



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

INTERFERENCIAS SATELITALES Y  
PERTURBACIONES IONOSFÉRICAS QUE  
IMPACTAN LA CALIDAD DE LAS  
OBSERVACIONES DEL RADIOTELESCOPIO  
MEXART

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**FÍSICO**

PRESENTA:  
**UGALDE CALVILLO LUIS GERARDO**

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. ARMANDO CARRILLO VARGAS



2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

---

*No es el crítico el que cuenta, ni aquellos que señalan como tropieza el hombre fuerte... El crédito pertenece al hombre que está realmente en la arena, con el rostro desfigurado por el polvo, el sudor y la sangre, que se esfuerza valientemente, yerra y se queda corto una y otra vez, porque no hay esfuerzo sin error o defecto. Pero conoce los grandes entusiasmos, las grandes devociones y pasa sobre sí mismo por una causa digna. En el mejor de los casos encuentra al final el triunfo del gran logro, y en el peor, si fracasa, al menos lo hace con la frente bien en alto, por lo que nunca estará con esas almas frías y tímidas que no conocen ni la victoria ni la derrota.*

Theodore Roosevelt

# Agradecimientos

---

*Las siguientes líneas son para expresar mi enorme agradecimiento a todas aquellas personas que han estado a mi lado a lo largo de mi vida, sobre todo a quienes me apoyaron y aconsejaron para llevar a buen término este trabajo*

*En primer lugar quiero agradecer a mis padres, por su apoyo incondicional, su confianza, cariño y paciencia. A mis hermanas por señalarme constantemente mis errores y hacerme crecer cada día.*



# Resumen

---

Para los estudios de clima espacial, la ionosfera terrestre es un elemento muy importante porque sobre ella se deposita gran parte de la radiación y partículas de origen solar que llegan a los alrededores de nuestro planeta. Siendo la ionosfera un plasma, es de particular interés el cálculo y monitoreo continuo de la densidad de electrones en ella. Son muchos los mecanismos que alteran la concentración electrónica de la ionosfera; ya sea por las variaciones periódicas como la rotación de la Tierra, las estaciones, la rotación y ciclo solar entre otros o por eventos esporádicos, la ionosfera es un elemento altamente cambiante y son estos cambios los que afectan de manera importante a las ondas de radio que se propagan a lo largo de ella. Uno de los objetivos más importantes de los estudios del clima espacial es entender la estructura y formación de irregularidades en la densidad del plasma ionosférico que causan centelleo en las ondas de radio de enlaces transionosféricos.

El radiotelescopio MEXART hace observaciones diarias de fuentes de radio cósmicas a  $139.65\text{ MHz}$  y además detecta señales de satélites con órbitas polares que transmiten a frecuencias entre  $137$  y  $142\text{ MHz}$ . En muchas ocasiones en el 2012 las fuentes de radio cósmicas mostraron centelleo interplanetario (CIP) producido por las perturbaciones de gran escala en el medio interplanetario asociadas con eventos solares al mismo tiempo que son detectados satélites que muestran fuertes oscilaciones en amplitud (*fading*) en sus señales.

En esta tesis se estudian las características generales del centelleo ionosférico en señales de fuentes de radio estelares y satélites con órbitas polares detectados con el radiotelescopio MEXART con la meta de conocer su origen y cuantificar la contribución de la ionosfera en los registros de centelleo interplanetario. Las propiedades del centelleo que se estudian son: su dependencia diurna, el periodo del centelleo (a la frecuencia de observación del MEXART) y su intensidad. Éste análisis se hace con 53 tránsitos satelitales a lo largo del 2012. Se observó que el centelleo ionosférico es claramente un fenómeno nocturno con frecuencia de oscilación predominante entre  $0.6$  a  $1\text{ Hz}$  y de mayor intensidad cuando hay actividad geomagnética.

Partiendo de la relación entre la ocurrencia de intenso centelleo ionosférico en las señales de los satélites con los días en que se presenta actividad geomagnética, se hace una compara-

---

ción entre el centelleo (presumiblemente interplanetario) detectado en esas fechas en fuentes de radio cósmicas con las señales de los satélites para 8 de las 18 tormentas geomagnéticas moderadas e intensas que tuvieron lugar en el 2012. Usando el índice  $D_{st}$  como indicador de la intensidad de la tormenta, se observa que el comportamiento del centelleo que presentan tanto las fuentes cósmicas como los satélites, si bien no es igual, es persistente en ambos casos desde 12 a 48 horas posteriores al momento en que se presenta el valor mínimo del  $D_{st}$  dependiendo de la hora en que ocurra éste último y de la intensidad de la tormenta. También se observó que los satélites con máximo centelleo en todo el 2012 ocurren en las fechas en que se presenta la máxima intensidad de una tormenta geomagnética, hecho que confirma la idea de que las tormentas geomagnéticas generan perturbaciones en la ionosfera que a su vez provocan centelleo en las señales de radio de satélites, fenómeno que a su vez contamina los registros de centelleo interplanetario de fuentes cósmicas del MEXART.

Esta tesis consiste en 5 capítulos además de la introducción. En el capítulo 2 se hace una descripción del clima espacial, la ionosfera, así como su estructura y variaciones. En el capítulo 3 me limito a presentar y describir el radiotelescopio de centelleo interplanetario MEXART, mismo que es la fuente de los datos utilizados en el presente trabajo. El capítulo 4 trata de la descripción del centelleo ionosférico: sus características generales, su relación con otros fenómenos que tienen lugar en la ionosfera y el análisis de datos llevado a cabo con los datos de tránsitos de satélites con centelleo ionosférico. El capítulo 5 describe la naturaleza de las tormentas ionosféricas, su relación con el centelleo ionosférico y su respectivo análisis de datos. Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones generales de este trabajo.

**Palabras clave** Centelleo ionosférico, Perturbaciones ionosféricas, MEXART

# Índice general

---

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. El clima espacial y la ionosfera terrestre</b>	<b>7</b>
2.1. El clima espacial . . . . .	7
2.2. La ionosfera terrestre: Estructura y variaciones . . . . .	8
2.2.1. Estructura de la ionosfera . . . . .	8
2.3. Variaciones de la ionosfera . . . . .	13
2.3.1. Variaciones regulares . . . . .	13
2.3.2. Variaciones irregulares . . . . .	15
2.4. Propagación de ondas de radio en la ionosfera . . . . .	17
2.4.1. Atenuación de ondas de radio . . . . .	18
2.4.2. Reflexión de ondas de radio y frecuencia crítica . . . . .	18
2.4.3. Índice de refracción y ecuación de Appleton-Hartree . . . . .	19
2.4.4. Transmisión de ondas de radio y ruido . . . . .	20
2.4.5. Fading . . . . .	21
<b>3. El radiotelescopio MEXART y el Centelleo Interplanetario</b>	<b>23</b>
3.1. El Centelleo Interplanetario . . . . .	24
3.1.1. Índice de centelleo interplanetario . . . . .	26
3.1.2. Variantes del centelleo . . . . .	27
3.1.3. Estudios de Centelleo Interplanetario con radiotelescopios . . . . .	28
3.2. El Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario MEXART . . . . .	29
3.2.1. Antecedentes . . . . .	29
3.2.2. Diseño del MEXART . . . . .	31
3.2.3. Arreglo dipolar y sistema amplificador de bajo ruido. . . . .	32
3.2.4. Sistema de amplificación y combinación de la señal . . . . .	33
3.2.5. Sistema de control de dirección de observación (matriz de Butler). . . . .	34
3.2.6. Receptores y sistema adquisidor. . . . .	35
3.2.7. Resumen del MEXART . . . . .	35
3.2.8. Patrón de radiación del MEXART y fuentes de radio . . . . .	36

<b>4. El centelleo ionosférico</b>	<b>39</b>
4.1. Irregularidades ionosféricas y centelleo ionosférico . . . . .	40
4.1.1. Ensanchamiento F y el centelleo . . . . .	41
4.1.2. Modelo de centelleo . . . . .	43
4.1.3. Observaciones de centelleo ionosférico con el MEXART . . . . .	46
4.1.4. Observaciones de satélites polares con el MEXART . . . . .	46
4.2. Análisis de datos y discusión . . . . .	47
4.2.1. Comportamiento diurno del centelleo . . . . .	50
4.2.2. Frecuencia de centelleo ionosférico . . . . .	52
4.2.3. Comportamiento del índice $I_{IONS}$ . . . . .	53
<b>5. Tormentas geomagnéticas y el centelleo ionosférico</b>	<b>55</b>
5.1. Tormentas geomagnéticas . . . . .	55
5.1.1. Índice $D_{st}$ y clasificación de tormentas . . . . .	57
5.1.2. Efectos de las tormentas geomagnéticas en la ionosfera . . . . .	58
5.2. Análisis de tormentas geomagnéticas y centelleo . . . . .	60
5.2.1. Centelleo durante la tormenta geomagnética 2: Del 21 al 28 de enero.	63
5.2.2. Centelleo durante las tormentas geomagnéticas 6 y 7: Del 7 al 11 de marzo. . . . .	65
5.2.3. Centelleo durante la tormenta geomagnética 9: Del 23 al 27 de abril.	67
5.2.4. Centelleo durante la tormenta geomagnética 13: Del 1 al 9 de septiembre. . . . .	69
5.2.5. Centelleo durante la tormenta geomagnética 14: Del 30 de septiembre al 2 de octubre. . . . .	71
5.2.6. Centelleo durante las tormentas geomagnéticas 15 y 16: Del 7 al 16 de octubre. . . . .	73
<b>6. Conclusiones</b>	<b>75</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>79</b>
<b>A. Bibliografía</b>	<b>81</b>

# Índice de figuras

---

2.1.	Diagrama de bloques que muestra un posible escenario de la evolución de las ráfagas y EMCs en el medio interplanetario y su impacto en la ionosfera. . . . .	8
2.2.	Distribución en altura de los gases atmosféricos ionizados y neutros. . . . .	9
2.3.	Esquema de la radiación electromagnética al llegar a la ionosfera terrestre . . . . .	11
2.4.	Perfil de densidad de electrones y altura de la ionosfera, tanto de día como de noche para el máximo (líneas solidas) y mínimo (líneas punteadas) de actividad solar. . . . .	12
2.5.	Variaciones anuales de $f_c$ y el número relativo de manchas solares $R$ . . . . .	14
3.1.	Esquema del fenómeno de Centelleo Interplanetario. El frente de onda de la fuente de radio distante se distorsiona al propagarse a través del viento solar perturbado. . . . .	25
3.2.	Registro típico de una fuente de radio que presenta centelleo interplanetario. . . . .	26
3.3.	Vista panorámica del radiotelescopio MEXART . . . . .	30
3.4.	El esquema ilustra la segmentación del MEXART. Cada línea de 64 dipolos está señalada con la letra L, misma que está compuesta por 4 unidades de 16 dipolos cada una. . . . .	31
3.5.	Esquema del tendido de los dipolos y su acoplamiento a la línea de transmisión. Se ilustra también la estructura del soporte y sus dimensiones. . . . .	32
3.6.	Esquema de una <i>unidad básica</i> , integrada por un subarreglo de 16 dipolos, un balun, filtro RF, amplificador y los cables correspondientes. . . . .	33
3.7.	Esquema de bloques general del radiotelescopio MEXART conformado por un arreglo planar de 4096 dipolos (la antena), varios subsistemas conformados por filtros RF, amplificadores, combinadores con sus respectivos cables y sistemas de alimentación, la matriz de Butler, receptores el sistema adquirente de datos. . . . .	35
3.8.	Abanico de haces que forman el patrón de radiación del MEXART. . . . .	36
4.1.	Mapa de intensidad del spread $F$ como función de la latitud magnética y de la hora local. . . . .	41

4.2. Mapa de intensidad del IONS como función de la latitud magnética y de la hora local. . . . .	43
4.3. Esquema que muestra como la señal de la fuente de radio cósmica o satélite artificial que se propaga a lo largo de la ionosfera es afectada por estructuras de diferente densidad electrónica. . . . .	44
4.4. Ejemplo de 3 trayectorias de satélites sobre el patrón de radiación del MEXART.	48
4.5. Señales de un satélite continuo (izquierda) no perturbado y un satélite con centelleo ionosférico (derecha). . . . .	49
4.6. Serie de datos del satélite perturbado sin tendencia. . . . .	49
4.7. Espectros de potencia del satélite sin perturbación ionosférica (izquierda) y satélite con centelleo (derecha). . . . .	50
4.8. Histograma de ocurrencia de centelleo como función de la hora local. . . .	51
4.9. Histograma de distribución de frecuencias de IONS. . . . .	53
4.10. Valores del índice $I_{IONS}$ de varios satélites como función de la hora local. .	54
5.1. Esquema del mecanismo de reconexión magnética. . . . .	56
5.2. Fases de una tormenta geomagnética en el registro del índice $D_{st}$ . . . . .	58
5.3. Tormenta geomagnética del mes de enero de 2012 y su relación con el centelleo observado por el MEXART en satélites y fuentes de radio cósmicas. .	64
5.4. Tormentas geomagnéticas del mes de marzo de 2012 y su relación con el centelleo observado por el MEXART en satélites y fuentes de radio cósmicas.	66
5.5. Tormenta geomagnética del mes de abril de 2012 y su relación con el centelleo observado por el MEXART en satélites y fuentes de radio cósmicas. .	68
5.6. Tormenta geomagnética del mes de septiembre de 2012 y su relación con el centelleo observado por el MEXART en satélites y fuentes de radio cósmicas.	70
5.7. Primera tormenta geomagnética del mes de octubre de 2012 y su relación con el centelleo observado por el MEXART en satélites y fuentes de radio cósmicas. . . . .	72
5.8. Tormentas geomagnéticas (15 y 16) del mes de octubre de 2012 y su relación con el centelleo observado por el MEXART en satélites y fuentes de radio cósmicas. . . . .	74

# Introducción

---

LA ionosfera terrestre es un componente fundamental en las ciencias espaciales, ya que es donde se cierran todos los circuitos (desde el punto de vista electrodinámico), por así decirlo, de las relaciones Sol-Tierra. Desde la rotación, campo magnético terrestre y procesos atmosféricos propios de la dinámica de nuestro planeta hasta la complicada dinámica solar impactan en gran medida a la ionosfera, determinando su estructura y formación. De ahí que sea tan importante su estudio y monitoreo constante.

Ubicado a 150 millones de kilómetros de nuestro planeta el Sol ha sido y seguirá siendo la fuente principal de energía de la Tierra, de ahí que el estudio de sus características, los fenómenos que ocurren en él, y que repercuten en nuestro entorno, sean de enorme importancia. Para propósitos de explicar los diversos mecanismos de interacción que ocurren entre la Tierra y nuestra estrella, basta decir que el Sol es una esfera de plasma (principalmente H y He) capaz de expulsar un amplio espectro de radiaciones hacia su entorno, desde ondas de radio hasta ondas electromagnéticas de alta frecuencia como los rayos X, así como partículas energéticas y plasma (Bravo, 1997). Esto nos dice que nuestra estrella es un objeto altamente dinámico, de hecho experimenta un complicado ciclo de actividad de aproximadamente 11 años. El estudio del Sol y su dinámica se conoce como actividad solar. Hoy en día el interés científico por la actividad solar ha crecido porque es claro que los cambios que en él ocurren afectan a la Tierra y al resto de los cuerpos del sistema solar.

A cada segundo enormes cantidades de energía son continuamente radiadas del Sol hacia el espacio. Las altas temperaturas en la atmósfera solar crean un flujo continuo de gas ionizado constituido de iones y electrones (conocido como plasma solar) que se expande y cubre el medio interplanetario. Llamamos a este plasma en expansión el viento solar. El viento solar confina el campo magnético terrestre a una región finita del espacio conocida como magnetosfera, sin embargo una parte de la energía del viento solar se transfiere a la magnetosfera dando lugar a procesos dinámicos en la frontera y el interior de ésta. Además el Sol también radía ocasionalmente energía en fenómenos transitorios de carácter explosivo como ráfagas solares, eyecciones de masa coronal (EMC), entre otros.

Éstos eventos producen severos cambios en el medio interplanetario, pero la contribución de energía debida principalmente a la radiación electromagnética es de particular importancia porque es la que determina la estructura de la atmósfera terrestre y genera a la ionosfera.

El estudio de las condiciones del ambiente (concretamente, la variación diaria del plasma solar) en los alrededores de la Tierra, asociadas con eventos intensos de la actividad solar, tales como ráfagas solares y EMC es lo que hoy en día se conoce como *clima espacial*. Para el estudio del clima espacial la ionosfera constituye, junto con la magnetosfera, un elemento importante. Si bien la magnetosfera sirve como un escudo natural de nuestro planeta para contener el impacto de plasma de viento solar y partículas cargadas de alta energía, es realmente en la ionosfera donde se depositan tanto las partículas cargadas que logran penetrar el campo magnético como la radiación electromagnética de gran energía (rayos de extremo ultravioleta y rayos X). El conocimiento detallado del clima espacial se ha convertido en un elemento fundamental para intentar pronosticar algunos de los efectos que éstos fenómenos puedan causar en nuestro planeta e intentar aminorar, en la medida de lo posible, sus consecuencias más severas.

Los estudios de la ionosfera iniciaron desde mediados del siglo XIX. En 1839 K. F. Gauss afirmó que debía haber una capa eléctricamente conductora en la atmósfera superior que explicara las variaciones que presenta el campo magnético de la Tierra entre el día y la noche. Se demostró experimentalmente la existencia de esta capa cuando en 1901 el científico italiano Guglielmo Marconi transmitió señales de radio exitosamente a través del Atlántico. El experimento de Marconi demostró que las ondas de radio de cierta frecuencia son reflejadas por las capas más exteriores de la atmósfera haciendo posible transmitir información a lugares distantes. Seis meses más tarde Oliver Heaviside propuso la existencia de una capa eléctricamente conductora en la atmósfera superior, responsable de la reflexión de ondas de radio. A. E. Kennelly más tarde terminó de redondear esta idea: supuso que la conductividad de dicha capa era debida a la presencia de iones y electrones formados por la acción de la luz ultravioleta proveniente del Sol. Una década después W. Eccles propuso una teoría elemental acerca de la propagación de ondas a través de un medio ionizado y un par de años más tarde J. Larmor explicó, de forma elemental, la reflexión de ondas de radio en una región ionizada (Tascione, 1988).

