valor máximo de producción. Champan (1931) formuló un modelo para encontrar una ecuación que describa la formación de la ionosfera debido a la radiación solar haciendo las siguientes suposiciones:

- La radiación ionizante que llega a la atmósfera es monocromática.
- Una atmósfera plana horizontalmente estratificada y compuesta de una sola especie de gas absorbente.
- La radiación ionizante varía con el ángulo ( $\chi$ ) formado entre el cenit y la ubicación del Sol.

- Existencia de un valor máximo de producción de electrones que se alcanza cuando se compensa la intensidad de la radiación ionizante con la concentración del gas (línea punteada en la figura 2.2). Este máximo se alcanza cuando el Sol se encuentra lo más cercano al cenit.



**Figura 2.2:** Representación idealizada de la tasa de ionización que ocurre en la ionosfera que muestra el balance entre la intensidad de la radiación y el decremento exponencial en la densidad atmosférica como función de la altura. Figura realizada a partir de las suposiciones antes mencionadas.

Suponiendo que la radiación ioniza una sola vez los átomos del gas (es decir, sólo es arrancado un electrón por cada fotón incidente) entonces la cantidad de pares ion-electrón formados o *razón de producción* estará dada por la *función de Chapman* (ver Champan, 1931; Budden, 1955; Davies, 1965):

$$q(h, \chi) = q_0 e^{(1 - \sec(\chi)) e^{-z}}, \quad (2.1)$$

con

$$z = \frac{h - h_0}{H},$$

en donde:

- $q(h, \chi)$  es la razón de producción,
- $h$  es la altura,
- $\chi$  es el ángulo de incidencia medido a partir del cenit,
- $q_o$  es la razón de producción a  $z = 0$ ,
- $H$  es la escala de altura<sup>2</sup>,
- $z$  es la altura estandarizada a la escala de altura, y
- $h_o$  es la altura de la máxima producción de pares ion-electrón para  $\chi = 0$ .

El valor  $q_o$  esta dado por

$$q_o = \frac{\phi(\infty)}{eH}, \quad (2.2)$$

en donde  $\phi(\infty)$  es la densidad de flujo solar que incide sobre la atmósfera en unidades de fotones por unidad de área y  $e$  es la base natural de la función logaritmo.

La altura a la cual se alcanza la máxima razón de producción de electrones se obtiene derivando la función de Chapman (ecuación 2.1), al igualar a cero la derivada se encuentra que  $z_{max} = \ln \sec(\chi)$  lo que significa que la altura máxima es:

$$h_{max} = h_o + Hz_{max}. \quad (2.3)$$

Al sustituir  $h_{max}$  en la ecuación 2.1 encontramos que el valor máximo de la razón de producción es:

$$q_{max} = q_o \cos(\chi). \quad (2.4)$$

A partir de las relaciones anteriores es posible estimar la densidad de electrones a una cierta altura en función de la razón de producción  $q$ . Se debe considerar el efecto de la recombinación que reduce la cantidad de electrones presentes en la ionosfera. En las capas  $E$  y  $F_1$ , se puede asumir que los iones se recombinan con los electrones a una tasa que depende de  $N_e^2$ . Omitiendo los posibles procesos de transporte, la ecuación de continuidad para los electrones se puede expresar como (Davies, 1965):

$$\frac{dN_e}{dt} = q - \alpha N_e^2, \quad (2.5)$$

---

<sup>2</sup>La escala de altura es la altura que hay que desplazarse en una atmósfera para que la presión disminuya en un factor  $e$ , es decir, la disminución de presión es  $1 - \frac{1}{e}$ . Esta dada como  $H = kT/mg$  con  $T$  = temperatura,  $m$  = masa de la partícula que constituye el gas,  $k$  y  $g$  constantes de Boltzmann y gravedad respectivamente.



en donde  $\alpha$  es el coeficiente de recombinación (varía dependiendo de cada especie de ion). Cuando se cumple que  $dN_e/dt = 0$  (estado de equilibrio), la distribución de los electrones correspondiente a la función de Chapman (ecuación 2.1) es

$$N_e(z, \chi) = N_{e,o} e^{\frac{1}{2}(1 - z - \sec(\chi)e^{-z})}, \quad (2.6)$$

en donde  $N_{e,o} = \sqrt{q_o/\alpha}$  es la densidad de electrones a  $z = 0$ . Esta distribución es llamada *Chapman alfa* o simplemente *capa de Chapman* (Davies, 1965; Rishbert y Garriot, 1969). La altura de la máxima densidad electrónica es idéntica a la de la ecuación 2.3. Siguiendo el mismo razonamiento usado para obtener la ecuación 2.4, se tiene que la máxima densidad de electrones es:

$$N_{e,max} = N_{e,o} \sqrt{\cos(\chi)}. \quad (2.7)$$

Cuando el ángulo  $\chi$  es cero (es decir, cuando el Sol esta en el cenit),  $N_{e,max}$  alcanza su valor máximo y  $h_{max}$  su mínimo.

Existen algunas dificultades que no se toma en cuenta el modelo de Chapman:

- La radiación solar no es monocromática y no se tienen en cuenta algunas bandas de emisión (como la Lyman  $\alpha$ ) que son muy importantes para efectos de fotoionización.
- La atmósfera no se ioniza ineditamente, hay un efecto de retardo y además la atmósfera no está en equilibrio.
- Contrario a lo que se supone, H no es constante, varía con la altura.
- La recombinación no es estrictamente proporcional a  $N_e^2$ , de acuerdo a Rishbert y Garriot (1969) esta suposición es válida solamente para la capa E.
- Antes de recombinarse, iones y electrones interactúan con otras moléculas (neutras en su mayoría), esto no se toma en cuenta en el modelo de Chapman ya que supone una atmósfera formada de una sola especie de gas.

#### 2.1.4. El campo geomagnético

El campo magnético de la Tierra, a primera aproximación, puede ser considerado como un *campo dipolar* cuyo dipolo generador esta ubicado en el centro del planeta inclinado cerca de  $11,5^\circ$  respecto al eje de rotación terrestre. El polo sur magnético apunta al polo norte geográfico y viceversa, por lo que comunmente se dice que el campo magnético de la Tierra esta dirigido hacia el norte, porque las líneas de campo *salen* del polo sur (geográfico) y *entran* en el polo norte geográfico. Debido a su forma dipolar, las líneas de campo magnético cambian su configuración con la latitud; mientras que sobre el ecuador las líneas son casi paralelas a la superficie, cerca de los polos son perpendiculares. La

intensidad de campo geomagnético varía también con la latitud. Por ejemplo, en territorio mexicano este valor varía entre 40,000 y 46,000  $nT$  aproximadamente dependiendo de la ubicación geográfica<sup>3</sup>. El vector de campo magnético de un sitio sobre la Tierra se expresa en términos de un sistema de coordenadas ( $H, Z, I$ ) donde  $Z$  es la componente vertical (perpendicular a la superficie, positiva hacia abajo sobre la vertical),  $H$  es la componente horizontal (positiva en dirección norte) e  $I$  es el ángulo de inclinación que completa el sistema ortogonal de coordenadas medido en grados,  $Z$  y  $H$  tienen unidades de nanoteslas (Tascione, 1988).

Desde hace casi 100 años se sabe que la configuración del campo magnético modifica la ionosfera latitudinalmente. Generalmente se clasifica a la ionosfera global en tres regiones (ver figura 2.3): la región entre el ecuador magnético y  $\pm 20^\circ$  de latitud se conoce como ionosfera de bajas latitudes o *ionosfera ecuatorial*; entre  $20^\circ$  y  $60^\circ$  aproximadamente se le llama *ionosfera de latitudes medias* y la *ionosfera de altas latitudes* comprende desde  $60^\circ$  hasta las regiones polares. La ionosfera de latitudes medias, a diferencia de las otras dos regiones que están fuertemente acopladas al campo geomagnético, es la que mejor se asemeja a los modelos clásicos de ionosfera (Tascione, 1988) y por ende es la mejor entendida.

### 2.1.5. Regiones de la ionosfera

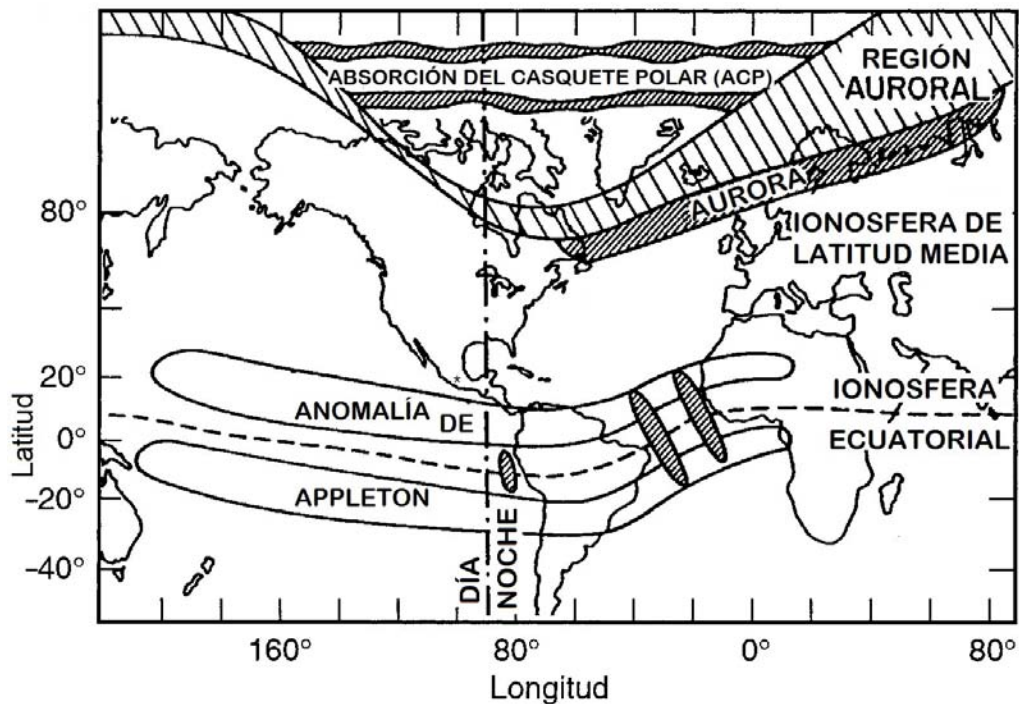
La composición y densidad de los gases atmosféricos cambian con la altura, así que la ionosfera, al ser la capa atmosférica más extendida, muestra una marcada separación en altura. La ionosfera se divide en varias regiones o capas sin fronteras bien definidas que se etiquetan en orden ascendente de altura con las letras  $D, E, F_1$  y  $F_2$  como se muestra en la figura 2.1. Las características de cada capa son diferentes porque los procesos físicos que las originan también lo son, por ejemplo, de acuerdo a las suposiciones que hace el modelo de Chapman, solamente las capas  $E$  y  $F_1$  tienen características de capa de Chapman; a continuación se describen las principales características y fenómenos que ocurren en cada capa. Para más detalles se recomienda consultar los trabajos de Rishbert y Garriot (1969), Ratcliffe (1972) y Kelley (1989).

#### Capa D

La capa  $D$  es producida principalmente por la línea de emisión Lyman  $\alpha$  y en menor medida por rayos X. El flujo de esta radiación es de aproximadamente  $3.3 \times 10^{11}$  fotones/ $cm^2$  por segundo (Hines y otros, 2001). Cuando el Sol ioniza más intensamente estando cerca del cenit, la densidad de electrones es cercana a  $100 \text{ cm}^{-3}$  a  $60 \text{ km}$  y  $10^4 \text{ cm}^{-3}$  a  $90 \text{ km}$  de altura (Tascione, 1988). La fuente principal de electrones es el  $NO$ . La ionización del  $N_2$  y  $O_2$  por rayos X solares es un proceso secundario (salvo cuando ocurren ráfagas). El proceso de recombinación disociativa es el más rápido y eficiente para

---

<sup>3</sup>Ver la página del servicio magnético <http://geomaglinux.geofisica.unam.mx> para más información.



**Figura 2.3:** Estructura global de la ionosfera por acción del campo geomagnético. Se señalan las tres regiones en que se divide la ionosfera global. La línea punteada indica el ecuador magnético. Imagen obtenida de Goodman (1991).

disminuir el número de electrones, lo que sumado a la alta densidad de especies neutras que prevalece todavía a la altura de esta capa, explica el porque se desvanece durante la noche la región *D* (excepto el latitudes mayores a  $65^\circ$ , donde el bombardeo de partículas mantiene la ionización).

### Anomalías de la capa *D*

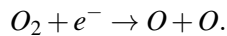
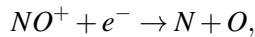
Cuando ocurre una ráfaga solar intensa, los rayos *X duros* (con longitudes de onda menores a  $10 \text{ \AA}$ ) pueden incrementar la ionización en esta capa hasta en un factor de 1000 (Goodman, 2005). Este incremento en la  $N_e$  provoca que la frecuencia natural de oscilación del plasma aumente y ondas de radio que en condiciones normales eran reflejadas, ahora son absorbidas, provocando una interrupción en las comunicaciones de radio durante intervalos de tiempo de hasta una hora, ya que es el tiempo aproximado en que se lleva a cabo el proceso de recombinación en esta región de la ionosfera. A este fenómeno característico de la capa *D* se le conoce como *perturbación ionosférica súbita* o *SID* (Ratcliffe, 1972). En las regiones cercanas a los polos ocurre un fenómeno similar a las *SIDs* conocido como *absorción de casquete polar* o *ACP*. Se trata de una severa ate-

nuación de ondas de radio que se propagan en la ionosfera a altas latitudes (cerca de los casquetes polares, de ahí el nombre, ver figura 2.3) varias horas después de la ocurrencia de una ráfaga causada por el elevado flujo de protones solares emitidos por ésta y que son deflectados por el campo magnético hacia las regiones polares (Ratcliffe, 1972).

### Capa E

La capa E es la región de la ionosfera mejor entendida porque es la que mejor se asemeja a una capa *tipo Chapman* y fue la primera en ser descubierta. Appleton y Barnett (1925) fueron los primeros en estudiar esta capa y calcularon su altura al observar las interferencias entre la onda directa y la onda reflejada. Sus resultados probaron que la reflexión sucedía a una altura de 100 km aproximadamente. Su formación se debe principalmente a la ionización del  $O_2$ . Las líneas de emisión solares responsables de la ionización son la línea Lyman  $\beta$  de longitud de onda 1025 Å (flujo de  $6 \times 10^9$  fotones/cm<sup>2</sup> por segundo) y la línea  $C_{III}$  ( $\lambda = 977$  Å, flujo  $\cong 4 \times 10^9$  fotones/cm<sup>2</sup> por segundo), además de la ionización de  $N_2$  por incidencia de rayos X con  $\lambda$  entre 10 - 100 Å (Hines y otros, 2001).

La tasa de producción de electrones es cercana a los 4000 electrones/cm<sup>3</sup> por segundo a 105 km para ángulos  $\chi < 10^\circ$ . En esta capa  $N_e$  mantiene un valor prácticamente constante de  $2 \times 10^5$  cm<sup>-3</sup>. Los iones moleculares  $N_2^+$  y  $O_2^+$  colisionan constantemente formando  $NO^+$ . Las reacciones de recombinación principales son (Hines y otros, 2001):



En las regiones polares, la contribución de ionización por impacto de partículas es similar a la contribución por fotoionización y se mantiene durante la noche con densidades entre 500 -  $10^4$  cm<sup>-3</sup> (Hunsucker y Hargreaves, 2003).

### Anomalías de la capa E

En ocasiones hay ensanchamientos de la capa E (anomalía denominada como capa E *esporádica*) que se caracteriza por un aumento muy marcado, pero irregular y rápidamente variable, de la densidad de electrones de esta región. Puede ocurrir durante el día y la noche, variando marcadamente con la latitud; son más frecuentes en verano a latitudes medias mientras que en latitudes ecuatoriales se observan principalmente durante el día (Ratcliffe, 1972).

### Capa F

La capa F es la región superior de la ionosfera terrestre que sufre un desdoblamiento en su perfil de densidad durante el día dando origen a las capas  $F_1$  y  $F_2$ . La primera se lo-

caliza a una altura entre 150 y 200 *km*. El elemento principal en el proceso de ionización de esta capa es el oxígeno atómico (*O*) por radiación con  $\lambda < 911 \text{ \AA}$ . Las bandas espectrales que también contribuyen a la ionización son el Lyman continuo (800 - 910  $\text{\AA}$ ) con un flujo de  $10^{10}$  fotones/ $\text{cm}^2$  por segundo, el intervalo entre 200 - 350  $\text{\AA}$  incluyendo la línea intensa *HeII* a 304  $\text{\AA}$  (flujo de  $1.5 \times 10^{10}$  fotones/ $\text{cm}^2$  por segundo) y el ultravioleta continuo entre 500 - 700  $\text{\AA}$  (Hines y otros, 2001). Los componentes moleculares *N*<sub>2</sub> y *O*<sub>2</sub> también aportan electrones a esta capa por radiación solar de 796  $\text{\AA}$ . Los iones más abundantes entre 140 - 200 *km* de altura son *O*<sup>+</sup>, *N*<sub>2</sub><sup>+</sup> y *O*<sub>2</sub><sup>+</sup>. Entre 200 - 400 *km* el número de iones pesados decrece haciendo al *O*<sup>+</sup> el elemento más numeroso (Hines y otros, 2001). La máxima densidad de electrones de la capa *F*<sub>1</sub> es de  $3 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$  cerca de los equinoccios a mediodía (Tascione, 1988). En esta capa la recombinación disociativa es el mecanismo principal de decremento de electrones.

## Capa *F*<sub>2</sub>

En las capas *D*, *E* y *F*<sub>1</sub> el incremento en la densidad de electrones es paulatino hasta alcanzar a su máximo valor en la capa *F*<sub>2</sub> para después disminuir de forma monótona. En las capas bajas la concentración de electrones esta determinada primeramente por el equilibrio químico existente entre la producción de iones y electrones por la radiación X y UV de Sol y los procesos de recombinación. En cambio, en la capa *F*<sub>2</sub> el plasma ionosférico se encuentra lo suficientemente enrarecido como para que la frecuencia de colisión entre partículas sea baja, así que los electrones se separan lo suficiente de su respectivo ion como para permitir que la fuerza de gravedad los transporte a alturas mayores de donde fueron producidos. Este proceso de transporte causado por la diferencia de masa que hay entre iones y electrones es conocido como *difusión* (Kelley, 1989), fenómeno que junto con el efecto del campo magnético terrestre sobre los electrones da lugar a corrientes ionosféricas que establecen la configuración de la ionosfera observada.

Entre 160 - 180 *km* de altura se encuentra la máxima tasa de producción de electrones de la ionosfera, sin embargo, los electrones no permanecen en esta región sino que desplazados hacia arriba causando que el valor máximo de densidad electrónica se encuentre a una altura mayor. La densidad electrónica de *F*<sub>2</sub> puede llegar a ser un orden de magnitud mayor que en la capa *F*<sub>1</sub> y se alcanza cerca de los 350 *km* de altitud (Tascione, 1988). En esta capa el proceso de recombinación es más lento que en las otras capas porque el *O*<sup>+</sup> primero debe colisionar con partículas neutras para formar, por disociación, los iones *NO*<sup>+</sup> y *O*<sub>2</sub><sup>+</sup>, los cuales capturan electrones en un proceso relativamente lento debido a la baja frecuencia de colisión entre especies entre 200 - 400 *km*, lo cual explica la existencia de la ionosfera nocturna.

### Anomalías de la capa F

A diferencia de la capa  $E$  las variaciones diurnas, latitudinales y estacionales de la región  $F$  no concuerdan con el modelo de Chapman y la actividad solar es importante para explicar muchos de los fenómenos que afectan esta región (Wright, 1962). A latitudes alrededor del ecuador magnético tiene lugar un fenómeno de gran escala que consiste en la distribución de la densidad de electrones de las capas  $F_1$  y  $F_2$  con valores máximos ubicados a  $\pm 20^\circ$  de latitud magnética. Esto sucede porque corrientes ionosféricas trasladan el plasma de la región  $F$  hacia el oeste del lado día y al este del lado noche, lo cual causa un arrastre de electrones (por efecto de la fuerza electromagnética dada como  $\vec{E} \times \vec{B}$ ) hacia arriba de día y en dirección contraria de noche (Tascione, 1988). Durante el día, el plasma asciende hasta cierta altura, luego se difunde a lo largo de las líneas de campo magnético lejos del ecuador, generando dos zonas cerca de los trópicos donde la densidad electrónica de la capa  $F$  aumenta considerablemente. Este fenómeno es llamado *anomalía de Appleton* (Ratcliffe, 1972) y se puede ver en la figura 2.3.

La turbulencia de la capa  $F_1$  puede ocasionar que concentraciones de electrones de menor densidad que sus alrededores con escalas de centímetros hasta kilómetros asciendan verticalmente hasta la región  $F_2$ . Cuando cesa la fotoionización la recombinación de la capa  $F_1$  es más rápida que en  $F_2$  de tal manera que ésta última región se vuelve más densa que la parte baja de la capa  $F$  creandose una situación de *inestabilidad de Rayleigh-Taylor* (un fluido situado sobre otro fluido menos denso es una situación dinámicamente inestable) por lo que se crea un gradiente vertical de densidad electrónica que da lugar a burbujas de plasma que ascienden y crean distribuciones irregulares en los electrones a la altura de la capa  $F_2$  (incluso se pueden alargar verticalmente hasta 1500 km de altura durante la noche). Este aparente ensanchamiento anómalo de la capa  $F$  se conoce comúnmente como *spread F* (Liu y Franke, 1986). El nombre proviene de sondeos hechos con ionosondas, cuando en ocasiones el eco reflejado parecía expandirse o ensancharse (*spread*) en altura y frecuencia. Este fenómeno es más común de noche aunque ocasionalmente se presenta de día y puede durar desde minutos hasta horas. De la misma forma que la anomalía de Appleton, el ensanchamiento  $F$  se intensifica durante periodos de actividad geomagnética (Yeh y Liu, 1982) y tiene la peculiaridad de ser precursor del centelleo de señales de radio, tema que se tratará a detalle más adelante.

#### 2.1.6. Tormentas geomagnéticas

Estimulada por las variaciones del viento solar y el campo magnético interplanetario (IMF), la magnetosfera terrestre sufre cambios globales que dan lugar a diferentes fenómenos perceptibles en la Tierra. El más importante de ellos, para efectos de este estudio, son las *tormentas geomagnéticas*. Una tormenta geomagnética es la máxima alteración de carácter global que puede sufrir la magnetosfera terrestre por acción del Sol. El problema de explicar el mecanismo mediante el cual el viento solar transfiere energía

al interior de la magnetosfera terrestre fue aclarado cuando Dungey (1961) propuso que si la componente  $z$  sur del IMF (visto desde el sistema de coordenadas terrestre) tiene un valor significativo, entonces las líneas del IMF pueden conectarse con las líneas del campo dipolar de la Tierra (que apuntan al norte). Cuando esto sucede, las líneas de campo magnetosféricas son arrastradas por el viento solar hacia la cola magnetosférica para después reconectarse nuevamente y regresar a la configuración dipolar anterior. Este mecanismo es conocido como *reconexión magnética* (ver capítulo 9 de Kivelson y Russell, 1995 para más detalles).

La reconexión permite el ingreso de partículas solares cargadas al interior de la magnetosfera, hecho que a lugar a dos procesos importantes que afectan directamente a la ionosfera: primero, las partículas magnetosféricas son aceleradas y deflectadas hacia los polos magnéticos de nuestro planeta, causando un incremento sustancial de la ionización de la ionosfera de altas latitudes en un proceso que puede durar varios días dependiendo del tiempo que dure la reconexión. Segundo, gran parte de éstas partículas experimentan movimientos en dirección norte-sur siguiendo las líneas de campo y de deriva en dirección este-oeste o viceversa dependiendo de la carga, es decir, iones y electrones derivan en sentidos contrarios, hacia el oeste los primeros y hacia el este los segundos. Esta separación de carga se manifiesta como una corriente eléctrica neta extendida sobre el planeta conocida como *corriente de anillo* ubicada a  $\sim 3 R_T$  sobre la superficie terrestre (Tascione, 1988).

El incremento en la población de partículas después de la reconexión implica un aumento en intensidad de la corriente de anillo provocando un campo magnético inducido con dirección contraria al campo magnético intrínseco de la Tierra, en consecuencia la intensidad de la componente horizontal del campo geomagnético sobre el ecuador se ve reducida. Esta disminución es lo que define una *tormenta geomagnética*. Históricamente el término tormenta geomagnética se usa para referirse a la reducción en la intensidad del campo geomagnético global pero una definición más adecuada sería: una tormenta en el espacio que causa fuertes corrientes eléctricas en toda la magnetosfera e ionosfera, perturbando así el campo geomagnético intrínseco del planeta (Gonzalez y otros, 1994). Su principal característica es la disminución en intensidad de la componente horizontal  $H$  del campo y la subsecuente recuperación. Dependiendo de la magnitud de la componente  $z$  sur del IMF y del tiempo que se mantenga la reconexión será el impacto global de la tormenta geomagnética.

### Índices magnéticos

Para medir la intensidad de una alteración magnética en el entorno espacial terrestre se usan varios índices dependiendo de la latitud magnética y del fenómeno que se desee estudiar (Perrone y De-Franceschi, 1998). Para el presente trabajo se usarán los índices  $D_{st}$  y  $K_p$ . El índice  $D_{st}$  esta expresado en nanoteslas ( $nT$ ) y proporciona el valor prome-

dio global de la componente horizontal  $H$  del campo magnético terrestre alrededor del ecuador<sup>4</sup>. En condiciones quietas, el valor de  $D_{st}$  es cercano a cero.

El índice  $K_p$ <sup>5</sup> por otro lado esta basado en el índice  $K$  que mide el cambio de amplitud de las componentes  $H$  y  $D$  del campo magnético en un intervalo de 3 horas de una sola estación magnética; el objetivo de usar el índice  $K$  es diferenciar claramente entre variaciones geomagnéticas regulares e irregulares en una cierta ubicación. El índice  $K_p$  consiste en el promedio de los índices  $K$  de un número selecto de observatorios magnéticos distribuidos en distintas latitudes y se obtiene mediante un proceso de estandarización que elimina la variación diurna, estacional y la dependencia latitudinal. Esta dado en escala de 0 a 9 donde 0 indica condiciones *muy quietas* y 9 para *muy perturbadas* (Perrone y De-Franceschi, 1998).

En función del índice  $Dst$  las tormentas se clasifican en 3 tipos principales: tormentas de baja intensidad ( $0 \geq D_{st} \geq -30 \text{ nT}$ ), moderadas ( $-50 \text{ nT} \geq D_{st} \geq -100 \text{ nT}$ ) e intensas ( $-100 \text{ nT} \geq D_{st}$ ). Una tormenta geomagnética consta de tres etapas: La fase inicial o *inicio repentino* que consiste en un súbito y breve incremento en el valor  $D_{st}$  atribuido a la compresión de la magnetosfera debido al aumento en la presión dinámica del viento solar. La *fase principal*, caracterizada por el decremento en el valor de  $D_{st}$  hasta un valor mínimo que indica la intensidad de la tormenta; esta fase puede durar desde unas horas hasta un día y el mecanismo que la genera es el aumento en la intensidad de la corriente de anillo por el ingreso de plasma solar a la magnetosfera. Como se mencionó anteriormente, el incremento en la corriente induce un campo magnético con sentido contrario que disminuye la intensidad de la componente  $H$  del campo geomagnético intrínseco, por eso el valor del índice  $D_{st}$  es negativo. La tercera etapa se conoce como *fase de recuperación* y corresponde a la reducción de la intensidad de la corriente de anillo, se observa en las mediciones una recuperación gradual del índice  $D_{st}$  que dura unos días.