Los primeros estudios de la capa estudiada por Kennelly y Heaviside (o capa *E* como se le conoce ahora) se llevaron a cabo en 1925 por M. A. Tuve y G. Breit usando un transmisor-receptor “sondeando” con pulsos la ionosfera, técnica que se emplea hasta el día de hoy. En forma independiente E. V. Appleton y M. A. Barnett en 1924 calcularon la altura de ésta misma capa. Lo que hicieron fue observar las interferencias entre la onda directa y la onda reflejada entre un sistema de emisor-receptor de radio separado 140 *km*. Sus resultados probaron que la reflexión sucedía a una altura de 100 *km* aproximadamente (Appleton y Barnett,

---

1925). Appleton además modeló matemáticamente el efecto del campo magnético sobre la reflexión de ondas de radio en la ionosfera a principios de 1930, recibiendo en 1947 el premio Nobel de Física por estos estudios. Las investigaciones de Appleton hicieron posible que se obtuvieran radiocomunicaciones de más largo alcance que contribuyeron posteriormente al desarrollo del radar (Smith, 1990).

Estudios subsecuentes de radioexploración de la atmósfera realizados con sondeos de incidencia vertical mostraron que la altura de reflexión tenía valores diferentes entre el día y la noche, además ondas radio exploradoras de diferente frecuencia se reflejaban a diferentes alturas. Así se descubrió que la ionosfera esta constituida por diversas capas que fueron llamadas *D*, *E* y *F* (nombres dados por Appleton) (Silverstein, 1959). Ondas de radio con frecuencias entre 1 y 2 *MHz* se reflejaban en la capa *E*. Cuando la frecuencia alcanzó un valor de 3 *MHz* las ondas comenzaban a reflejarse a una altura aproximada de 200 *km*, descubriendo así la capa *F*. Para frecuencias mayores a 10 *MHz* las ondas penetraban esta capa y las señales ya no regresaban (Appleton y Naismith, 1933). Pero a medio día las cosas eran un poco distintas. La capa *F* parecía consistir en dos regiones (diferenciadas como *F1* y *F2*) con alturas medidas cercanas a los 200 *km* y 330 *km* respectivamente (Smith, 1990).

Después de la segunda guerra mundial, la tecnología en cohetes y radar desarrollados en tiempo de guerra se utilizó con fines científicos para el estudio de las altas capas atmosféricas y la ionosfera. Posterior al lanzamiento del Sputnik 1 por la Unión Soviética en 1957 (hecho que dio inicio a la era espacial) se llevaron a cabo lanzamiento de sondas espaciales con el objetivo de estudiar la ionosfera. La primera sonda que hizo medidas directas de la ionosfera fue un V-2 lanzado desde Nuevo México seguido por el Alouette 1 lanzado por la NASA en 1962; su principal objetivo fue determinar las variaciones diurnas, estacionales y geográficas en la distribución de la densidad electrónica en la ionosfera (Aarons, 1997).

El Año Geofísico Internacional (abreviado AGI), entre julio de 1957 y diciembre de 1958 supuso un esfuerzo único por su alcance en la historia de la ciencia. En el AGI más de 30 000 científicos de 66 países cooperaron en una serie de observaciones de nuestro planeta dedicadas específicamente a la investigación de actividad solar, rayos cósmicos, geomagnetismo, auroras boreales y física ionosférica. Se creó una red mundial de ionosondas para recolectar medidas de sondeos verticales durante el periodo del máximo de actividad solar (Van Allen, 1984). Para el periodo del siguiente mínimo solar (1964-1965) se llevaron a cabo experimentos mundiales utilizando cohetes y satélites para hacer mediciones de radiación solar, se amplió el uso del radar para hacer sondeos ionosféricos, de este modo se crearon las primeras bases de datos, así como modelos ionosféricos. Para los años 70 se tenía ya claro que las capas de la ionosfera son creadas por radiación solar. La estructura vertical de la ionosfera depende directamente del espectro solar y la estructura latitudinal de la ionosfera depende del campo geomagnético.

Actualmente instrumentos como las ionosondas, el radar de dispersión coherente e incoherente, métodos de monitoreo constante como tomografías ionosféricas o cálculo del TEC (o contenido total de electrones) con GPS son usadas para monitorear constantemente la ionosfera, abriendo toda un área de estudio por la importancia que tiene el conocimiento permanente de la ionosfera para las comunicaciones satelitales y sistemas de navegación (Lawrence et al, 1964).

Otra fenómeno usado para el estudio de la ionosfera terrestre, y en la que centraremos nuestra atención en el presente trabajo, es la propagación transionosférica de ondas de radio. Como parte esencial del clima espacial, la ionosfera tiene propiedades particulares que influyen en la propagación de ondas de radio a diferentes frecuencias. Las señales que se usan en comunicaciones satelitales pueden atravesar la atmósfera sin mayor problema para una ionosfera en calma, pero en épocas de actividad solar son susceptibles a efectos de difracción, refracción, absorción, entre otros. Dado que la ionosfera es semitransparente a las señales de radio para ciertas bandas de comunicación satelital, éstas pueden resultar alteradas cuando hay cambios importantes en la ionosfera. Uno de los fenómenos más interesantes que tienen lugar en la ionosfera se conoce como *centelleo ionosférico*. En años de alta actividad solar, señales de ondas de radio transionosféricas en regiones polares y ecuatoriales han experimentado intensas fluctuaciones en amplitud a frecuencias entre  $54\text{ MHz}$  hasta  $4\text{ GHz}$ . Estas variaciones en las señales de satélites juegan un rol muy importante en los sistemas de telecomunicación actuales, es por ello que el centelleo ionosférico toma gran importancia (Aarons, 1997).

En México se ubica el Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario MEXART (Mexican Array Radio Telescope) compuesto de un arreglo de  $64 \times 64$  dipolos que opera con una frecuencia central de  $139.65\text{ MHz}$  cuyo objetivo es medir el centelleo interplanetario (o CIP) de fuentes de radio estelares provocado por irregularidades en la densidad de electrones en el viento solar. Sin embargo, a esa frecuencia, la señal con CIP recibida por el radiotelescopio presenta adicionalmente interferencias de diferente naturaleza, entre ellas el centelleo ionosférico. Entonces se tiene una región del espectro electromagnético de radio donde, dependiendo del estado de la ionosfera y del medio interplanetario, la señal de radio puede presentar centelleo ionosférico, interplanetario o ambos. En otras palabras, en ocasiones hay perturbaciones en la ionosfera que son la consecuencia final de eventos solares, las cuales pueden contaminar las mediciones de CIP o tener una importante contribución en las oscilaciones observadas. Para poder hacer la distinción entre un fenómeno u otro, se debe tener conocimiento del panorama global del medio interplanetario, la magnetósfera y la ionosfera de la Tierra. El uso de señales de satélites artificiales polares son una buena alternativa que nos ayuda a discriminar entre uno de los dos tipos de centelleo.

El objetivo de esta tesis es caracterizar y analizar las señales de varios satélites con trayectoria polares que orbitan la Tierra captadas por el MEXART, el estudio de las señales

---

se usará para distinguir entre el fenómeno de centelleo interplanetario e ionosférico. Una de las hipótesis de este trabajo considera que es posible encontrar una correlación entre las fuentes estelares de radio y las ondas de radio emitidas por satélites con órbitas polares. Si se detecta centelleo en una fuente de radio estelar pero esto no se aprecia en la señales de satélites cercanas en tiempo y posición a la fuente estelar, entonces podemos asegurar, a reserva de lo que muestre un análisis espectral y otros índices de actividad solar, que se trata de centelleo interplanetario. Por el contrario, si las señales de los satélites también presentan centelleo, entonces podemos tener un registro CIP contaminado con centelleo ionosférico.



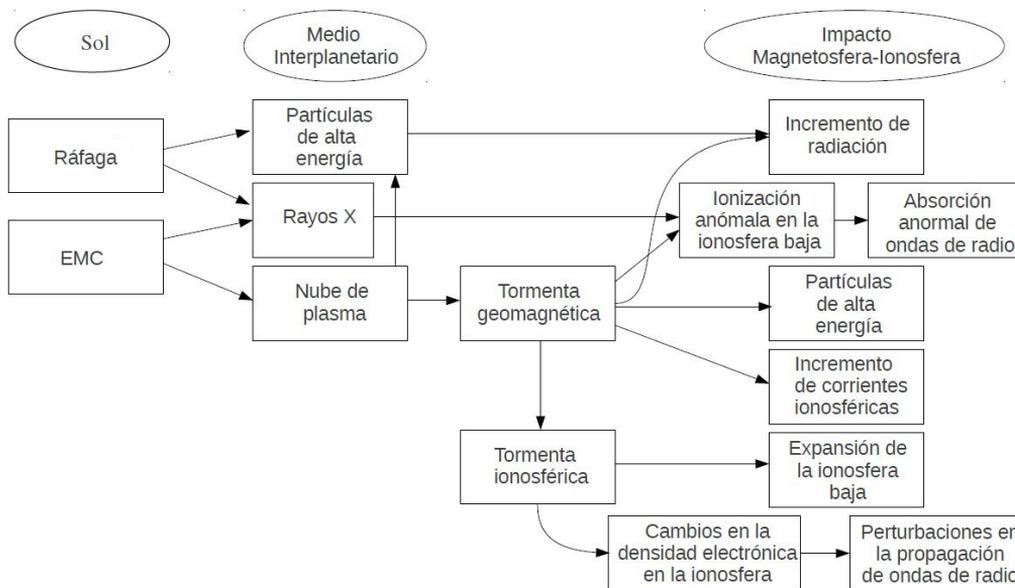
# El clima espacial y la ionosfera terrestre

---

## 2.1. El clima espacial

EL clima espacial es el estudio de las condiciones del entorno terrestre asociadas con eventos intensos, transitorios y de gran escala de origen solar, ráfagas, estallidos en radio, eyecciones de masa coronal (EMC), entre otros. Cuando estos fenómenos tienen lugar cerca del centro del disco solar se tienen condiciones favorables para afectar severamente el estado del medio interplanetario, magnetosfera, ionosfera, y las condiciones atmosféricas de nuestro planeta.

Las ráfagas solares y las EMC son ambas producto de violentas expulsiones de energía almacenada en el deformado campo magnético presente en las regiones activas. Las ráfagas solares son estallidos de energía en forma de partículas y radiación electromagnética en todo el espectro. Ocurren en la cromosfera solar, sobre todo en regiones activas. Son de naturaleza muy compleja, pueden emitir entre  $10^{21}$  y  $10^{25}$   $J$  en un tiempo aproximado de  $10^2$  segundos (Tascione, 1988). Las ráfagas solares se clasifican según su emisión electromagnética, particularmente en rayos X y ultravioleta. El flujo de radiación a esas frecuencias se clasifica con los niveles C, M o X para diferenciar entre ráfagas suaves, medias e intensas respectivamente. Aunque las ráfagas de rayos X son muy energéticas, son realmente las EMC que a menudo las acompañan las que tienen mayor impacto en el entorno terrestre. Una EMC se presenta como una enorme nube de plasma denso eyectado de la corona solar que inicia con una explosión sobre una región activa. Inestabilidades en los campos magnéticos que tienen lugar en dichas regiones son las causantes de la liberación de enormes cantidades de energía, surgiendo así las ráfagas y EMC. En términos prácticos, una EMC puede liberar hasta 100 mil millones de kilogramos de material solar con una velocidad de eyección que puede alcanzar más de  $1\ 000\ km/s$  (Tascione, 1988). Tanto las ráfagas solares como las EMC tienen mayor ocurrencia en épocas cercanas al máximo de actividad solar. Los efectos de estos dos fenómenos en el medio interplanetario y en el entorno terrestre se muestran en la figura 2.1 (Imagen tomada de (Tadanori, 2001)).



**Figura 2.1:** Diagrama de bloques que muestra un posible escenario de la evolución de las ráfagas y EMCs en el medio interplanetario y su impacto en la ionosfera.

## 2.2. La ionosfera terrestre: Estructura y variaciones

La ionosfera es la capa de la atmósfera terrestre que se encuentra ionizada permanentemente debido principalmente a la fotoionización provocada por radiación electromagnética de alta frecuencia emitida por el Sol, tal como rayos X y ultravioleta; su incidencia sobre átomos y moléculas es capaz de arrancar uno o varios electrones produciendo la ionización del medio, convirtiendo el gas neutro de la atmósfera en un plasma cargado y magnetizado. Desde esta visión, la ionosfera es una región donde existen fuertes corrientes eléctricas como resultado del acoplamiento magnético entre la atmósfera parcialmente ionizada y el campo magnético terrestre. Esto permite que sean entonces las fuerzas electromagnéticas las que determinen su comportamiento y su interacción con la radiación.

### 2.2.1. Estructura de la ionosfera

El plasma que constituye la ionosfera es creado a partir de los gases neutros de las capas superiores de la atmósfera neutra como resultado de la absorción de energía radiada por el Sol. El calentamiento atmosférico por absorción de energía depende principalmente de dos variables: la altitud y composición del gas presente en la región de la atmósfera.

Por abajo de los 100 km de altitud las concentraciones relativas de los gases presentes se mantienen casi constantes. La composición de la atmósfera hasta esta altura es aproxi-

madamente 78 % nitrógeno molecular, 21 % oxígeno molecular y 1 % de otros gases como argón, dióxido de carbono y vapor de agua. La radiación ultravioleta (UV), con longitud de onda ( $\lambda$ )  $\sim 200 \text{ nm}$  es la que actúa como principal fuente de calentamiento, generando la disociación del  $O_2$  en átomos individuales e ionizando el  $N_2$ . En la región entre  $100 \sim 200 \text{ km}$  hay un notable incremento en la temperatura. Esto se debe a que el elemento químico más abundante en esa región (el oxígeno atómico) absorbe la radiación ultravioleta extrema (UVE) con longitudes de onda menores a los  $170 \text{ nm}$ . Los fotones con  $\lambda \leq 100 \text{ nm}$  son absorbidos por el ozono ( $O_3$ ) localizado en una pequeña región por encima de  $30 \text{ km}$  sobre la superficie terrestre. Esta delgada capa, por tanto, sirve de escudo para la radiación ultravioleta más penetrante proveniente del Sol (Tascione, 1988).

Los átomos y moléculas atmosféricas neutras los principales responsables de las reacciones químicas y colisiones entre partículas, estas condiciones son las que controlan la estructura de la ionosfera a alturas cercanas a los  $100 \text{ km}$ . En la región por abajo de los  $100 \text{ km}$  de altura, la mezcla de los gases neutros es homogénea por la alta densidad que existe a esa altura. En cambio, por arriba de los  $100 \text{ km}$  la densidad gaseosa disminuye, frecuencia de colisión entre partículas también disminuye, por ello se pierde la homogeneidad entre los distintos tipos de gases y ahora su distribución depende, por efectos gravitacionales, de sus masas. Esto significa que conforme incrementa la altura, el porcentaje de partículas ligeras aumenta y el de partículas más pesadas disminuye como lo muestra la figura 2.2, tomada de (Kivelson y Russell, 1995).

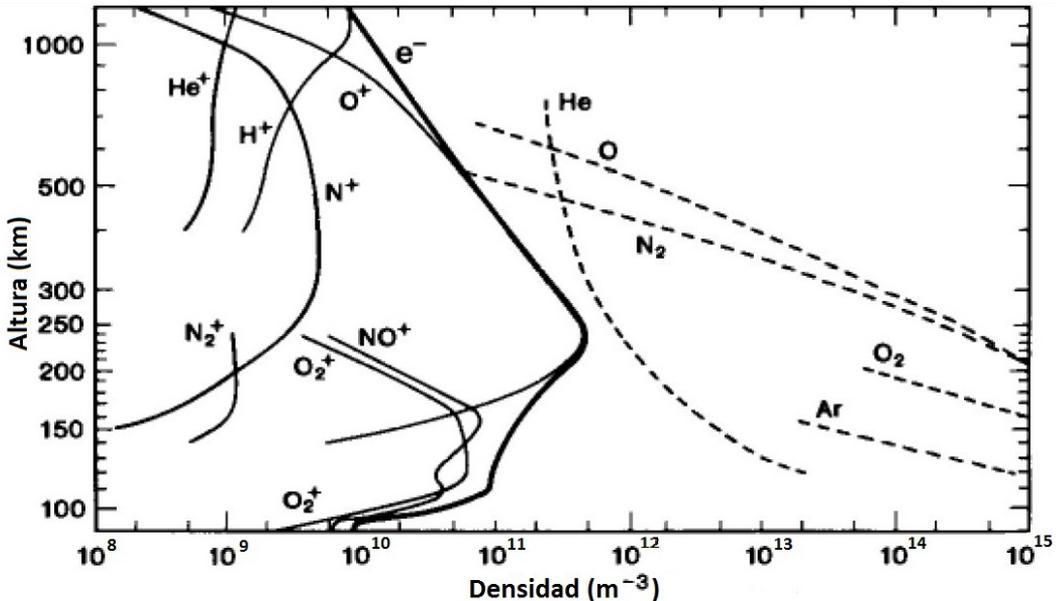
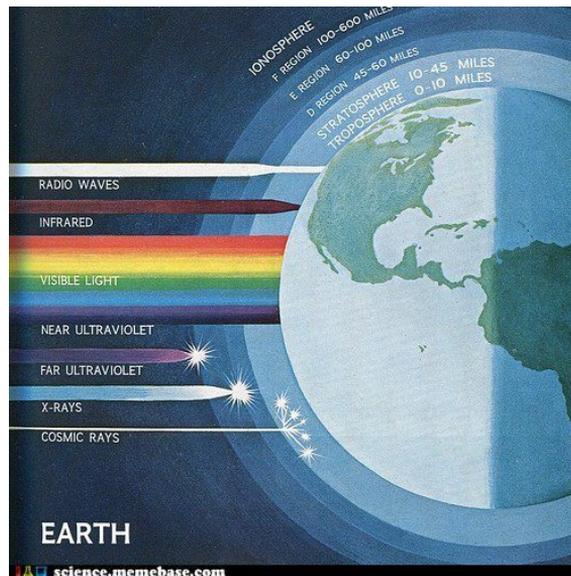


Figura 2.2: Distribución en altura de los gases atmosféricos ionizados y neutros.

Del mismo modo que con los gases neutros, la densidad de electrones (y de iones) en la ionosfera no es homogénea, en esencia es función de la altura. La concentración de electrones aumenta irregularmente hasta un máximo y a partir de ahí disminuye lentamente su valor. A gran altura la densidad de partículas cargadas (iones o electrones) es baja debido a la densidad del gas que es ya muy pequeña. A bajas alturas también hay baja densidad de partículas debido a que la mayor parte de la radiación de alta frecuencia ya fue absorbida. Luego entonces, es a una altitud entre 200 y 300 km que existe una densidad con valor máximo bien definido donde la concentración de iones y electrones de la ionosfera es de  $10^{12}$  partículas/m<sup>3</sup>, mientras que la densidad del gas neutro es de  $10^{15}$  partículas/m<sup>3</sup>.

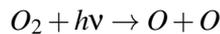
El cambio de densidad electrónica de la ionosfera en función de la altura provoca que ondas de radio de diferentes frecuencias sean reflejadas a diferentes alturas. Hay un cierto valor de frecuencia para el cual, todas las ondas de radio que tengan frecuencia menor serán reflejadas por la ionosfera, ya sean ondas provenientes del espacio o generadas en la superficie de la Tierra. Esta frecuencia crítica generalmente tiene un valor entre 5 y 15 MHz dependiendo de las condiciones atmosféricas y la actividad solar (Smith, 1990). Cabe mencionar que no todas las frecuencias mayores al límite ionosférico pueden penetrar la atmósfera completa. Por encima de los 150 000 MHz se da la absorción de radiación infrarroja por el oxígeno y el vapor de agua presentes en la troposfera (capa de la atmósfera comprendida entre el suelo y 15 km aproximadamente), rayos UV y rayos X son capturados para ionizar y calentar la atmósfera alta; radiación de muy alta energía como rayos  $\gamma$  y rayos cósmicos dan lugar a reacciones con los núcleos de la atmósfera que muy difícilmente alcanzan la superficie como lo muestra la figura 2.3. De esta forma, la atmósfera forma una coraza protectora que sólo deja pasar radiaciones electromagnéticas en dos rangos de frecuencias llamados *ventanas atmosféricas*: la ventana de luz visible y la ventana de radio.

En la ionosfera se distinguen varias regiones de acuerdo a la altura aunque sin fronteras bien definidas. Las regiones ionosféricas se crean por diversos procesos: el espectro de luz solar deposita su energía a distintas alturas dependiendo de la absorción característica de la atmósfera, el proceso de recombinación depende de la densidad atmosférica (que varía con la altura) y la composición química de los gases que componen la atmósfera cambia con la altura. Ya que la composición química de la atmósfera y el poder de penetración que tiene la radiación de alta frecuencia son diferentes de acuerdo a la altura, cada región tiene sus propias características. Estas capas o regiones se etiquetan en orden ascendente de altura con las letras *D*, *E*, *F*<sub>1</sub> y *F*<sub>2</sub>. La región inferior de la ionosfera (capa *D*) se encuentra aproximadamente entre 60 km y 90 km de altura sobre la superficie. Cuando inciden sobre ella intensos rayos X (con longitudes de onda menores a 1 nm) pueden disociar e ionizar el O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> presentes en ella. La recombinación en esta región es alta, por eso el efecto de ionización es bajo la mayor parte del tiempo. En épocas de calma la concentración de electrones alcanza su máximo al medio día ( $10^8 \sim 10^{10} m^{-3}$ ) (Hines et al., 2001), suficiente para afectar la propagación de ondas de radio.



**Figura 2.3:** Esquema de la radiación electromagnética al llegar a la ionosfera terrestre

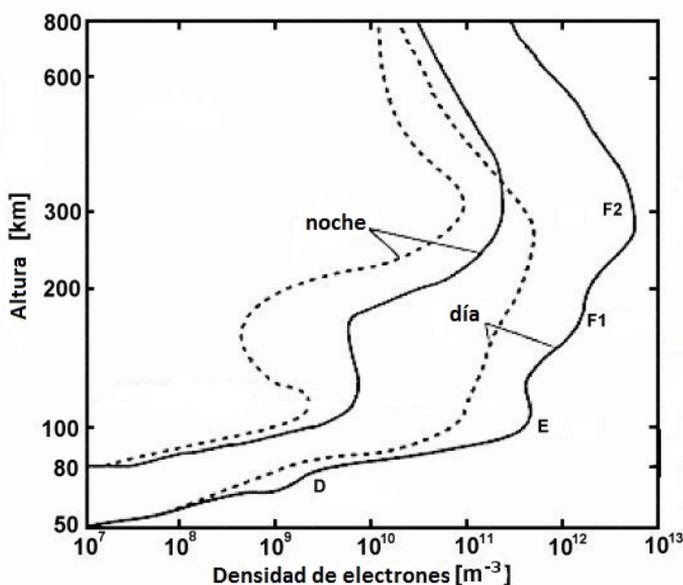
Le sigue la capa *E*, también conocida como la capa de Kennelly-Heaviside, ubicada entre 90 y 150 *km*. La ionización en esta capa se debe a los rayos UV que disocian el oxígeno molecular a oxígeno atómico



donde  $h\nu$  es la energía de un fotón de radiación UV. Normalmente son reflejadas en esta capa las ondas de radio con frecuencias inferiores a 10 *MHz* sin embargo, durante eventos solares intensos, se puede dar el fenómeno de capa *E* esporádica (*sporadic E*) la cual puede reflejar frecuencias de hasta 50 *MHz* (Ratcliffe, 1972). Por la noche la capa *E* esporádica desaparece rápidamente debido a que la radiación solar ya no está presente. Durante gran parte del tiempo la densidad de electrones en esta región mantiene un valor prácticamente constante de  $10^{10} m^{-3}$  (Hines et al., 2001).

La capa *F*, conocida como capa Appleton, es la capa superior de la ionosfera terrestre y la causa de su ionización es la radiación solar del ultravioleta extremo, la cual ioniza el oxígeno atómico. La capa *F* sufre una deformación en su perfil de densidad durante el día dando origen a las capas *F*<sub>1</sub> y *F*<sub>2</sub>. La primera se localiza a una altura de entre los 150 y los 200 *km*, presentando componentes ionizados de *N*<sub>2</sub>, *O* y densidad electrónica alrededor de  $10^{11} m^{-3}$ . La segunda se presenta a altitudes que van desde los 200 hasta los 500 *km*, en donde su componente principal de ionización es el oxígeno atómico. Sobre el medio día, en ésta capa la ionosfera alcanza su valor máximo de concentración de electrones:  $10^{12} m^{-3}$  cerca de los 300 *km* de altitud (Hines et al., 2001). La capa *F*<sub>2</sub> es la responsable de la transmisión de ondas de alta frecuencia, facilitando las comunicaciones de larga distancia.

En las tres primeras capas el incremento en la densidad de electrones es paulatino hasta llegar a su máximo valor en la capa  $F_2$  para después decrecer de forma monótona (ver figura 2.4. Imagen tomada de (Tascione, 1988)). Entre la región  $D$  y la  $F_1$ , 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 la recombinación de las diferentes partículas ionizadas con los electrones. Por encima de la capa  $D$ , iones y electrones se separan lo suficiente para permitir que las fuerzas eléctricas transporten a los electrones a distancias lejanas de donde se separaron de su respectivo ion, fenómeno que junto con el campo magnético terrestre, da lugar a corrientes ionosféricas que establecen la configuración de la ionosfera observada.



**Figura 2.4:** Perfil de densidad de electrones y altura de la ionosfera, tanto de día como de noche para el máximo (líneas sólidas) y mínimo (líneas punteadas) de actividad solar.

Las características de cada región cambian del día a noche, la fotoionización del Sol cesa en el lado noche dando lugar a la recombinación de iones y electrones, hecho que cambia la estructura de la ionosfera. En el lado día la atmósfera es más caliente, sus moléculas están más agitadas por lo cual las colisiones entre electrones y átomos neutros son más frecuentes. Del lado noche, en cambio, baja la temperatura, el número de colisiones disminuye dando lugar a efectos de recombinación entre iones y electrones ocasionando que varíe la altura de las capas que componen la ionosfera. La densidad electrónica de la ionosfera y la altura del máximo se sondean constantemente enviando señales de radio de distintas frecuencias y midiendo el tiempo que tardan en regresar. Este sondeo constante del plasma ionosférico sirve además para obtener mapeos de densidad electrónica que son útiles en el estudio de la ionosfera.

## 2.3. Variaciones de la ionosfera

Hasta ahora se ha descrito la ionosfera “ideal”, es decir, como un elemento estático y estacionario cuya estructura y características están gobernadas principalmente por la radiación solar que incide sobre ella, pero como es de imaginarse, la ionosfera raramente coincide con el modelo ideal; la diferencia entre el estado real y el ideal puede ser desde mínimo hasta extremo. Son varios los fenómenos que afectan la dinámica de la ionosfera en cada una de sus capas, algunos debidos a la latitud (que va de la mano con la geometría del campo magnético terrestre), a las corrientes de aire de la atmósfera neutra, efectos gravitacionales y de mareas; otros son fenómenos periódicos como la rotación terrestre, las estaciones del año, la actividad del Sol e incluso la rotación misma de éste último. Las variaciones que más nos interesan son aquellas relacionadas con eventos transitorios de gran escala con origen en el Sol que terminan por alterar en gran medida el estado de la ionosfera.

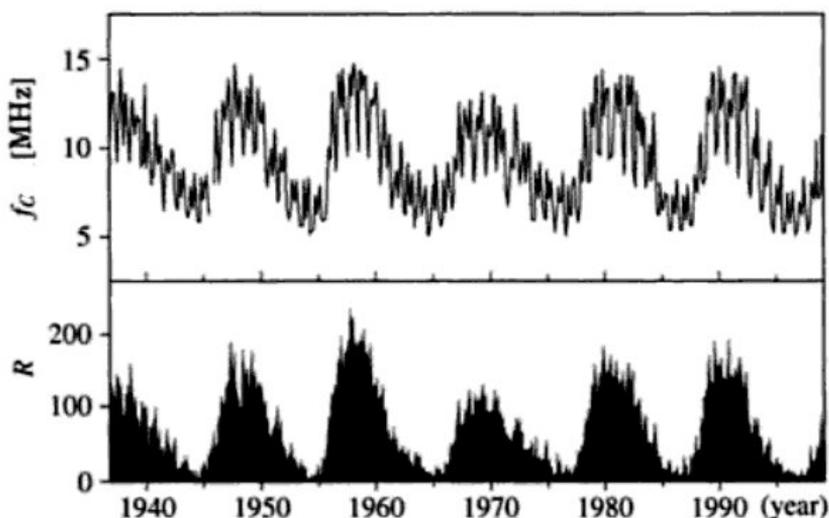
### 2.3.1. Variaciones regulares

La ionosfera varía de forma regular y predecible por los cambios de día a noche, por el cambio de estación a lo largo del año, con la altura, además tiene marcadas variaciones relacionadas con el ciclo de actividad solar.

- *Variación diaria:* Las variaciones diarias de la ionosfera se deben a la rotación de la Tierra sobre su eje. Debido a esto las condiciones de la ionosfera son distintas a diferentes latitudes y diferentes horas. Al amanecer, la densidad electrónica incrementa por la fotoionización del Sol, aumenta hasta el atardecer, momento en que la fotoionización disminuye y la recombinación aumenta. Las capas  $D$  y  $E$  alcanzan el máximo al medio día, cuando el ángulo cenital del Sol es pequeño; debido a que la concentración del gas es todavía grande a esas alturas, la recombinación es rápida. Durante el día las capas  $F_1$  y  $F_2$  están claramente separadas pero al anochecer la recombinación de iones y electrones procede de manera tan lenta que grandes concentraciones de electrones persisten, pasando a formar una sola capa.
- *Variación estacional:* Debida a la rotación de la Tierra alrededor del Sol. Dependiendo de la estación del año y de la latitud, será mayor o menor la cantidad de energía que incide sobre la atmósfera. Así, el ángulo que hace el Sol con respecto al cenit es un indicador de la cantidad de radiación ionizante que llega a la ionosfera. En verano, cuando este ángulo es mínimo, la densidad de electrones es alta a comparación de ésta misma en invierno cuando el ángulo cenital es máximo. En las capas  $D$ ,  $E$  y  $F_1$  la tasa de ionización es proporcional a densidad de oxígeno atómico ( $O$ ) porque es el proveedor principal de electrones a la ionosfera, mientras que el decremento de electrones es modulado por la cantidad de nitrógeno molecular ( $N_2$ , el cual lleva a cabo el proceso de recombinación de manera más eficiente). En cambio, la concentración de electrones de la capa  $F_2$  alcanza su máximo valor en primavera y otoño, mientras que

toma su valor mínimo en verano. Este fenómeno se conoce como *anomalía estacional* y es consecuencia del decremento de la tasa de ionización por los bajos niveles de  $O$  aunado a una mayor recombinación por una mayor población de  $N_2$  (Zou, 2000).

- *Variaciones con el ciclo de actividad solar:* En 1935 se evidenció por medio de sondeos que las frecuencias críticas (que son una medida de la cantidad de electrones) de las capas  $E$  y  $F$  estaban sujetas a un marcado control solar. Se encontró que éstas frecuencias dependían de las variaciones diurnas y en menor medida de la latitud y estación del año. E. V. Appleton y R. Naismith llevaron a cabo un seguimiento de las frecuencias críticas de las capas en cuestión durante un periodo de 8 años. Con los valores medidos de dichas frecuencias calcularon la densidad de electrones para cada capa, obteniendo que este valor, y por consecuencia también la radiación solar UV, variaban de forma importante con el número relativo de manchas solares. Entre el periodo mínimo de manchas solares de 1933-1934 y el máximo de 1937-1938 encontraron para la capa  $E$  que el número de electrones aumenta entre el mínimo y el máximo en un 50% (Appleton, 1939). Una comparación entre las variaciones en el número relativo de manchas solares ( $R$ ) y los valores de frecuencia crítica ( $f_c$ ) registrados desde hace más de 60 años indicaron una relación muy cercana entre estos dos parámetros, como lo muestra la figura 2.5. (Imagen tomada de (Tadanori, 2001)). El número relativo de manchas solares es comúnmente usado como un índice de actividad solar, hecho que da un indicio claro de que el Sol en su máximo de actividad emite más radiación UV, ionizando en mayor medida la atmósfera neutra, dando como consecuencia un aumento en la densidad de electrones.



**Figura 2.5:** Variaciones anuales de  $f_c$  y el número relativo de manchas solares  $R$ .

### 2.3.2. Variaciones irregulares

Hay fenómenos repentinos e impredecibles que impactan de forma importante la ionosfera. Se conocen desde perturbaciones localizadas y corta duración hasta eventos de escala global que pueden durar hasta días. Aunque no hay regiones donde se presenten este tipo de variaciones con mayor frecuencia, estos fenómenos tienen dependencia latitudinal.

- *Sporadic E*: La *E* esporádica consiste en un aumento muy marcado, pero irregular y rápidamente variable de la densidad de electrones en la región *E*. La reflexión de ondas, cuando está presente este fenómeno esporádico, hace posible la recepción de ondas de mayor frecuencia que normalmente no son percibidas (hasta 50 MHz). Puede ocurrir durante el día y la noche, variando marcadamente con la latitud; además está asociada con actividad solar y geomagnética.
- *Perturbaciones ionosféricas súbitas*: Una perturbación ionosférica se manifiesta como un brusco desvanecimiento en las radiocomunicaciones de corta frecuencia del lado día de la Tierra. Este desvanecimiento es causado por un fuerte incremento en la densidad de electrones en las capas *D* y en la parte más baja de la capa *E* presumiblemente como resultado de la penetración de rayos X solares hasta esas capas. Ondas de radio que normalmente atravesarían la capa *D* para reflejarse a mayores alturas, en su lugar son absorbidas. En consecuencia comunicaciones por radio a larga distancia quedan interrumpidas súbitamente 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 las regiones más bajas de la ionosfera.
- *Efectos producidos desde abajo de la ionosfera*: Estos efectos producen cambios en la concentración electrónica. Las mareas juegan un papel importante en la dinámica de la termosfera, particularmente en un intervalo de altitud de los 100 a los 250 km. Las mareas son generadas en la baja atmósfera y se propagan hacia alturas ionosféricas. Las mareas atmosféricas son oscilaciones de escala global producidas principalmente por el calentamiento asociado con la absorción de la radiación solar por vapor de agua en la troposfera, por ozono en la estratosfera y por el oxígeno molecular en la baja termosfera.
- *Absorción del casquete polar o PCA*: Durante épocas de fuerte actividad solar pueden precipitarse protones de muy alta energía sobre la ionosfera en las regiones polares, dando como resultado zonas de enorme absorción de ondas de radio, fenómeno conocido como *polar-cap absorption* o *PCA*. La PCA es acompañada de bloqueos en las radiocomunicaciones, resultado de un incremento en la densidad electrónica a alturas entre 55 y 90 km. Dado que el espectro de energías que tienen estas ráfagas de protones es muy amplio, los más energéticos inciden primero produciendo pequeñas áreas de alta ionización, seguidos del resto de protones de menor energía que gradualmente ionizan el casquete polar. Aunque los efectos relacionados con la tormenta son más

frecuentes en las zonas aurales (centradas a  $67^\circ$  de latitud magnética), la absorción de ondas de radio puede darse aún en latitudes más bajas.