### 2.1.7. Tormentas ionosféricas

A causa de la actividad solar, las condiciones del entorno espacial de nuestro planeta son altamente variables; una las consecuencias es que la ionosfera reacciona a estos cambios de formas muy variadas que pueden ir desde fenómenos de pequeña escala y corta duración hasta alteraciones de escala global que se prolongan hasta varios días. Históricamente se le conoce como *tormenta ionosférica* a la respuesta de la ionosfera a escala global ante la ocurrencia de una tormenta geomagnética. Por décadas se han intentado explicar los mecanismos involucrados en la ocurrencia e intensidad de una tormenta ionosférica (ver por ejemplo los trabajos de Mendillo, 1971; Prolss, 1995; Bousanto, 2000)

---

<sup>4</sup>Los datos están disponibles en la página [wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/)

<sup>5</sup>Los datos están disponibles en el sitio [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old-indices/](http://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old-indices/)



encontrando que sus características dependen en gran medida de efectos electromagnéticos y de la dinámica de la atmósfera neutra, volviendo el estudio de las tormentas ionosféricas un tema sumamente complejo. Actualmente se le llama tormenta ionosférica a una alteración de escala global en la población de electrones de la capa  $F_2$  principalmente (por ser la región que tiene mayor cantidad de electrones) que se prolonga por varios días (Ondoh y Marubashi, 2001). Las tormentas ionosféricas son por mucho la afectación más importante para las actividades humanas en el rubro de las radiocomunicaciones por el amplio intervalo de frecuencias que se ven afectadas y su duración.

Los cambios de densidad electrónica que tienen lugar en la ionosfera se explican teniendo en cuenta la razón de producción  $q$  (ecuación 2.1), la razón de pérdida de electrones y en la velocidad de transporte de electrones o bien, una combinación de los tres factores, de modo que cuando se rompe el balance entre estos parámetros ocurren aumentos o disminuciones en la población de electrones. Con base en esto, las tormentas ionosféricas se dividen en dos fases: *Tormenta negativa* y *tormenta positiva* que se caracterizan por una reducción e incremento de densidad de electrones de la capa  $F_2$  respectivamente. La respuesta que tiene la ionosfera ante una alteración geomagnética es sumamente compleja, aún para sitios magnéticamente comparables (se tienen casos registrados donde dos localidades magnéticamente similares presentan características de tormenta negativa en un sitio y positiva en otro, ver por ejemplo Ondoh y Marubashi, 2001). A pesar de esto, es posible observar algunos patrones que se repiten entre tormentas de características similares. Por ejemplo, de acuerdo a Davies (1990) las tormentas negativas son más frecuentes durante el verano en latitudes altas, mientras que las positivas lo son en invierno para latitudes ecuatoriales.

## 2.2. El efecto de la ionosfera sobre las ondas de radio

La ionosfera terrestre tiene propiedades que afectan la propagación de ondas de radio a varias longitudes de onda. Desde el punto de vista de las radiocomunicaciones, es necesario considerar a la ionosfera como un medio dispersivo, es decir, afecta las ondas de radio de diferente manera dependiendo de su frecuencia, así que esta radiación de baja frecuencia funciona como una herramienta para estudiar esta región de la atmósfera de forma remota puesto que el estudio *in situ* es complicado además de costoso y los modelos teóricos funcionan para entender manera general los procesos ionosféricos pero no los efectos de la actividad solar, sin mencionar que, debido a su naturaleza altamente variable, los radio sondeos permiten monitoreo constante de la ionosfera. La interacción de las ondas de radio con la ionosfera depende tanto de la radiofrecuencia como de las distribuciones de iones y electrones que encuentre la señal de radio a lo largo de su trayectoria. La naturaleza de estas interacciones es compleja porque además de los parámetros altamente variables de la ionosfera se tiene que tomar en cuenta el campo geomagnético.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU por sus siglas en inglés) resalta la importancia de la ionosfera sobre la propagación de ondas de radio, desde el punto de vista del diseño de sistemas de comunicación, por el impacto que tiene en la degradación de la calidad de los enlaces de comunicación considerando que (ver manuales de la ITU-R 1994; 1995):

- La ionosfera ocasiona cambios significativos en la propagación de ondas con frecuencias menores a 12 *GHz*, en particular en señales menores a 3 *GHz*.
- La densidad de electrones a lo largo de la trayectoria de un enlace satelital que penetre en la ionosfera ocasiona una rotación del plano de polarización (rotación de Faraday) de la señal y un retardo temporal de la misma, así como una modificación de la dirección aparente debido a refracción.
- En la ionosfera tienen lugar concentraciones irregulares de ionización que ocasionan retardo en una señal además de actuar como lentes convergentes o divergentes que enfocan o desenfocan las ondas de radio. Este efecto se denomina centelleo y afecta la amplitud, fase y dirección de arribo de la señal de radio.

Para entender el efecto de la ionosfera sobre las ondas de radio es indispensable conocer las interacciones básicas que ocurren cuando radiación electromagnética incide sobre un medio irregular como la ionosfera, a saber: *reflexión*, *refracción*, *dispersión*, *difracción*, *atenuación*, *cambio de polarización*, *birrefringencia* o una combinación de varios de ellos (Petrovski y Tsujii, 2012).

- *Reflexión* ocurre en la frontera entre dos medios, una onda de radio de baja frecuencia rebota en la ionosfera porque la oscilación natural del plasma ionosférico impide su propagación.
- *Refracción* causa que la onda incidente se desvíe un cierto ángulo que dependerá del ángulo de incidencia de la onda y de la frecuencia de la misma, así como de las características del medio.
- *Dispersión* ocasiona que ondas de diferente frecuencia se propaguen por la ionosfera a distinta velocidad.
- *Difracción* es el fenómeno que ocurre cuando hay irregularidades en el medio a lo largo de la trayectoria de la onda, lo cual causa una distorsión del frente de onda. La anisotropía de la ionosfera es lo que causa la difracción, dando lugar al *centelleo ionosférico* que se tratará más adelante.
- *Atenuación* es un proceso disipativo que representa la conversión de energía de la onda de radio en calor a través de colisiones, disminuyendo la potencia de la señal; en el caso límite la energía de la onda puede ser absorbida completamente.

- *Cambio de polarización* ocurre cuando el medio ionizado está en presencia de un campo magnético. Se conoce como rotación Faraday y es de particular interés para estudiar variaciones en el campo magnético y para los enlaces satelitales.
- *Birrefringencia* es el fenómeno que tiene lugar cuando el medio (la ionosfera en este caso) es anisotrópico. Debido a la presencia del campo magnético una onda de radio incidente se separa en dos ondas polarizadas linealmente y perpendiculares entre sí. Se le dice haz ordinario al que cumple la ley de refracción mientras que el otro tiene un índice de refracción variable y se llama haz extraordinario.

La dispersión y absorción existirían aún en ausencia de campo magnético, no así la rotación Faraday y la birrefringencia. Es necesario mencionar que la ionosfera no es la única capa de la atmósfera que altera las ondas electromagnéticas. La troposfera (la capa atmosférica que abarca desde la superficie hasta 10 km) también causa atenuación en ondas de radio milimétricas (por encima de 1 GHz) en ciertas bandas espectrales por la presencia de vapor de agua y oxígeno (Yakovlev, 2002); para fines de este trabajo, los efectos troposféricos son ignorados. Cada uno de los fenómenos antes mencionados proporciona una técnica para investigar la dinámica ionosférica, lo cual es esencial para el entendimiento de las radiocomunicaciones. Se sugiere consultar los trabajos de Lawrence y otros (1964), Davies (1990), Yakovlev (2002) y Petrovski y Tsujii (2012) para conocer más detalles de los efectos de la ionosfera sobre las ondas de radio.

### 2.2.1. Índice de refracción y ecuación de Appleton-Hartree

Para entender la gran variedad de formas en que la ionosfera puede afectar las ondas de radio es necesario contar con una ecuación matemática que relacione la frecuencia de la onda de radio  $\nu$  con las propiedades de la ionosfera. La velocidad de propagación de una onda de radio por la ionosfera es  $v = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$  donde  $\mu$  y  $\epsilon$  son la permitividad y permeabilidad de la ionosfera respectivamente (y que a su vez son función de la frecuencia  $\nu$  de la onda). En el vacío, la velocidad de la onda es  $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0} = 3 \times 10^8$  m/s. La razón entre estas velocidades es el *índice de refracción*  $n = c/v$ . Si el índice de refracción es función de la frecuencia  $n(\nu)$ , como ocurre con la ionosfera, se dice que el medio es *dispersivo* (Davies, 1965).

El principal parámetro que determina como será afectada una onda de radio de frecuencia  $\nu$  que se propaga en ionosfera es la *frecuencia de plasma*. Dentro de un medio ionizado, por la distribución de las cargas positivas y negativas, se crean campos eléctricos que tienden a mantener la cuasi-neutralidad global del plasma. Si, por ejemplo, una carga negativa abandona la posición en la que las fuerzas eléctricas de todas las partículas se compensan entre sí, surge entonces un campo eléctrico que tiende a restablecer el equilibrio, haciendo que la carga negativa regrese a su posición inicial de equilibrio pero por inercia, la carga *pasa de largo* de esa posición, lo que trae como consecuencia la generación de otro campo eléctrico que causa el mismo efecto, de tal manera que se origina

una oscilación propia del plasma cuya frecuencia es llamada *frecuencia natural de oscilación del plasma* (Milantiev y Temko, 1983). Para la ionosfera se puede considerar que se desplazan solamente los electrones, en tanto que los iones permanecen inmóviles y, si se ignoran los movimientos térmicos, la frecuencia de oscilación del plasma ionosférico es:

$$v_N = \sqrt{\frac{e^2 N_e}{4\pi^2 m_e \epsilon_0}}, \quad (2.8)$$

en donde  $N_e$  es la densidad de electrones en partículas/ $m^3$ ,  $m_e$  la masa de los electrones y  $v_N$  es la frecuencia en  $Hz$ . Note que la frecuencia del plasma depende solamente de  $n_e$ , por lo que cada región de la ionosfera tendrá una frecuencia de plasma distinta.

El campo magnético de la Tierra actúa sobre la ionosfera haciendo girar a iones y electrones alrededor de las líneas de campo con frecuencia de giro  $v_B$  dada como (Davies, 1965):

$$v_B = \frac{eB}{2\pi m_e}, \quad (2.9)$$

en donde  $B$  es la intensidad del campo magnético. Se toma en cuenta únicamente a los electrones porque los iones (en su mayoría átomos y moléculas derivados del oxígeno y nitrógeno) son tan masivos que su frecuencia de giro es mucho menor en comparación con los electrones, así que se pueden asumir como estacionarios y sus efectos son despreciados. Por último, se tiene la frecuencia de colisión entre electrones con otras partículas ( $v_{col}$ ) que es inversamente proporcional al camino libre medio de las partículas<sup>6</sup>, siendo importante únicamente en las capas bajas de la ionosfera (Davies, 1965).

La teoría magneto-ionica desarrollada por E. V. Appleton y posteriormente complementada por D. Hartree sobre la propagación de ondas electromagnéticas en gases ionizados establece que para un medio dispersivo ionizado, el índice de refracción  $n$  esta dado por la *ecuación de Appleton-Hartree* (Hartree, 1931; Ratcliffe, 1959). Para expresar esta ecuación en su forma completa, resulta cómodo definir las cantidades adimensionales  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  derivadas de las frecuencias características de la ionosfera ( $v_N$ ,  $v_B$  y  $v_{col}$ ) como:

$$X = \frac{v_N^2}{v^2} = \frac{e^2 N_e}{4\pi^2 m_e \epsilon_0 v^2}, \quad (2.10)$$

$$Y = \frac{v_B}{v} = \frac{eB}{2\pi m_e v}, \quad (2.11)$$

---

<sup>6</sup>También deben considerarse las frecuencias de colisión entre iones y especies neutras pero para fines prácticos se menciona solamente la frecuencia asociada a los electrones.

$$Z = \frac{v_{col}}{v}. \quad (2.12)$$

En términos de estas cantidades, la ecuación de Appleton-Hartree para el índice de refracción de un medio dispersivo ionizado con densidad de electrones  $N_e$  permeado por un campo magnético  $B$  estará dada como (Budden, 1961; Davies, 1965; Davies, 1990):

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1-X-iZ)} \pm \sqrt{\left[\frac{Y_T^2}{2(1-X-iZ)}\right]^2 + Y_L^2}}, \quad (2.13)$$

en donde (+) y (-) denotan el haz ordinario y extraordinario respectivamente. Además,  $Y$  esta dividido en sus componentes longitudinal  $Y_L$  y transversal  $Y_T$  al campo magnético y están dados como:

$$Y_L = Y \cos \phi, \quad (2.14)$$

$$Y_T = Y \sin \phi, \quad (2.15)$$

en donde  $\phi$  es el ángulo formado entre la dirección de propagación de la onda y el campo magnético. Note que  $n$  es una cantidad compleja, con partes real e imaginaria (es decir, se puede expresar como  $n = \mu + i\chi$ ).

### 2.2.2. Propagación transionosférica

Una onda con frecuencia  $v$  mayor que la frecuencia de plasma  $v_N$  de la capa  $F_2$  es capaz de atravesar la ionosfera. Hay un valor límite de frecuencia conocido como *frecuencia crítica* que ocurre cuando  $v = v_N$  porque todas aquellas señales con frecuencia  $v$  menor a  $v_N$  serán reflejadas o absorbidas, mientras que las que tengan una frecuencia mayor a  $v_N$  podrán atravesar la ionosfera aunque pueden ser susceptibles a cambios de polarización, intensidad, experimentar difracción si la ionosfera presenta turbulencia e inclusive retraso temporal de la señal (Milantiev y Temko, 1983).

Típicamente la frecuencia crítica es de 10  $MHz$ , aunque esta cantidad es altamente variable dependiendo del lugar, la hora y del ciclo solar; ondas con valores por encima de la frecuencia crítica hasta 100  $MHz$  pueden atravesar la ionosfera pero son altamente susceptibles a sus variaciones; ondas entre 100 - 1000  $MHz$  son casi inmunes a la absorción y refracción ionosférica pero no lo son a la turbulencia de la capa  $F$  causante de difracción (detectado en tierra como centelleo en la señal) y a cambios de polarización mientras que para ondas mayores a 1  $GHz$  el mayor inconveniente son pequeños retrasos y ocasional centelleo (Ondoh y Marubashi, 2001).

Efecto	100 MHz	1 GHz	Dependencia con la frecuencia
Rotación de Faraday	30 rotaciones	108°	$\nu^{-2}$
Retardo ionosférico	25 $\mu\text{seg}$	250 nanoseg	$\nu^{-2}$
Refracción	$< 1^\circ$	$< 0.6'$	$\nu^{-2}$
Absorción	5 dB	0.05 dB	$\nu^{-2}$

**Tabla 2.1:** Estimación de los efectos máximos de dos señales de 100 y 1000 MHz al pasar por la ionosfera tomando como referencia un ángulo de incidencia menor a 30°. Datos tomados de Goodman (2005).

En la tabla 2.1 se detalla el grado de afectación de la ionosfera para señales de 100 MHz y 1 GHz por parte de los fenómenos discutidos anteriormente. Como la dependencia con la frecuencia es de  $\nu^{-2}$ , al incrementar la frecuencia disminuye de forma cuadrática la afectación ionosférica. También es importante el ángulo de incidencia de la onda de radio. Si la incidencia es cerca del cenit de forma perpendicular el grado de afectación será mínimo en tanto que para ángulos mayores a 30° la alteración incrementa. Se sugiere consultar los trabajos de Lawrence y otros (1964), Goodman (2005) y Petrovski y Tsujii (2012) para más información acerca de la propagación transionosférica de ondas de radio.

Retomando la ecuación de Appleton-Hartree, si la frecuencia  $\nu$  es mayor que la frecuencia crítica de la capa  $F_2$ , entonces  $X \ll 1$  e ignorando el campo magnético y las colisiones (es válida esta suposición dado que  $\nu_B < \nu_N < \nu$  y porque en la capa  $F_2$  casi no hay colisiones entre partículas, así que  $Y_T = Y_L = Z \cong 0$ ) entonces el segundo término de la ecuación es mucho menor a 1, de tal manera que la ecuación 2.13 se reescribe como (Ondoh y Marubashi, 2001):

$$n \cong 1 - \frac{X}{2} = 1 - \frac{e^2}{8\pi^2 m_e \epsilon_0} \frac{N_e}{\nu^2}. \quad (2.16)$$

El índice de refracción es menor a la unidad por una cantidad proporcional a la densidad de electrones  $e$  e inverso al cuadrado de la frecuencia puesto que  $n$  es 1 en el vacío ( $N_e = 0$ ). Cuando  $\nu$  y  $n_e$  son tales que  $X = 2$ , entonces  $n = 0$  y la onda es entonces reflejada. El segundo término de la ecuación 2.16 también indica que la señal de frecuencia  $\nu$  será detenida parcialmente por la ionosfera, lo que se traduce como un retraso de la onda que dependerá de la trayectoria, de  $n_e$  y de  $\nu$  (Ondoh y Marubashi, 2001). En forma integral este retraso temporal de la señal se expresa de la siguiente manera:

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_{\ell} (1 - n) d\ell, \quad (2.17)$$

en donde  $c$  es la velocidad de la luz y  $\ell$  es la trayectoria que sigue la onda para atravesar la ionosfera. En el caso particular del vacío  $n = 1$  este retraso es cero (no hay electrones que obstaculicen la señal). Sustituyendo 2.16 en 2.17 se llega a la ecuación

$$\Delta t = \frac{e^2}{8\pi^2 m_e \epsilon_0 c v^2} \int_{\ell} N_e d\ell = \frac{A}{v^2} N_T, \quad (2.18)$$

con  $A$  una constante y  $N_T$  dados como:

$$A = \frac{e^2}{8\pi^2 m_e \epsilon_0 c} \cong 1,345 \times 10^{-7} m^2/s, \quad (2.19)$$

$$N_T = \int_{\ell} N_e d\ell. \quad (2.20)$$

$N_T$  es la densidad de electrones integrada a lo largo de la trayectoria de la onda, o dicho de otro modo, es el número de electrones por sección de área unitaria que encuentra la señal en su recorrido a través de la ionosfera y es conocido como el *contenido total de electrones* (TEC por sus siglas en inglés).

### 2.2.3. El sistema global de navegación por satélite GNSS

Para medir el retardo de una señal monocromática es necesaria otra señal que sirva como referencia. Se necesitan al menos dos señales de frecuencias diferentes, coherentes, moduladas de la misma forma para que una de ellas sirva como referencia de tiempo para medir el retardo de la otra, en eso radica la importancia de los sistemas satelitales actuales como el GPS. El NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite Timing and Ranging Global Position System) o simplemente GPS es un sistema satelital de navegación desarrollado y operado por EUA con propósitos civiles y militares puesto en marcha en 1978 que funciona a partir de señales transmitidas por los satélites en órbita hacia unidades receptoras en tierra para determinar la posición geográfica del receptor. Los satélites GPS orbitan nuestro planeta a una altura aproximada de 20,200 *km* sobre la superficie en órbitas casi circulares con periodos orbitales de 11 horas y 58 minutos (la mitad del día sideral) lo que implica que las órbitas de los GPS están en resonancia 2:1 con la rotación terrestre. Los satélites GPS transmiten información vía dos señales de radio en banda L (intervalo de frecuencias entre 1 a 2 *GHz*) denominadas L1 ( $\nu_1 = 1.575$  *GHz*) y L2 ( $\nu_2 = 1.228$  *GHz*) obtenidas como múltiplos de una frecuencia fundamental  $\nu_o = 10.23$  *MHz* generada a partir de oscilador de alta precisión con relojes atómicos montados en los satélites (Goodman, 2005).

El análogo ruso del sistema GPS, el Global Navigation Satellite System (GLONASS) y el sistema Galileo de la unión europea tienen características similares al GPS estadounidense. Para homologar todos estos sistemas se le llama GNSS (por Global Navigation Satellite System) a los sistemas de navegación y posicionamiento en general. En los últimos 20 años los GNSS han servido como una herramienta muy útil para estudios científicos, por eso la comunidad científica ha hecho un esfuerzo para crear estándares en GNSS para análisis y adquisición de datos. Producto de ese esfuerzo se creó el International

GPS Service o IGS (Beutler y otros, 1999). El IGS en conjunto con agencias, organizaciones y universidades alrededor del mundo crearon estándares para tener las efemérides de todos los satélites GNSS activos, distinguiendo entre efemérides rápidas (para aplicaciones en tiempo real), finales (para un procesamiento posterior) y de predicción (que usan los datos anteriores para pronosticos).

#### 2.2.4. Medición del contenido total de electrones TEC

Las señales L1 y L2 son enviadas coherentemente desde los satélites GNSS hacia el receptor terrestre. Como sus frecuencias son distintas, se espera que lleguen al receptor con un desfase temporal que puede ser medido y usado para calcular el contenido de electrones ionosférico. Un método para calcular este retraso de tiempo ( $\delta t$ ) en segundos entre las señales L1 y L2 es con la ecuación análoga a 2.18 expresada como:

$$\delta t = A \left( \frac{1}{v_2^2} - \frac{1}{v_1^2} \right) N_T. \quad (2.21)$$

Al sustituir  $A$  de la ecuación 2.19 y los valores de frecuencia de L1 y L2 tenemos que el TEC esta dado como:

$$N_T = 2,85 \times 10^{25} \delta t, \quad (2.22)$$

y tiene unidades de electrones/ $m^2$ . En época de máxima actividad solar a latitudes medias, el TEC puede alcanzar valores de  $N_T = 10^{17} \sim 10^{18} \text{ el}/m^2$  (Goodman, 2005).

Existen otros métodos para estimar el TEC en la ionosfera. Por ejemplo, usando señales de satélites con órbitas polares a altitudes cercanas a 1000 km que se comunican con frecuencias entre 150 - 400 MHz a un solo receptor es posible medir también el TEC usando la técnica de corrimiento Doppler, mientras que usando satélites geoestacionarios es posible monitorear constantemente los cambios de polarización del enlace entre el satélite y el receptor en tierra y a partir de esos cambios, estimar el TEC por rotación Faraday por mencionar algunos métodos alternativos para el cálculo de TEC además del uso de GPS. Para más detalles de éstas y otras técnicas se sugiere revisar los trabajos de Lawrence y otros (1964) y el capítulo 4 de Ondoh y Marubashi (2001) .

#### 2.2.5. Densidad de electrones integrada

El estado general de la ionosfera es descrito por la densidad de electrones  $N_e$ . Para propagación de ondas de radio transionosféricas sin embargo, la densidad de electrones integrada a lo largo de la trayectoria que recorre dicha onda o TEC es de mayor utilidad. El TEC es usualmente expresado en *unidades TEC* o *uTEC*; un uTEC equivale a  $10^{16}$  electrones contenidos en un cilindro con área de un metro cuadrado en su base centrado en la trayectoria de propagación de la onda (Ondoh y Marubashi, 2001).



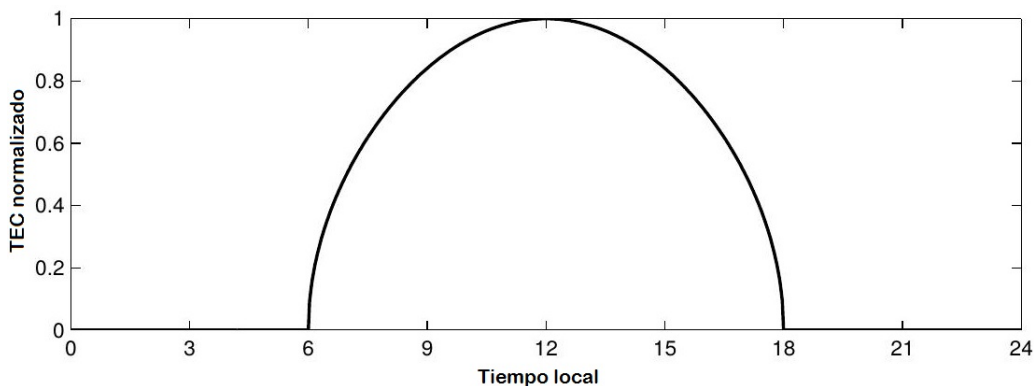
Recordemos del modelo de Chapman (sección 2.1.3) que la densidad de electrones  $N_e$  depende de la altura, del ángulo de incidencia solar  $\chi$  y de la función de producción  $q_{max}$ , de tal manera que para una ionosfera que satisface el modelo de Chapman, el TEC se obtiene integrado a lo largo de una trayectoria  $\ell$  la capa de Chapman con  $N_e$  dado por la ecuación 2.6 de la siguiente manera:

$$TEC = \int_{\ell} N_e(z, \chi) dl = \int_{\ell} N_{e,0} e^{\frac{1}{2}(1 - \sec(\chi)e^{-z})} dz. \quad (2.23)$$

Esta cantidad se refiere en algunos textos como *slant* TEC o *line of sight* (LOS) TEC (Petrovski y Tsujii, 2012). En la mayoría de los casos el TEC vertical, es decir, el TEC reducido a una trayectoria cenital (denotado como vTEC) es la cantidad de mayor interés para estudiar la ionosfera en una cierta ubicación geográfica y se obtiene a partir de la ecuación 2.23 haciendo  $\chi = 0$ :

$$vTEC = \int_{\ell} N_e(z, 0) dz = \int_0^{\infty} N_{e,0} e^{\frac{1}{2}(1 - e^{-z})} dz. \quad (2.24)$$

En la figura 2.4 se muestra el resultado de integrar la ecuación 2.24 suponiendo una ubicación geográfica con latitud igual a la declinación del Sol, de tal manera que la ionización y la máxima densidad de electrones se encuentran exactamente en una trayectoria a lo largo del cenit; como el vTEC es proporcional a la máxima densidad de electrones, alcanza su valor máximo a mediodía (suponiendo que el Sol sale a las 6 am y se pone 12 horas después). El perfil del vTEC es cosenoidal debido a la dependencia de la densidad de electrones máxima con el ángulo  $\chi$  (ecuación 2.7).



**Figura 2.4:** Gráfica idealizada y normalizada del TEC vertical obtenida a partir de la ecuación 2.24 integrando la capa de Chapman (ecuación 2.7) como función del tiempo solar.

Este perfil del TEC tiene algunos inconvenientes: Primero, predice que el TEC es cero durante la noche, lo cual no sucede; también establece que el máximo valor ocurre con el Sol en el cenit, esto no sucede todos los días y no toma en cuenta que la ionosfera

tiene un tiempo de retardo a la radiación ionizante del Sol, es decir, la fotoionización no es instantánea. En segundo lugar, se hace la suposición de que la ionosfera completa es una capa de Chapman sin tener en cuenta que se divide en capas, en particular la capa *F*, que es la región de más alta población de electrones, no sigue el modelo de Chapman porque este modelo no toma en cuenta los procesos de transporte ni las variaciones del ciclo solar, que determinan el comportamiento de esta región.