- *Anomalía ecuatorial*: En la ionosfera de latitudes alrededor del ecuador tiene lugar esta variación global. Consiste en la distribución de la frecuencia crítica de las capa  $F_1$  y  $F_2$  con un valor mínimo a lo largo del ecuador magnético y 2 máximos ubicados a  $\pm 20^\circ$  de latitud alrededor del ecuador. Esto sucede porque los campos eléctricos asociados con corrientes ionosféricas trasladan el plasma de las capas  $F$  en latitudes bajas hacia el oeste del lado día y al este del lado noche, lo cual causa un arrastre de plasma (por efecto de la fuerza electromagnética dada como  $\vec{E} \times \vec{B}$ ) hacia arriba de día y hacia abajo de noche. 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 regiones cerca de los trópicos donde la densidad electrónica de la capa  $F$  aumenta considerablemente. Este efecto es más marcado cuando hay actividad geomagnética.
- *Spread F*: Inestabilidades y turbulencia del plasma ionosférico en la capa  $F$  (sobre todo en latitudes medias y bajas) se agrupan bajo el nombre de *spread F* o *ensanchamiento F*. 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 minutos a horas. Las inestabilidades provocan irregularidades e inhomogeneidades en la densidad de electrones de la capa  $F$  en escalas que van desde centímetros hasta kilómetros, causando perturbaciones en las señales de radio en un amplio rango de frecuencias. Las señales de comunicación satelital que se propagan a lo largo de la ionosfera han revelado que el ensanchamiento  $F$  en el ecuador puede distorsionar seriamente ondas de radio incluso a frecuencias de gigahertz. La concentración total de electrones y por ende el índice de refracción se vuelve altamente irregular, con cambios de concentración de hasta 3 órdenes de magnitud en solo unos kilómetros. En horas nocturnas el ensanchamiento  $F$  se caracteriza por la presencia de burbujas de plasma (de menor densidad que sus alrededores) que se alargan verticalmente hasta 1500 km de altura. Este fenómeno es un ejemplo de la *inestabilidad de Rayleigh-Taylor* (Makela, 2006) (un fluido más denso situado sobre un fluido menos denso es una situación dinámicamente inestable). Después del atardecer la parte baja de la capa  $F$  se vuelve menos densa que la región  $F_2$  porque la recombinación es más lenta en ésta última, lo cual crea un gradiente vertical de densidad electrónica que da lugar a las mencionadas burbujas de plasma que ascienden y crean distribuciones irregulares en los electrones de las regiones superiores de la ionosfera. De la misma forma que la anomalía ecuatorial, el ensanchamiento  $F$  se vuelve más marcado en épocas de actividad geomagnética.

Cabe mencionar el impacto que tienen todos estos sucesos en la propagación de ondas de radio, ya que todos ellos interfieren directa o indirectamente en las telecomunicaciones y sistemas que hacen uso de dichas ondas.

## 2.4. Propagación de ondas de radio en la ionosfera

La dinámica de la ionosfera genera condiciones que afectan la propagación de ondas de radio en varias longitudes de onda. Además de actuar como una superficie reflectiva de ondas de radio de baja frecuencia, efectos de la ionosfera son sustanciales, incluso para señales cuya frecuencia es suficiente para penetrar la ionosfera, tales como las usadas por satélites de telecomunicaciones y sistemas de percepción remota. Esos efectos incluyen centelleo de las señales que ocurren debido a fluctuaciones espaciales y temporales en el índice de refracción de la ionosfera, así como retrasos en la propagación de la señales que se usan para calcular el contenido total de electrones (TEC) a lo largo de la trayectoria de la misma, por mencionar solo algunos.

La ionosfera puede afectar la transmisión de ondas de radio al menos de tres maneras: Primero, si las condiciones son las adecuadas, las partículas cargadas de la ionosfera pueden quitarle energía a una onda electromagnética atenuando su señal; en el caso límite la energía de la onda puede ser absorbida completamente. En segundo lugar, una onda de radio que se propaga a lo largo de una región donde la densidad de electrones no es constante sufre un cambio de dirección, en otras palabras, el índice de refracción del medio cambia espacialmente y por eso la onda se refracta. Bajo ciertas circunstancias la refracción es tal que la onda de radio es reflejada por completo. En tercer lugar, si la densidad de electrones no está uniformemente espaciada, o dicho de otra manera, presenta fluctuaciones en su densidad, una onda electromagnética que se propaga a lo largo de la región de fluctuación exhibirá variaciones temporales en su amplitud y fase, fenómeno conocido como *fading*.

El parámetro que nos determina cual de los efectos mencionados afectará a una onda de radio de frecuencia  $f$  que se propaga a lo largo de la ionosfera es la *frecuencia de plasma*  $f_N$ . Dentro del plasma, la distribución de las cargas, tanto positivas como negativas, crean campos que tienden a mantener la cuasineutralidad 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 nos regresa a la misma situación. De esta forma se origina una oscilación propia del plasma con frecuencia  $f_N$  llamada *frecuencia natural de oscilación del plasma*. Si consideramos que se desplazan solo los electrones, en tanto que los iones permanecen inmóviles y sin considerar movimientos térmicos de iones y electrones, la frecuencia de oscilación del plasma está dada como:

$$f_N = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{4\pi^2 m_e \epsilon_0}} \quad (2.1)$$

donde  $n_e$  es la densidad de electrones y  $m_e$  la masa de los electrones. Note que la fre-

cuencia del plasma solo depende de la densidad de electrones. Para la capa  $F_2$  de la ionosfera (en condiciones estables a medio día), este valor es aproximadamente de  $10\text{ MHz}$  (Tanadori, 2001).

### 2.4.1. Atenuación de ondas de radio

Cuando una onda de radio entra en la ionosfera y encuentra una concentración significativa de electrones libres, algo de la energía de la onda es transferida a los electrones, los cuales empiezan a oscilar a la frecuencia de la onda. A su vez, los electrones pierden parte de esa energía por colisiones con partículas neutras del aire, calentando a este último. En consecuencia, la señal de radio captada se atenúa. Si la tasa de colisión entre electrones y partículas neutras es lo suficientemente grande, en esencia toda la energía de la onda es transferida a la atmósfera neutra y la señal de radio es completamente absorbida. La pérdida apreciable de la potencia de la señal ocurre en la atmósfera cuando hay un número suficiente de electrones y partículas neutras. Esta es la situación que prevalece en la capa  $D$ . En principio esta situación no es exclusiva de los electrones. Los iones también pueden atenuar la señal de una onda de radio para cederla después por colisiones pero como la masa de los iones es considerablemente mayor a la de los electrones, su oscilación es menor y por lo tanto la transferencia de energía por colisiones es menor y el efecto de la atenuación de la onda por la presencia de los iones puede ser despreciada. En general, las ondas de radio sufren una pequeña atenuación en la intensidad de la señal debido a su paso por la ionosfera. La mayor parte de esa atenuación colisional ocurre en las regiones más bajas de la ionosfera, es decir, en la capa  $D$ .

### 2.4.2. Reflexión de ondas de radio y frecuencia crítica

La ecuación (2.1) nos da un límite importante de frecuencias utilizables para transmisión a lo largo de la ionosfera. Ondas de radio con frecuencias menores al valor típico de  $10\text{ MHz}$  no pueden penetrar en el plasma. Cuando una onda electromagnética atraviesa un plasma, los electrones responden a esta oscilación pero la atracción electrostática que experimentan por parte de los iones tiende a impedir este acoplamiento onda-electrones. Lo que sucede es que si la frecuencia de la onda incidente  $f$  es menor que la frecuencia  $f_N$ , en el transcurso de un periodo  $T$ , los electrones del plasma *tienen tiempo* para distribuirse de tal forma que el desplazamiento de la onda resulta imposible. Por lo tanto, si la frecuencia de la onda es menor que la frecuencia natural del plasma, no hay acoplamiento, la onda solo penetra una fina capa del plasma y luego es reflejada. En cambio, para ondas con frecuencias  $f$  mayores a la frecuencia de plasma  $f_N$ , la frecuencia es tan rápida que no le da tiempo a los electrones de redistribuirse y la onda pasa de largo. Este límite de frecuencia se denomina *frecuencia crítica* y esta dada, a partir de la ecuación (2.1) como (Tanadori, 2001):

$$f_c = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{4\pi^2 m_e \epsilon_0}} \cong 8,98 \times 10^{-3} \sqrt{n_e} [\text{Hz}] \quad (2.2)$$

De la ecuación vemos que la frecuencia crítica del plasma es función de la concentración de electrones en él. En la región  $D$  por ejemplo, el valor máximo observado para la densidad de electrones  $n_e$  es de  $10^{10} m^{-3}$  y por tanto la frecuencia más alta que puede ser reflejada (en propagación vertical) por esta capa es de  $0.28 MHz$ . En cambio, la máxima densidad electrónica de la capa  $F_2$  es aproximadamente  $10^{12} m^{-3}$ , por lo que ondas de radio que se propagan verticalmente a frecuencias menores de  $10 MHz$  son reflejadas.

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

Con el fin de estudiar a detalle como se propagan ondas electromagnéticas en la ionosfera, es conveniente expresar el índice de refracción  $\mu$  de la ionosfera en términos de las cantidades medibles (como densidad electrónica, campo magnético entre otras). De la teoría magneto-ionica desarrollada por E. V. Appleton sobre la propagación de ondas electromagnéticas en gases ionizados (misma que ha sido tratada a detalle por (Davies, 1965), (Ratcliffe, 1959) entre otros) se obtiene la siguiente ecuación para el índice de refracción de la ionosfera:

$$\mu^2 = 1 - \frac{X}{1 - \frac{Y_T^2}{2(1-X)} \pm \sqrt{\left[\frac{Y_T^2}{2(1-X)}\right]^2 + Y_L^2}} \quad (2.3)$$

con

$$X = \frac{f_N^2}{f^2} = \frac{e^2 n_e}{4\pi^2 m_e \epsilon_0 f^2} \quad (2.4)$$

$$Y = \frac{f_B}{f} = \frac{eB}{2\pi m_e f} \quad (2.5)$$

$$Y_T = Y \sin(\phi) \quad (2.6)$$

$$Y_L = Y \cos(\phi) \quad (2.7)$$

donde  $f_B$  es la frecuencia de giro de los electrones alrededor de las líneas del campo magnético (terrestre)  $B$ ,  $\phi$  es el ángulo entre el frente de onda y la dirección del campo magnético y  $f$  es la frecuencia de la onda electromagnética incidente. Esta ecuación para  $\mu$  (llamada *Ecuación de Appleton-Hartree*) es válida solo si desprecian efectos de colisiones entre cargas y partículas neutras y si se supone que solo los electrones afectan la propagación de la onda y los iones no.

Para el caso de ondas que pueden penetrar la ionosfera, es decir, que tienen frecuencia  $f$  mayor a la frecuencia del plasma  $f_N$  podemos simplificar la ecuación de Appleton-Hartree. Si suponemos que  $f = 100 MHz$ ,  $f_N = 10 MHz$  y  $f_B = 1 MHz$  entonces  $X = 0,01$  y  $Y = 0,01$ . Para este valor de  $X$ , el término  $1 - X$  en el denominador lo podemos aproximar como la

unidad y los términos cuadráticos de  $Y$  son muy pequeños por lo que podemos anularlos. Así, la ecuación (2.3) se reduce simplemente a

$$\mu \cong \sqrt{1 - X}$$

pero como  $X$  es pequeño con respecto a 1, podemos aproximarlo como

$$\mu \cong 1 - \frac{1}{2}X = 1 - \frac{e^2 n_e}{8\pi^2 m_e \epsilon_0 f^2} \quad (2.8)$$

#### 2.4.4. Transmisión de ondas de radio y ruido

Las ondas de radio son usadas para diferentes propósitos, pero el principal es transmitir información de un punto a otro sin necesidad de usar enlace cableado entre ambos puntos. Muy poca información puede ser transmitida a una sola frecuencia, por lo que se monta una banda de frecuencias sobre la onda principal (la que se transmite) alrededor de la frecuencia principal, este es el *ancho de banda* de una señal. Esta manera de transmitir información delimita el número de receptores que pueden captar y desmontar la información. Un ancho de banda grande permite emitir (o recibir) mayor información pero esta más expuesta a interferencias. En cambio, si el ancho de banda de la señal es pequeño, menor es la información que se emite o recibe pero es menos susceptible a interferencias. Mientras que el ancho de banda limita la información que puede ser emitida y recibida por una onda de radio, la relación *señal a ruido* (denotada comunmente como  $S/N$  por "signal / noise") es una propiedad del receptor que determina como es la intensidad de la señal con respecto al ruido de fondo. Si  $S/N$  es grande es más fácil diferenciar la señal del ruido de fondo. Los sistemas de radio requieren de un valor mínimo de  $S/N$  para operar exitosamente y este cociente puede incrementarse aumentando la intensidad de la señal, disminuyendo el ruido, o ambos.

La intensidad de la señal depende de la potencia del transmisor y de la eficiencia de la antena. El ruido de fondo, que puede ser creado artificialmente por el hombre, provenir del entorno o ser un efecto secundario de los componentes electrónicos del receptor. Aunque en teoría se pueden usar amplificadores y filtros para aumentar la intensidad de la señal y disminuir el ruido, en la práctica el ruido no se puede minimizar tanto como se desea porque los amplificadores también aumentan el ruido. Interferencias creadas por el hombre pueden ser identificadas y filtradas aunque no siempre resulta sencillo. Típicamente este ruido en radio se debe a motores y otros aparatos eléctricos y es común a frecuencias mayores a 300 MHz. Por lo tanto, a estas frecuencias, la única manera de mitigar los efectos del ruido de una señal en un receptor es un ancho de banda estrecho y antenas con alta eficiencia. Finalmente, el ruido debido al ambiente (como el de tormentas eléctricas o el radio cielo de fondo) no puede ser eliminado.

### 2.4.5. Fading

El entorno puede alterar la señal y los niveles de ruido en otras maneras, siendo las ondas de radio que se propagan por el cielo las más vulnerables. Sobre todo la absorción y el fading pueden reducir la intensidad de la señal y los niveles de ruido. Ambos efectos son dependientes de la frecuencia. El *fading* (o fluctuaciones en la amplitud y fase de una señal) usualmente resulta de las variaciones del medio en que se propaga la onda a lo largo de su trayectoria mientras que la absorción es consecuencia de la conversión de energía de la onda en calentamiento de la atmósfera. Cuando la señal emitida se encuentra con un obstáculo en su trayectoria (como pueden ser gradientes de densidad o irregularidades debidas al campo geomagnético para la ionosfera) dos o más rayos de luz pueden desviarse y seguir trayectorias separadas hasta el receptor. Como diferentes trayectorias tienen distintas longitudes, las señales llegarán al receptor ligeramente desfasadas. Por lo tanto la señal total captada por el receptor puede variar debido a interferencia constructiva o destructiva. Este tipo de fluctuaciones usualmente tiene periodos de segundos, por eso se vuelve importante a frecuencias mayores a los 30 MHz, las cuales son lo suficientemente grandes para ser reflejadas por los electrones de la ionosfera pero no están exentas del fading.



# El radiotelescopio MEXART y el Centelleo Interplanetario

---

LAS perturbaciones transitorias de gran escala en el viento solar, al interactuar con la magnetosfera terrestre pueden inducir severas perturbaciones en el campo magnético terrestre, denominadas tormentas geomagnéticas. El estudio de estas perturbaciones tiene, no sólo un valor científico por la diversidad de procesos de plasma que involucran, tanto en su generación en el Sol como en su propagación en el medio interplanetario, sino que también tiene un valor práctico, debido a que estas perturbaciones afectan el entorno terrestre y pueden causar daños severos a nuestra tecnología. Actualmente se sabe que una gran variedad de sistemas: telecomunicaciones, transformadores, líneas de alta tensión, aparatos que usan de referencia la orientación del campo magnético, gasoductos, satélites artificiales, control de naves espaciales, comunicaciones por radio y radar, entre otros, son afectados severamente por la actividad solar. Debido a esto, el estudio de las perturbaciones que viajan del Sol hacia la Tierra, ha adquirido una importancia relevante, a tal grado que se ha acuñado el término *clima espacial* para designar el estado de perturbación del viento solar en el medio interplanetario y el ambiente magnético que rodea a la Tierra. Por esta razón hay gran interés de los gobiernos de varios países (principalmente los que se encuentran en latitudes altas) por establecer sistemas regionales de alarma que permitan evitar o disminuir los posibles efectos de la llegada de estas perturbaciones a la Tierra.

Como una parte de los estudios de la actividad solar que realiza la comunidad internacional, ha planteado el proyecto de desarrollar una red mundial de radiotelescopios dedicados a estudiar el plasma expulsado por el Sol que eventualmente puede alcanzar a la Tierra y producir tormentas geomagnéticas. Esto con el objetivo de establecer un sistema mundial de alerta temprana que permitiría, en principio, conocer con al menos un día de anticipación si hay una perturbación importante en el medio interplanetario, viajando del Sol hacia la Tierra. En México existe un radiotelescopio que tiene como objetivo principal el rastreo de perturbaciones transitorias de gran escala que viajan hacia la Tierra que emplea la técnica del *centelleo interplanetario*, el cual consiste en la medición del centelleo que estas perturbaciones producen en las señales de fuentes de radio cósmicas de diámetro pequeño.

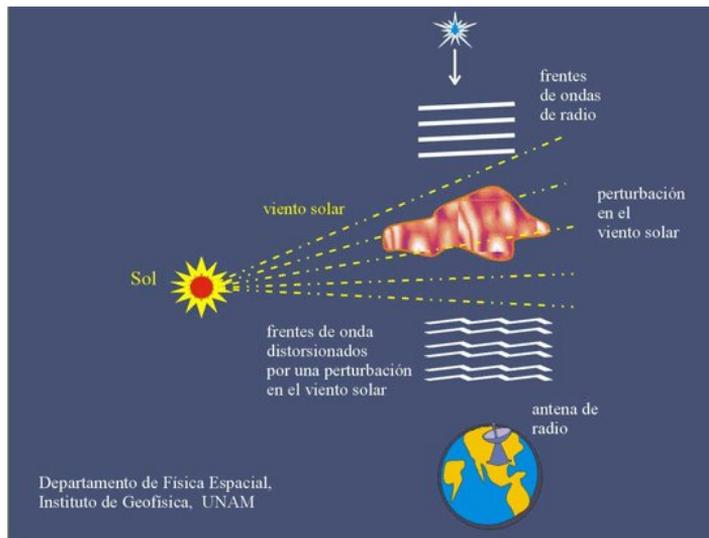
El radiotelescopio de centelleo interplanetario de México (MEXART) se integrará a la red de observatorios dedicados a la detección y seguimiento de estas perturbaciones en un programa conjunto con observatorios de Europa, India y Japón. La red de observatorios tiene como objetivo mejorar el rastreo sistemático de las perturbaciones del viento solar en el medio interplanetario durante su trayectoria hacia la Tierra, manteniendo así un monitoreo continuo del Sol y de la actividad en el medio interplanetario, considerando que en todo momento, alguno de ellos estará observando el Sol.

### 3.1. El Centelleo Interplanetario

Los primeros registros del centelleo interplanetario se observaron en los años 50 durante observaciones de fuentes de radio estelares con radiotelescopios que tenían como objetivo determinar el diámetro de éstas, ubicadas cerca del Sol. Las observaciones de las fuentes presentaron un extraño ensanchamiento en la desviación estándar de la potencia captada. En 1963 Hewish y colaboradores en el Observatorio de Cambridge registraron variaciones en la amplitud de las señales de algunas fuentes haciendo observaciones a  $178\text{ MHz}$ . Un análisis de las observaciones mostró que dichas fluctuaciones en intensidad mostraban un periodo entre 1 y 2 segundos. La contaminación de la señal debido a la ionosfera, bien conocida en ese entonces, no justificaba las rápidas variaciones de la señal captada (Hewish et al, 1964). Hewish y colaboradores fueron los primeros en reconocer que la señal de las fuentes de radio presentaba, además de contaminación ionosférica, un centelleo asociado con el viento solar. A este fenómeno se le llamó *centelleo interplanetario* (o CIP). Además encontraron que esas fluctuaciones estaban bien correlacionadas con la posición de la fuente respecto al Sol, confirmando de esta manera su origen interplanetario. Actualmente se sabe que fuentes de radio con tamaño angular menor a 1 segundo de arco presentan centelleo interplanetario en un rango de frecuencia de  $0.1$  a  $3\text{ Hz}$  (Hewish y Duffet-Smith, 1987).

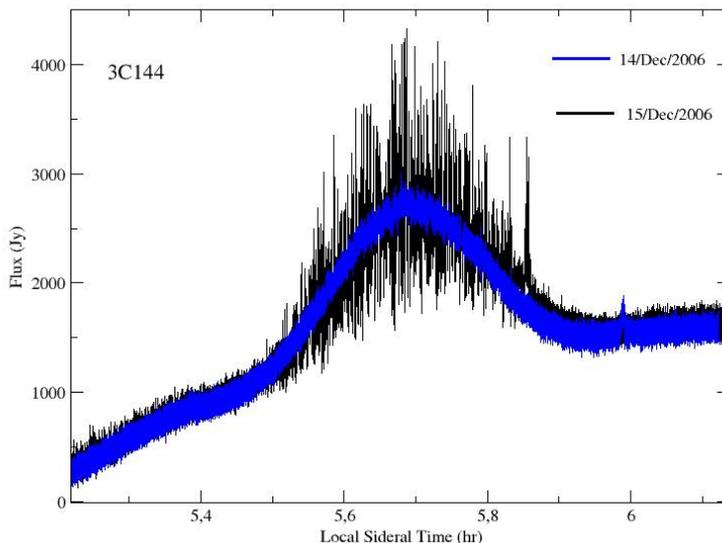
El centelleo interplanetario es la variación aleatoria en la intensidad de una fuente de radio cósmica de diámetro angular pequeño (menor a 2 segundos de arco) causada por la difracción del frente de onda que se propaga a lo largo de las turbulencias aleatorias del índice de refracción del medio interplanetario (González-Esparza et al, 2004). Las distorsiones de fase del frente de onda surgen debido a irregularidades en la densidad electrónica de pequeña escala en el plasma interplanetario que producen un patrón de difracción en el plano del observador, captándose así las fluctuaciones en intensidad (centelleo) en la antena receptora (figura 3.1) (Imagen tomada de la Web del Departamento de Física Espacial del Instituto de Geofísica, UNAM).

La técnica de CIP asume que las fluctuaciones en la densidad de electrones son proporcionales a las variaciones de pequeña escala del viento solar. Dichas variaciones pueden estar asociadas a dos tipos generales de perturbaciones de gran escala en el viento solar: (1) regiones de interacción corrotantes entre viento solar rápido y lento e (2) incrementos en



**Figura 3.1:** Esquema del fenómeno de Centelleo Interplanetario. El frente de onda de la fuente de radio distante se distorsiona al propagarse a través del viento solar perturbado.

densidad asociados a eventos transitorios como eyecciones de masa coronal u otros efectos de la actividad solar. Por lo tanto, es posible usar observaciones de CIP para identificar perturbaciones de gran escala en el viento solar propagándose desde el Sol hasta 1 UA, así como obtener información de estas perturbaciones, tales como tamaño y velocidad en una región del medio interplanetario donde no hay otra técnica capaz de hacerlo (González-Esparza et al., 2004). Hewish (Hewish, 1990) sugirió que observaciones de todo el cielo de CIP de fuentes de radio extragalácticas pueden ser usadas para el monitoreo del clima espacial. Para que esto sea posible se debe tener en cuenta una variable importante: la elongación solar ( $\epsilon$ ). La *elongación solar* es el ángulo formado por las líneas Sol-Tierra y Tierra-fuente de radio cósmica. El centelleo interplanetario incrementa conforme disminuye la elongación hasta un cierto límite, y disminuye para valores grandes de la elongación. Detalles sobre la geometría del centelleo en función de la elongación y otros detalles de éste último pueden consultarse en (Carrillo-Vargas, 2007; Pérez-Enríquez et al., 2008). Por ejemplo, combinando observaciones de SOHO-LASCO, CIP y mediciones *in situ* es posible trazar la evolución de algunas EMC (Manoharan et al., 2000; 2001) así como regiones de interacción corrotantes y perturbaciones interplanetarias (Manoharan y Ananthkrishnan, 1990; Tokumaru et al., 2000) combinando datos de dos diferentes radiotelescopios: El radiotelescopio de Ooty (ORT) ubicado a  $76^\circ$  de longitud Este, el cual consta de una sola antena (30 m x 600 m) operando a 327 MHz, operado por el Radio Astronomy Center, Tata Institute of Fundamental Research, India (Manoharan y Ananthkrishnan, 1990; Swarup, 1971) y el Solar-Terrestrial Environment Laboratory (STEL) ubicado a  $138^\circ$  de longitud Este, compuesto de un sistema de multiantenas que opera a 327 MHz y esta a cargo de la Universidad de Nagoya, Japón (Asai et al., 1998).



**Figura 3.2:** Registro típico de una fuente de radio que presenta centelleo interplanetario.

La señal de una fuente de radio estelar puede cambiar de un día a otro. En la figura 3.2 se muestra la señal de la fuente estelar 3C144 para condiciones de viento solar quieto (línea azul) y con centelleo interplanetario un día después (línea en negro) (Imagen tomada de (Carrillo-Vargas et al., 2012)).

### 3.1.1. Índice de centelleo interplanetario

El grado de centelleo interplanetario medido en una señal proveniente de una fuente de radio se caracteriza por el índice de centelleo interplanetario  $g$  definido como:

$$g = \frac{\Delta S_{obs}}{S_{prom}} \quad (3.1)$$

donde  $\Delta S_{obs}$  es el centelleo observacional o flujo rms de la señal y  $S_{prom}$  es el centelleo promedio asociado a un viento solar quieto. La magnitud de  $g$  proporciona una estimación bastante confiable a la densidad media del plasma (Hewish y Bravo, 1986). Algunas definiciones alternativas del índice de centelleo y usos de  $g$  para estimar diversos parámetros del viento solar y su relación con la actividad solar y geomagnética se pueden consultar en (Hewish y Bravo, 1986; Pérez-Enríquez et al., 2008; Rickett, 1973). Para fines de este trabajo, definimos un índice de centelleo alternativo ( $G$ ) como:

$$G = \frac{RMS_{on-source}}{RMS_{off-source}} \quad (3.2)$$

donde  $RMS_{off-source}$  es la desviación estandar del ruido de fondo propio del radiotelescopio y  $RMS_{on-source}$  es la desviación estandar de la señal de una fuente de radio toda vez que se removió la tendencia de la fuente. En condiciones de calma, este índice tiene valor muy cercano a 1 mientras que en condiciones de actividad solar que afectan directamente la señal de la fuente de radio, el valor de  $G$  es mayor a 1.

### 3.1.2. Variantes del centelleo

En general la radiación electromagnética generada por una fuente de radio estelar al propagarse por el espacio hasta alcanzar la Tierra se ha desplazado, en términos generales, a través de 3 medios: interestelar, interplanetario y la ionosfera. En los tres casos el centelleo depende, en general, de varios parámetros como la escala y forma de las irregularidades en la densidad del plasma, la turbulencia del plasma, frecuencia de observación, entre otras.

#### Centelleo ionosférico

El desarrollo de la técnica de centelleo en longitud de ondas métricas proporcionó por primera vez una manera de estudiar las irregularidades del plasma ionosférico terrestre. El centelleo ionosférico tiene periodos de entre 1 segundo y 1 minuto (dependiendo de la frecuencia de observación) pero el valor típico es de 10 segundos (Lawrence et al., 1964) mientras que el asociado al centelleo interplanetario es de ( $\sim 1$  segundo). El empleo de satélites artificiales, particularmente los polares, actuando como fuentes de radio, proporcionan una herramienta calibrada para realizar observaciones de centelleo ionosférico, generando la posibilidad de obtener una imagen global de las distribuciones y ocurrencia de irregularidades ionosféricas (Aarons, 1982). Estudios realizados por Pryse y colaboradores (Pryse et al., 1991) mostraron que zonas de centelleo ionosférico se habían presentado durante la ocurrencia de actividad geomagnética intensa.

#### Centelleo interestelar

El centelleo interestelar es una fluctuación en intensidad de una señal asociada con la dispersión de ondas de radio de un pulsar, al atravesar las irregularidades de densidad de plasma interestelar. Esto se descubrió al observar pulsares, los cuales emiten, por su tamaño angular muy pequeño, radiación con suficiente coherencia para propiciar el fenómeno de centelleo. Mientras que el centelleo asociado a la ionosfera o al medio interplanetario aparece traslapado en ciertas frecuencias, el centelleo interestelar es fácilmente distinguible porque la escala de tiempo es mayor. Las variaciones medidas en los pulsares presentan escalas de tiempo del orden de minutos a una hora dependiendo de la frecuencia de observación. El centelleo interestelar ha sido empleado para estudiar las variaciones en densidad en el gas interestelar en un amplio rango de escalas y también para modelar la distribución de turbulencia de la Galaxia (Hewish, 1992).

### 3.1.3. Estudios de Centelleo Interplanetario con radiotelescopios

Observaciones continuas de EMC y zonas de compresión de viento solar en el medio interplanetario a una unidad astronómica son potencialmente dañinas para las telecomunicaciones terrestres. El seguimiento de estos fenómenos propios de la actividad del Sol ha sido uno de los objetivos recientes del clima espacial. Sin embargo, las dificultades que implica el monitoreo constante *in situ* de estos eventos convierten al CIP en una excelente alternativa para darles un seguimiento continuo. Para llevar a cabo este tipo de estudios es necesario crear una red mundial de radiotelescopios que observen constantemente el cielo para detectar continuamente las perturbaciones de origen solar haciendo uso de fuentes de radio cósmicas. Todos los radiotelescopios deben cumplir una serie de requisitos que se explicarán en breve.

Elegir una frecuencia de trabajo adecuada dentro del espectro de radiofrecuencia, donde la intensidad de centelleo es mayor es una de los factores más importantes a tomar en cuenta si se desean obtener óptimos resultados. La razón por la cual existen restricciones para seleccionar la frecuencia de un radiotelescopio para estudios de CIP, se debe principalmente a la relación tan cercana que existe entre la frecuencia seleccionada y la fuerza de dispersión, la cual puede aumentar o disminuir de acuerdo al ángulo de elongación solar (Duffett-Smith, 1976). Por otra parte, si existe un desplazamiento hacia frecuencias cada vez más bajas el centelleo ionosférico se incrementa rápidamente hasta el grado de poder perderse o ser opacado por la ionosfera cuando la frecuencia se aproxima a los 10 MHz. Para realizar estudios de centelleo interplanetario hay que considerar la ubicación del arreglo de antenas para evitar ruido ionosférico, el cual se intensifica a latitudes altas y bajas, siendo perjudicial para este tipo de estudios. Por otra parte, hay que realizar estudios de ruido electromagnético ambiental, a fin de evitar interferencia electromagnética en el lugar de ubicación del radiotelescopio, e implementar sistemas de filtraje para las señales de interés. La ubicación del lugar donde se ha de construir el observatorio para estudios de CIP debe estar alejada, por lo menos, entre 6 y 10 km de zonas de actividad industrial y líneas de alta tensión (Carrillo-Vargas, 2007). De igual forma, debe estar lo más alejado posible de zonas urbanas o lugares donde el crecimiento demográfico interfiera e imposibilite el desarrollo y funcionamiento del radiotelescopio, sin dejar de considerar que la ubicación del observatorio cuente con vías de acceso que permitan un libre y fácil transporte de personas, equipo y material que el radiotelescopio requiera.

La experiencia obtenida al construir otros radiotelescopios en diferentes partes del mundo ha demostrado que la situación geográfica y climática del lugar debe ser objeto de consideración para ubicar el arreglo de antenas. La ubicación del lugar debe estar lo más alejado posible de montañas o colinas altas, cuya elevación no exceda un rango de 5 a 10 grados. El medio climático es considerado el otro factor de gran impacto que afecta directamente a la infraestructura del arreglo de antenas; como en el caso de periodos prolongados de lluvias y tormentas eléctricas, que pueden llegar a afectar directamente los elementos que constituyen a las antenas, líneas de transmisión y demás componentes electrónicos que se encuentren a

la intemperie. Lo más conveniente para realizar estudios de CIP es diseñar y construir antenas del tipo arreglo plano de gran área para observaciones de tránsito meridional, ya que son instrumentos de observación de tránsito de fuentes de radio muy eficaces. En comparación con arreglos de antenas parabólicas o cilíndricas, este tipo de arreglos tiene un costo de construcción menor (Carrillo-Vargas, 2007).

### 3.2. El Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario MEXART

El Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario de Coeneo Michoacán (Mexican Array Radio Telescope, MEXART por sus siglas en inglés) es un arreglo de gran área (casi 10,000  $m^2$ ) con frecuencia de observación de 139.65 MHz. Las señales son detectadas a través de varias líneas de dipolos, las señales son filtradas, amplificadas, combinadas y posteriormente enviadas a los puertos de una matriz de Butler en el cuarto de control (González-Esparza et al, 2004). La matriz de Butler suma y combina vectorialmente las señales de cada una de las 64 líneas y genera un abanico de haces que apuntan a diferentes declinaciones en el cielo. Finalmente, de cada haz se obtiene una señal que se envía a los receptores donde es procesada con sistema de adquisición de datos analógico-digital. El radiotelescopio MEXART formará parte del proyecto de cooperación internacional para conformar una red mundial de observatorios solares que permitan estudiar de manera continua la evolución y rastreo sistemático, de las perturbaciones del viento solar en el medio interplanetario durante su trayectoria hacia Tierra, con el fin de establecer un sistema de alerta o pronóstico de tormentas geomagnéticas intensas.

#### 3.2.1. Antecedentes

La idea de construir un Observatorio para detectar Centelleo Interplanetario en México surge por el interés científico de hacer estudios del clima espacial y el viento solar. El radiotelescopio es parte de un proyecto que tiene origen en el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM en 1992, siendo la responsable científica del proyecto la Dra. Silvia Bravo del Departamento de Física Espacial. Los altos niveles de ruido electromagnético que se observan en todos los lugares dentro y cercanos al Distrito Federal impidieron la operación de un radiotelescopio en el campus de la UNAM. Por esta razón se decidió construir el telescopio lejos de ciudades con mucha población y actividad industrial y se buscaron sitios que cumplieran el requerimiento principal de bajo ruido electromagnético ambiente para montar el radiotelescopio final. Después de comparar diferentes locaciones se eligió el municipio de Coeneo, Michoacán, ya que está en una ciénega rodeada de montañas de poca altitud y con muy bajos niveles de ruido electromagnético. Sus coordenadas geográficas son: latitud 19 48''49' norte, longitud 101 41''39' oeste, altura de 1964 m sobre el nivel del mar.

Las características generales del radiotelescopio construido en México se hicieron con

base en el diseño y las experiencias del radiotelescopio de Cambridge, Inglaterra (desarrollado en los años sesentas y que operó hasta la década de los noventas) pero implementando tecnología moderna para la optimización del sistema de amplificación, filtrado, control electrónico del sistema de observación, entre otros. Y considerando una frecuencia de operación superior al arreglo en Cambridge, además de ubicar el radiotelescopio en una latitud geográfica más baja, lo cual ayuda a evitar problemas de ruido ionosférico presente a latitudes altas y permite observar otras fuentes de radio estelares. La determinación de las dimensiones del arreglo se hicieron considerando las pruebas realizadas en Cambridge (Duffer-Smith, 1976). Se encontró que un arreglo de dipolos lineales, polarizados en la dirección este-oeste y separados media longitud de onda ( $\lambda/2$ , en función de la frecuencia de operación) en la dirección norte-sur, presenta una buena eficiencia. También se acordó considerar las experiencias y opiniones de otros especialistas que contaban con radiotelescopios similares, como lo es el National Centre for Radio Astrophysics of Tata Institute of Fundamental Research en la India y el Instituto Tecnológico de Florida, USA (Carrillo-Vargas, 2007).