### 2.3. Irregularidades ionosféricas y centelleo

Un componente esencial de la ionosfera son las estructuras de pequeña escala en la densidad electrónica que distorsionan las ondas de radio en enlaces transionosféricos. En ese sentido, uno de los problemas prioritarios del programa de Clima Espacial de E. U. A y de Europa (reporte de la ITU, 1995; Basu y otros, 2002) es el entendimiento de:

- Las interacciones termosfera-ionosfera-magnetosfera que controlan la formación y evolución de irregularidades en la densidad electrónica con escalas espaciales de 10 km a 50 m que causan centelleo.
- La relación entre esas irregularidades y los efectos del centelleo en ciertos sistemas de comunicaciones.

En la ionosfera hay concentraciones irregulares en densidad electrónica que no son estacionarias, cambian de tamaño y posición continuamente, por lo que al ser observadas desde un punto fijo causan que una onda de radio que las atraviesa cambie con el tiempo (en otras palabras, la señal *titila* o *centellea*). El *centelleo ionosférico* se puede definir como la fluctuación aleatoria en la intensidad de una señal producida por la variación espacial de estructuras ionosféricas en movimiento, o dicho de otro modo, una onda de radio que atraviesa una región irregular de la ionosfera se difracta causando cambios temporales en la señal debidas al movimiento de dicha región. El estudio de esa señal distorsionada permite deducir algunas características de las irregularidades de la capa *F*.

Los estudios de centelleo ionosférico iniciaron a finales de la década de 1940 en los años posteriores a la segunda guerra mundial, con el auge de las grandes antenas usadas durante la guerra como radares y la mejora de los receptores de radio, se reorientó el uso de esta tecnología hacia fines académicos iniciando así una época destacada en la radioastronomía. Hey y otros (1946) reportaron que la radiofuente Cygnus mostraba fluctuaciones en observaciones a 68 MHz. Para aclarar si estas fluctuaciones eran variaciones propias de la radiofuente o un efecto atmosférico, estudios realizados en el Reino Unido por Smith y otros (1950) y Bolton y otros (1953) en Australia mostraron que las fluctuaciones no eran coincidentes cuando la radio fuente era observada simultáneamente con radiotelescopios separados. Las dos posibles causas de dichas fluctuaciones (que no son más que patrones irregulares de difracción) son discutidas por Ryle y Hewish (1950). La

primera de ellas es difracción debida al medio interestelar, que implicaría estructuras con dimensiones de al menos 900 *km* pero esta idea fue descartada con las observaciones de radiotelescopios espaciados. La otra alternativa es la difracción por irregularidades en la ionosfera de la Tierra. Estudios teóricos de las características de la difracción de señales provenientes de radio fuentes son tratados a detalle por Ratcliffe (1956) y Booker (1958).

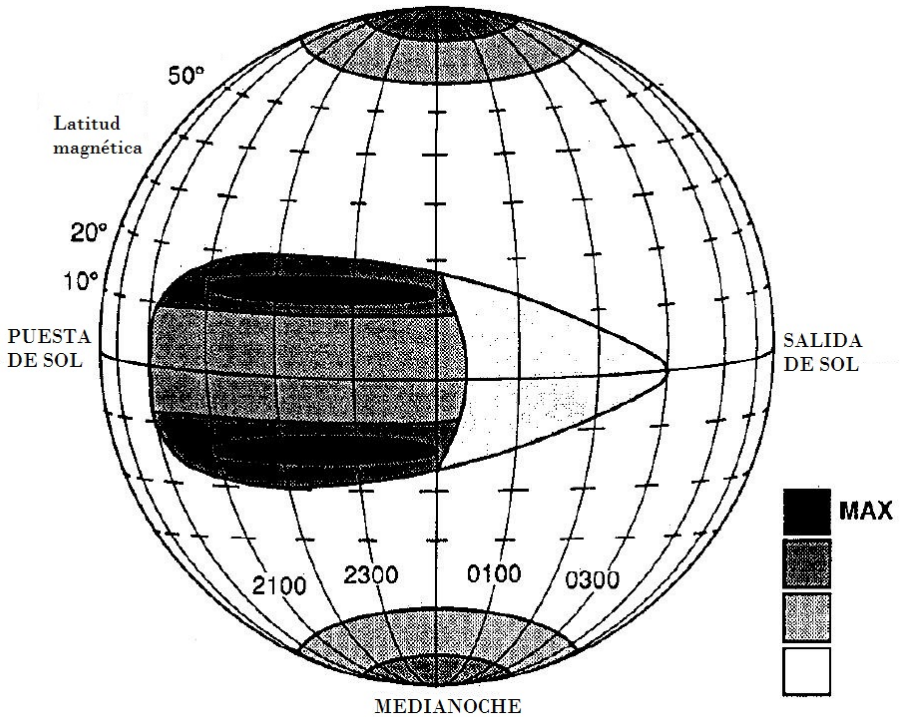
Los primeros casos de centelleo presente en ondas de radio cósmicas se detectaron en frecuencias menores a 100 MHz (Hey y otros, 1946). Estudios posteriores mostraron que al incrementar la frecuencia de las ondas de radio, el centelleo seguía presente aunque su intensidad disminuía. Booker (1958) establece que *la amplitud de las fluctuaciones del centelleo es proporcional al cuadrado de la longitud de onda*. Esta aseveración es en realidad un poco más compleja ya que esta involucrado el tamaño angular de la fuente y es válida siempre que en centelleo no sea intenso, por lo que las transmisiones de radio de alta frecuencia son menos propensas al centelleo.

Con el inicio de la era espacial en la década de 1950 el estudio de la ionosfera se diversificó porque fue posible poner en órbita satélites artificiales que hacen las veces de fuentes radio, permitiendo así estudios simultáneos de la ionosfera a diferentes frecuencias. El lanzamiento de la familia de satélites de baja altitud Sputnik, en particular el Sputnik 1 y 3, permitieron hacer observaciones ionosféricas a 20 y 40 *MHz* respectivamente que contribuyeron al entendimiento de la ocurrencia e intensidad del centelleo ionosférico sobre todo el planeta, algo que no habría sido posible con observaciones de fuentes de radio estelares en contados observatorios (Aarons, 1997), de modo que los trabajos con fuentes de radio naturales prepararon el terreno para estudios de propagación transionosférica con el uso de satélites artificiales. Consideraciones acerca de la teoría desarrollada para explicar el efecto del diámetro angular de la fuente de radio, la dependencia con la frecuencia y el efecto de la actividad solar y geomagnética sobre la propagación ionosférica fue desarrollada por Booker (1958), Lawrence y otros (1964) y completada posteriormente por Yeh y Liu (1982).

### 2.3.1. Características globales del centelleo

Con las aportaciones hechas por las señales de satélite, se confirmó que el centelleo ionosférico tiene una marcada dependencia con la latitud magnética. En la figura 2.5 se muestra la intensidad del centelleo (en escala arbitraria) para frecuencias de VHF y UHF en época de máxima actividad solar. El centelleo ionosférico es un fenómeno nocturno que se intensifica en las horas posteriores a la puesta del Sol, cesando cerca de medianoche (aunque de acuerdo a Basu y otros, 2002 para frecuencias menores a 250 *MHz* se puede prolongar varias horas más). Latitudinalmente se tiene la zona del ecuador magnético, donde el centelleo es moderado después de la puesta del Sol; alrededor de esta región, a  $\pm 15^\circ$  aproximadamente se sitúa la zona de centelleo más intenso. En la región de la ionosfera auroral y polar el centelleo también puede llegar a ser intenso y no

únicamente durante la noche. La región de latitudes medias presenta centelleo débil de forma muy esporádica. Las fronteras de las zonas aurorales y ecuatoriales son variables y dependen de la actividad solar y magnética (Aarons, 1982).



**Figura 2.5:** Esquema de la intensidad del centelleo como función de la latitud magnética y la hora. Imagen obtenida de Aarons (1982)

Observaciones metódicas mostraron dos picos de ocurrencia de centelleo debido a la ionosfera, uno a mediodía y otro a medianoche que de acuerdo a Wild y Roberts (1956) se deben a la aparición de la capa esporádica *E* y a irregularidades en la capa *F* respectivamente. En latitudes ecuatoriales un fenómeno en la capa *F* típicamente nocturno es el incremento anormal y extendido de la ionización debido a burbujas de plasma ionosférico alineadas con el campo magnético generadas por la inestabilidad de Rayleigh-Taylor (Liu y Franke, 1986) conocido como *ensanchamiento la capa F* (*spread-F* en inglés), discutida brevemente en la sección 2.1.5. Diversos trabajos sugieren una correlación entre la ocurrencia del *spread-F* y el centelleo (ver por ejemplo Lawrence y otros, 1964; Liu y Franke, 1986 y Aarons, 1982) sin embargo no hay una relación estricta entre la intensidad y duración de ambos fenómenos. El centelleo es prolongado en las regiones aurorales y polares, débil y esporádico en latitudes medias e intenso cerca del ecuador.

En la zona que rodea al ecuador, donde es más intenso, el centelleo una vez que inicia se prolonga por varias horas y es profundo (hasta en un factor de 2 en amplitud entre máximo y mínimo) y es lento (de 1 a 10 oscilaciones por minuto). Mediciones con ionosondas y satélites muestran que este centelleo se debe a irregularidades de tamaño entre 200 y 1000 *m* que se mueven en dirección este-oeste con marcada orientación a lo largo de las líneas de campo magnético (Ondoh y Marubashi, 2001). El centelleo en latitudes aurorales y polares no tiene una marcada dependencia diurna y consiste de oscilaciones rápidas con periodos de 1 a 3 segundos cuando llega a ser intenso (Hunsucker y Hargreaves, 2003) que se intensifican durante tormentas geomagnéticas puesto que los movimientos de las concentraciones de densidad están ligadas fuertemente al campo magnético. En época de máxima actividad solar se incrementa la precipitación de partículas en esta región, lo cual incrementa la conductividad de la ionosfera y crea intensos flujos de corriente que intensifican el centelleo (Aarons, 1982).

En latitudes medias, centelleo nocturno ocurre en la región *F* o a alturas que pueden llegar a los 1000 *km* debido al spread-F, mientras que durante el día el centelleo es causado por la presencia de la capa esporádica *E*. En todas las latitudes, el centelleo es más intenso durante el periodo de máxima actividad solar, cuando la ionización de la capa *F* es mayor y las irregularidades que dan lugar al centelleo se desarrollan en un ambiente de mayor densidad electrónica. Para una discusión detallada sobre la morfología del centelleo se sugiere consultar Booker (1958), Yeh y Liu (1982) y Aarons (1982).

LA implementación de los sistemas de posicionamiento global GNSS han permitido en los últimos años el estudio de la ionosfera a través del cálculo del contenido total de electrones TEC, el cual se ha convertido en un parámetro esencial para el monitoreo de la ionosfera por la cercana relación que guarda con la densidad de electrones ionosférica. La principal ventaja del TEC es que permite estudiar la ionosfera en escalas de tiempo que van desde fracciones de segundo hasta años, de modo que es posible estudiar la influencia que tiene en Sol sobre la ionosfera de manera confiable, así como conocer el estado de la ionosfera en cualquier ubicación del planeta. La desventaja es que no proporciona información detallada acerca de los cambios de densidad electrónica por capas o cambios de altura de las mismas (como si lo hacen las ionosondas por ejemplo).

### 3.1. Cálculo de TEC con el código *ionFR*

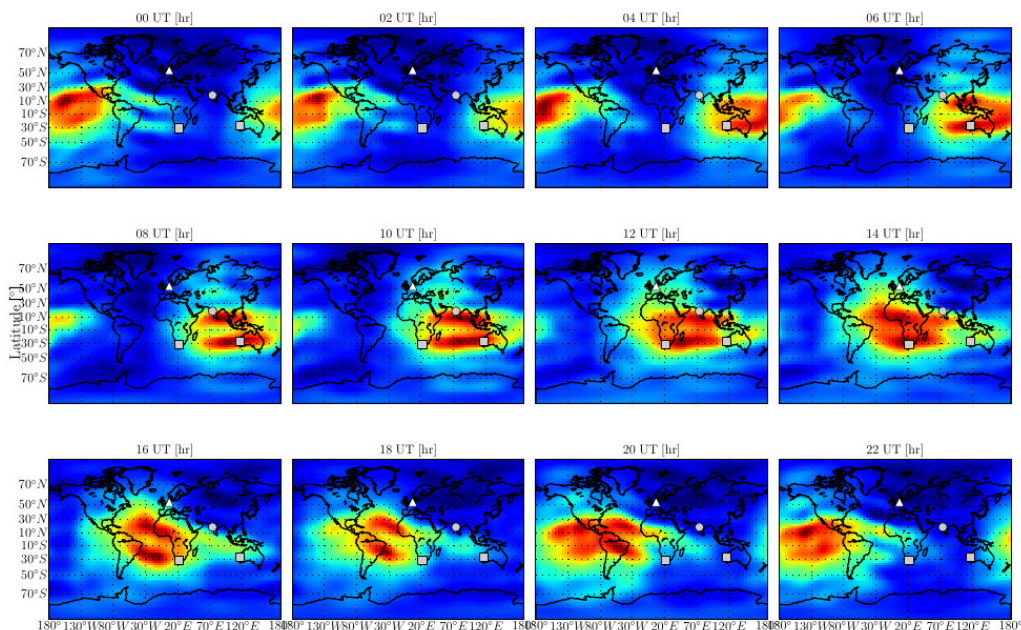
Entre los muchos métodos que existen para calcular el TEC en un sitio, se optó por usar el código *ionFR* (escrito casi totalmente en lenguaje de programación *Python*), se encuentra disponible de manera gratuita en el sitio [sourceforge](http://sourceforge.net)<sup>1</sup>. Existen 2 versiones de este código: La más austera proporciona una relación de valores de TEC dados en *uTEC* para una cierta trayectoria con ascensión recta y declinación fijas en una ubicación geográfica determinada. La segunda versión, más completa, además del TEC, calcula la magnitud del campo geomagnético y el ángulo de rotación Faraday a lo largo de la trayectoria con los parámetros antes mencionados. El código es lo suficientemente robusto como para que los valores calculados de TEC y rotación Faraday sean comparables a los obtenidos con otros métodos como lo muestra Sotomayor-Beltran y otros (2013). Para obtener los valores de TEC y campo geomagnético, el código *ionFR* usa mapas ionosféricos en formato IONEX<sup>2</sup> (el nombre viene de IONosphere map EXchange) y el IGRF11 (International Geomagnetic Reference Field) respectivamente.

---

<sup>1</sup><http://sourceforge.net/projects/ionfarrot/>

<sup>2</sup>Los archivos IONEX proporcionan valores de TEC globales. Para más información se recomienda consultar el sitio <http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/>

La información acerca de la cantidad de electrones que hay en la ionosfera, necesaria para que el código *ionFR* calcule el  $TEC_{\ell}$  proviene de la base de datos de CODE (Center for Orbit Determination in Europe) que provee de mapas globales ionosféricos (o GIMs por Global Ionospheric Maps) en formato IONEX, disponibles de manera libre vía ftp<sup>3</sup>. Los archivos IONEX de CODE son obtenidos usando los datos de  $\sim 200$  estaciones GNSS pertenecientes a IGS (International Global navigation satellite system Service). En la figura 3.1 se ilustran un ejemplo de 12 mapas obtenidos del archivo IONEX del 11 de abril de 2011.



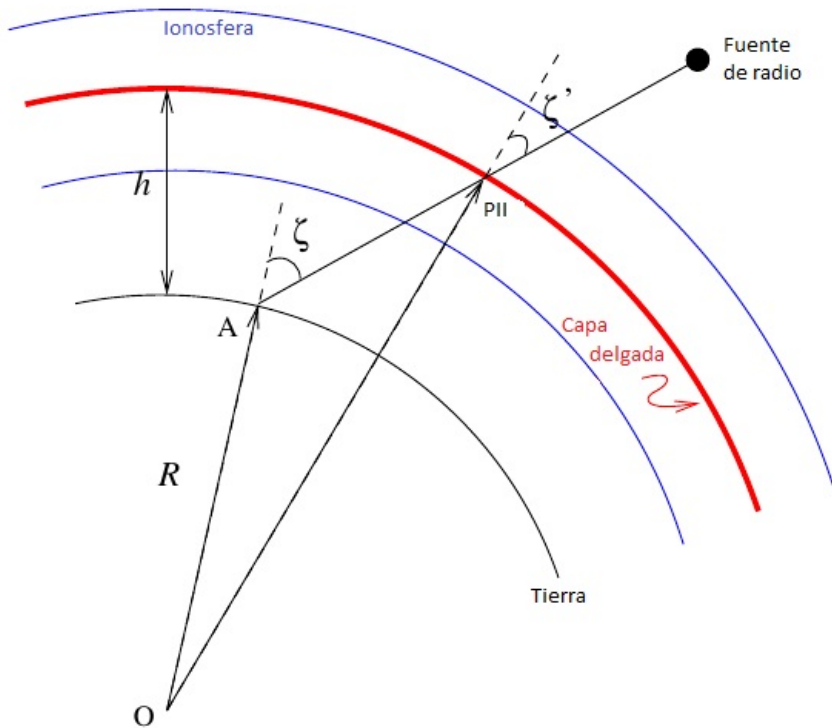
**Figura 3.1:** Ejemplo de los mapas obtenidos con un archivo IONEX. Imagen tomada de (Sotomayor-Beltran y otros, 2013).

### 3.1.1. Modelo de capa delgada y función de mapeo

Para calcular el TEC a lo largo de la trayectoria que sigue una señal, el código *ionFR* supone que la ionosfera consiste de una capa delgada con grosor despreciable, es decir, se asume la ionosfera es un cascarón esférico alrededor de la Tierra (ver figura 3.2).

Para encontrar el TEC a lo largo de una trayectoria con ascensión recta y declinación fijas (o *slant TEC*) es necesario encontrar el *punto ionosférico de incidencia* (PII). Recordemos de la ecuación 2.20 que el *slant TEC* está definido a lo largo de la trayectoria entre la fuente de radio y el punto A de la figura 3.2. Para facilitar la estimación de PII,

<sup>3</sup>ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE



**Figura 3.2:** Esquema del modelo de capa delgada que usa el código *ionFR* para calcular el TEC. Imagen tomada de Sotomayor-Beltran y otros (2013).

el código *ionFR* asume un radio terrestre fijo de  $R = 6371 \text{ km}$ . Dado el triángulo definido por los puntos A, O y PII de la misma figura, el valor del ángulo cenital ( $\zeta'$ ) en PII se deriva usando la ley de los senos

$$\text{sen}(\zeta') = \frac{R}{R+h} \text{sen}(\zeta), \quad (3.1)$$

en donde  $h$  es la altitud a la que se encuentra el cascarón esférico cuyo valor es de  $350 \text{ km}$  que es la altura a la que se encuentra la mayor concentración de electrones. Siguiendo el mismo razonamiento se usa trigonometría esférica para determinar la latitud, longitud y acimut de PII. Ya obtenidos los parámetros geométricos se calcula el TEC sobre la vertical en una ubicación de latitud y longitud fijas haciendo uso de los mapas IONEX. Los archivos IONEX proveen el contenido total de electrones de la ionosfera sobre la vertical ( $vTEC$ ) en un mallado geográfico ( $\Delta_{lon} = 5^\circ$ ,  $\Delta_{lat} = 2.5^\circ$ ). La resolución temporal que proveen los archivos IONEX es de 2 horas. Para aumentar esta resolución espacial, el código *ionFR* crea nuevos GIMs con resolución de 1 hora usando el esquema de interpolación que toma en cuenta la rotación de la Tierra como propone Schaer y otros (1988) de tal manera que el código interpola el valor de  $vTEC$  dado por el archivo



IONEX en una ubicación geográfica obteniendo así el TEC en una cierta dirección del cielo con resolución temporal de 1 hora. La incertidumbre de los valores de TEC es de 2 a 5  $uTEC$  (Schaer y otros, 1988). Una vez obtenido el  $vTEC$ , se calcula el valor de  $TEC_\ell$  a partir del ángulo  $\zeta'$  que hace el PII con respecto al cenit con la función de mapeo (ecuación 3.2).

$$TEC_\ell = \frac{vTEC}{\cos(\zeta')}. \quad (3.2)$$

## 3.2. Centelleo ionosférico

Una onda que se propaga a través de un medio irregular acumulará pequeños cambios de amplitud y fase, dando como resultado variaciones en estos dos parámetros. El centelleo en las señales de fuentes de radio (extragalácticas o satelitales) es consecuencia de la existencia de fluctuaciones aleatorias en la densidad electrónica de la ionosfera. Dichas regiones irregulares distorsionan el frente de onda incidente, dando lugar a una onda emergente con una modulación de fase aleatoria. Conforme la onda se propaga hacia el receptor en tierra, de acuerdo al principio de Huygens, cada pequeña región del frente de onda emergente de la ionosfera puede ser tratado como una fuente secundaria de ondas cuya superposición constituye el frente de onda un instante de tiempo posterior, repitiéndose este proceso hasta que la onda es captada por el receptor. Al avanzar la onda emergente, las regiones del frente de onda con distinta fase afectan a la amplitud de la onda, lo que da lugar a un patrón de difracción. El fenómeno de difracción es aplicado para determinar como la amplitud y la fase de la señal recibida fueron afectados por su paso a través de la ionosfera (Hargreaves, 1992).

### 3.2.1. Difracción por una rejilla delgada

Para obtener información de la ionosfera a partir del patrón de difracción observado en tierra es necesario hacer algunas suposiciones acerca de la onda y de la ionosfera misma, que a partir de ahora será tratada como una *rejilla de difracción*. Para que ocurra difracción es necesario que (Hargreaves, 1992):

- Una fuente de ondas de radio muy lejana (radiogalaxia, cuasar o un remanente de supernova) de tal manera que el frente de onda pueda considerarse plano.
- Una región que sea un obstáculo para las ondas (las irregularidades espaciales en el plasma ionosférico).
- Un punto de observación (el receptor), que es donde se capta el patrón de difracción.

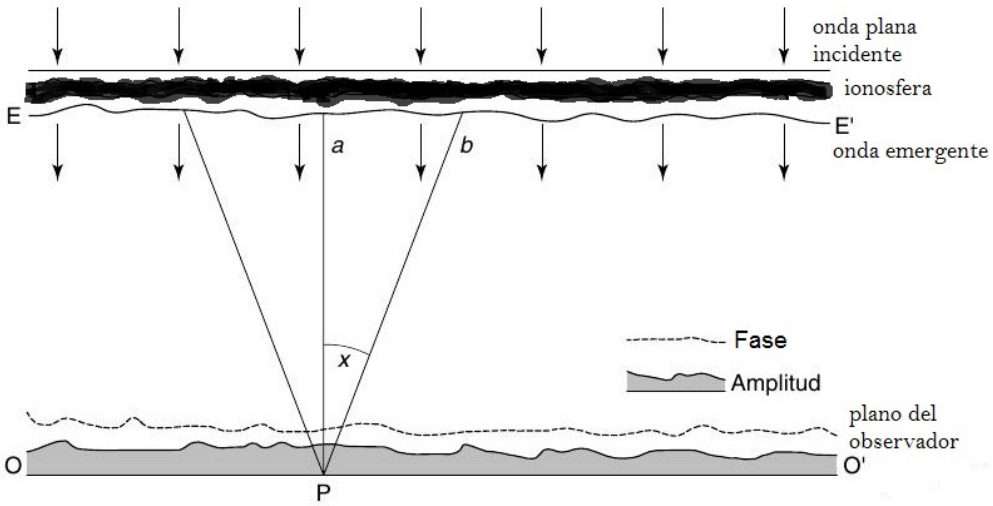
La longitud de onda ( $\lambda$ ) de la señal de radio que se propaga por la ionosfera, la distancia entre la rejilla de difracción y el receptor ( $z$ ) son cantidades importantes porque a partir de ella se calcula el parámetro principal a considerar para estudiar el patrón de difracción, el *radio de Fresnel* ( $r_f$ ), que se tratará a detalle más adelante y está definido como:

$$r_f = \sqrt{\pi\lambda z}. \quad (3.3)$$

El caso de centelleo ionosférico más simple a tratar es el de una rejilla de difracción de ancho despreciable ubicada a una altura  $z$  sobre el receptor, que solamente introduce pequeñas perturbaciones de fase a lo largo del frente de onda. Para fines prácticos la fuente esta en infinito y se desprecian efectos de absorción y la señal incide de manera perpendicular a la rejilla, por lo que no hay distorsión por refracción. El frente de onda es plano (puesto que se supone que la fuente está en infinito) pero el frente de onda que emerge de la pantalla difractora es irregular, como se muestra en la figura 3.3. El frente de onda irregular que emerge de la ionosfera se propaga hasta llegar al receptor en tierra (el punto P en la figura 3.3). Al propagarse, se acrecentan las irregularidades en la fase de la señal al mismo tiempo que se genera un *patrón de difracción* que genera cambios en la amplitud de la señal (a saber, regiones de interferencia constructiva y destructiva). Dependiendo de la distancia  $z$  y  $\lambda$  serán las características del patrón de difracción captado por el receptor (Hargreaves, 1992). Dado que las variaciones de amplitud registradas en el receptor se deben a la contribución de varias regiones de la rejilla de difracción, no existe una relación *uno a uno* entre las irregularidades de la ionosfera y la señal captada en el receptor, sin embargo, es posible establecer algunas relaciones estadísticas.

### 3.2.2. Espectro de potencia del centelleo

La conexión entre las propiedades de la ionosfera y las fluctuaciones que ésta induce en el receptor es el *espectro de potencia angular*. Del mismo modo que una onda modulada en tiempo [ $f(t)$ ] puede ser expresada como un espectro de frecuencia mediante una transformada de Fourier [ $F(\nu)$ ], una onda modulada en distancia [ $f(d)$ ] se puede relacionar mediante una transformación de Fourier en un espectro angular [ $F(\text{sen } \theta)$ ] donde  $d$  es la longitud de las irregularidades y  $\theta$  es el ángulo de propagación medido con respecto al cenit. Para obtener la información completa de las irregularidades ionosféricas son necesarios los espectros angular y de amplitud; el problema de obtener ambos es que resulta relativamente sencillo medir la amplitud de una señal pero es muy complicado medir su fase, sin embargo, numerosos trabajos (ver por ejemplo Ratcliffe, 1956; Fremouw y otros, 1980; Hargreaves, 1992) muestran que si las observaciones se hacen suficientemente lejos de la pantalla difractora y si la modulación de fase inducida por ésta es pequeña (menor a 1 radian) entonces las propiedades estadísticas de los espectros de amplitud y angular son similares, dicho de otro modo, estudiando únicamente el es-



**Figura 3.3:** Esquema de la difracción de una onda plana que incide sobre una rejilla de difracción delgada (capa  $F$  de la ionosfera). Figura adaptada de Hargreaves, 1992.

pectro de amplitud de la señal es posible conocer las propiedades de las irregularidades presentes en la ionosfera.

Suponiendo irregularidades ionosféricas rígidas que se mueven en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda de radio con velocidad  $V$  entonces la relación entre el espectro de potencia de las fluctuaciones de la señal recibida  $P_I(\nu)$  y el espectro de potencia de la fase de dichas fluctuaciones  $P_\phi(\nu)$  para una capa difractora delgada en una dimensión esta dada por (ver Bowhill, 1961; Budden, 1971; Rufenach, 1971):

$$P_I(\nu) = P_\phi(\nu)F(\nu), \quad (3.4)$$

en donde  $F(\nu)$  es el factor de filtrado de Fresnel definido como:

$$F(\nu) = 4\text{sen}^2(\nu^2/\nu_f^2), \quad (3.5)$$

siendo  $\nu_f$  la *frecuencia de Fresnel*. La frecuencia de Fresnel es esencialmente la frecuencia temporal correspondiente al recíproco espacial del radio de Fresnel (ecuación 3.3) y se define como:

$$\nu_f = \frac{V_f}{\sqrt{\pi\lambda z}}, \quad (3.6)$$

en donde  $V_f$  es la velocidad de movimiento de la rejilla de difracción.

### 3.2.3. Efectos de las zonas de Fresnel

La distancia entre capa de irregularidades ionosféricas y el receptor ( $z$ ) es importante porque el *radio de Fresnel* (o primera zona de Fresnel como también se le conoce) depende de  $z$  y de la longitud de onda de la señal ( $\lambda$ ). Como se mencionó antes, la ionosfera induce variaciones de fase (más no de amplitud) en la señal de radio, las cuales evolucionan hasta llegar al receptor; si éste último se encuentra muy cerca de la ionosfera no se puede desarrollar el patrón de difracción por lo que a esta configuración de  $\lambda$  y  $z$  se le conoce como *campo cercano*. Si la distancia  $z \gg \lambda$  entonces estamos en el régimen de *campo lejano*, que es donde se desarrolla la *difracción de Fresnel* (Hargreaves, 1992). De acuerdo a la figura 3.3, la primera zona de Fresnel se extiende desde el punto  $a$  hasta el punto  $b$  sobre la rejilla de difracción tal que  $\overline{Pb} - \overline{Pa} = \lambda/4$ ; las señales que recorren estas dos trayectorias se superponen en el receptor con un desfase de  $180^\circ$  que crea interferencia destructiva (y por lo tanto el centelleo), de modo que la superficie irregular se puede dividir en *zonas de Fresnel* cuyas distancias a P difieren sucesivamente en  $\lambda/2$ .

En la ionosfera hay irregularidades de diversos tamaños y no todas ellas van a difractar la onda de radio de la misma forma. La escala de tamaño de las irregularidades ( $d$ ) más propensa a crear interferencia corresponde a  $r_f$ . Suponiendo que la capa  $F$  (capa que difracta la onda de radio) se encuentra a una altura  $z = 350 \text{ km}$  y si  $\lambda = 2.15 \text{ m}$ , entonces por la ecuación 3.3 el radio de Fresnel es de  $1.54 \text{ km}$ . Aquellas estructuras ionosféricas de mayor tamaño que  $r_f$  no van a generar cambios en la amplitud de la señal porque la distancia no es suficiente para que se desarrolle interferencia; mientras que las de menor tamaño que el radio de Fresnel no se difractan tan eficientemente como para que su contribución al centelleo sea importante.

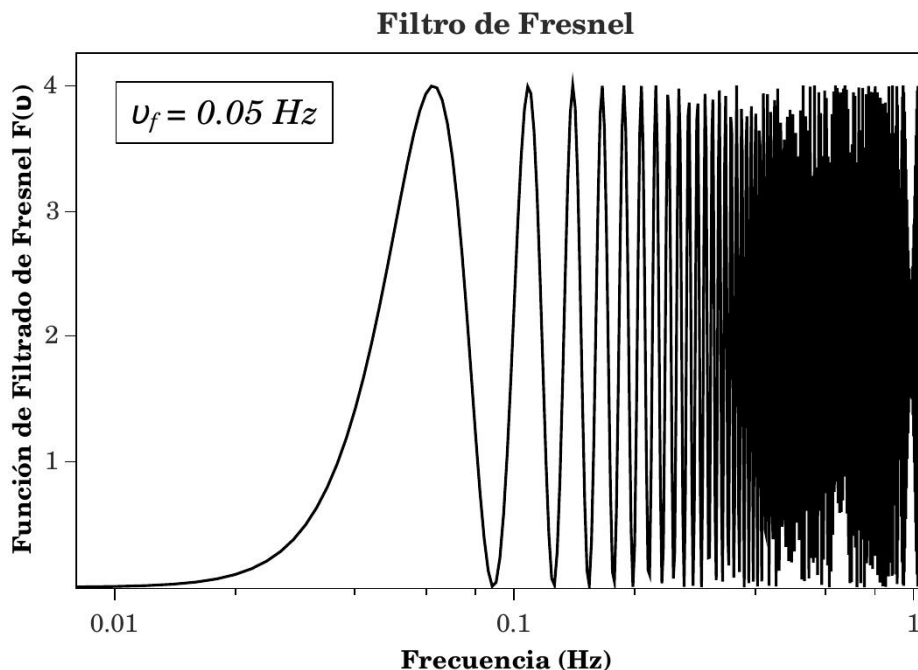
Retomando la ecuación 3.5, el término senoidal es responsable de oscilaciones en el espectro de potencia. En la figura 3.4 se ilustran estas oscilaciones suponiendo una frecuencia de Fresnel  $\nu_f = 0.05 \text{ Hz}$ . Los mínimos entre las oscilaciones se pueden usar para determinar  $\nu_f$ . Si se iguala a cero la ecuación 3.5 se llega a la siguiente relación

$$\nu_f = \frac{\nu_n}{\sqrt{n\pi}}, \quad (3.7)$$

en donde  $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$  corresponden al primer, segundo, ...,  $n$ -ésimo mínimo.

La frecuencia  $\nu_f$  es un límite entre la atenuación del centelleo a bajas frecuencias y las oscilaciones de Fresnel a altas frecuencias, que a su vez exhiben un marcado descenso en intensidad conforme aumenta la frecuencia. Para frecuencias  $\nu$  mayores a  $\nu_f$  diversos autores (Rufenach, 1971; Fremouw y otros, 1980; Wernik y otros, 2003) establecen que un modelo de ley de potencia

$$P_\varphi(\nu) \propto \nu^{-\alpha}, \quad (3.8)$$

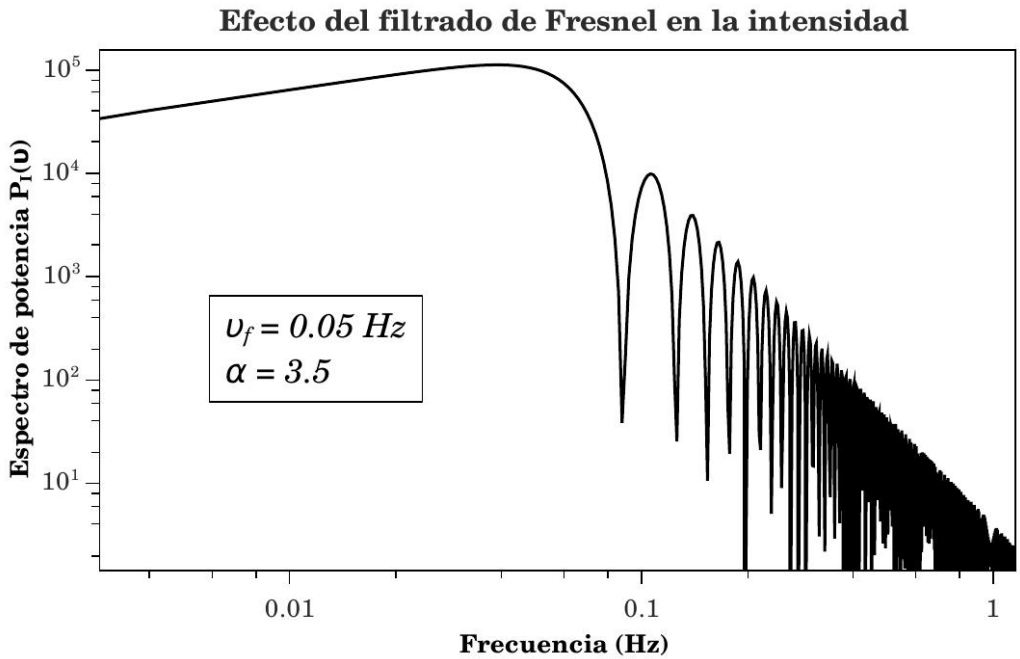


**Figura 3.4:** Filtrado de Fresnel suponiendo  $v_f = 0.05 \text{ Hz}$

es la mejor alternativa para representar el comportamiento de  $P_\phi(v)$ . En la figura 3.5 se muestra el espectro de potencia  $P_f(v)$  suponiendo una frecuencia de Fresnel de  $0.05 \text{ Hz}$  y  $\alpha = 3.5$  en la ecuación 3.8. Se aprecian entre las oscilaciones senoidales las caídas de potencia correspondientes a los ceros de la ecuación 3.5 y el descenso gradual de potencia a altas frecuencias. Una vez conocida la frecuencia de Fresnel es posible calcular la velocidad ( $V_f$ ) de las irregularidades usando mediciones de una sola estación con observaciones a una frecuencia usando la ecuación 3.6. Si se supone que la altura de las irregularidades varía entre  $300$  y  $400 \text{ km}$ , entonces la velocidad será del orden de  $\sqrt{z}$ .

### 3.2.4. Observaciones con el MEXART

Las señales de fuentes de radio cósmicas que se propagan a través de la ionosfera son propensas a presentar centelleo ionosférico. En México existe un radiotelescopio que tiene como objetivo principal el rastreo de perturbaciones solares transitorias de gran escala que se propagan en el medio interplanetario empleando la técnica de *centelleo interplanetario*, que consiste en la medición del centelleo que estas perturbaciones producen en las señales de fuentes de radio cósmicas de diámetro angular pequeño (González-Esparza y otros, 2004). El radiotelescopio de Centelleo Interplanetario **MEXART** (Mexican Array Radio Telescope por sus siglas en inglés), localizado en el municipio de Coeneo Michoacán en las coordenadas de latitud  $19^\circ 48' 39''$  norte y longitud  $101^\circ 41' 39''$  oeste

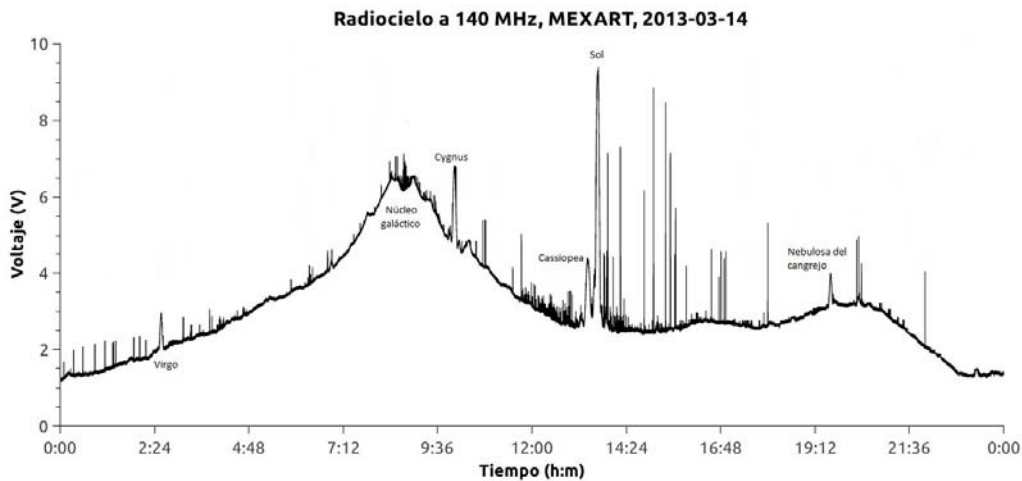


**Figura 3.5:** Modelado del espectro de potencia  $P_f(\nu)$  suponiendo un filtrado de Fresnel y una ley de potencia en la región de altas frecuencias.

con elevación de 1964 sobre el nivel del mar, es un instrumento que capta ondas de radio de  $\lambda = 2.15 \text{ m}$  o frecuencia de  $139.65 \text{ MHz}$  con un ancho de banda de  $2 \text{ MHz}$ .

Consiste en 64 líneas paralelas de 64 dipolos cada una polarizadas en dirección este-oeste orientadas todas ellas en dirección este - oeste (E-O) para tener con cada línea un arreglo de 64 elementos con la misma amplitud y fase cuya longitud es de  $64 \lambda$  (González-Esparza y otros, 2004). Cada línea está adecuada por medio de una matriz de Butler (sistema de conmutación electrónico que puede formar múltiples haces o lóbulos a diferentes declinaciones en el cielo) para desplazar un patrón de radiación de 16 haces a diferentes declinaciones que abarca alrededor de  $100^\circ$  (desde  $-43^\circ$  hasta  $+58^\circ$ , con  $-$  y  $+$  señalando declinación sur y norte) donde cada haz observa de forma efectiva una región del cielo de  $1^\circ \times 8^\circ$  en dirección E-O y N-S respectivamente. El área de la antena utilizada para este estudio es de  $4830 \text{ m}^2$ ,  $34.5 \text{ m}$  N-S  $\times$   $140 \text{ m}$  E-O, equivalente a la mitad del área total del radiotelescopio.

El MEXART aprovecha la rotación de la Tierra para captar señales de fuentes de radio cósmicas una vez al día en cierta región del cielo. En la figura 3.6 se observa un día de datos típico del MEXART, destacando el flujo en radio del núcleo galáctico, del Sol y algunas radiofuentes importantes como Cassiopea A, Cygnus X, Virgo, y la nebulosa del



**Figura 3.6:** Un día de observación con el MEXART. Se destacan las fuente de mayor flujo así como el Sol y el núcleo galáctico. Las líneas verticales son en su mayoría ruido por interferencia o tormenta eléctrica.

cangrejo. Las líneas verticales son en su mayoría ruido debido a interferencias, señales de satélites artificiales o tormenta eléctrica en la cercanía del radiotelescopio. Dado el patrón de radiación del radiotelescopio, el tiempo de tránsito de las fuentes es de aproximadamente 4 minutos con una resolución que varía entre 10 y 100 muestras por segundo (mps). De acuerdo a Mejía-Ambriz [apéndice A] (2012) el MEXART, con media antena, puede captar casi 100 fuentes de radio, la mitad de las cuales pueden usarse para estudios de centelleo interplanetario. Las observaciones diarias del MEXART se pueden consultar en tiempo real<sup>4</sup>. Para más detalles técnicos del radiotelescopio se sugiere consultar a González-Esparza y otros (2004); Carrillo-Vargas (2007); Mejía-Ambriz y otros (2010).

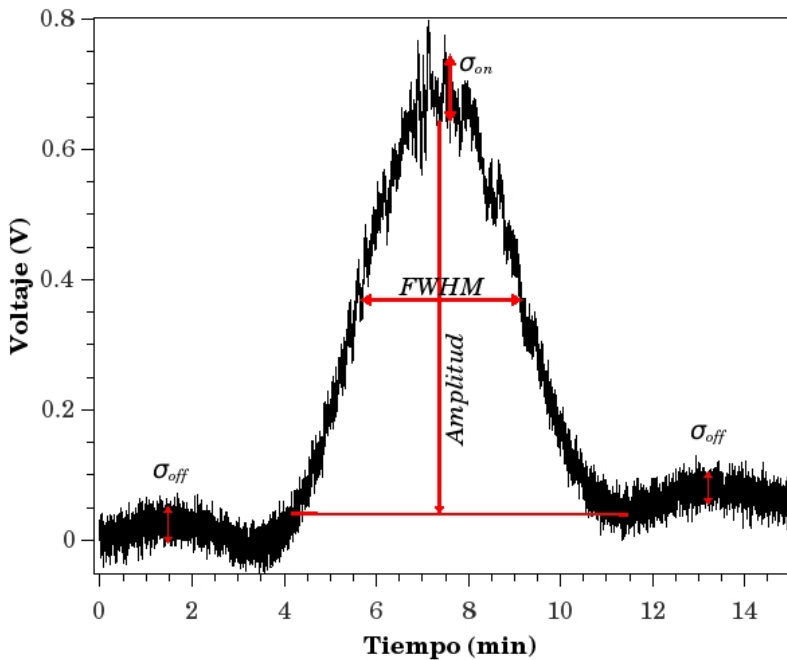
El radiotelescopio MEXART, aunque construido con el único objetivo de estudiar CIP, no está exento de efectos ionosféricos en la señal de radio. Para propósitos del MEXART, la influencia ionosférica que se observa en la señal de fuentes naturales de radio son una forma de ruido, son afectaciones en la señal que no deberían de observarse pero que sin embargo están presentes. Recordemos que dos factores importantes en la ocurrencia del centelleo es la latitud magnética y la frecuencia de observación. Latitudes medias son las regiones geográficas menos propensas a este efecto en condiciones ideales, sin embargo no están exentas de afectación ionosférica. En cuanto a la frecuencia se refiere, la intensidad del centelleo es proporcional a  $\nu^{-2}$ , es decir, mientras mayor sea la frecuencia, menor será el efecto de la ionosfera en la onda recibida (Goodman, 2005); la frecuencia del MEXART es un orden de magnitud menor a las señales de GPS, por lo que es más susceptible a centelleo que el sistema de posicionamiento global. El ángulo

<sup>4</sup><http://www.mexart.unam.mx>

de incidencia de la onda de radio sobre la ionosfera también es un factor a considerar, siendo mínimo para incidencia cenital.

Este trabajo se centra en el estudio de la radiofuente 3C144 (también conocida como nebulosa del cangrejo) con coordenadas astronómicas<sup>5</sup>  $\alpha = 05^{\text{h}}34^{\text{m}}32^{\text{s}}$ ;  $\delta = 22^{\circ}00^{\text{m}}52^{\text{s}}$  porque es la radiofuente cuyo tránsito es más cercano al cenit del MEXART con flujo importante cercano a 1400 Jy. Con el fin de aislar el centelleo ionosférico del interplanetario se seleccionaron aquellas fechas donde la elongación ( $\epsilon$ )<sup>6</sup> de 3C144 es mayor a  $90^{\circ}$ , que es cuando el tránsito de 3C144 es nocturno y es más intenso el centelleo ionosférico, a saber entre el 12 de noviembre y el 12 de febrero.

Una vez que tiene el registro de 3C144 con centelleo es necesario manipular esta serie de tiempo para facilitar su análisis. Lo primero es obtener los siguientes parámetros (ver figura 3.7):



**Figura 3.7:** Parámetros obtenidos de los tránsitos de 3C144:  $\sigma_{off}$ ,  $\sigma_{on}$ ,  $A$  y  $FWHM$ .

<sup>5</sup> $\alpha$  para ascensión recta y  $\delta$  declinación

<sup>6</sup>La elongación solar  $\epsilon$ , que es el ángulo que forman las líneas Sol-Tierra y Tierra-radiofuente determina la intensidad del CPI, entre mayor sea la elongación, mayor será en intensidad el CPI; dependiendo de cada fuente hay un límite inferior de intensidad y para todos los casos se considera que para  $\epsilon > 90^{\circ}$  la contribución del CPI es despreciable



- El *rms* (del inglés root mean square) o amplitud de las fluctuaciones en intensidad de la señal tanto del cielo de fondo, también llamado *cielo frío*, como de la amplitud de las oscilaciones en el tope de la fuente. A estas cantidades las denotaremos de ahora en adelante como  $\sigma_{off}$  y  $\sigma_{on}$  respectivamente.
- La amplitud ( $A$ ) de la fuente, que es la diferencia de altura de la gaussiana entre su punto más alto y el nivel de referencia del ruido de cielo frío.
- El ancho de la gaussiana a media altura (o FWHM) que denota el tiempo que le toma a la fuente recorrer el ancho del haz principal. Este valor es muy cercano a 4 minutos.

A partir de  $\sigma_{off}$  y  $A$  se calcula la *razón señal a ruido* o RSR que es una manera de medir indirectamente el flujo de la fuente de radio y se define como:

$$RSR = \frac{A}{\sigma_{off}}. \tag{3.9}$$

En la tabla 3.1 se muestran los valores promedio de amplitud, RSR y FWHM para cada intervalo de tiempo así como la hora en tiempo local en que ocurrió el tránsito de 3C144 y la resolución de los datos en muestras por segundo (mps).

Fecha [día/mes/año]	Tiempo local [hr:min]	Resolución (mps)	$\langle A \rangle$ (volts)	$\langle RSR \rangle$	$\langle FWHM \rangle$ (min)
[12nov12-20nov12]	[02:55-02:23]	10	0.67	51.7	3.88
[21nov12-12dic12]	[02:19-00:55]	10	0.53	41.1	3.91
[13dic12-13ene13]	[00:51-22:46]	–	–	–	–
[14ene13-12feb13]	[22:42-20:48]	10	0.76	58.3	3.96
[12nov13-08dic13]	[02:56-01:12]	100	0.46	27.1	3.93
[09dic13-13dic13]	[01:08-00:54]	20	0.47	36.1	4.06
[14dic13-12feb14]	[00:50-20:50]	10	0.63	48.7	4.04

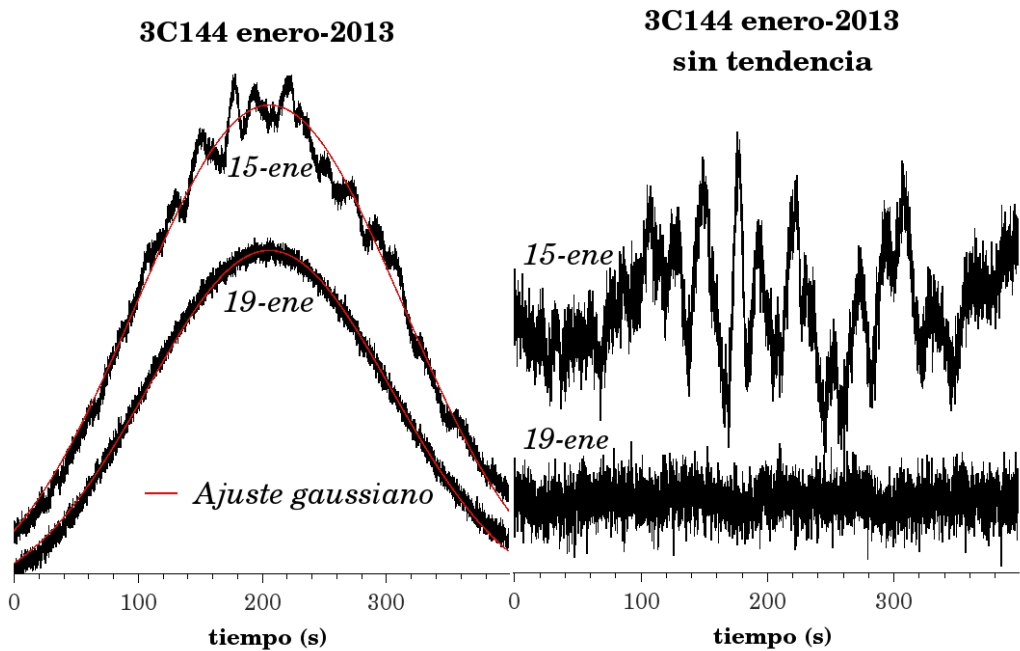
**Tabla 3.1:** Propiedades generales de 3C144 entre 2012 y 2014 para ciertas fechas de tránsito nocturno de la fuente. Los corchetes  $\langle \rangle$  indican valor promedio sobre las fechas señaladas.

Para hacer el análisis de la señal primero hay que remover la tendencia gaussiana<sup>7</sup> de la señal. Al hacer esto se tiene una serie de tiempo de aproximadamente 4 minutos que contiene toda la información acerca del centelleo que se genera en la señal de la fuente

<sup>7</sup>Tomando como base la ecuación de una gaussiana  $y = y_0 + \frac{A}{\omega\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\omega^2}}$  donde  $y_0$  es el valor de referencia,  $x_0$   $A$   $\omega$  son el centro, amplitud y ancho de la gaussiana, se introducen como  $x$  los datos de la fuente que contiene el FWHM para conocer la ecuación gaussiana que mejor se ajusta a los datos de la fuente. Una vez encontrados los parámetros que mejor se ajustan a los datos, se resta la ecuación obtenida y a la serie original para obtener la señal sin tendencia.

de radio a su paso por la ionosfera. Durante el proceso del ajuste se calcula  $\sigma_{off}$ ,  $A$ ,  $RSR$  y  $FWHM$ ; el valor  $\sigma_{on}$  se calcula una vez que ya fue removida la tendencia.

En la figura 3.8 se muestran dos registros típicos de 3C144 detectado por el MEXART los días 15 y 19 de enero de 2013 con y sin actividad ionosférica en su señal respectivamente. Del lado izquierdo se tiene la señal original de la radiofuente y el ajuste gaussiano hecho a ambos registros y del lado derecho las señales una vez removida la tendencia gaussiana.



**Figura 3.8:** Comparativo de la señal original de 3C144 (panel izquierdo) con el ajuste gaussiano (línea roja) y la señal sin tendencia (panel derecho).

### 3.2.5. Índices de centelleo

Al comparar estadísticamente la señal de cielo frío y la señal de la fuente mediante de los parámetros  $\sigma_{off}$  y  $\sigma_{on}$  se advierten marcadas diferencias que son resultado directo de la perturbación de la señal debido a la ionosfera. Mientras que la señal de cielo frío es la suma aleatoria de las contribuciones de ruido que llegan al MEXART de todas direcciones con el añadido del ruido térmico propio de los cables, componentes electrónicos y el receptor que conforman el radiotelescopio, la señal de la fuente contiene (en la mayoría de los casos) además del ruido de cielo frío, una contribución propia de las variaciones de la radiofuente más el efecto de difracción de la señal por la ionosfera. Para fines de

este trabajo suponemos que la 3C144 es una fuente estable, de tal manera que podemos asumir que toda diferencia entre el ruido de cielo frío y el ruido en la señal de la fuente, es únicamente de origen ionosférico. Al hacer esto, una comparación adecuada entre  $\sigma_{off}$  y  $\sigma_{on}$  nos permitirá encontrar una relación cuantitativa del grado de perturbación de la ionosfera en la intensidad de la señal, en tanto que un análisis espectral de la misma nos llevará a diferenciar entre las variaciones aleatorias temporales propias del cielo frío de las variaciones de origen ionosférico.

Hay diferentes maneras de determinar las variaciones de la señal de una fuente de radio dependiendo del fenómeno que se desea estudiar. Para estudios de centelleo interplanetario con radiotelescopios similares al MEXART se utiliza comunmente el índice de centelleo  $m$ , que compara el *rms* de las fluctuaciones en la señal de la fuente de radio con respecto a su intensidad media, que depende de la elongación  $\epsilon$  y es una medida de la densidad electrónica presente en el medio interplanetario a lo largo de la trayectoria de la radiofuente (Manoharan, 1993). Para estudios de ionosfera con el MEXART se ha usado en trabajos previos el *índice*  $D$ , propuesto por Carrillo-Vargas y otros (2012), definido como:

$$D = \frac{\sigma_{on}}{\sigma_{off}}, \quad (3.10)$$

que no toma en cuenta  $\epsilon$  ni el flujo de la fuente pero es una medida del grado de perturbación de la ionosfera sobre la señal de la fuente por encima del ruido de fondo. Otra cantidad de uso común para estudios de centelleo, similar a  $D$ , es medir el grado de perturbación en escala de decibeles (dB). Tomando como valor de referencia  $\sigma_{off}$  se calcula  $\sigma_{on}$  en dB y se denota a este valor con  $P_{fluc}$  mediante la siguiente ecuación (ver manual de la ITU, 1994):

$$P_{fluc} = 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_{on}}{\sigma_{off}} \right). \quad (3.11)$$

Por poner un ejemplo, si este índice tiene un valor de 6 dB, significa que  $\sigma_{on}$  es mayor que  $\sigma_{off}$  por un factor de 2. Los dos índices anteriores dependen en gran medida de las características de cada sistema receptor, por lo que fue necesario desde hace varias décadas establecer un índice de centelleo estándar para comparar datos entre diferentes instrumentos o diferentes frecuencias de observación. El parámetro más utilizado para caracterizar las fluctuaciones en intensidad de una señal es el *índice*  $S_4$  que se define como la intensidad de la señal normalizada con la varianza y viene dado por la ecuación (Wernik y otros, 2003):

$$S_4^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}, \quad (3.12)$$

en donde  $I$  es la intensidad de la fluctuación de la señal y  $\langle \rangle$  denota el valor promedio de dicha cantidad. La tabla 3.2 muestra una conversión empírica entre  $S_4$  y  $P_{fluc}$ <sup>8</sup>.