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo en dos etapas: la primera de ellas se basó en la construcción de un arreglo dipolar prototipo, construido con una cantidad mucho menor de dipolos empleado para probar el diseño de la antena y los materiales empleados en su construcción; la segunda etapa consistió en implementar el arreglo final y el observatorio. Desde su inauguración el 1 de diciembre de 2005 opera de forma continua hasta la fecha. En la figura 3.3 se muestra una foto panorámica del MEXART (foto tomada de la página web [www.mexart.unam.mx](http://www.mexart.unam.mx)).

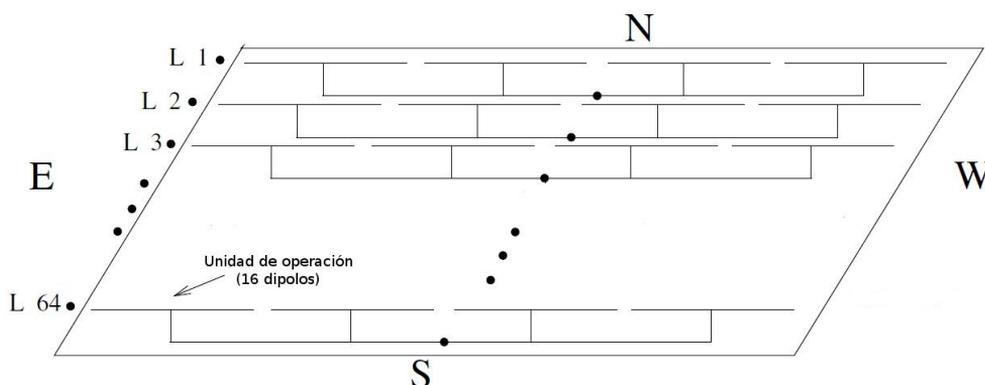


**Figura 3.3:** Vista panorámica del radiotelescopio MEXART

### 3.2.2. Diseño del MEXART

Para estudiar las estructuras y dinámica de los eventos transitorios de gran escala en el viento solar en un rango amplio de elongación solar se requiere observar varios cientos de fuentes con centelleo alrededor del Sol. El área efectiva del arreglo determina el número total de fuentes estelares de radio que pueden ser detectadas y usadas para mapear las perturbaciones en el medio interplanetario. Entre más grande sea el área del arreglo (mayor cantidad de dipolos) es más sensible y por lo tanto puede detectar mayor cantidad de fuentes. Otro parámetro crucial es la frecuencia de operación del radiotelescopio. Este parámetro define o determina directamente el diseño de la antena. (Duffett-Smith, 1976) explica detalladamente como seleccionar la frecuencia de operación de un radiotelescopio cuyo fin sea estudios de viento solar por medio de la técnica del CIP. Con base en los argumentos presentados por Duffett-Smith se concluye que una frecuencia en el rango 70 a 900 MHz es la óptima para estudios de CIP, con un ancho de banda mínima de 2 MHz. Antes de iniciar el diseño del arreglo prototipo se tramitó una banda de frecuencias ante la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) que autorizó la banda de 138.9 a 140.4 MHz, con la garantía oficial de protegerla y mantenerla libre de interferencia electromagnética. Así, se determinó la frecuencia central del MEXART en 139.65 MHz con un ancho de banda de 1.5 MHz.

El radiotelescopio MEXART consiste en un arreglo dipolar plano con las siguientes características: constituido por 4096 dipolos distribuidos en una configuración rectangular, usando 64 arreglos lineales polarizados en dirección geográfica este-oeste. Cada arreglo consta de 64 dipolos de onda completa con separación entre líneas de  $\lambda/2$  en dirección norte-sur. La superficie de la antena es de aproximadamente 10 000 m<sup>2</sup>, en un arreglo rectangular de 70 × 140 m orientado con su eje mayor paralelo al eje este-oeste geográfico y su eje menor paralelo con el eje norte-sur (Carrillo-Vargas, 2007) como se muestra en la figura 3.4 (Imagen tomada de (Carrillo-Vargas, 2007)).



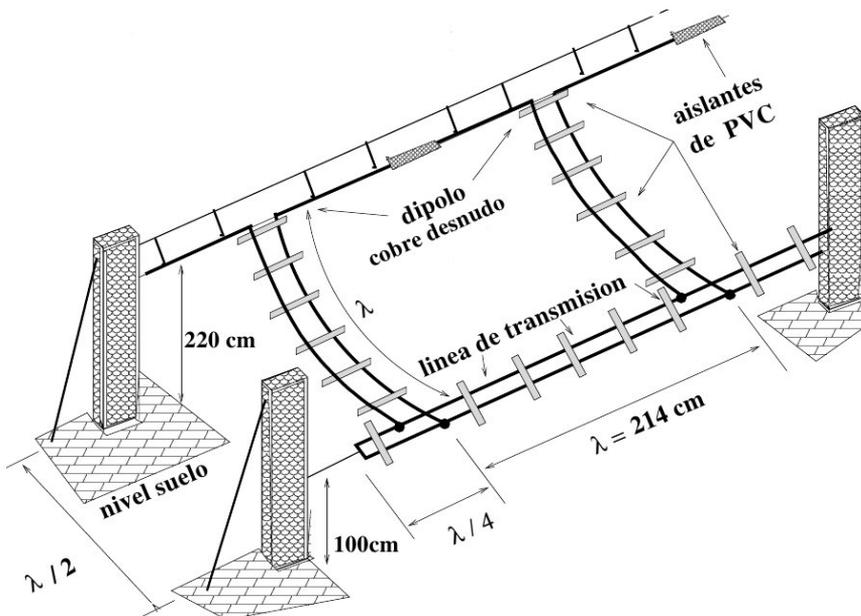
**Figura 3.4:** El esquema ilustra la segmentación del MEXART. Cada línea de 64 dipolos está señalada con la letra L, misma que está compuesta por 4 unidades de 16 dipolos cada una.

El instrumento se puede dividir en 4 subsistemas básicos:

- Arreglo dipolar y sistema amplificador de bajo ruido.
- Sistema de amplificación y combinación de la señal.
- Sistema de control de dirección de observación (matriz de Butler).
- Receptores y sistema adquiredor.

### 3.2.3. Arreglo dipolar y sistema amplificador de bajo ruido.

El elemento básico del arreglo es un dipolo de onda completa ( $\lambda = 2.15 \text{ m}$ ), el cual está hecho con alambre de cobre. Cada dipolo es conectado en paralelo a una línea de transmisión construida del mismo material que el dipolo. La separación entre la base de cada dipolo y la línea de transmisión es de  $2.15 \text{ m}$ , es decir una longitud de onda. Los conductores de cobre se mantienen paralelos a una distancia de  $2.5 \text{ cm}$  sobre toda la longitud de la línea de transmisión mediante aisladores hechos con tubos de PVC de  $2 \text{ cm}$  de diámetro distribuidos cada  $30 \text{ cm}$  aproximadamente. Cada dipolo se une por sus extremos al siguiente dipolo a través de aislantes de PVC como se observa en la figura 3.5 (Imagen tomada de (Carrillo-Vargas, 2007)).

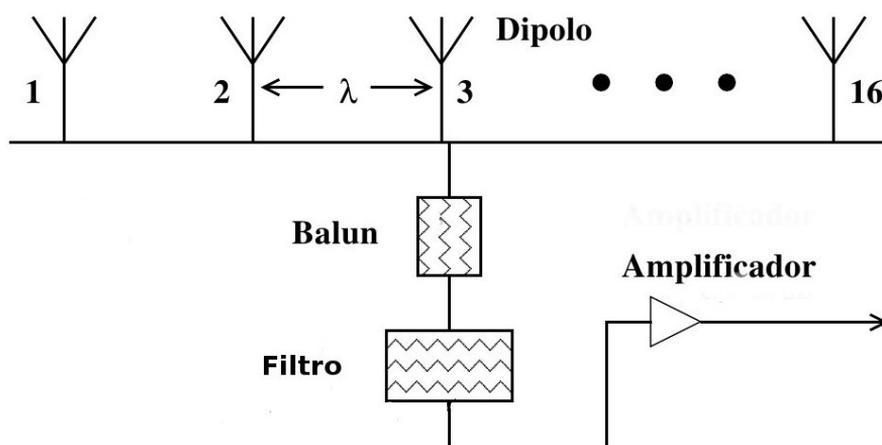


**Figura 3.5:** Esquema del tendido de los dipolos y su acoplamiento a la línea de transmisión. Se ilustra también la estructura del soporte y sus dimensiones.

Un subarreglo de 16 dipolos es conectado a la línea de transmisión, con impedancia característica es de 450 ohms, mismo que se acopla mediante un *balun*<sup>1</sup> a una línea de transmisión coaxial, con valor de 50 ohms. El balun acopla las líneas de transmisión y coaxial, eliminando las pérdidas que se producen al propagarse la señal de un medio al otro (Andrade, 2000). En el MEXART el balun que se utiliza es una bobina toroidal con núcleo de ferrita. A la salida del balun se hace una transición a cable coaxial hasta un filtro RF pasaltas (con frecuencia de corte de 65 MHz). Con este filtraje se excluyen las señales de bajas frecuencias que saturan los primeros amplificadores. Los filtros tienen una frecuencia central de 139.65 MHz y un ancho de banda de operación mínimo de 15 MHz. Enseguida del filtro se establece un primer nivel de amplificación de bajo ruido. Los amplificadores mantienen estable la fase (característica muy importante debido a que las fases de las señales captadas son de gran importancia para mantener el control del patrón de radiación). Para compensar las pérdidas de la señal de radiofrecuencia debido a la atenuación en el cable coaxial, impedancia de acoplamiento imperfecta, etcétera, se determinó establecer dos etapas de amplificación y dos etapas de combinación, correspondientes a cada etapa de amplificación.

### 3.2.4. Sistema de amplificación y combinación de la señal

Se define una *unidad* como una configuración conformada por un subarreglo de 16 dipolos, un balun, un filtro RF, un amplificador de bajo ruido, cables coaxiales y sistema de alimentación DC (ver figura 3.6). Imagen tomada de (Carrillo-Vargas, 2007).



**Figura 3.6:** Esquema de una *unidad básica*, integrada por un subarreglo de 16 dipolos, un balun, filtro RF, amplificador y los cables correspondientes.

<sup>1</sup> El balun es un dispositivo usado para acoplar un sistema balanceado a un sistema desbalanceado. Un dipolo alimentado por una línea de transmisión está balanceado respecto a la tierra. Una línea de transmisión coaxial es un sistema desbalanceado, ya que los conductores interno y externo del cable coaxial no están acoplados al dipolo del mismo modo que la línea de transmisión. Lo anterior trae como consecuencia una corriente a tierra a través del cable coaxial, el cual interfiere con la radiación del dipolo y modifica su patrón de radiación.

El tendido de los dipolos sobre cada línea de transmisión se divide en 4 unidades básicas de 16 dipolos cada una, los cuales se encuentran polarizados horizontalmente en la dirección este-oeste y conforman los 64 que integran cada línea. Las señales de dos unidades básicas se suman usando un combinador que suma vectorialmente las dos señales de igual o diferente frecuencia y fase. En cada línea las señales de cada sección se suman vectorialmente en una configuración tipo árbol, es decir, el subarreglo 1 se suma con el subarreglo 2 dentro del combinador 1; el subarreglo 3 se suma con el subarreglo 4 dentro del combinador 2, conformando el primer nivel de combinación. Después del primer nivel de combinación se generan dos señales independientes, cada una debido a la combinación de las dos unidades del lado este y del lado oeste, que a su vez se combinan para tener una sola señal por cada línea este-oeste, empleando el mismo circuito combinador, como el utilizado en el primer nivel de combinación. La señal que se obtiene del segundo combinador se redirige a un filtro RF pasa-banda (20 MHz) y posteriormente se introduce a un amplificador de bajo ruido en lo que constituye la segunda etapa de amplificación. El amplificador en esta etapa es igual al del primer nivel.

Las ondas de radio captadas por los 64 dipolos de cada línea, después de pasar por los dos niveles de combinación antes mencionados, forman una señal por cada línea, la cual pasa por un segundo nivel de amplificación con el objetivo de tener un nivel de potencia adecuado. Los sistemas de amplificación y combinación se encuentran ocultos en registros y tuberías sellados para evitar filtraciones de agua que dañan a los sistemas electrónicos. Estos registros y tuberías que contienen el cableado, permanecen subterráneos para dar estabilidad térmica y evitar una degradación rápida por exposición a la intemperie. Los registros se conectan a una trinchera central que recibe el cableado de los amplificadores distribuidos en la plataforma. Finalmente la señal de salida del segundo nivel de amplificación de cada línea es llevada por la trinchera hasta el cuarto de control por un cable coaxial donde alimenta a la matriz de Butler o el sistema de receptores.

### **3.2.5. Sistema de control de dirección de observación (matriz de Butler).**

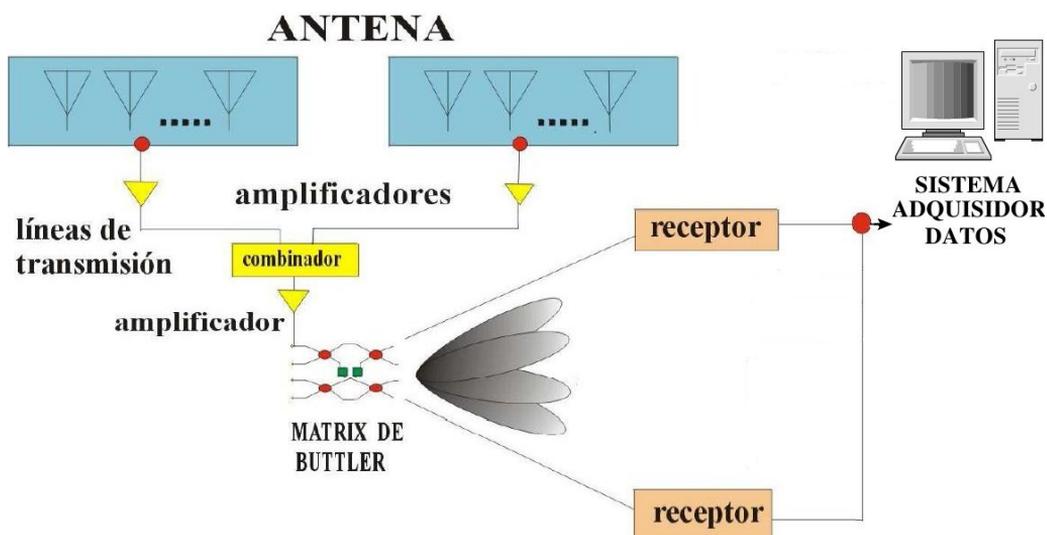
Debido a la gran superficie del arreglo, es imposible implementar un sistema de rotación mecánico de localización que dirija el haz de cada línea a cualquier punto en el cielo. Para poder direccionar la antena en dirección norte-sur se implementó un sistema de conmutación electrónica que puede formar múltiples haces (o lóbulos) a diferentes declinaciones llamado *matriz de Butler*. La matriz de Butler es un dispositivo formado por acopladores híbridos de 3 dB los cuales funcionan como dispositivos combinadores de fase de la señal recibida. La señal de cada línea se inyecta a la matriz de Butler, produciendo un abanico de haces en declinaciones diferentes. Este sistema de posicionamiento mantiene constante la apertura de la antena fija y se aprovecha la rotación de la Tierra, para hacer el barrido del cielo en ascensión recta (Andrade, 2000). Para más detalles sobre el funcionamiento y características de la matriz de Butler, consultar (Castillo, 2006; Carrillo-Vargas, 2007; Villanueva, 2009).

### 3.2.6. Receptores y sistema adquiredor.

A la salida de la matriz de Butler la señal es enviada a un sistema de receptores. La función de los receptores que se emplean en el radiotelescopio es detectar y medir la emisiones de radio de fuentes estelares. El nivel de potencia de la señal en el receptor de un radiotelescopio es usualmente muy pequeño (del orden de  $10^{-20} W$ ) (Carrillo-Vargas, 2007). La potencia de ruido ambiental es mucho más grande, así que una alta sensibilidad y estabilidad son requerimientos importantes para un receptor. El MEXART utiliza receptores de tipo superheterodino.

### 3.2.7. Resumen del MEXART

El Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario MEXART fue diseñado para operar en la frecuencia de  $139.65 MHz$  con un ancho de banda de  $1.5 MHz$ , valores establecidos de acuerdo a los estudios previos de centelleo interplanetario y la banda de frecuencia asignada por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT).



**Figura 3.7:** Esquema de bloques general del radiotelescopio MEXART conformado por un arreglo planar de 4096 dipolos (la antena), varios subsistemas conformados por filtros RF, amplificadores, combinadores con sus respectivos cables y sistemas de alimentación, la matriz de Butler, receptores el sistema adquiredor de datos.

El arreglo de antenas del radiotelescopio es un arreglo dipolar de gran área que cuenta con 4096 dipolos de onda completa ( $\lambda = 2.15 m$ ) distribuidos en 64 líneas de 64 dipolos; cada línea se divide en 4 secciones de 16 dipolos. Cada sección, o unidad básica del arreglo, consta de 16 dipolos alimentados en paralelo y polarizados en la dirección este-oeste. La señal de cada sección, previamente amplificada y filtrada, se suma vectorialmente en una configuración tipo árbol, lo cual permite obtener una señal por cada línea, esto es, 64 señales

independientes de toda la antena. La señal que llega proveniente de cada una de las líneas se conecta a la matriz de Butler (dispositivo para el direccionamiento de los lóbulos de la antena), misma que direcciona electrónicamente cada línea a una declinación determinada sobre el plano norte-sur, a continuación la señal se envía a un sistema de receptores. Finalmente, la señal de cada lóbulo es captada con un sistema de adquisición analógico-digital que toma la señal ya amplificada por el receptor, la digitaliza para ser visualizada y almacena en un servidor permitiendo monitorear las señales en tiempo real y almacenar los datos para su posterior análisis. La configuración general del radiotelescopio se ilustra en la figura 3.7 (Tomada de (Andrade, 2000)).

### 3.2.8. Patrón de radiación del MEXART y fuentes de radio

El patrón de radiación es una representación gráfica de la potencia de radiación de una antena en función de las coordenadas espaciales, típicamente se compone de un haz principal y una estructura de haces laterales. Al ser un instrumento de tránsito, el ancho del haz principal determina la duración del tránsito de las radiofuentes. En el caso de un solo dipolo, su patrón de radiación consiste en un haz muy extendido. Si se hace la suma en serie de los patrones de radiación de varios dipolos contiguos, el patrón total resulta con un haz con mayor potencia y ganancia en una cierta dirección. El MEXART, como se mencionó antes, esta compuesto de 64 líneas de 64 dipolos cada una polarizados en dirección este-oeste y cada línea genera un haz principal que apunta hacia el cenit (González-Esparza et al, 2006).

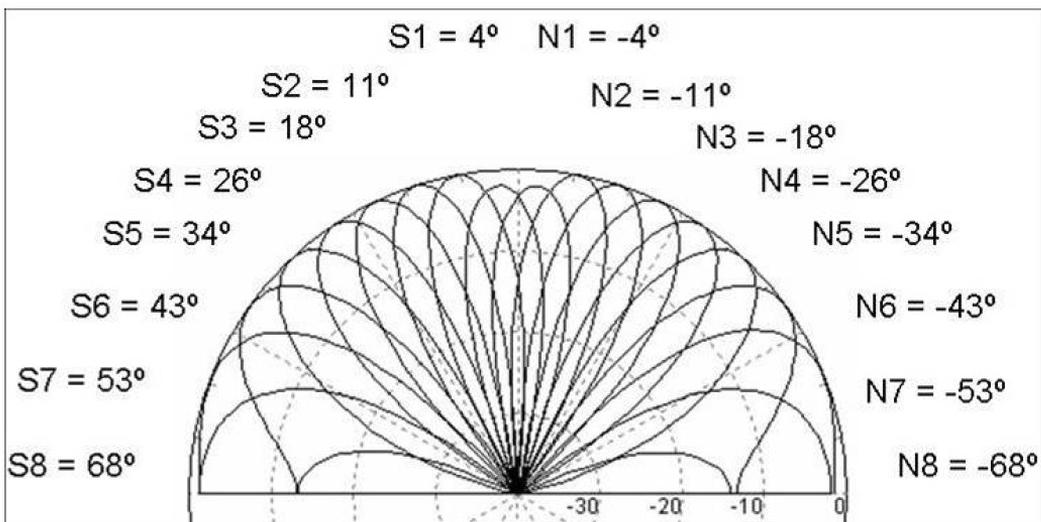


Figura 3.8: Abanico de haces que forman el patrón de radiación del MEXART.

En dirección este-oeste el ancho angular del haz principal es de 1°, por eso el tránsito de una fuente de radio que cruza una vez al día la línea norte-sur dura cerca de 4 minutos y el del Sol es de 8 minutos. En cambio, en dirección norte-sur el ancho angular del haz principal

es de  $120^\circ$  por lo que el rango de detección a la latitud del MEXART es desde  $-40^\circ$  hasta  $80^\circ$ . Para tener este abanico de haces que abarcan  $120^\circ$  en dirección norte-sur se emplea a la Matriz de Butler, que genera un patrón de radiación de 16 haces principales apuntando a 16 declinaciones diferentes del cielo. Los 16 lóbulos apuntan a  $\pm 4^\circ$ ,  $\pm 11^\circ$ ,  $\pm 18^\circ$ ,  $\pm 26^\circ$ ,  $\pm 34^\circ$ ,  $\pm 43^\circ$ ,  $\pm 53^\circ$  y  $\pm 68^\circ$  con respecto al cenit en dirección norte-sur (+ para el sur, - si apunta hacia el norte) (Villanueva, 2009). La figura (3.8) muestra un corte del plano norte-sur del patrón de radiación total de los 16 haces apuntando a distintas direcciones del cielo. Imagen tomada de (Villanueva, 2009). Los haces con letra *N* apuntan al norte y los que se etiquetan con *S* están dirigidos hacia el sur.

El hecho de tener un radiotelescopio que aprovecha la rotación de la Tierra para captar señales de radio cósmicas hace que solo cierta región del cielo sea observable. Dada la latitud a la que se encuentra el MEXART y la apertura de los haces que componen su patrón de radiación, hace que sea posible detectar un número limitado de fuentes de radio que se resumen en la siguiente tabla.

**Fuentes de radio detectadas por el MEXART**

Nombre de la fuente	Ascensión recta (hrs:min:seg)	Declinación (Grados)	Densidad de flujo (Jy)
3C48	1:37:41	33	58
3C84	3:19:48	41	21
3C123	4:37:04	29	206
3C144 (Crab Nebula)	5:34:32	22	1430
3C157	6:16:37	22	6
3C163	6:32:18	4	5
3C219	9:21:09	45	45
3C274 (Virgo)	12:30:50	12	1100
NGC 5128 (Centauro)	13:22:28	-42	800
3C298	14:19:09	6	61
3C348	16:51:08	5	350
3C405 (Cygnus A)	19:59:28	40	10500
3C410	20:20:06	29	
3C461 (Cassiopea)	23:23:28	58	12800

**Cuadro 3.1**

Los *Jy* son llamados *Jansky* y es la unidad de flujo espectral más común en radioastronomía. Esta definido como  $1 \text{ Jy} = 10^{-23} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$ .



## El centelleo ionosférico

---

LOS sistemas de comunicación satelital usan las bandas de frecuencias de transmisión VHF (30-300 MHz) y UHF (300-3000 MHz) para mitigar los efectos de la ionosfera. Es bien sabido que la absorción de ondas de radio es inversamente proporcional a la frecuencia y el fading se vuelve importante para ondas con periodos de unos segundos, por ello el uso de frecuencias muy altas (con longitudes de onda de microondas o menores) minimizan el impacto de los dos fenómenos mencionados. Sin embargo, estos sistemas no son totalmente inmunes a la ionosfera. El principal efecto ionosférico que sufren los sistemas satelitales es el *centelleo ionosférico* o *IONS*. Las fluctuaciones que las irregularidades ionosféricas imponen en las señales que pasan a través de la ionosfera son referidos como *centelleo* de la señal en el contexto de la radio propagación de ondas por la atmósfera por analogía con el *tintileo* de la luz de las estrellas por las noches. El centelleo es una rápida (usualmente aleatoria) variación en la amplitud y fase de una señal resultado de abruptas variaciones en la densidad electrónica a lo largo de la trayectoria de la señal. Si bien es cierto que las variaciones sobre toda la trayectoria contribuyen al centelleo de una señal, las variaciones más significativas ocurren cerca del valor máximo de densidad de la capa  $F_2$ , entre 225 y 400 km de altura.

Los primeros estudios de IONS se remontan a finales de la década de 1940 usando como transmisores a fuentes de radio cósmicas. En los años posteriores a la segunda guerra mundial se hizo uso de las grandes antenas y receptores desarrollados en tiempos de guerra para uso de radares militares con fines científicos, lo que trajo importantes avances sobre todo en el área de la radioastronomía. En 1946 Hey, Parsons y Phillips (Hey et al., 1946) reportaron que la fuente de radio Cygnus A presentaba fluctuaciones en intensidad observandola a 64 MHz. Para conocer la naturaleza de esta variación se llevaron a cabo mediciones detalladas con varias antenas separadas unos cuantos kilómetros entre si (Smith et al., 1950). Como las fluctuaciones eran ligeramente diferentes de un receptor a otro se descartó la posibilidad de que éstas fueran de la fuente misma, tenía que ser otro mecanismo lo que las ocasionaba. Dos posibles fenómenos para explicarlo se discuten en (Ryle y Hewish, 1950). El primero de ellos es difracción por material interestelar pero fue descartada por tratarse de periodos cortos de oscilación. Se concluyó entonces que las fluctuaciones eran producto de difracción debida a irregularidades en la ionosfera terrestre. Con la llegada de transmisiones satelitales

años después fue posible hacer estudios de la ionosfera sobre todo el planeta usando satélites como fuentes de radio puntuales a alturas desde 500 *km* hasta varios radios terrestres.

Uno de los objetivos importantes del estudio del clima espacial es entender la estructura y formación de las irregularidades en la densidad del plasma ionosférico que causa centelleo de ondas de radio en enlaces de comunicación satelital transionosféricos. En particular, el U. S. National Space Weather Program (Wernik et al., 2003) especifica que uno de los problemas prioritarios a resolver en el ámbito del clima espacial es:

- Las interacciones termosfera-ionosfera-magnetosfera que controlan la formación y evolución de irregularidades en la densidad electrónica que causan centelleo en longitudes de onda métricas y kilométricas.
- La relación entre esas irregularidades y los efectos del centelleo en sistemas de comunicación.

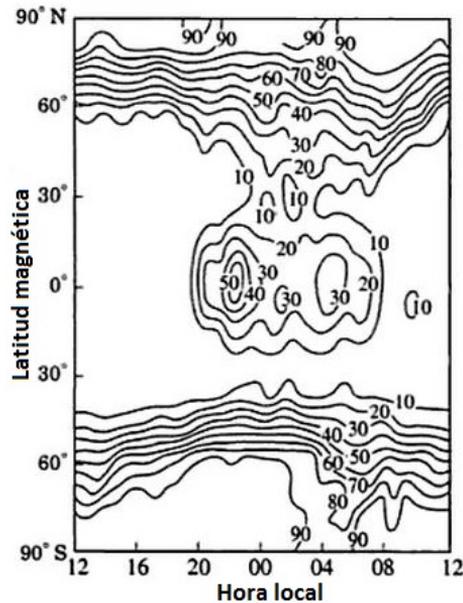
La importancia del estudio del centelleo ionosférico viene del impacto significativo que tiene en la comunicación satelital. Por ejemplo, la distorsión de una señal causada por centelleo puede crear problemas en el funcionamiento de sistemas de navegación y generar errores en la señal recibida. Aunque la morfología global del centelleo es bien conocida, hay ciertos parámetros que deben ser estudiados con más detalle, en especial aquellos relacionados con fenómenos esporádicos como los producidos por la actividad solar. El centelleo es probablemente el factor perjudicial más importante que afecta a los sistemas de comunicación satelital en VHF y UHF.

### **4.1. Irregularidades ionosféricas y centelleo ionosférico**

Desde hace tiempo se ha investigado como la ionosfera afecta la propagación de ondas de radio cuando hay cambios graduales y significativos en su densidad electrónica, sobre todo en dirección horizontal. En la ionosfera se observan estructuras irregulares con escalas de tamaño de metros hasta kilómetros. Cuando tienen lugar esas irregularidades, las ondas de radio son difractadas y dispersadas, causando desviaciones en intensidad y fase fuera de lo que se consideraría como características de propagación normal. En general, estructuras irregulares en la ionosfera incluyen fluctuaciones de densidad electrónica en diferentes escalas, mismas que tienden a extenderse a lo largo de las líneas de campo magnético, causando que ondas de radio que inciden perpendiculares a las líneas de campo son dispersadas muy eficientemente porque se encuentran con diferentes densidades de plasma a lo largo de su trayectoria.

### 4.1.1. Ensanchamiento $F$ y el centelleo

La frecuencia de ocurrencia del spread o ensanchamiento  $F$  con observaciones hechas por ionosondas es una consideración importante para predecir centelleo de señales de satélites y fuentes de radio cósmicas. Se sabe que el spread  $F$  varía con la localización y la hora local pero es difícil tener una imagen completa de la ionosfera en un instante por el limitado número de estaciones en tierra con que se cuentan para sondearla constantemente. Sin embargo con uso de satélites se ha hecho un mapa de ocurrencia del ensanchamiento  $F$  como función de la latitud magnética y hora local (Ver figura 4.1, tomada de (Tanadori, 2001)).



**Figura 4.1:** Mapa de intensidad del spread  $F$  como función de la latitud magnética y de la hora local.

Los valores más grandes representan las regiones donde se presenta más comunmente el ensanchamiento  $F$ . A bajas latitudes es un fenómeno típicamente nocturno debido a burbujas de plasma generadas por la inestabilidad de Rayleigh-Taylor (Makela, 2006; Liu y Franke, 1986), discutida brevemente en el capítulo 1. A latitudes altas en cambio el ensanchamiento  $F$  es un fenómeno sin dependencia diurna.

Cuando tiene lugar el ensanchamiento  $F$ , en ocasiones son observadas variaciones en las señales de ondas de radio que atraviesan la ionosfera, claramente tratandose de IONS. La mayor parte de la información acerca de las irregularidades en la región  $F$  ha sido obtenida por propagación transionosférica donde la fuente, ya sea satélite artificial o fuente de radio cósmica, esta por encima de la ionosfera. Una vasta cantidad de información ha sido reunida acerca del centelleo porque las fluctuaciones de señales de radio es un efecto adverso común en sistemas de comunicación satelital en diferentes frecuencias. La relación que existe entre

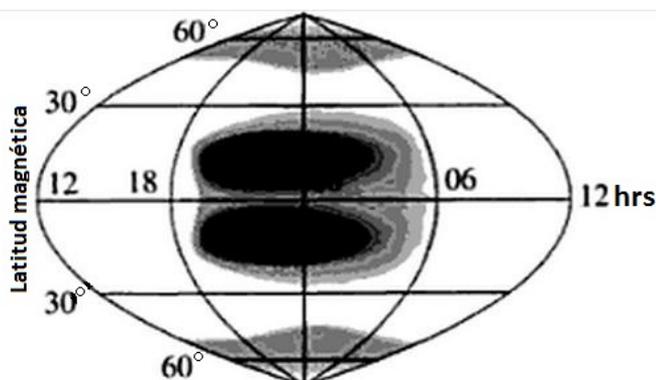
la ocurrencia de irregularidades ionosféricas y el centelleo, así como sus características generales han sido examinadas por (Aarons, 1982; 1997; Crane, 1976; Lawrence et al., 1964; Liu y Franke, 1986; Yeh y Liu., 1982).

El centelleo ionosférico tiene una marcada dependencia con la latitud magnética, clasificando a la ionosfera en 3 regiones geográficas. La región entre el ecuador magnético y  $\pm 20^\circ$  de latitud se le conoce como *ionosfera de bajas latitudes* o *ionosfera ecuatorial*; entre  $20^\circ$  y  $60^\circ$  se le llama *ionosfera de latitudes medias* y la *ionosfera de altas latitudes* comprende desde  $60^\circ$  hasta las regiones polares. Aunque mucha de la información acerca de las irregularidades ha sido obtenida por estudios de las variaciones de amplitud y fase de ondas de radio recibidas en tierra, información adicional ha sido obtenida por otros medios. En latitudes medias, centelleo en la región  $F$  tiende a ocurrir por causa de regiones densas a mayores alturas (por encima incluso de  $500\text{ km}$ ). Estas zonas de densidad electrónica anomalas han sido identificadas con el fenómeno de ensanchamiento  $F$ .

En la zona ecuatorial, a  $20^\circ$  de latitud alrededor del ecuador, el centelleo es máximo por la noche. El fading, una vez que inicia, se prolonga por varias horas y es profundo (hasta en un factor de 2 en amplitud entre máximo y mínimo). Además es lento, con frecuencia de 1 a 10 oscilaciones por minuto. Mediciones con ionosondas y satélites muestran que este centelleo es por irregularidades de tamaño entre 100 y 400  $m$  que se mueven en dirección este-oeste con marcada orientación a lo largo de las líneas de campo magnético. Diversos trabajos sugieren que el centelleo en la ionosfera ecuatorial esta claramente relacionado con la ocurrencia de ensanchamiento  $F$  (Aarons, 1982; Basu y Basu, 1981; Koster, 1972), la cual resulta del alineamiento de la densidad de electrones con el campo magnético. Esta distribución de densidad electrónica a lo largo de las líneas de campo significa que, en una pequeña región horizontal, pueden existir distintas concentraciones de electrones a varias alturas.

El centelleo en la zona polar, por el contrario, no tiene marcada dependencia diurna como el centelleo ecuatorial, pero si son oscilaciones más rápidas (con periodos de 1 a 3 segundos en fading intenso). Cuando centelleo es observado a altas latitudes usando transmisiones de satélites geoestacionarios, parece más severo por la trayectoria oblicua que sigue la señal a través de la ionosfera. Las características generales del centelleo en latitudes altas pueden consultarse en (Aarons et al., 1981; 1988; Basu, 1985; Tsunoda, 1988).

La zona de mayor intensidad es la ionosfera ecuatorial en horas siguientes a la puesta de Sol, persiste hasta media noche y luego decrece. La zona menos expuesta a centelleo son latitudes medias. A latitudes altas el centelleo no tiene dependencia diurna y es menos intenso que en regiones ecuatoriales. En la figura 4.2 (tomada de (Tanadori, 2001)) se observa un mapa de la intensidad del IONS en función de la latitud magnética y la hora local. Las regiones más oscuras son las de centelleo más intenso, las cuales corresponden a las horas posteriores al atardecer hasta después de media noche a latitudes alrededor del ecuador.



**Figura 4.2:** Mapa de intensidad del IONS como función de la latitud magnética y de la hora local.

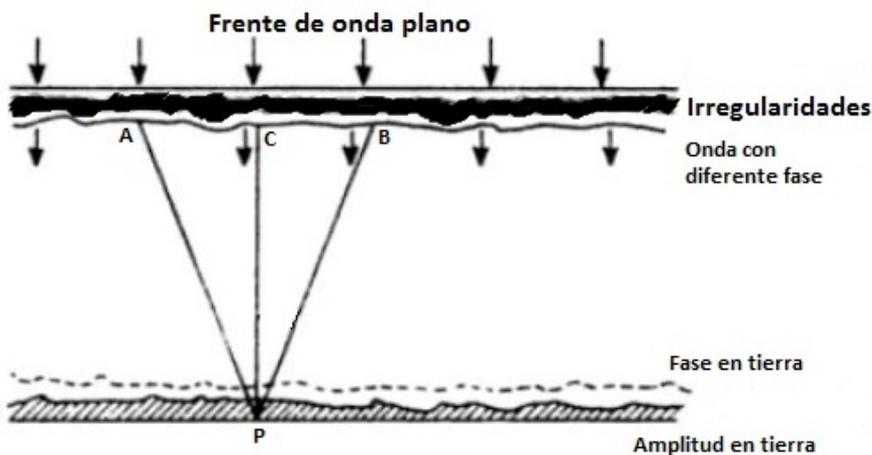
La similitud que exhibe este gráfico y el mapa de la figura 4.1 es un claro indicio de que el centelleo y el ensanchamiento  $F$  tienen una causa común. Además hay evidencia en sondeos de ionosondas de que las irregularidades ionosféricas que causan el ensanchamiento  $F$  están alineadas con el campo magnético, lo cual refuerza la idea de la relación que tiene este fenómeno con el IONS.