$S_4$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$P_{fluc}$ (dB)	1.5	3.5	6.0	8.5	11	14	17	20	24	27.5

**Tabla 3.2:** Conversión del índice  $P_{fluc}$  a  $S_4$ . Los valores se tomaron del manual de la ITU (1995)

Existen otros parámetros para describir las perturbaciones en la señal pero para fines de este trabajo nos limitaremos a los tres antes mencionados. Una discusión completa acerca de los índices usados para cuantificar el grado de afectación en señales transionosféricas se puede consultar en los trabajos de Fremouw y otros (1980), manual de la ITU (1995) y Wernik y otros (2003).

<sup>8</sup>El índice  $S_4$  utiliza en mayor medida para señales con frecuencias por encima de 300 MHz sin embargo diversos trabajos como el manual de la ITU (1995), Yakovlev (2002), Wernik y otros (2003) lo aplican satisfactoriamente para señales cercanas a 140 MHz, por eso se incluye en este trabajo.

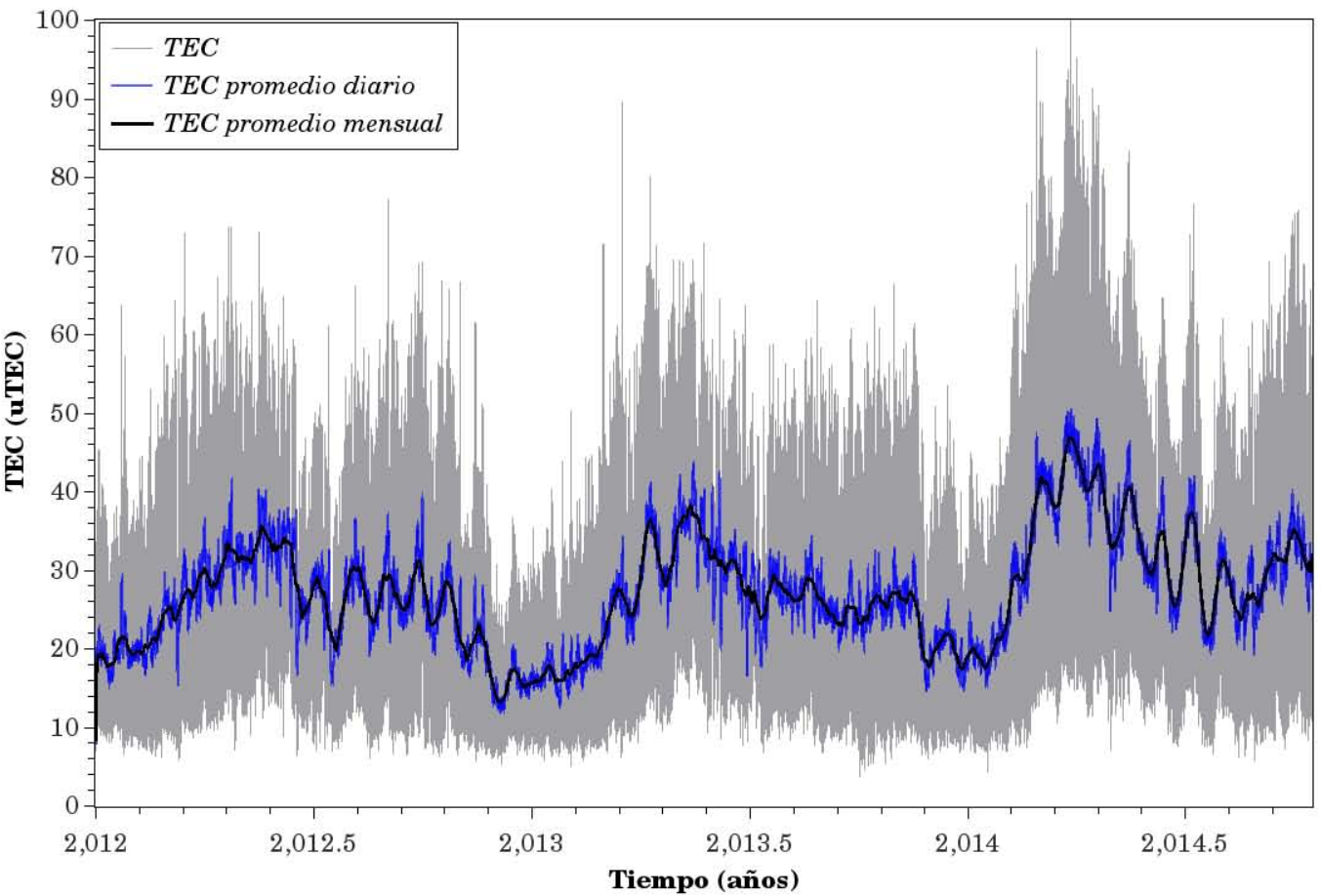


### 4.1. El TEC sobre México

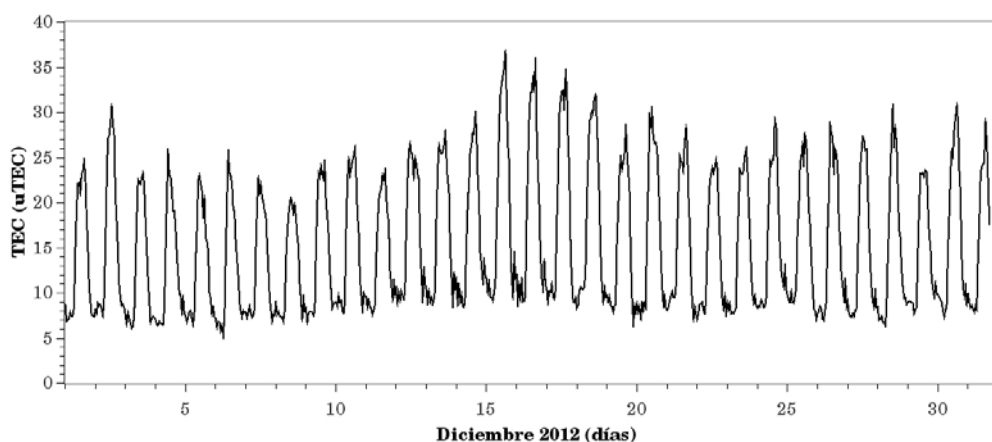
EL parámetro esencial que se usó para describir el estado de la ionosfera en México es el TEC vertical ( $vTEC$ ). Con el uso de los archivos IONEX y el código `ionFR` es posible conocer el TEC en una cierta ubicación geográfica para ciertos valores de declinación y ascensión recta para una fecha dada. La figura 4.1 muestra la evolución del  $vTEC$  sobre un sitio ubicado en México con coordenadas geográficas (Lat, Lon) = (+ 19° 48' 47", - 101° 41' 39") donde el signo (+) es latitud norte y (-) es longitud oeste, en el periodo de tiempo comprendido entre enero de 2012 y octubre de 2014. La figura 4.1 es una de las más importantes de este trabajo porque muestra la evolución de la ionosfera sobre un periodo de casi 3 años. La línea gris indica el TEC total con resolución de una hora, la línea azul es el promedio diario del TEC y la línea negra señala el TEC promediado mensualmente.

Para el estudio de fenómenos que tienen escalas de días, resulta conveniente tener perfiles mensuales de TEC. Por ejemplo la figura 4.2 muestra el valor del TEC vertical en la ubicación dada para los 31 días del mes de diciembre de 2012. Se nota en esta serie de tiempo la variación diurna del TEC debido a la rotación terrestre. Por la noche el TEC tiene valores entre 5 y 10  $uTEC$  mientras que en el día alcanza hasta 35  $uTEC$ . Cada archivo IONEX corresponde a un día de TEC, así que esta serie no es estrictamente continua, se compone del ensamble de los 31 días, además los mapas IONEX están en tiempo universal, por lo que fue necesario hacer la conversión a hora local.

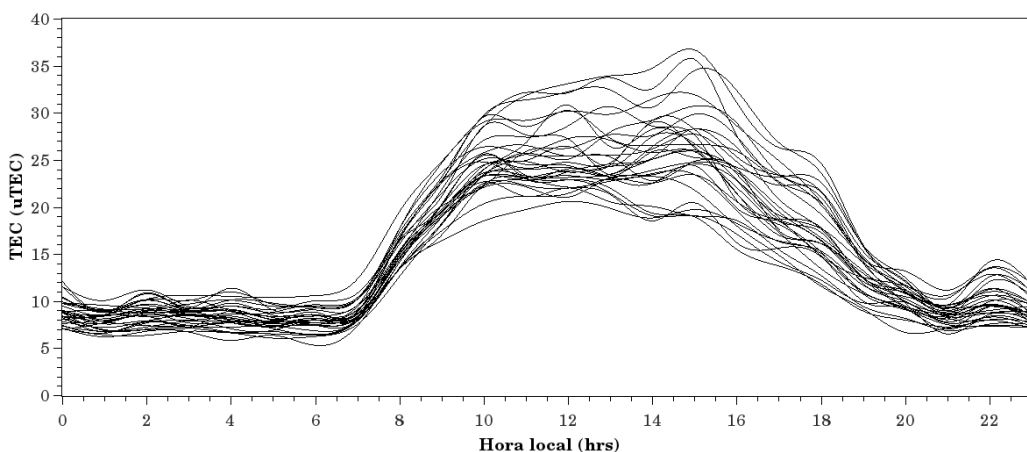
En la figura 4.2 el valor de TEC se mantiene casi constante durante la noche y empieza a aumentar con la salida del Sol (después de las 7 hrs tiempo local) alcanzando su máximo valor entre 14 y 15 hrs para una posterior disminución del TEC al ponerse el Sol, lo cual se aprecia más claramente en la figura 4.3 que muestra el TEC de los 31 días del mes acumulado en un perfil de 24 horas. Promediando los 31 perfiles diarios de la figura 4.3 se obtiene un perfil mensual del TEC como el que se muestra en la figura 4.4.



**Figura 4.1:** TEC vertical sobre México calculado en las coordenadas geográficas (Lat, Lon) = (+19° 48' 47", -101° 41' 39") con el código *ionFR* de enero 2012 a octubre 2014.



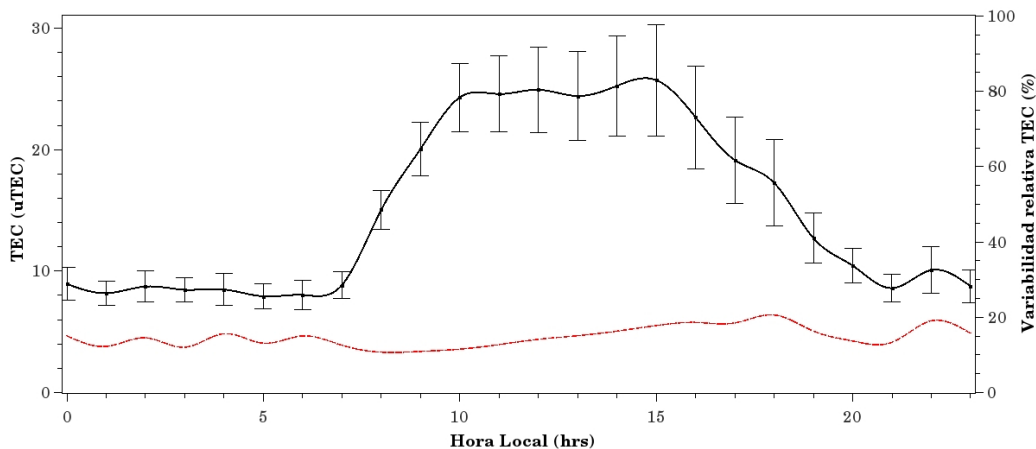
**Figura 4.2:** Perfil diario del TEC para diciembre 2012. Se observa la variación diurna del TEC.



**Figura 4.3:** Perfiles acumulados del TEC evaluado en (Lat, Lon) = (+ 19° 48' 47", - 101° 41' 39") como función de la hora local para diciembre 2012.

Para cuantificar la variabilidad del TEC como función de la hora local ( $t$ ) se calcula la desviación estándar mediante la ecuación 4.1, en donde  $\bar{x}(t)$  es el TEC promedio mensual (línea continua de la figura 4.4) y  $x_i(t)$  es el valor del TEC del  $i$ -ésimo día, de tal manera que tenemos un perfil mensual promedio del TEC ( $\bar{x}(t)$ ) acotado por un rango de incertidumbre ( $\bar{x} + \bar{\sigma}$ ,  $\bar{x} - \bar{\sigma}$ ) como se aprecia en la misma figura. La variabilidad relativa del TEC ( $\bar{\sigma}/\bar{x}$ ) en porcentaje (%) se incluye también en la gráfica como una línea punteada referida en la escala del eje derecho.





**Figura 4.4:** Promedio mensual del perfil de TEC y la variabilidad relativa del TEC evaluado en (Lat, Lon) = (+ 19° 48' 47", - 101° 41' 39") como función de la hora local para diciembre 2012.

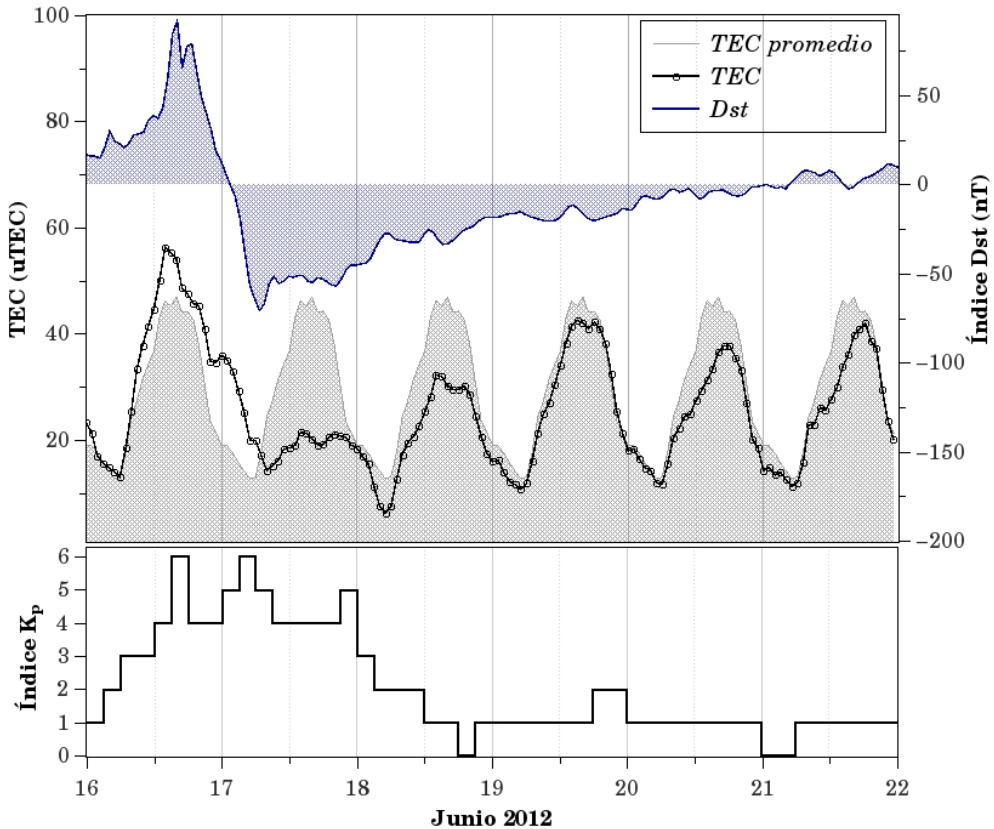
$$\bar{\sigma}(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^n (x_i(t) - \bar{x}(t))^2}{n-1}}. \quad (4.1)$$

¿Cuál es el significado práctico de la variabilidad relativa del TEC? Esta cantidad permite estudiar el comportamiento de uno o varios días del TEC con respecto a los días previos, lo cual resulta de gran importancia para saber si las variaciones que llegan a ocurrir en el TEC pueden ser consideradas dentro del valor normal o hay algún mecanismo físico externo que altera los valores de TEC. Por ejemplo, en la figura 4.4 a las 15 hrs tiempo local un valor esperado de TEC estaría entre 22 y 30 uTEC; un valor fuera de este intervalo sería evidencia de una alteración ionosférica. Por otro lado, asumiendo que se desee usar la información del TEC para aplicaciones en tiempo real, lo más práctico es usar la información del día anterior en lugar del promedio mensual. Si se usan los datos promedio para predecir el comportamiento del TEC del día siguiente se tendrá un error estadísticamente mayor que si se usan los datos del día previo. La *repetibilidad* relativa se calcula reemplazando  $\bar{x}(t)$  por  $x_{i-1}(t)$  en la ecuación 4.1. De acuerdo a Schaer (1999) el error se reduce de entre 15-20% de variabilidad relativa sobre el promedio a 10-15% con repetibilidad relativa para aplicaciones en tiempo real. En el apéndice A se incluyen los perfiles promedio mensuales de TEC entre enero y diciembre de 2012, que vistos en conjunto revelan el comportamiento estacional del TEC sobre el territorio mexicano.

#### 4.1.1. Tormentas ionosféricas sobre México

Los trabajos de Carrillo-Vargas y otros (2012) y Rodríguez-Martínez y otros (2014) estudian casos particulares de variaciones en el TEC sobre México que denominan como *perturbaciones ionosféricas*. En ocasiones los nombres *tormenta* y *perturbación*

ionosférica se usan indistintamente, pero el término perturbación ionosférica se aplica generalmente para eventos de corta duración (unas horas) que consisten en variaciones repentinas y locales en la densidad de electrones de la ionosfera, mientras que las tormentas tienen duración de al menos un día y están asociadas con alteraciones en toda la alta atmósfera, incluyendo magnetosfera y termosfera (Ondoh y Marubashi, 2001).



**Figura 4.5:** Variación del TEC durante una tormenta ionosférica típica de latitudes medias. Se incluyen como referencia los índices *Dst* y *K<sub>p</sub>*.

La figura 4.5 muestra la respuesta del TEC sobre México ante la ocurrencia de una tormenta geomagnética en el mes de junio de 2012 con datos obtenidos a partir del código `ionFR` en la ubicación geográfica (Lat, Lon) = (+ 19° 48' 47", - 101° 41' 39")<sup>1</sup>. En la figura el índice *Dst* (línea continua azul) es referenciado al eje derecho y el TEC (línea punteada para el TEC diario y línea continua sombreada para el TEC promedio mensual) al eje izquierdo; en el panel inferior se muestra el índice *K<sub>p</sub>*.

<sup>1</sup>En adelante todos los datos de TEC serán anclados en esta ubicación.

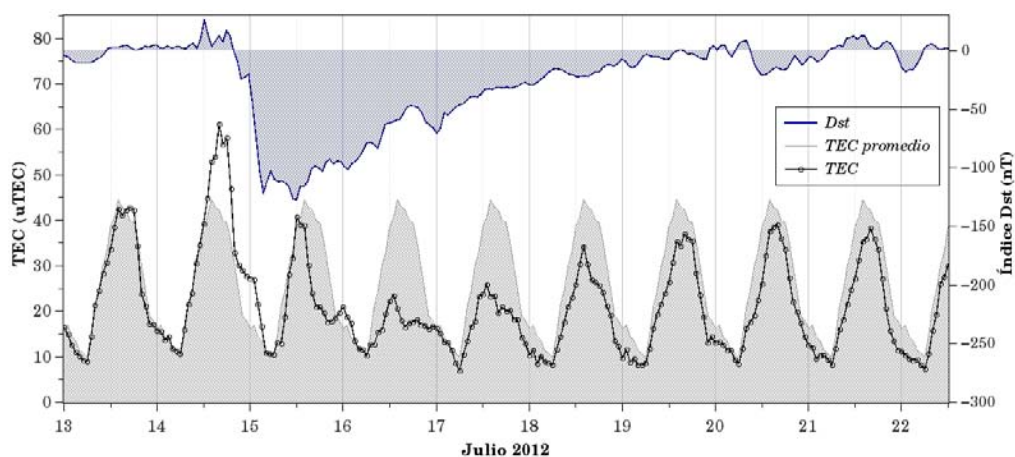
A diferencia de las perturbaciones ionosféricas, que son totalmente aleatorias en su morfología (es decir, no hay un patrón que se repita entre una perturbación y otra), las tormentas ionosféricas en latitudes medias, en muchos casos, constan de tres fases aunque no bien definidas (Hunsucker y Hargreaves, 2003): una *fase inicial* que dura unas horas durante la cual  $N_e$  y el TEC aumentan sobre su valor promedio; este incremento depende de la hora local en que inicia la tormenta y de la intensidad de la perturbación magnética que la genera. Le sigue una *fase principal* que puede durar 24 horas o más y se caracteriza por el descenso de estas mismas cantidades con respecto a su promedio. A los días que le toma al TEC y a  $N_e$  recuperar su estado normal se le conoce como *fase de recuperación*, morfología similar a la de una tormenta geomagnética (Hunsucker y Hargreaves, 2003). En la tormenta mostrada en la figura 4.5 la fase inicial ocurre entre mediodía del 16 y el amanecer del día 17. La fase principal transcurre las 24 horas siguientes en las cuales se ve apantallada la fotoionización del día 17 alcanzando el mínimo valor de TEC las primeras horas del día 18; a partir de este instante inicia la fase de recuperación por 3 días más. Tormentas similares a estas tuvieron lugar entre 2012 y 2014. Más adelante se discuten los procesos involucrados en la aparición de estas tormentas y su relación con la actividad geomagnética.

Resulta conveniente hacer la diferenciación entre los incrementos (fase de tormenta positiva) y decrementos (fase de tormenta negativa) en la densidad de electrones (y por ende, el TEC) de la ionosfera, ya que los mecanismos físicos que los ocasionan son diferentes. De acuerdo a Mendillo (1971), Bousanto (2000) y Goodman (2005) la *fase positiva* de una tormenta ionosférica se debe a fuerzas electromagnéticas producto de la transferencia de energía entre el viento solar y la magnetosfera terrestre mientras que la *fase negativa* se debe a cambios en la composición química de la alta atmósfera y a una modificación de los patrones de vientos termosféricos aunque un factor importante que determina en gran medida que tan prolongada será una fase u otra de la tormenta es el calentamiento atmosférico. Observaciones de ionosondas muestran que durante la fase principal de la tormenta la altura de la capa  $F$  aumenta debido al calentamiento y expansión de la termosfera (Goodman, 2005), lo que provocan una mayor recombinación por parte de las especies neutras que se elevan hasta la altura de la capa  $F$  para una subsecuente disminución de la población electrónica. El resultado de una alteración geomagnética sobre la ionosfera es complejo; si bien las características de tormenta descritas aplican para gran parte de las tormentas, suele haber casos de tormentas que solamente tienen fase positiva o negativa. Se discuten a continuación ejemplos de ambos casos sobre el territorio mexicano.

#### **4.1.2. Reducción del TEC: Tormenta negativa**

La fase negativa de una tormenta puede ser explicada como un cambio en las concentraciones relativas de  $O$  y  $N_2$  provocado por una perturbación magnetosférica de la

siguiente manera: la entrada de energía en las regiones polares durante periodos de actividad auroral da lugar al calentamiento de la termósfera neutra. La expansión térmica de esta región provoca el cambio en la altitud de los componentes neutros más pesados de la atmósfera, en particular la cantidad de  $N_2$  que asciende hasta la altura de la capa  $F$ ; si la cantidad de  $N_2$  excede la de  $O$  aumenta la recombinación y disminuye la densidad de electrones de esta capa. Dado que este efecto se inicia en las regiones aurorales y se propaga hacia latitudes ecuatoriales, es más notable entre mayor sea la latitud (Bousanto, 2000).



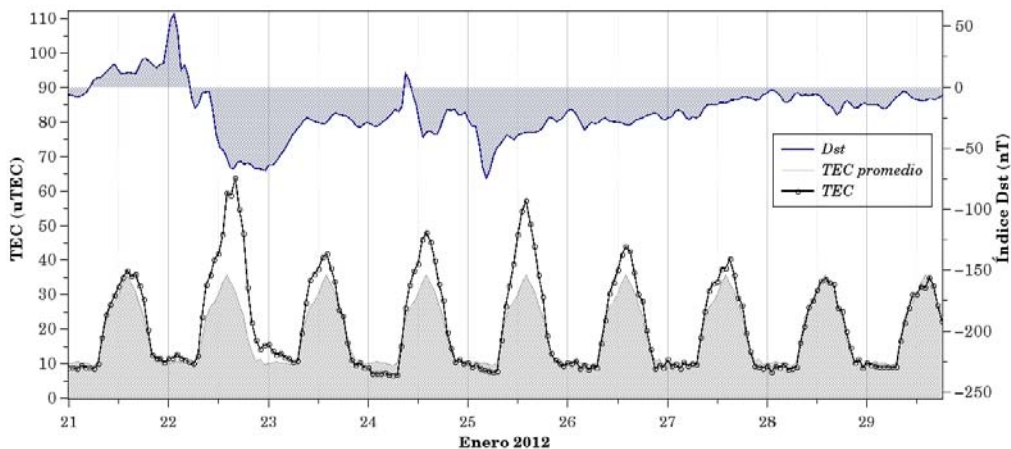
**Figura 4.6:** Tormenta con fase negativa prolongada en el mes de julio de 2012. El TEC y el TEC promedio mensual (parte inferior del gráfico en línea negra y gris respectivamente) está referenciado al eje de la izquierda. El índice Dst (en línea azul) se refiere con el eje de la derecha.

Las tormentas negativas tienen una clara dependencia estacional que se manifiesta en la fase de recuperación. De acuerdo a Ondoh y Marubashi (2001) durante el verano en latitudes medias, la disminución de densidad electrónica ionosférica como consecuencia de una tormenta ionosférica es más prolongada que el cualquier otra época del año debido a una mayor población de moléculas neutras e iones positivos de  $N_2^+$  que aumentan la tasa de recombinación. Esto se puede ver en la figura 4.6 que ilustra una tormenta negativa ocurrida entre el 14 y 21 de julio de 2012, que corresponde a la respuesta ionosférica de una tormenta geomagnética que inicia el día 14 y cuya fase principal alcanza los  $-110 nT$  cerca de mediodía del 15. El día 14 el TEC incrementa su valor por encima del promedio (fase de tormenta positiva) y a partir del 15 se inicia un decremento del TEC que se prolonga por cinco días. El tiempo que le toma a la ionosfera recuperar su valor promedio de TEC se debe tanto a la intensidad de la tormenta como a un efecto estacional (esta tormenta ocurre en verano cuando hay una mayor cantidad de  $N_2$  y por ende la recombinación es más rápida).

### 4.1.3. Incremento del TEC: Tormenta positiva

El incremento en la densidad de electrones o fase positiva de las tormentas ionosféricas no puede ser explicado por los cambios del cociente  $N_2/O$ . Los datos de ionosondas muestran que el plasma ionosférico se translada, por difusión, a mayores alturas durante una tormenta positiva. Este movimiento ascendente del plasma ionosférico se explica de por medio de dos factores (Ondoh y Marubashi, 2001): por un lado, los vientos termosféricos que fluyen horizontalmente a grandes alturas desde los polos hacia el ecuador hacen ascender el plasma a lo largo de las líneas magnéticas. Este ascenso y subsecuente arrastre de electrones por acción de los vientos y el campo magnético acarrea gran cantidad de ionización hacia latitudes medias que se observa como un aumento en la densidad de electrones y en el TEC. El Otro mecanismo es que al incrementarse la intensidad de la corriente de anillo por el ingreso de viento solar a la magnetósfera, el ascenso y posterior arrastre de electrones de la capa  $F$  ecuatorial por el efecto de la anomalía de Appleton se intensifica, causando la fase de tormenta positiva en latitudes medias alrededor del ecuador. Este último mecanismo es más evidente durante el día y en primavera u otoño que es cuando la ionización diurna es mayor.

La figura 4.7 muestra una tormenta ionosférica positiva originada por una tormenta geomagnética que inicia el día 21 de enero. La fase principal de la perturbación magnética ocurre a lo largo del día 22 y en respuesta el TEC durante el día aumenta considerablemente. La fase de recuperación no ocurre de manera monótona sino que el  $Dst$  presenta fluctuaciones que se traducen en aumento del TEC durante el día entre el 23 y 27 de enero.

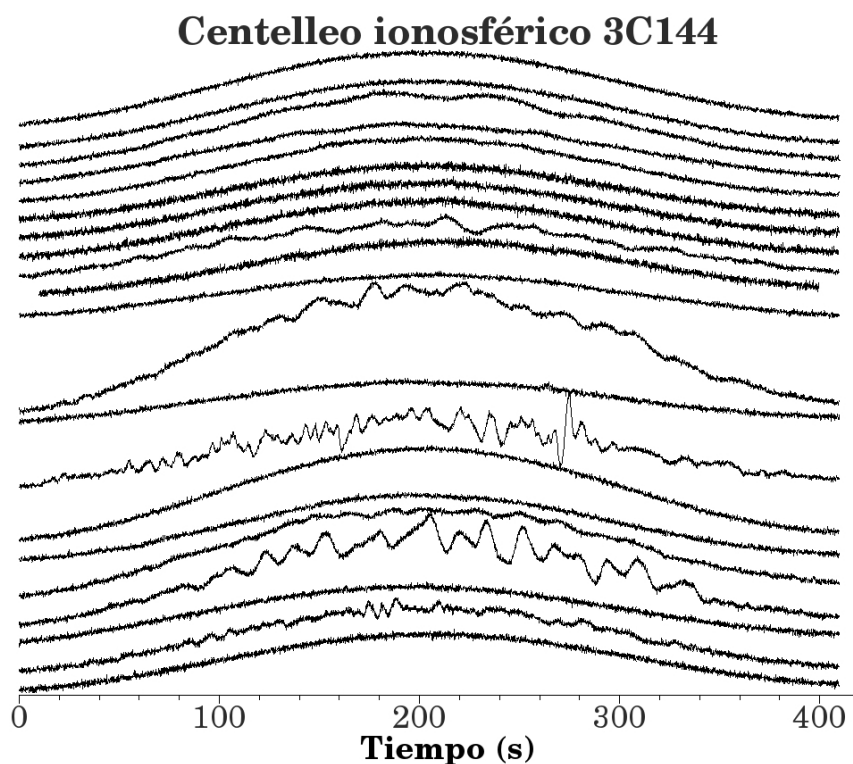


**Figura 4.7:** Tormenta con fase positiva durante el mes de enero de 2012. El TEC y el TEC promedio mensual (parte inferior del gráfico en línea negra y gris respectivamente) está referenciado al eje de la izquierda. El índice  $Dst$  (parte superior del gráfico en línea azul) se mide con el eje de la derecha.

En resumen, en latitudes medias el aumento anormal de TEC se debe al arrastre de electrones por parte del campo magnético perturbado a grandes alturas, ya sea por acción de vientos termosféricos que fluyen de los polos hacia el ecuador o por efecto de la anomalía de Appleton desde el ecuador hacia latitudes medias.

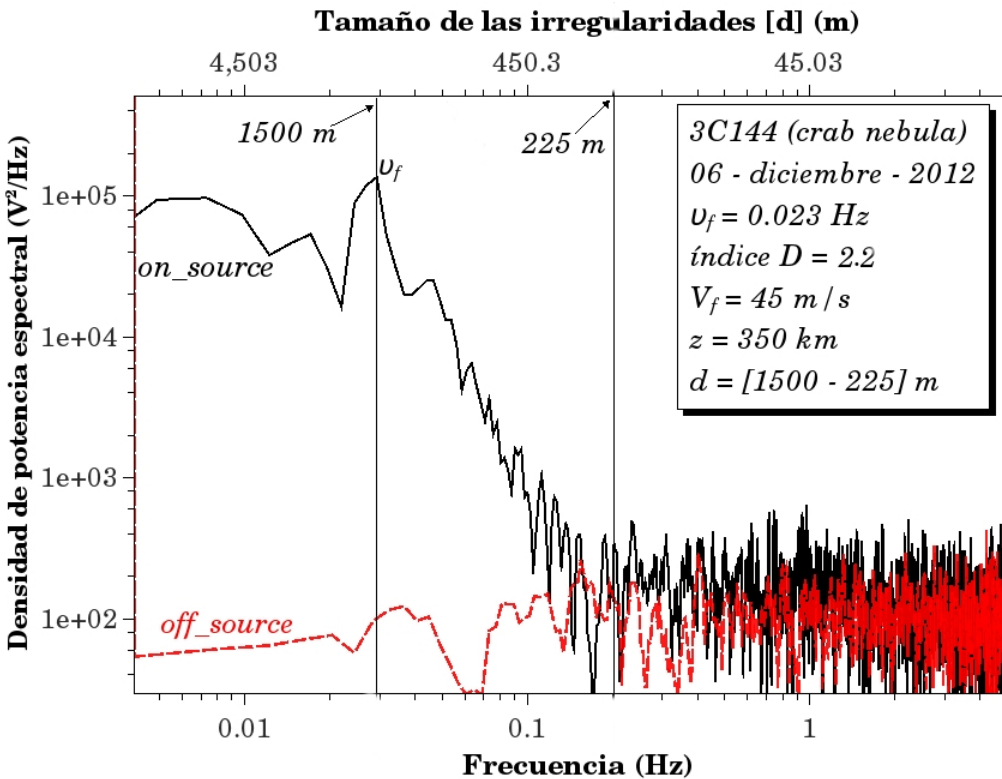
## 4.2. Centelleo ionosférico con el MEXART

Se hizo un seguimiento de los tránsitos nocturnos de 3C144 por el MEXART entre 2012 y 2014 para estudiar el centelleo ionosférico presente en la señal de esta fuente libre de contaminación por CIP. Se analizaron 27 tránsitos de 3C144 en esos intervalos de tiempo. En la figura 4.8 se observan algunos de esos tránsitos donde se aprecia las diferencia en amplitud y grado de afectación de la señal debido a la ionosfera. Se hace el tratamiento de los datos descrito en la sección 3.2.4 para obtener, a partir del tránsito de 3C144, la intensidad del centelleo (con los índices de centelleo mencionados en la sección 3.2.5) y las frecuencias de oscilación características de la ionosfera.



**Figura 4.8:** Tránsitos de la radiofuente 3C144 captados por el MEXART entre 2012 y 2014. El acomodo y amplitud de las señales es arbitrario.

Una vez que se tiene la serie de tiempo correspondiente a la fuente 3C144 sin tendencia se procede a obtener su *espectro de potencia*. Para esto se aplica una transformada rápida de Fourier (FFT) al ruido de cielo frío y luego a la serie de tiempo de la fuente con el propósito de conocer las características espectrales del *cielo frío* y de la perturbación de señal sobre la fuente debida a la ionosfera. Es importante comparar los espectros de intensidad de cielo frío (*off-source*) y el de la fuente (*on-source*) para distinguir entre el contenido espectral que se debe al ruido del receptor y el que es inducido por difracción en la ionosfera.



**Figura 4.9:** Comparación de los espectros de potencia de cielo frío (*off-source* - línea roja segmentada) y sobre la fuente 3C144 (*on-source* - línea negra continua) el día 6 de diciembre de 2012. Los parámetros del centelleo se aprecian en el recuadro de la derecha.

En la figura 4.9 se compara la diferencia de potencia espectral entre la señal de 3C144 el día 6 de diciembre de 2012 (línea negra continua) y el ruido de cielo frío (línea punteada roja). El espectro de potencia *off-source* mantiene prácticamente del mismo orden de magnitud sobre todo el intervalo de frecuencia (reflejo de la estabilidad del receptor) mientras que el espectro *on-source* se divide en 3 regiones:

- Región de baja frecuencia (menor a 25  $mHz$ ): Es casi plana y con potencia de 3 órdenes de magnitud mayor al ruido de cielo frío.
- Región entre 25  $mHz$  y 200  $mHz$ : Exhibe una marcada caída en intensidad con oscilaciones de Fresnel.
- Región de alta frecuencia (frecuencias mayores a 200  $mHz$ ): Donde espectros de sobreponen por lo que no hay información acerca del centelleo de la fuente en esta región ya que se trata de ruido instrumental.

La frecuencia límite que separa la región de baja frecuencia de región con oscilaciones de Fresnel se denomina como *frecuencia de Fresnel*  $v_f$ . En el caso del espectro de la figura 4.9 este valor es de 23  $mHz$ . Usando de la ecuación 3.6 se calcula la velocidad de Fresnel  $V_f$ , es decir, la magnitud de la velocidad con la que se mueven las irregularidades transversalmente a la dirección de propagación de la señal de 3C144; si se supone que la zona causante de la difracción se encuentra a 350  $km$  de altura y  $\lambda = 2.15 m$ , entonces  $V_f = 45 m/s$ . Esta cantidad es importante porque permite estimar la escala de las irregularidades  $d$  que provoca que la señal de la radiofuente centellee, definida como:

$$d = \frac{V_f}{v}. \quad (4.2)$$

En el caso particular en que  $v = v_f$  entonces  $d = r_f$  (el radio de Fresnel), es decir, la ecuación 3.6. En la figura 4.9  $d$  comprende el intervalo de tamaños entre 1540 y 225  $m$ , este último se puede considerar como el límite inferior de escala de las irregularidades que contribuyen al espectro de potencia puesto que esta señal tiene potencia comparable con el ruido de fondo. De las fechas propuestas en la tabla 3.1 se seleccionaron 27 tránsitos de 3C144 para los cuales se calcularon los valores de los índices  $D$ ,  $P_{fluc}$ ,  $S_4$  así como los parámetros  $v_f$  y  $V_f$ , mismos que se resumen en la tabla 4.1. La escala de tamaño  $d$  en los 27 tránsitos tuvo como cota inferior valores entre 250 y 100  $m$  (la cota superior es  $r_f$ ).

### 4.3. El centelleo y el TEC

Una perturbación magnética desata una alteración local en la ionosfera y esto se observa tanto en el TEC como en el centelleo de una fuente de radio. Si el valor de TEC se desvía de su valor promedio por acción de una alteración en el campo magnético durante unas horas se dice que ocurrió una perturbación ionosférica (que no necesariamente entra en la categoría de tormenta); cuando esto sucede se generan corrientes en la capa  $F$  creando un ambiente *turbulento*, más propenso a difractar las ondas de radio, resultando en centelleo de la señal medida en tierra. La hora local en que tiene lugar la perturbación magnética es importante para anticipar la intensidad de centelleo. Si ocurre cerca de mediodía, la alta ionización del Sol puede aminorar el efecto de turbulencia y el centelleo



	Fecha año / día-mes	Hora local (hr:min)	Índice D	$P_{fluc}$ (dB)	$S_4$	$v_f$ (mHz)	$V_f$ (m/s)	
2012	13-nov	02:51	1.55	2.55	0.15	7.5	11.5	
	14-nov	02:47	1.29	0.94	0.08	21.1	32.3	
	15-nov	02:43	1.99	4.75	0.25	17.0	26.1	
	16-nov	02:39	1.65	3.08	0.18	9.7	14.9	
	17-nov	02:35	1.54	2.53	0.15	6.8	10.4	
	23-nov	02:11	1.78	3.76	0.20	11.6	17.8	
	24-nov	02:07	1.81	3.90	0.21	11.0	16.9	
	25-nov	02:03	1.79	3.84	0.21	9.8	15.1	
	06-dic	01:19	2.21	5.66	0.29	†23.1	45.2	
	07-dic	01:15	1.68	3.27	0.18	11.1	16.9	
2013	14-ene	22:42	1.05	0.39	0.06	19.4	29.8	
	15-ene	22:38	3.49	9.61	0.44	45.7	70.2	
	16-ene	22:34	1.37	1.47	0.10	8.6	13.2	
	17-ene	22:30	5.42	13.43	0.58	131.0	201.4	
	19-ene	22:22	1.68	3.28	0.18	7.2	11.1	
	28-ene	21:48	1.53	2.44	0.15	7.5	11.4	
	29-ene	21:44	2.74	7.51	0.36	23.8	36.9	
	17-nov	02:35	1.32	1.18	0.09	19.2	29.5	
	18-nov	02:31	1.26	0.77	0.07	12.3	18.9	
	23-nov	02:11	3.56	9.79	0.45	16.3	25.1	
	25-nov	02:03	1.50	2.28	0.14	25.8	39.7	
	11-dic	01:01	1.24	0.66	0.07	13.2	20.0	
	12-dic	00:57	2.01	4.86	0.25	†25.0	38.4	
	14-dic	00:49	5.53	13.61	0.59	†68.2	104.5	
	15-dic	00:45	1.87	4.19	0.22	7.4	11.4	
	2014	16-ene	22:35	2.17	5.49	0.28	69.3	106.1
		17-ene	22:31	1.56	2.67	0.16	7.2	11.1

**Tabla 4.1:** Valores de los índices de centelleo  $D$ ,  $P_{fluc}$ ,  $S_4$  y los parámetros de difracción de Fresnel  $v_f$  y  $V_f$ . Los valores de  $v_f$  con el símbolo (†) indican los registros en los que se aprecian convincentemente las oscilaciones de Fresnel.

no será intenso. Si sucede al atardecer la turbulencia interrumpe la recombinación y prolonga la alta ionización hasta varias horas después de la puesta de Sol, este mecanismo es el responsable del centelleo intenso en latitudes ecuatoriales y medias de acuerdo a Basu y otros (2002) y Wernik y otros (2003). Cuando la perturbación inicia durante la noche las observaciones no son concluyentes.

En la figura 4.10 se muestran los datos de TEC, el promedio mensual del TEC, los índices  $Dst$  y  $K_p$  para el mes de enero 2013 entre los días 14 y 20. En el panel superior se muestra el comportamiento del TEC con respecto a su valor promedio. En el panel intermedio se encuentra el índice  $Dst$  (referenciado al eje del lado izquierdo) y la *variabilidad relativa del TEC* en porcentaje (%). Esta cantidad, definida como:

$$VarRelTec = \frac{TEC - TEC_{promedio}}{TEC_{promedio}} \times 100, \quad (4.3)$$

es una medida porcentual de cuanto cambio el TEC en un momento dado con respecto al promedio mensual. Si este valor es positivo, el TEC aumentó su valor por encima del promedio y si es negativo, es lo contrario. La variabilidad relativa esta referenciada con el eje derecho de ese panel. Finalmente, el panel inferior contiene los valores del índice  $K_p$ .

En el panel intermedio con números romanos se señala el momento del tránsito de 3C144 para los días 14, 15, 16, 17 y 19 de enero indicados con las flechas I, II, III, IV y V respectivamente. Desde el mediodía del 16 hasta el anochecer del 18 fue el intervalo de mayor perturbación magnética de acuerdo a los índices  $K_p$  y  $Dst$ . En estos días el TEC durante el día se incrementó por encima del promedio, manteniendose elevado durante la noche del 17. De los datos de la tabla 4.1, el día 17 el tránsito de 3C144 ocurrió a las 22:30 hrs con índice  $S_4 = 0.58$  (centelleo intenso) y  $V_f = 201 \text{ m/s}$ . En ese instante el  $Dst = -50 \text{ nT}$  y la variabilidad del TEC es de casi 50 % (valores que se indican con la flecha IV). Esta situación es consistente con la hipótesis de Basu y otros (2002) y Wernik y otros (2003) al asegurar que una perturbación magnética ocurrida en el atardecer prolonga la turbulencia en la densidad de electrones varias horas, lo que explica el intenso centelleo de 3C144 en comparación con los otros días.

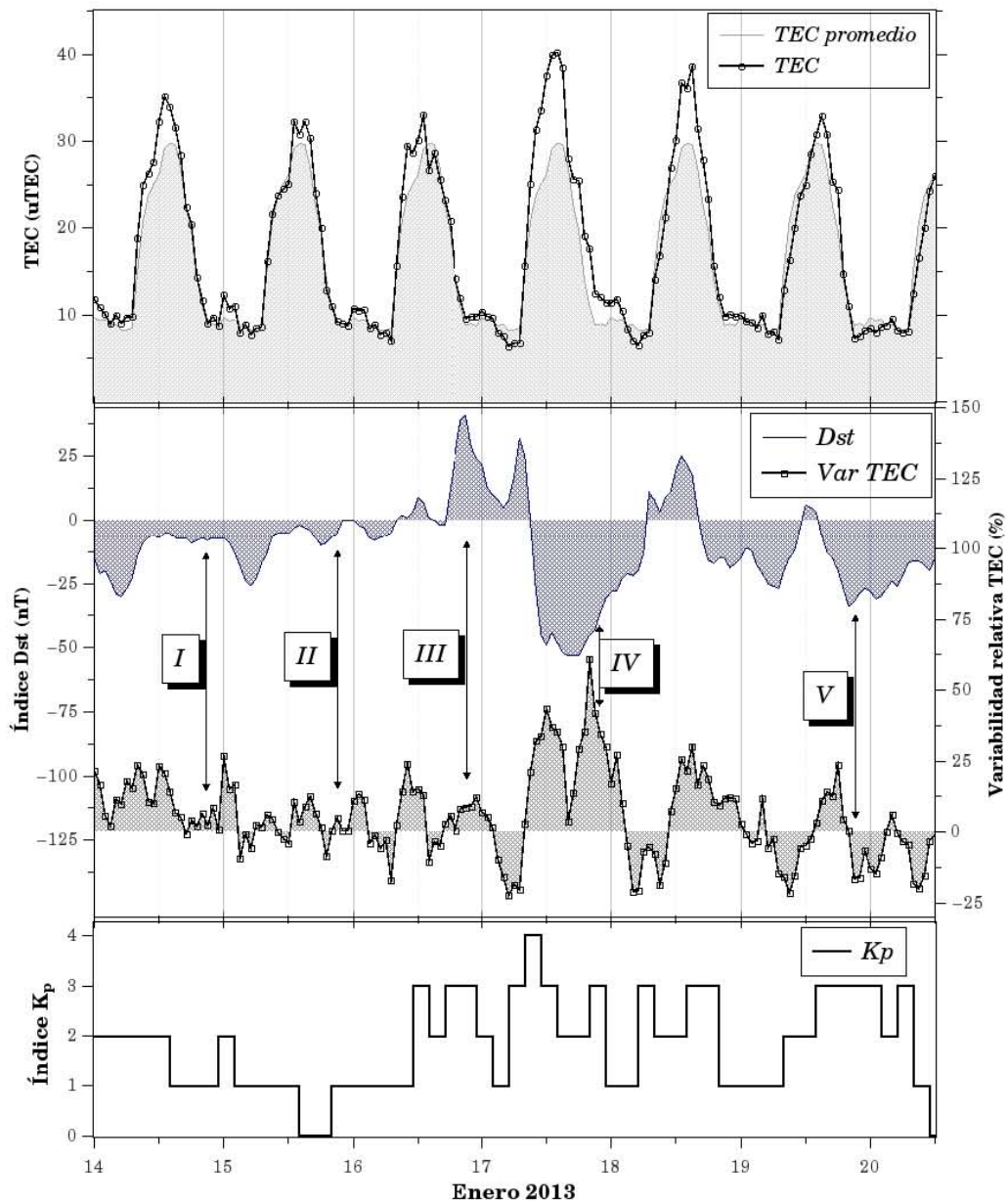


Figura 4.10: Relación entre la variabilidad en el TEC y el centelleo detectado por el MEXART.

# Discusión y conclusiones

## 5.1. Discusión: TEC sobre México

EL TEC vertical acumulado durante casi tres años que se observa en la figura 4.1 proporciona información acerca de los fenómenos regulares e irregulares que afectan a la ionosfera en escalas de días y meses; para dar una adecuada interpretación de estas variaciones es importante calcular el espectro de amplitud, es decir, la transformada de Fourier del TEC acumulado, mismo que se muestra en la figura 5.1.

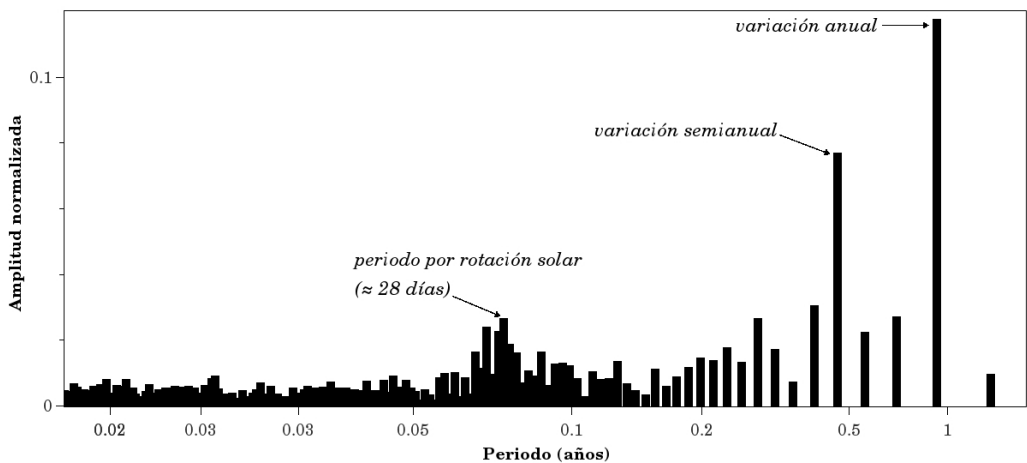
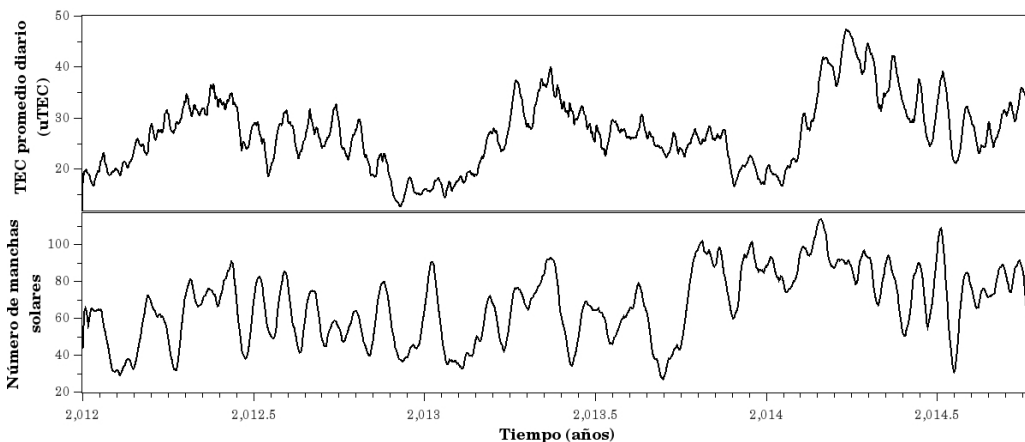


Figura 5.1: Espectro de amplitud del vTEC.

Sin contar el periodo de 24 horas por la rotación terrestre y el de 11 años por el ciclo solar que no se aprecian en esta escala, se distinguen en la figura 5.1 dos periodos con amplitudes significativas conocidas como variaciones anual y semianual que han sido bien estudiadas desde hace varias décadas (Rishbert y Garriot, 1969). La *variación semianual* (periodo de 0.5 años o seis meses aproximadamente) se caracteriza por valores altos de TEC en primavera y otoño (siendo máximo cerca de los equinoccios) mientras que en

verano e invierno los valores de TEC decrecen debido a cambios entre las concentraciones relativas de los componentes atmosféricos en verano y por el solsticio (cuando el Sol alcanza su declinación mínima y por lo tanto la tasa de ionización desciende) en invierno. La *variación anual* se debe a una variación de 7 % del flujo ionizante por el cambio de la distancia Sol-Tierra aunado a efectos estacionales (Rishbert y Garriot,1969).

En la figura 5.1 se señala otro periodo (de 28 días aproximadamente) que es causado por la rotación del Sol. En época de máxima actividad solar, las regiones activas que hay en la cara del Sol que da a la Tierra pueden incrementar el flujo de radiación UV hasta en un 50 % (Hargreaves, 1992), por lo que es de esperarse este efecto (que estrictamente hablando no es de 28 días debido a la rotación diferencial de Sol) sobre la ionosfera que en mínimo solar no sería tan evidente. En la figura 5.2 se observa una comparación entre el TEC promedio diario con el número de manchas solares<sup>1</sup> para las mismas fechas.



**Figura 5.2:** Comparación entre el número de manchas solares y el TEC promedio.

Las manchas solares son una medida indirecta de la radiación ionizante que da lugar a la ionosfera por lo que es de esperarse una dependencia global de la ionosfera diurna. Si bien en la figura 5.2 no se aprecia una relación *uno a uno* entre el TEC y el número de manchas, es latente la dependencia que hay de la actividad solar sobre el TEC, misma que debería ser más evidente si se toma un intervalo de tiempo más grande.

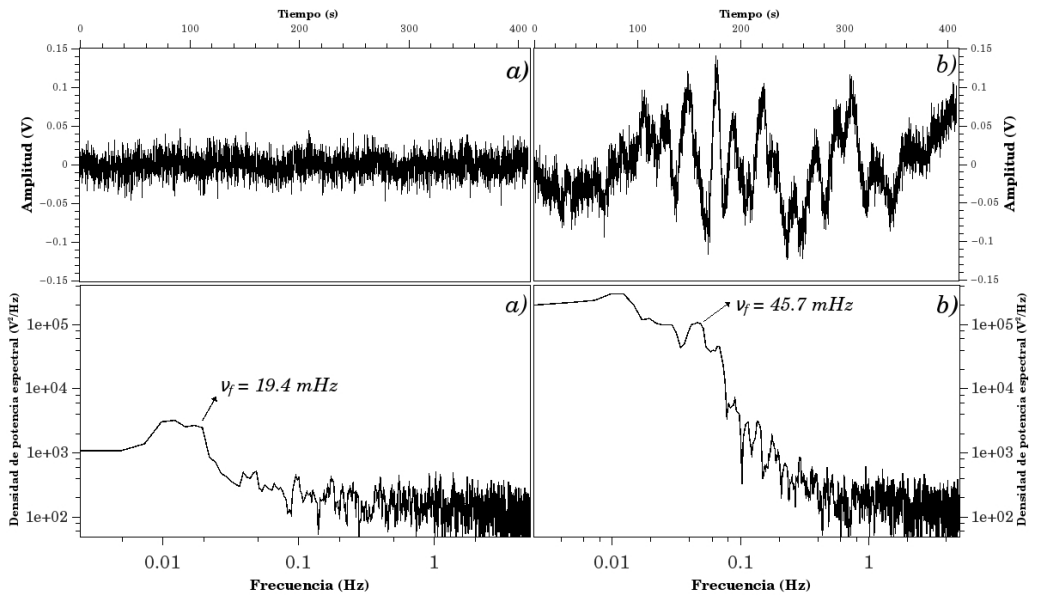
## 5.2. Discusión: Centelleo ionosférico con el MEXART

Por como se define el índice de centelleo  $D$ , valores cercanos a 1 indican que  $\sigma_{on}$  y  $\sigma_{off}$  tienen valores similares y por lo tanto la influencia de la ionosfera sobre la señal de la fuente es débil. Si  $\sigma_{on} > 2\sigma_{off}$  entonces la perturbación ionosférica es importante y se

<sup>1</sup>Datos tomados de la página [www.swpc.noaa.gov](http://www.swpc.noaa.gov)

manifiesta este efecto en el espectro de potencia. De acuerdo a Fremouw y otros (1980) el índice  $S_4$  corresponde, en el espectro de potencia, a la diferencia entre el espectro sobre la fuente y espectro del ruido de cielo de fondo (líneas negra y roja en la figura 4.9 respectivamente) por lo que valores de  $S_4$  cercanos a cero indican que las irregularidades de la ionosfera no difractan de manera importante la señal de la radiofuente.

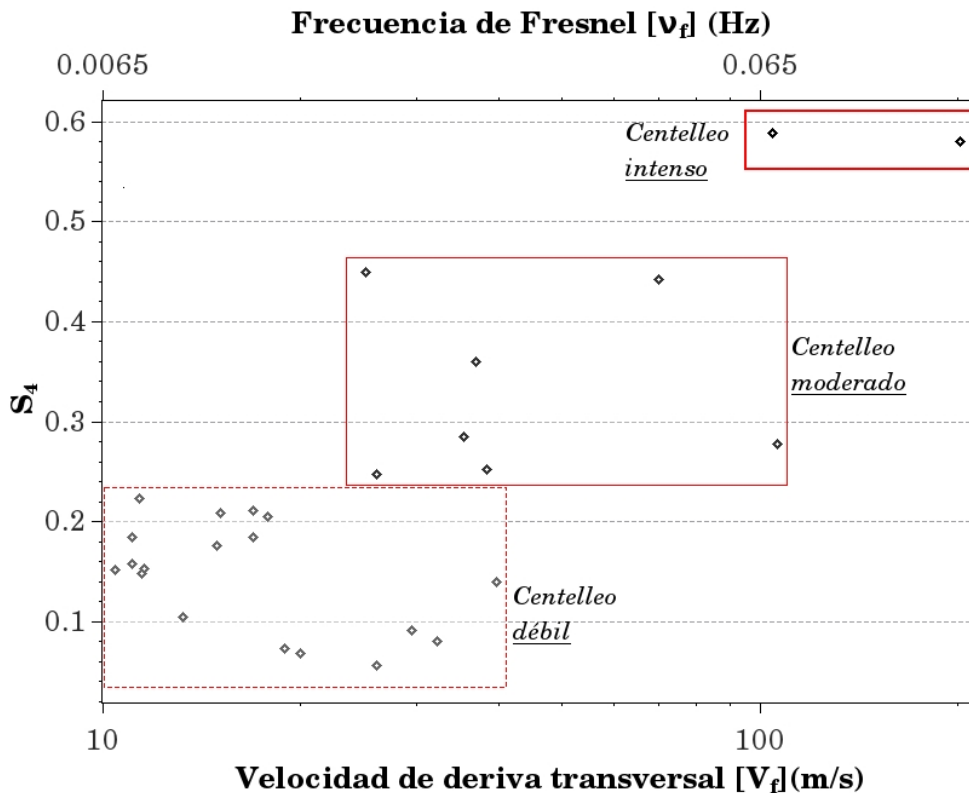
Tomando como ejemplo los tránsitos de 3C144 los días 14 y 15 de enero de 2013 podemos ver en la tabla 4.1 que el día 14  $S_4 = 0.06$ ,  $v_f = 19.4 \text{ mHz}$  ( $V_f = 29.8 \text{ m/s}$ ) y el día 15  $S_4 = 0.44$   $v_f = 45.7 \text{ mHz}$  ( $V_f = 70 \text{ m/s}$ ). En la figura 5.3 se muestra el comparativo de las dos señales sin tendencia (paneles superiores) y el espectro de potencia (paneles inferiores) correspondientes a cada día. En el tránsito del día 14 apenas se nota el efecto de la ionosfera sobre la señal de 3C144 mientras que el tránsito del día 15 está visiblemente perturbado.



**Figura 5.3:** Comparativo entre centelleo de 3C144 el día 14 (panel *a*) y 15 (panel *b*) de enero 2013.

De acuerdo a Fremouw y otros (1980) el índice  $S_4$  es una medida del área bajo la curva del espectro de potencia y así lo manifiestan los espectros de la figura 5.3. Valores grandes de la frecuencia de Fresnel se traducen en valores elevados de  $S_4$ . Esto significa que entre mayor sea la velocidad a la que se mueven las irregularidades (y por ende, más grande sea  $v_f$ ) es más probable que las irregularidades de tamaño del radio de Fresnel difracten la onda de radio y el valor de  $S_4$  aumenta. De acuerdo a Yakovlev (2002), se

pueden establecer tres niveles de centelleo en función de  $S_4$ : centelleo débil (valores de  $S_4$  menores a 0.25), moderado ( $0.25 < S_4 < 0.50$ ) e intenso ( $S_4$  mayor a 0.50). En la tabla 4.1 la mayor parte de los casos de centelleo entran en el régimen de centelleo débil, hay siete casos de centelleo moderado y dos de centelleo intenso. En la figura 5.4 se muestran los tres tipos de centelleo comparados con la velocidad (y frecuencia) de Fresnel.



**Figura 5.4:** Grafico que muestra el comportamiento de  $S_4$  y la velocidad de deriva  $V_d$ . Se distinguen en los recuadros las tres clases de centelleo.

La mayoría de los casos de centelleo débil tienen velocidades menores a 20 m/s; el centelleo moderado abarca un intervalo de velocidades entre 25 y 100 m/s y los dos casos de centelleo intenso alcanzan velocidades superiores a 100 m/s siendo el día 17 de enero de 2013 el caso más extremo alcanzando 201 m/s. Hay algunas cuestiones a considerar en los cálculos de velocidad. En primer lugar, los valores obtenidos no son más que una estimación de como se mueven las irregularidades más que un valor exacto ya que se hace la suposición de que la capa difractora se encuentra a 350 km de altura y que todas las irregularidades se mueven a la misma velocidad y esto no impone una fuente de error en los cálculos.

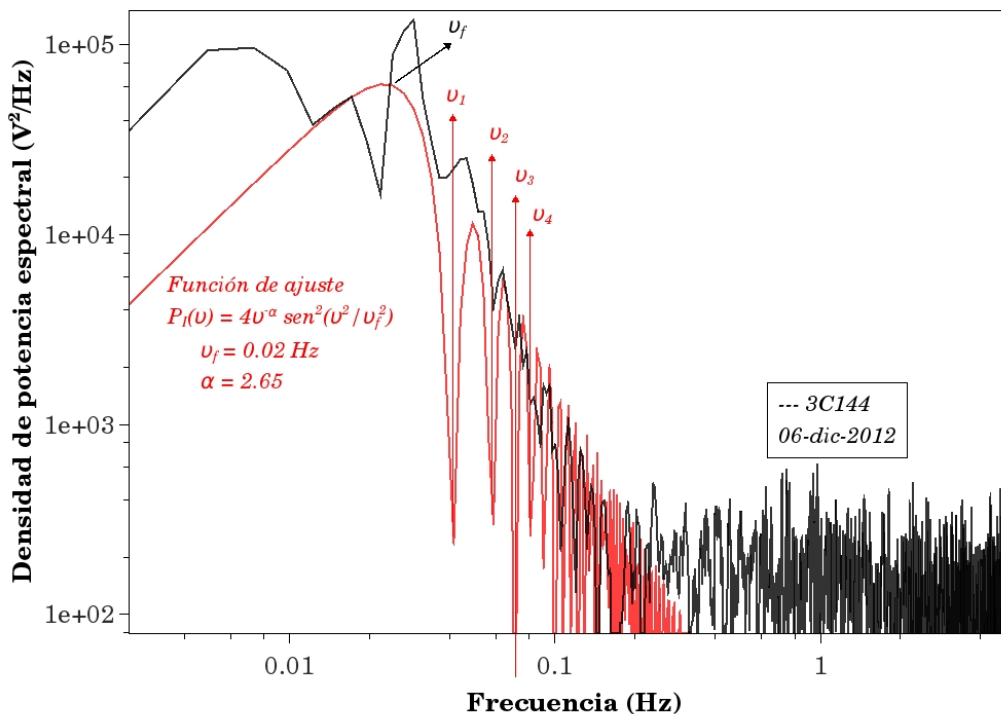
El efecto del campo magnético tampoco es considerado; de acuerdo a Rufenach (1972) las irregularidades de en la capa  $F$  derivan a lo largo de las líneas de campo magnético en dirección este a oeste, que coincide con la dirección de rotación de la Tierra. La superficie y la ionosfera no rotan a la misma velocidad, hay una velocidad relativa entre ambas que causa un error en las mediciones de velocidad de  $20\text{ m/s}$  de acuerdo a una estimación hecha por Rufenach (1972) lo cual es una fuente de error grande porque de ese orden son las mediciones de centelleo débil y moderado. También existe una relación entre el grado de perturbación geomagnética y la intensidad del centelleo ya que casi todos los casos de centelleo moderado y ambos casos de centelleo intenso ocurren cuando el índice  $K_p$  es mayor a 3, valor límite entre condiciones magnéticas quietas y perturbadas.

Otra limitante en el tratamiento de los datos es el modelo de centelleo propuesto (ecuación 3.4). Se trata del modelo en una dimensión más simple y que mejor se ajusta a las observaciones pero no es el más adecuado. Según lo expone Rufenach (1971) el modelo de ley de potencia (ecuación 3.8) es una buena aproximación para explicar la caída de potencia en la región de alta frecuencia; Rufenach propone un modelo gaussiano que incluye otras variables como el grosor de la rejilla y el radio axial que ajusta bien la región de baja frecuencia pero no así con la zona de altas frecuencias. En la figura 5.5 se muestra el ajuste del modelo de ley de potencia para el registro del día 6 de diciembre de 2012.

El grosor de la región de la ionosfera (capa  $F$ ) que causa el centelleo es importante porque las oscilaciones de Fresnel son amortiguadas por la anchura de la rejilla. En la figura 5.5 se muestran los cuatro primeros valores de  $v_i$  (los ceros en la función de Fresnel dada por la ecuación 3.7 donde la potencia es mínima); según el modelo estas frecuencias tienen potencia cero pero en el espectro apenas se aprecia la caída de potencia. De acuerdo a Rufenach (1972) esto sucede porque el grosor de la región ionosférica causante del centelleo no es despreciable y eso hace que la difracción no se lleve a cabo tan eficiente como para que se desarrollen enteramente las oscilaciones de Fresnel. Rufenach estima que si se pueden apreciar convincentemente cuatro mínimos entonces el grosor es menor a  $50\text{ km}$ .

En la tabla 4.1 se indica con el símbolo ( $\dagger$ ) aquellas fechas donde las primeras oscilaciones de Fresnel se observan convincentemente; únicamente hay 3 tránsitos en el mes de diciembre que es la época en que hay menor densidad de electrones hay en la capa  $F$  nocturna y por lo tanto mejor se asemeja la capa  $F$  a una rejilla de difracción delgada. En cuanto al radio axial y la dirección de movimiento, la extensión del modelo gaussiano a dos dimensiones hecha por Rufenach (1972) estima que cerca del ecuador magnético las irregularidades tienen una proporción de 5:1 con el eje mayor en dirección perpendicular





**Figura 5.5:** Diferencias entre el espectro de la fuente y el modelo de ajuste (ley de potencia).

a la dirección de movimiento, lo cual coincide con observaciones de satélites artificiales (Rufenach, 1972).

Finalmente, dada la configuración y tasa de muestreo que tiene el MEXART, el tiempo de observación de las radiofuentes está limitado a 4 minutos o 240 segundos, lo que significa que la frecuencia mínima observable en el espectro de potencia es  $1/240$  segundos o  $4.2 \text{ mHz}$ ; en la tabla 4.1 se ve que la mayoría de los casos de centelleo débil tienen frecuencias de Fresnel cercanas a  $10 \text{ mHz}$ , por lo que resulta difícil la medición de  $v_f$  al ser estos valores muy próximos. De acuerdo a Rufenach (1971) son necesarios al menos 10 minutos de observación de una fuente para tener bien definida la región de bajas frecuencias y sea posible medir  $v_f$  adecuadamente (lo cual no se puede hacer con el MEXART). La región de alta frecuencia del espectro no representa mayor problema ya que la frecuencia de Nyquist para una resolución de 10 a 100 mps es mayor a  $10 \text{ Hz}$  y este estudio se centra en frecuencias menores a  $1 \text{ Hz}$ . Para una mejor resolución del espectro de potencia resultan más adecuadas las mediciones con resolución mayor a 20 mps porque eso significa que en 4 minutos de observación de la fuente hay 4800 datos (una serie de tiempo requiere de 4096 datos mínimo para que la FFT sea confiable).

## 5.3. Conclusiones

En esta tesis se estudió el estado de la ionosfera sobre el territorio mexicano (variaciones regulares, irregulares, influencia del campo geomagnético y de la actividad solar) usando estaciones GNSS con los datos de la plataforma CODE usando el código `ionFR` para calcular el TEC vertical en el reciente máximo de actividad solar (entre 2012 y 2014). Por otro lado se usó la radiofuente 3C144 para estudiar el centelleo ionosférico captado por el radiotelescopio MEXART durante 27 noches seleccionadas entre 2012 y 2014. La novedad e importancia de este estudio radica por un lado en mostrar la implementación de una nueva herramienta (el código `ionFR`) para calcular el TEC sobre territorio mexicano sobre un intervalo de tiempo de casi tres años (hecho que no se había llevado a cabo en estudios previos de TEC) y por otro, en la metodología utilizada para extraer información de parámetros ionosféricos (velocidad de propagación, intensidad y tamaño de las irregularidades causantes del centelleo) usando análisis espectral sobre los datos de MEXART.

A partir de los datos del contenido total de electrones vertical calculados con el código `ionFR` durante el periodo de máxima actividad solar comprendido entre enero de 2012 y octubre de 2014 (ver figura 4.1) se obtuvo que el TEC tiene variaciones periódicas. La más notable es la variación diurna de 24 horas, en la cual valor de TEC oscila entre 50  $uTEC$  durante el día y 10  $uTEC$  en la noche, aunque estos valores son altamente variables; a esta variación se le añade una modulación de 28 días aproximadamente debida a la rotación del Sol, que es más notoria en época de actividad solar; hay un periodo de seis meses (conocido como variación semianual) que se caracteriza por valores elevados de TEC cerca de los equinoccios (en los meses de marzo, abril, septiembre y octubre) así como decrementos cerca de los solsticios (junio, julio, diciembre y enero) alcanzando en diciembre su valor promedio más bajo; por último presenta una variación con periodo de un año (ver figura 5.1).

El TEC es propenso a variaciones irregulares producto de la actividad solar y geomagnética principalmente que perduran por varios días. El efecto de la actividad solar, a través del número de manchas solares, se muestra en la figura 5.2. Uno de los principales resultados de este trabajo es que la respuesta de la ionosfera a una tormenta geomagnética se divide en tres etapas (ver figura 4.5): Primero el TEC incrementa su valor por encima del promedio (etapa que dura unas horas) y luego disminuye por intervalo de uno o dos días hasta que finalmente el TEC recupera su valor promedio días después; esta morfología de una tormenta ionosférica es consistente con el comportamiento de ionosfera de latitudes medias.

El centelleo ionosférico fue el fenómeno utilizado en este trabajo para estudiar la afectación de la ionosfera sobre la señal de los 27 tránsitos de 3C144 captados por el

MEXART. Para cuantificar la intensidad del centelleo se usaron los índices  $D$  y  $S_4$  mientras que con un análisis espectral se obtuvo la velocidad de deriva horizontal  $V_f$  y tamaño de las irregularidades  $d$  implementando el modelo propuesto por Rufenach (1971). La escala de las irregularidades ionosféricas causantes del centelleo esta entre 1.5 km y 200 m y la velocidad de movimiento transversal entre 20 m/s y 200 m/s. Con base en la información de la tabla 4.1 se clasificó el centelleo en tres tipos: Centelleo débil ( $S_4 < 0.25$ ,  $V_f < 40$  m/s), centelleo moderado ( $0.25 < S_4 < 0.5$ ,  $40$  m/s  $< V_f < 100$  m/s) y centelleo intenso ( $S_4 > 0.5$ ,  $V_f > 100$  m/s).

Al correlacionar algunos casos de centelleo en 3C144 con mediciones del TEC se encontró que los casos de centelleo moderado e intenso ocurren cuando la ionosfera es perturbada por una alteración magnética. El caso de centelleo más intenso ocurrió el 17 de enero de 2013. La señal de 3C144 alcanzó valores  $S_4 = 0.58$  y  $V_f = 201$  m/s. En el momento del tránsito de la fuente ocurría una tormenta geomagnética moderada (que alcanzó  $Dst = -50$  nT horas previas al tránsito de 3C144) haciendo que el TEC se desviara más de 50% de su valor nominal, lo que es indicio de turbulencia ionosférica desencadenada por la tormenta geomagnética. Al correlacionar la actividad magnética con el TEC y la señal del MEXART es posible estudiar la dinámica de la ionosfera a fin de tener un panorama general del entorno espacial sobre nuestro país.

## 5.4. Trabajo a futuro

Con el objetivo de que la metodología implementada pueda servir de base para futuros trabajos, se discuten a continuación algunas ideas derivadas de los resultados obtenidos en este trabajo:

- El código `ionFR` tiene la ventaja de brindar valores de vTEC, slant TEC, el campo geomagnético total (calculado a partir del International Geomagnetic Reference Field IGRF11) y la rotación Faraday para una declinación y ascensión recta dadas en un sitio. Aunque este trabajo se centra en el vTEC, el cálculo de slant TEC, campo magnético y rotación Faraday para puede resultar útil para estudios con otros fines.
- Hay tres tipos de archivos IONEX (que sirven de entrada para el código `ionFR`):  *finales*, que se usaron en este trabajo, *rápidos* que son liberados por CODE para aplicaciones en tiempo real y *predictivos* que se usan con el fin de predecir el TEC con uno o dos días de anticipación. Los dos últimos archivos resultan de gran utilidad si se desean hacer mapas locales de TEC de baja resolución en tiempo real o para predecir el comportamiento del TEC en un sitio con antelación.
- La metodología basada en un modelo de difracción de Fresnel en una dimensión

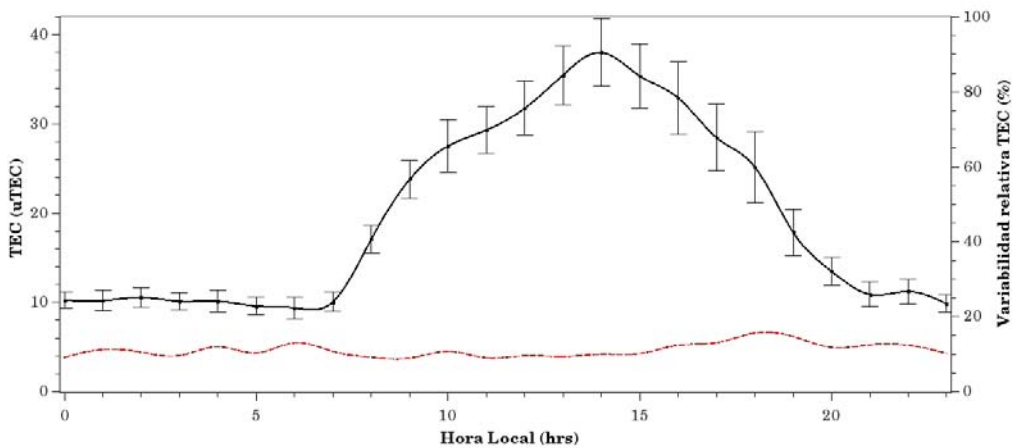
resulta ser una buena aproximación para explicar el espectro de potencia observado, sin embargo, sería conveniente un modelo en dos o tres dimensiones que permita extraer más información del espectro (como la dirección de propagación de las irregularidades, el radio axial de las mismas, el grosor de la zona difractora, entre otros) como lo sugiere Rufenach (1972).

- Resultaría de gran utilidad implementar la metodología descrita para otras fuentes de radio además de 3C144, de tal manera que tener fuentes a diferentes declinaciones permitiría conocer el estado de la ionosfera en trayectorias diferentes al cenit. En este trabajo no se hizo porque para fuentes de radio cósmicas con declinaciones diferentes a la del MEXART (como Cassiopea, Cygnus X, Virgo entre otras) es necesario hacer una corrección de propagación oblicua al modelo de Rufenach (1971).

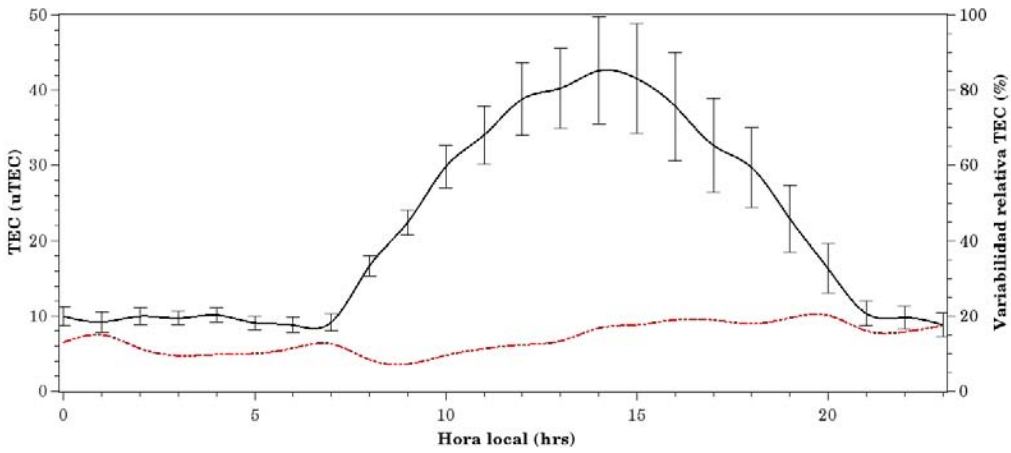


# TEC sobre México durante el 2012

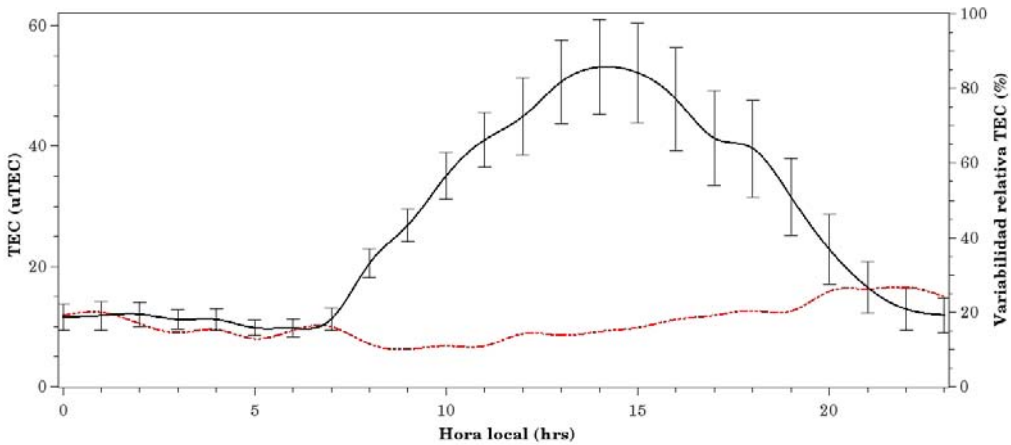
Las figuras A.1 hasta A.12 muestran el comportamiento promedio mensual del TEC de los doce meses del 2012 (de enero a diciembre).



**Figura A.1:** Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para enero 2012.

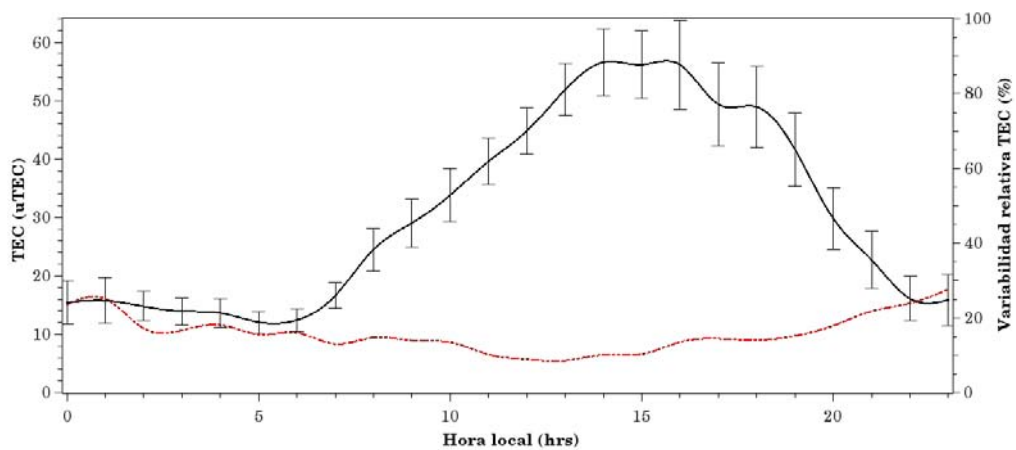


**Figura A.2:** Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para febrero 2012.

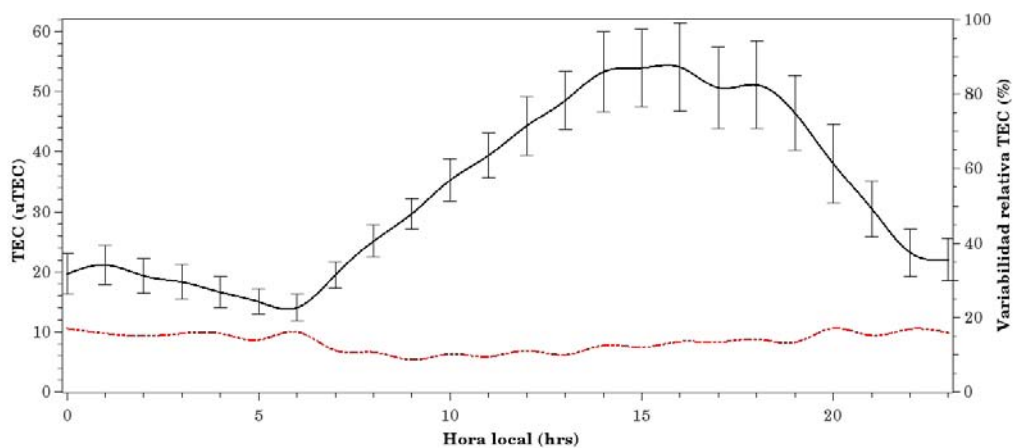


**Figura A.3:** Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para marzo 2012.

En las figuras A.13 y A.14 se muestran los perfiles promedio de los doce meses antes mostrados apilados en una sola gráfica para dimensionar la diferencia del TEC entre meses consecutivos.

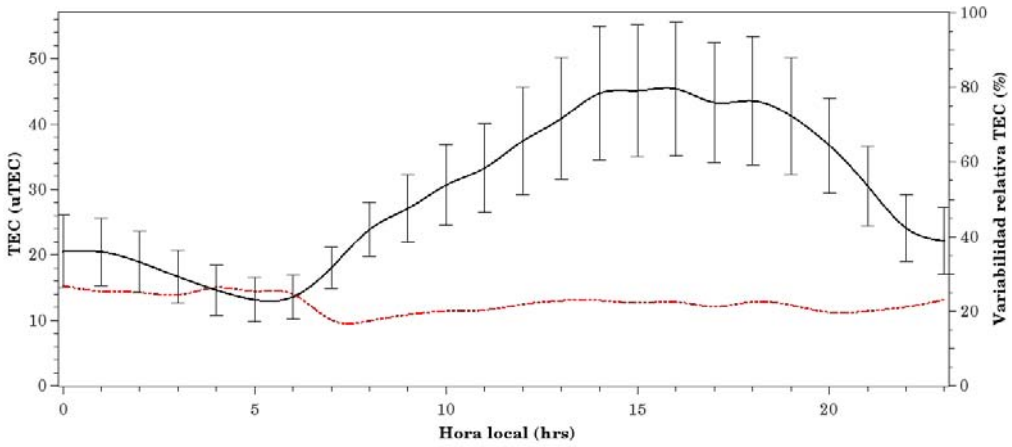


**Figura A.4:** Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para abril 2012.

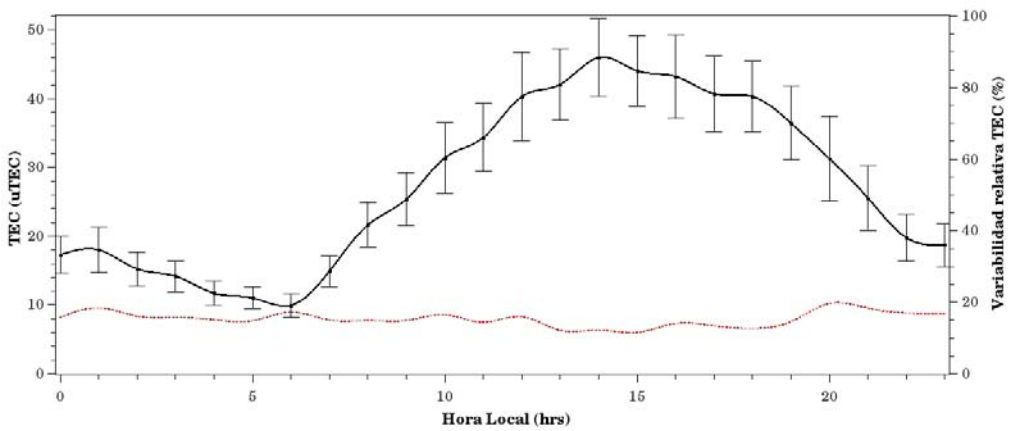


**Figura A.5:** Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para mayo 2012.

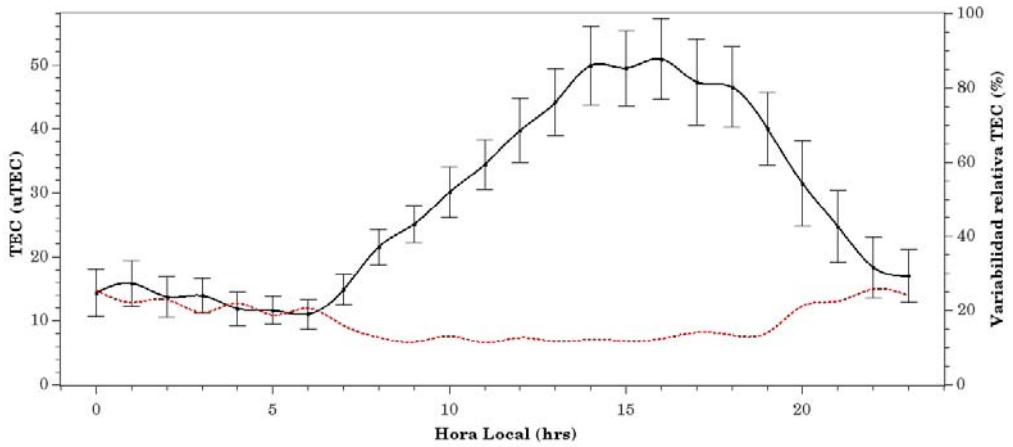




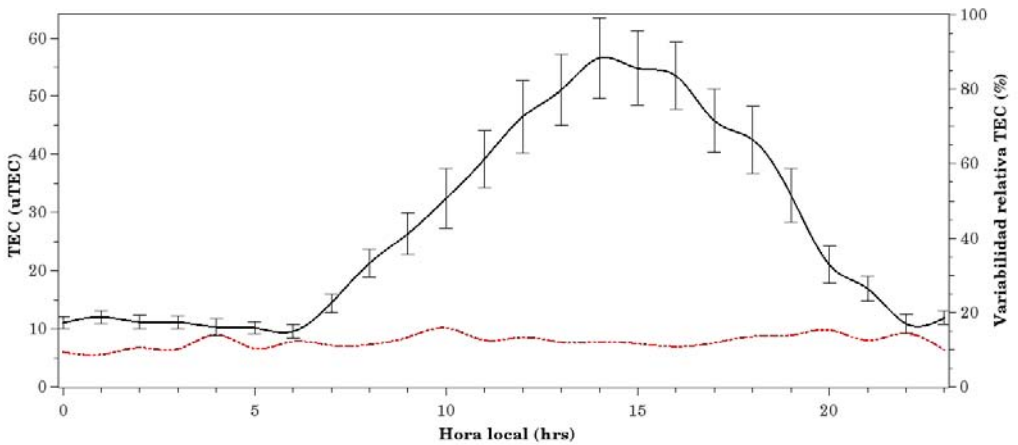
**Figura A.6:** Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para junio 2012.



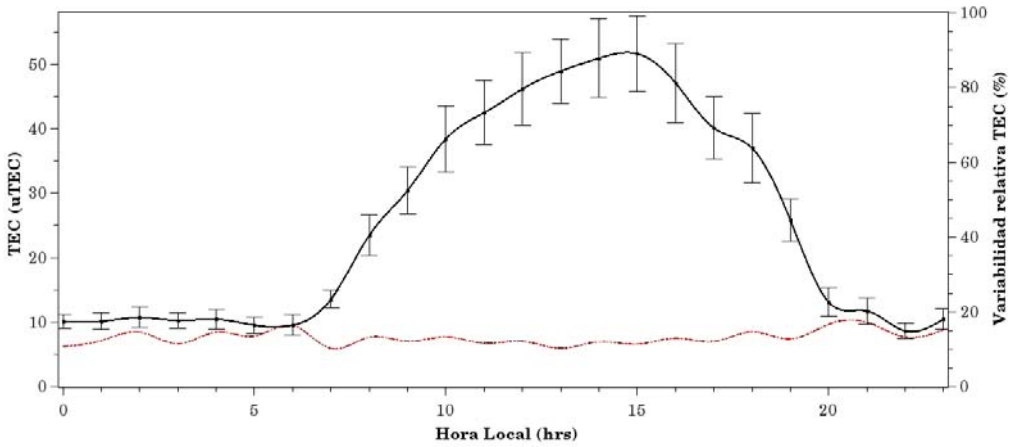
**Figura A.7:** Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para julio 2012.



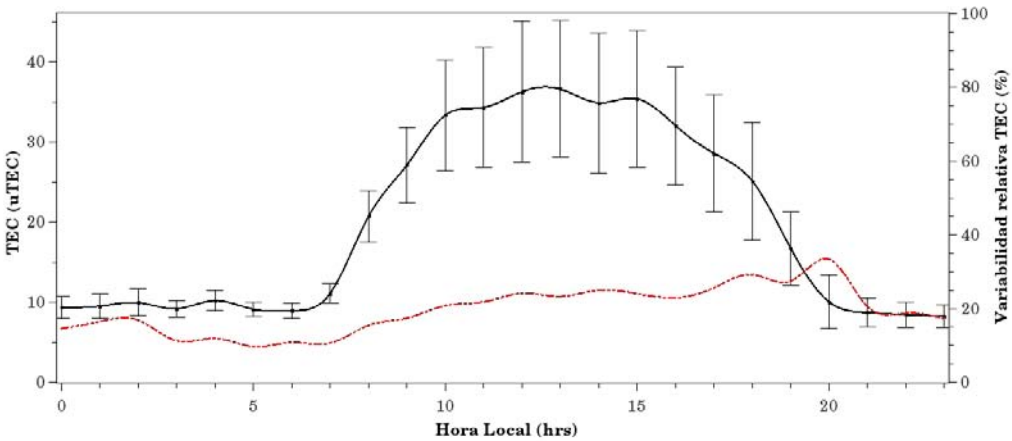
**Figura A.8:** Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para agosto 2012.



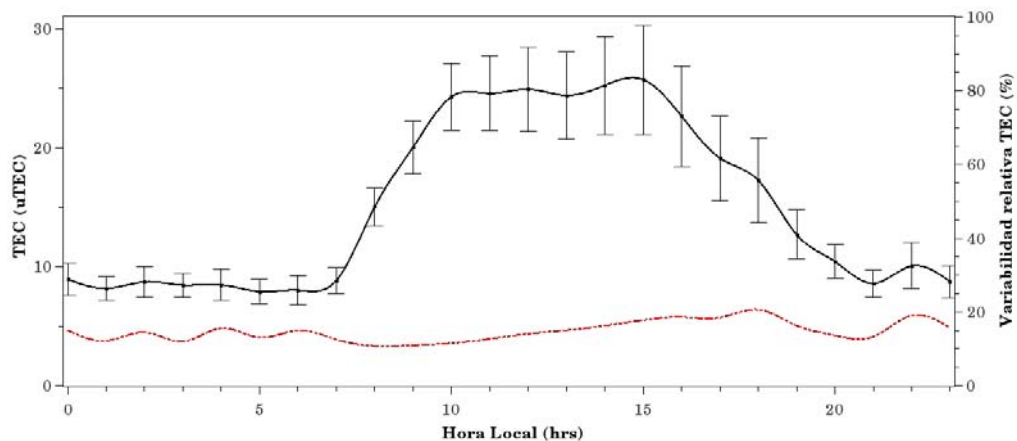
**Figura A.9:** Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para septiembre 2012.



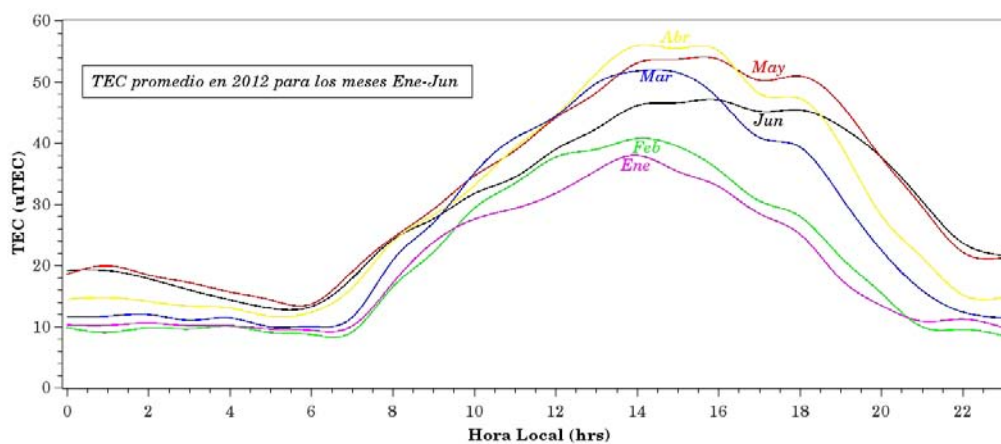
**Figura A.10:** Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para octubre 2012.



**Figura A.11:** Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para noviembre 2012.



**Figura A.12:** Perfil promedio de TEC y variabilidad relativa del TEC como función de la hora local para diciembre 2012.



**Figura A.13:** Perfiles mensuales de TEC entre enero y junio 2012.

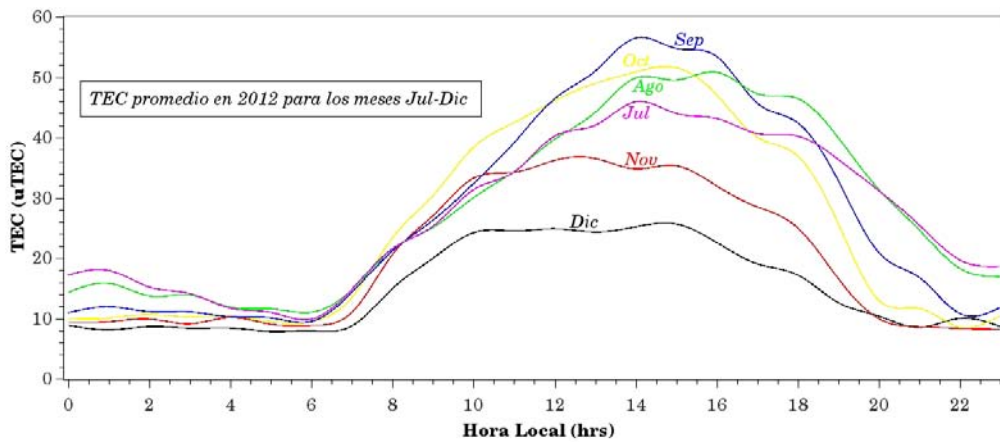


Figura A.14: Perfiles mensuales de TEC entre julio y diciembre 2012.

# Bibliografía

---

- [1] AARONS, J.: «Global morphology of ionospheric scintillation». Proceedings of the IEEE, Num. 4, 1982, **70**, pp. 360–378.
- [2] ———: «50 years of radio scintillation observations». IEEE Antenas and Radio Propagation Magazine, 1997, **39**, p. 10.
- [3] ADEM, JULIÁN: El Año Geofísico Internacional en México. Monografías del Instituto de Geofísica Número 3, 1962.
- [4] APPLETON, E. V. y BARNETT, M. A.: «On some direct evidence for downward atmospheric reflection of electric rays». Proc. Roy. Soc. Series A, 1925, **109**, pp. 621–641.
- [5] ARAUJO-PRADERE, EDUARDO ATABEX: Morfología de la ionosfera sobre México. Tesina o Proyecto, Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México, 1994.
- [6] BASU, S.; GROVES, K. M.; BASU, SU. y SULTAN, P. J.: «Specification and forecasting of scintillations in communication-navigation links: Current status and future plans». Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2002, **64**, pp. 1745–1754.
- [7] BEUTLER, G.; ROTHACHER, M. S.; SCHAER, T. A.; SPRINGER, J. K. y NEILAN, R.E.: «The International GPS Service (IGS): An interdisciplinary service in support of Earth sciences». Advances in Space Research, 1999, **23**, pp. 631–653.
- [8] BOLTON, J. B.; SLEE, O. B. y STANLEY, G. J.: «1953 Galactic radiation at radio frequencies IV: Low altitud scintillations of discrete sources». Australian Journal of Physics, 1953, **6A**, pp. 434–451.
- [9] BOOKER, H. G.: «The use of radio stars to study irregular refraction of radio waves in the ionosphere». Proceedings of the IRE, 1958, pp. 298–314.
- [10] BOUSANTO, M. J.: «Ionospheric storms - A review». Space Sci. Reviews, 2000, **88**, pp. 563–601.

- [11] BOWHILL, S. A.: «Statistics of a radio wave diffracted by a random ionosphere». *J. Res. Nat. Bur. Stand., Sect. 65D*, 1961, **275**.
- [12] BOYD, R. L. F.: Space research by rocket and satellite. Arrow Books Ltd., London, 1960.
- [13] BUDDEN, K. G.: The physics of the ionosphere. Physical Society, London, 1955.
- [14] —: Radio waves in the ionosphere. Cambridge University Press, London and New York, 1961.
- [15] —: «The amplitude fluctuations of the radio wave scattered from a thick ionospheric layer with weak irregularities». *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1971, **27**.
- [16] CARRILLO-VARGAS, A.; PÉREZ-ENRÍQUEZ, H. R.; LÓPEZ-MONTES, R.; RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ, M. y UGALDE-CALVILLO, L. G.: «Radio signal anomalies detected with MEXART in 2012 during the recovery phase of geomagnetic storms». *Adv. Space. Res.*, 2016, **58**, p. 2057–2066.
- [17] CARRILLO-VARGAS, A.; PÉREZ-ENRÍQUEZ, H. R.; RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ, M.; LÓPEZ-MONTES, R.; CASILLAS-PÉREZ, G. A. y ARAUJO-PRADERE, E. A.: «Ionospheric disturbances detected by MEXART». *Adv. Space. Res.*, 2012, **49**, pp. 1570–1580.
- [18] CARRILLO-VARGAS, ARMANDO: Construcción y calibración del radiotelescopio de centelleo interplanetario MEXART. Tesis doctoral, Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.
- [19] CHAMPAN, S.: «The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating earth». *Proc. Phys. Soc.*, 1931, **43**, pp. 26–45.
- [20] CIPAGAUTA-LARA, E. C. y DURAND-MANTEROLA, H. J.: «Efectos de tormentas geomagnéticas sobre la ionosfera de las estaciones El Cerrillo (Toluca, México) y Boulder (Colorado, EUA)». *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 2010, **27**, pp. 366–373.
- [21] DAVIES, K.: Ionospheric Radio Propagation. National Bureau of Standards Monograph, 1965.
- [22] —: Ionospheric Radio. IEE Electromagnetic Wave Series 31, Peter Peregrinus Ltd., IEE, London UK, 1990.
- [23] DUNGEY, J. W.: «Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones». *Phys. Rev. Lett.*, 1961, **6**, p. 15.

- 
- [24] FREMOUW, E. J.; LIVINGSTON, R. C. y MILLER, D. A.: «On statistics of scintillating signals». *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1980, **42**, pp. 687–694.
- [25] GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T. y VASYLIUNAS, V. M.: «What is a geomagnetic storm?» *J. Geophys. Res. A4*, 1994, **99**, p. 5771–5792.
- [26] GONZÁLEZ-ESPARZA, J. A.; CARRILLO-VARGAS, A.; ANDRADE, E.; PÉREZ-ENRÍQUEZ, H. R. y KURTZ, S.: «The MEXART interplanetary scintillation array in Mexico». *Geofis. Int.*, 2004, **43**, pp. 61–73.
- [27] GOODMAN, J. M.: *HF communications: Science and technology*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- [28] ———: *Space Weather and Telecommunications*. Springer. Radio propagation services, Virginia, USA, 2005.
- [29] HARGREAVES, J. K.: *The solar-terrestrial environment*. Cambridge University Press, UK, 1992.
- [30] HARTREE, D. R.: «The propagation of electro-magnetic waves in a refracting medium in a magnetic field». *Proc. Cambridge Phil. Soc.*, 1931, **27**, p. 143.
- [31] HEY, J. S.; PARSONS, S. J. y PHILLIPS, J. W.: «Fluctuations in cosmic radiation at radio-frequencies». *Nature*, 1946, **158**, pp. 234–236.
- [32] HINES, C. O.; PAGHIS, I.; HASTZ, T. R. y FEJER, J. A.: *Physics of the Earth's upper atmosphere*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ USA, 2001.
- [33] HUNSUCKER, R. D. y HARGREAVES, J. K.: *High latitude ionosphere and its effects on radio propagation*. Cambridge University Press, UK, 2003.
- [34] IBARRA-ORTEGA, HÉCTOR ENRIQUE: *Variación del contenido total de electrones en la ionosfera a latitudes medias durante actividad geomagnética con Dst > 50 nT desde 1999 a 2014*. Tesina o Proyecto, Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México, 2016.
- [35] ITU-R: *Short term prediction of solar induced variations of operational parameters for ionospheric propagation*. ITU-R, International Telecommunications Union, Geneva. P.727, 1994.
- [36] ———: *Short term forecasting of critical frequencies, operational maximum useable frequencies and total electron content*. ITU-R, International Telecommunications Union, Geneva. P.888, 1995.
- [37] KELLEY, M. C.: *The Earth's ionosphere: Plasma physics and electrodynamics*. Academic Press Inc., Second Edition, San Diego CA, 1989.
-



- [38] KIVELSON, M. G. y RUSSELL, C. T.: Introduction to space physics. Cambridge University Press, UK, 1995.
- [39] LAWRENCE, R. S.; LITTLE, C. G. y CHIVERS, H. J. A.: «A survey of ionospheric effects upon earth-space radio propagation». Proc. IEEE, 1964, **52**, pp. 4–27.
- [40] LIU, C. y FRANKE, S. J: «Experimental and theoretical studies of ionospheric irregularities using scintillation techniques». Radio Science, 1986, **21**, pp. 363–369.
- [41] LÓPEZ-MONTES, R.; PÉREZ-ENRÍQUEZ, H. R.; ARAUJO-PRADERE, E. A. y CRUZ-ABEYRO, J. A. L.: «Fractal and wavelet analysis evaluation of the mid latitude ionospheric disturbances associated with major geomagnetic storms». Adv. Space. Res., 2015, **55**, p. 586–596.
- [42] LÓPEZ-MONTES, REBECA: Cálculo del contenido total de electrones (TEC) en la ionosfera sobre diversas estaciones mexicanas de GPS y su relación con el clima espacial asociado a ráfagas intensas de rayos X. Tesina o Proyecto, Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- [43] MANOHARAN, P. K.: «Three-dimensional structure of the solar wind: Variation of density with the solar cycle». Sol. Phys., 1993, **148**, pp. 153–167.
- [44] MEJÍA-AMBRIZ, J. C.; VILLANUEVA-HERNANDEZ, P.; GONZÁLEZ-ESPARZA, J. A.; AGUILAR-RODRIGUEZ, E. y JEYAKUMAR, S.: «Observations of interplanetary scintillation (IPS) using the mexican array radio telescope MEXART». Sol. Phys., 2010, **256**, pp. 309–320.
- [45] MEJÍA-AMBRIZ, JULIO CÉSAR: Análisis de observaciones del MEXART: Bases para estudios de Centelleo interplanetario. Tesis doctoral, Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- [46] MENDILLO, M.: «Ionospheric electron content behavior during geomagnetic storms». Nature, 1971, **234**, p. 23.
- [47] MILANTIEV, V. y TEMKO, S.: Física del plasma. Física al alcance de todos, Mir, Moscú, 1983.
- [48] ONDOH, T. y MARUBASHI, K.: Science of Space Environment. Ohmsha IOS Press, Japan, 2001.
- [49] PERRONE, L. y DE-FRANCESCHI, G.: «Solar, ionospheric and geomagnetic indices». Annali di geofisica, 1998, **41**, pp. 843–855.

- 
- [50] PETROVSKI, I. G. y TSUJII, T.: Digital satellite navigation and geophysics. Cambridge University Press, UK, 2012.
- [51] PROLSS, G.: Handbook of atmospheric electrodynamics. CRS Press, Florida USA, second edition, 1995.
- [52] PÉREZ-DE TEJADA, H.: Características del comportamiento de la ionosfera en México. Dirección General de Telecomunicaciones, SCT, 1973.
- [53] RATCLIFFE, J. A.: «Some aspects of diffraction theory and their application to the ionosphere». Reports on Progress in Physics, 1956, **19**, pp. 188–267.
- [54] —: The magneto-ionic theory and its application to the ionosphere. Cambridge University Press, UK, 1959.
- [55] —: An introduction to the ionosphere and magnetosphere. Cambridge University Press, UK, 1972.
- [56] RISHBERT, H. y GARRIOT, O. K.: Introduction to ionospheric physics. Academic Press, New York, 1969.
- [57] RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ, M.; PÉREZ-ENRÍQUEZ, H. R.; CARRILLO-VARGAS, A.; LÓPEZ-MONTES, R.; ARAUJO-PRADERE, E. A.; CASILLAS-PÉREZ, G. A. y CRUZ-ABEYRO, J. A. L.: «Ionospheric disturbances and their impact on IPS using MEXART observations». Solar Phys., 2014, **289**, pp. 2677–2695.
- [58] RUFENACH, C. L.: «A radio scintillation method of estimating the small-scale structure in the ionosphere». J. Atmos. Terr. Phys., 1971, **33**, pp. 1941–1951.
- [59] —: «Power-law wavenumber spectrum deduced from ionospheric scintillation observations». J. Geofis. Res., 1972, **77**, pp. 4761–4772.
- [60] RYLE, M. y HEWISH, A.: «The effects of the terrestrial ionosphere on the radio waves from discrete sources in the galaxy». Proceedings of the Royal Society A, 1950, **110**, pp. 381–394.
- [61] SCHAER, S. W.; GURTNER, W. y FELTENS, J.: «IONEX: The IONosphere map EXchange format version 1». Proc. of the 1998 IGS Analysis Centres Workshop, ESOC, Darmstadt, Germany, 233, 1988.
- [62] SCHAER, STEFAN: Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System. Tesis doctoral, Astronomic Institute. University of Bern., 1999.
- [63] SMITH, A.: Radioexploración del Sol. Editorial Reverte Mexicana, México, 1990.
-

- [64] SMITH, F. G.; LITTLE, C. G. y LOWELL, A. C. B.: «Origin of the fluctuations in the intensity of radio waves from galactic sources». Nature, 1950, **165**, pp. 422–424.
- [65] SOTOMAYOR-BELTRAN, C.; SOBEY, C. y HESSELS, J. W. T. ET AL.: «Calibrating high-precision Faraday rotation measurements for LOFAR and the next generation of low-frequency radio telescopes». Astronomy and Astrophysics, A58, 2013, **552**, pp. 1–13.
- [66] TASCIONE, T. F.: Introduction to the space environment. Orbit Book Company, Florida, 1988.
- [67] UGALDE-CALVILLO, LUIS GERARDO: Interferencias satelitales y perturbaciones ionosféricas detectadas por el radiotelescopio MEXART. Tesina o Proyecto, Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [68] WERNIK, A. W.; SECAN, J. A. y FREMOUW, E. J.: «Ionospheric irregularities and scintillation». Adv. Space Res., 2003, **31**, pp. 971–981.
- [69] WILD, J. P y ROBERTS, J. A.: «Regions of the ionosphere responsible for radio star scintillations». Nature, 1956, **178**, pp. 377–378.
- [70] WRIGHT, J. W.: «Dependence of the ionosphere F-Region on the solar cycle». Nature, 1962, **194**, pp. 461–463.
- [71] YAKOVLEV, O.I.: Space Radio Science. Taylor and Francis Group, London, UK, 2002.
- [72] YEH, K. C. y LIU, C.: «Radio wave scintillations in the ionosphere». Proc. IEEE, 1982, **70**, pp. 324–360.