Las causas físicas de las irregularidades son todavía discutidas, aunque se conjetura que el electrojet ecuatorial es la fuente de las irregularidades en latitudes bajas y la precipitación de partículas energéticas lo es en la ionosfera auroral. Teorías han demostrado que mecanismos, basados en las diferencia de velocidades de iones y electrones en presencia de campos eléctricos pueden reforzar cualquier gradiente presente que cause importantes regiones de distinta densidad electrónica.

#### 4.1.2. Modelo de centelleo

Como hemos visto, la ionosfera no es estrictamente uniforme, esta estratificada horizontalmente y contiene irregularidades de muchos tamaños. Mucha de la información disponible acerca de las irregularidades ionosféricas ha sido obtenida estudiando el *fading* que presentan ondas de radio que se reflejan o propagan a través de las diferentes capas de la ionosfera. El estudio de los efectos de esas irregularidades en la propagación de ondas de radio debe ser tratado con teoría de difracción. 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. De acuerdo al principio de Huygens, cada punto de un frente de onda puede ser considerado como una fuente de ondas esféricas secundarias, de tal manera que el frente de onda en un tiempo posterior será la envolvente de estas ondas secundarias. En teoría de difracción, uno aplica este principio para determinar como es afectada la amplitud y fase de una onda que se propaga por un medio con irregularidades.

El caso más simple a tratar es el de una rejilla de difracción de ancho despreciable que solo cambia la fase de una onda incidente al pasar a través de ella. En este modelo las irregularidades de la rejilla o pantalla difractora introduce pequeñas perturbaciones de fase a lo largo del frente de onda. Se supone además que la fuente esta en infinito, las irregularidades son del mismo orden que la longitud de onda ( $\lambda$ ) y se desprecian efectos de absorción del medio. La onda incidente es plana (puesto que la fuente esta en infinito) pero el frente de onda que emerge de la pantalla difractora es irregular, como se muestra en la figura 4.3, tomada de (Hargreaves, 1993).



**Figura 4.3:** Esquema que muestra como la señal de la fuente de radio cósmica o satélite artificial que se propaga a lo largo de la ionosfera es afectada por estructuras de diferente densidad electrónica.

El frente de onda irregular se propaga hasta llegar al receptor en tierra pero como distintos puntos de la onda tienen diferente fase, se genera un patrón de interferencia. Es decir, si nuestro receptor está en el punto P, del frente de onda irregular a los puntos A, B y C les toma el mismo tiempo llegar al receptor pero los 3 tienen diferente fase, por lo que la amplitud de la señal recibida tendrá interferencia constructiva y destructiva. Note que las fases de las señales que pasan a través de un área con densidad de electrones alta serán distintas a aquellas que pasaron por una región electrónica menos densa. En otras palabras, la velocidad de fase ( $v_p = c/\mu$ ) incrementa en presencia de electrones, por lo que el cambio del ancho del plano fase varía como (haciendo uso de la ecuación 2.8):

$$\Delta l = \int (\mu - 1) ds = -\frac{e^2}{8\pi^2 m_e \epsilon_0 f^2} \int n_e ds \quad (4.1)$$

Entonces, el cambio de fase está dado como:

$$\delta = \frac{-2\pi\Delta l}{\lambda} = \frac{-2\pi\Delta l f}{c} = -\frac{e^2}{4\pi m_e \epsilon_0 f} \int n_e ds [\text{rad}] \quad (4.2)$$

donde  $\int n_e ds$  es conocido como TEC (o contenido total de electrones). El TEC es la densidad de electrones integrada sobre toda la trayectoria de la onda. Los cambios de fase que ocurren en ondas de radio que pasan a través de irregularidades son proporcionales al TEC e inversamente proporcionales a la frecuencia de la onda. Esto quiere decir que a frecuencias altas ( $GHz$ ) el centelleo es más débil que a frecuencias bajas ( $MHz$ ). Es importante notar la señal emergente de la ionosfera irregular presenta variación sólo en fase, la amplitud permanece constante.

Hay que tener en cuenta que las irregularidades se mueven horizontalmente, por lo que la señal que capta el receptor no es constante, varía con el tiempo. Esta variación es la que se conoce como centelleo de la onda de radio (Davies, 1965). En otras palabras, fluctuaciones espaciales en la densidad de electrones se traducen en variaciones temporales de la señal (es decir, la señal centellea).

El tamaño angular de la fuente es también una condición importante para tener centelleo. Es bien conocido que las estrellas que se ven a simple vista *tintilan* de noche pero la luz proveniente de los planetas no presenta este efecto. Esto se debe a que las variaciones que presentan diferentes partes del disco planetario no están relacionados ópticamente y tienden a cancelarse los efectos de centelleo presentes. Lo mismo sucede con las ondas de radio. Consideraciones simples nos dan la condición de que el diámetro angular de la fuente de radio ( $\alpha$ ) debe cumplir la desigualdad  $\alpha = d_0/D$  siendo  $d_0$  el tamaño típico de las irregularidades ionosféricas y  $D$  la distancia entre la región de difracción y el observador, estando la fuente en infinito (Hargreaves, 1993). Si no se cumple esta condición, el frente de onda ilumina coherentemente la rejilla de difracción y no se tienen efectos de centelleo por las variaciones de la ionosfera. La distancia entre la rejilla de difracción y el observador es significativa porque la región efectiva para que se tengan efectos de difracción depende tanto de la distancia mencionada como de la longitud de onda. La condición a cumplir es (Hargreaves, 1993):

$$\left(\frac{\lambda D}{2}\right)^{\frac{1}{2}} > \pi d_0 \quad (4.3)$$

Esto nos dice que la señal recibida del frente de onda emergente con fluctuaciones tendrá perturbaciones tanto en fase como en amplitud si el observador está lo suficientemente lejos de la zona mínima de difracción (zona de Fresnel), que es la que contiene irregularidades importantes de tamaño típico  $d_0$ .

El centelleo tiene una gran influencia del clima espacial. En años de actividad solar máxima, la propagación transionosférica a través de regiones polares y ecuatoriales experimenta intensas variaciones a frecuencias entre  $100 MHz$  y  $4 GHz$  (Tanadori, 2001) debido a la alta ocurrencia de tormentas geomagnéticas. Las características del centelleo pueden distorsionarse por la influencia de tormentas geomagnéticas, mismas que, en ciertas circunstancias,

intensifican y prolongan el centelleo en todas las latitudes aunque el fenómeno físico que lo ocasiona es distinto en los 3 regímenes latitudinales. Por ejemplo, a latitudes medias, el centelleo es un problema relativamente débil. Sin embargo, en presencia de fuertes tormentas geomagnéticas se observa intenso IONS que afectan las señales de radio incluso en  $GHZ$ . Aunque los mecanismos que generan esos intensos centelleos no son totalmente entendidos aún, se cree que son provocados por variaciones anómalas del campo eléctrico que acompaña a las tormentas geomagnéticas (Tanadori, 2001).

### 4.1.3. Observaciones de centelleo ionosférico con el MEXART

Las fuentes de radio cósmicas y los satélites artificiales que orbitan nuestro planeta funcionan como emisores de ondas de radio en VHF y UHF que se propagan a través de la ionosfera, convirtiéndose en los mecanismos disponibles y propensos a presentar centelleo ionosférico. El radiotelescopio MEXART, aunque construido con el objetivo único de estudiar el centelleo interplanetario usando sólo fuentes de radio cósmicas, no está exento de efectos ionosféricos en la señal captada, así como de las interferencias que representan el tránsito de satélites artificiales. Para propósitos del MEXART, las perturbaciones ionosféricas que se observan en las fuentes de radio y las señales de satélites que son captadas por ser emitidas a frecuencia cercana a la frecuencia central del MEXART, son una forma de ruido, es decir, son efectos que no deberían de observarse pero que sin embargo están presentes.

Las observaciones de centelleo ionosférico son anteriores a las de centelleo interplanetario, por lo que los pioneros en el estudio de CIP estaban al tanto del papel que juega la ionosfera en las frecuencias usadas para dichos estudios. Por ejemplo, (Hewish et al., 1964) propusieron el concepto de CIP al analizar las oscilaciones que presentaban fuentes de radio cósmicas y descartar que el origen de ellas era la ionosfera. Por eso, los observatorios actuales de CIP (como Ooty y STEL) fueron construidos en lugares y con frecuencias de operación tales que el efecto de la ionosfera es mínimo. Recordemos que dos factores importantes en la ocurrencia del centelleo es la latitud magnética y la frecuencia de observación. Latitudes medias (por encima de  $20^\circ$  y menores a  $60^\circ$  de latitud) son las regiones geográficas menos propensas a ser afectadas por IONS. En cuanto a la frecuencia se refiere, la ecuación (4.2) nos dice que el cambio de fase, y por tanto la intensidad del centelleo, es inversamente proporcional a la frecuencia de observación  $f$ , es decir, mientras mayor sea la frecuencia a la que opera un radiotelescopio de CIP, menor será el efecto de la ionosfera en la onda recibida.

### 4.1.4. Observaciones de satélites polares con el MEXART

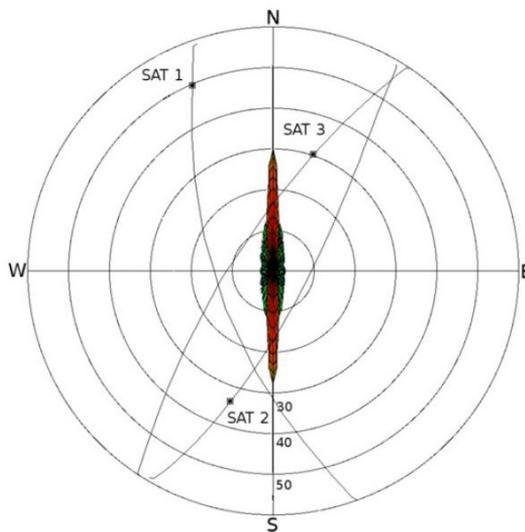
Satélites artificiales con órbitas polares emiten ondas de radio en frecuencias cercanas a  $139.65 MHz$  y por ende son detectados por el MEXART. De acuerdo a (Carrillo-Vargas et al., 2012) los satélites cuya señal es captada por el MEXART tienen órbitas polares (es decir, que su trayectoria estacionaria alrededor del planeta pasa cerca de los polos norte y sur

geográficos) con periodos entre 90 y 100 minutos, orbitan a alturas entre 6 000 *km* y 7 000 *km* y sus frecuencias de emisión son alrededor de 137 y 145 *MHz*. Estas características de los satélites provocan diferencias entre el centelleo observado en fuentes de radio y satélites, las cuales describiremos brevemente a continuación:

1. La señal que emiten los satélites esta perfectamente calibrada en frecuencia y fase. Como el único obstáculo que encuentra en su camino es la ionosfera, cualquier variación en la señal recibida en frecuencia y amplitud se asocia con cambios en la ionosfera.
2. La señal tiene un ancho de banda muy pequeño y es de gran potencia, por eso en el MEXART se observan con amplitud mayor que las fuentes, en ocasiones incluso saturan el registro de datos.
3. A diferencia de las fuentes, sus tiempos de tránsito son muy cortos. Mientras que para las fuentes este tiempo de aproximadamente 4 minutos, los satélites, al moverse más rápido a través del cielo, tienen tiempos de tránsito entre 10 y 40 segundos, dependiendo de su trayectoria. En la figura 4.4 se presentan ejemplos de las posibles trayectorias que siguen los satélites al pasar por el patrón de radiación del MEXART proyectadas en el plano horizontal (Imagen tomada de (Carrillo-Vargas et al., 2012)). Note que entre más cerca pasen por el cenit del MEXART con trayectorias no muy desviadas de la línea norte-sur, mayor será el tiempo de detección de la señal del satélite.
4. Se desconoce exactamente que satélites son detectados. Si se conoce el satélite se puede calcular su trayectoria con ayuda de software y de este modo anticipar su tránsito por el MEXART aunque la mayor parte de los satélites detectados tienen trayectorias desconocidas.
5. Las características de un satélite polar en movimiento relativo con respecto a la ionosfera, funcionando como fuente puntual de radio, difieren de la de una fuente de radio cósmica, por eso no se espera ver patrones de centelleo similares en ambos casos.

## 4.2. Análisis de datos y discusión

Para conocer el impacto que tiene la ionosfera en los registros del MEXART se hizo primero que nada una búsqueda de satélites en la base de datos del año 2012. Como se mencionó antes, no se tiene conocimiento previo de cuando va a ser detectado un satélite así que se revisaron todos los archivos de cada mes del 2012 a fin de crear una base de datos confiable de tránsitos satelitales. Hay que aclarar aquí que hay dos tipos de satelites detectados: pulsados y continuos. Los satélites pulsados, además de emitir una onda continua, emiten un pulso periódico sobre la señal base, lo cual interfiere con el análisis de centelleo y por ende todos los satélites pulsados no se incluyeron en la base de datos. De los satélites con señal continua, se ignoraron todos aquellos con amplitud muy baja (del orden de la desviación



**Figura 4.4:** Ejemplo de 3 trayectorias de satélites sobre el patrón de radiación del MEXART.

estandar del ruido de fondo) o con tiempos de tránsito menor a 10 segundos. De todos los satélites continuos se seleccionaron sólo aquellos que mostraran una marcada oscilación. En la figura (4.5) se muestran los registros típicos de un satélite continuo sin perturbacion (de la izquierda) y otro con claro centelleo ionosférico (de la derecha). La base de datos final consta de 53 satélites polares con centelleo. Se obtuvieron los parámetros básicos de cada satélite como fecha y hora del registro, amplitud, la desviación estándar del ruido antes y después del tránsito del satélite (llamaremos a esta cantidad  $RMS_{off-satellite}$ ), la relación señal a ruido ( $S/N$ ) y tiempo de tránsito, para lo cual se uso software para gráficar los datos como *Gnuplot*<sup>1</sup>, *Grace*<sup>2</sup> y software de análisis estadístico como *Origin*<sup>3</sup>.

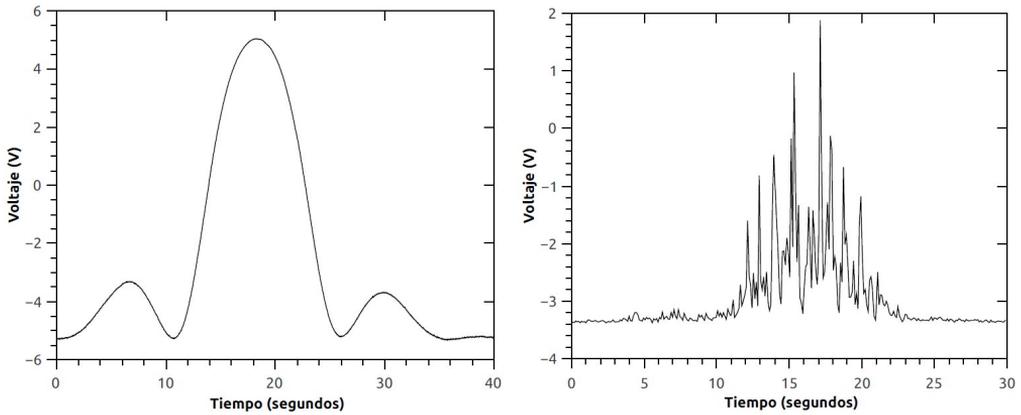
El procedimiento para extraer la información requerida es el siguiente. Como primer paso se aplicó un ajuste Gaussiano a cada satélite, entonces se removió la tendencia del satélite restando el ajuste a la serie de datos, generando así un nuevo conjunto de datos. En la figura 4.6 se muestra la serie de datos del satélite con centelleo de la figura 4.5 pero sin tendencia.

De esta serie de datos se obtiene la desviación estandar de la oscilación. Observe que el resultado final es la oscilación que presenta el satélite alrededor del valor de voltaje igual a cero. A esta cantidad la llamamos  $RMS_{on-satellite}$  y representa la variación de la señal con centelleo alrededor de la media. Una vez generado el nuevo conjunto de datos procedemos a obtener el espectro de potencia asociado a la oscilación. Haciendo uso de programas y

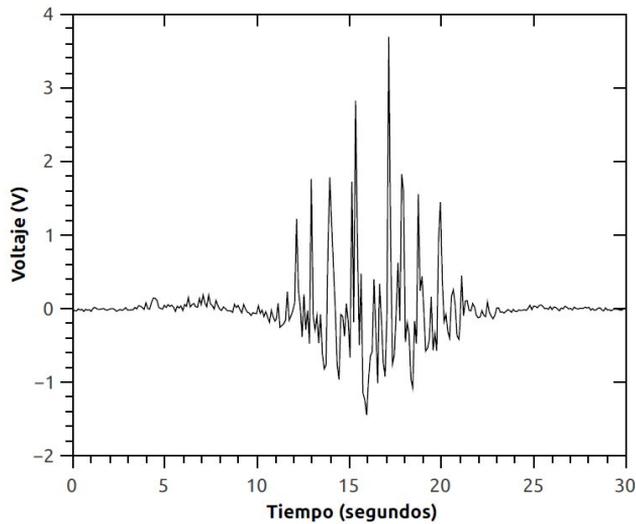
<sup>1</sup>[www.gnuplot.info/](http://www.gnuplot.info/).

<sup>2</sup>[plasma-gate.weizmann.ac.il/Grace/](http://plasma-gate.weizmann.ac.il/Grace/).

<sup>3</sup>[www.originlab.com/](http://www.originlab.com/).



**Figura 4.5:** Señales de un satélite continuo (izquierda) no perturbado y un satélite con centelleo ionosférico (derecha).

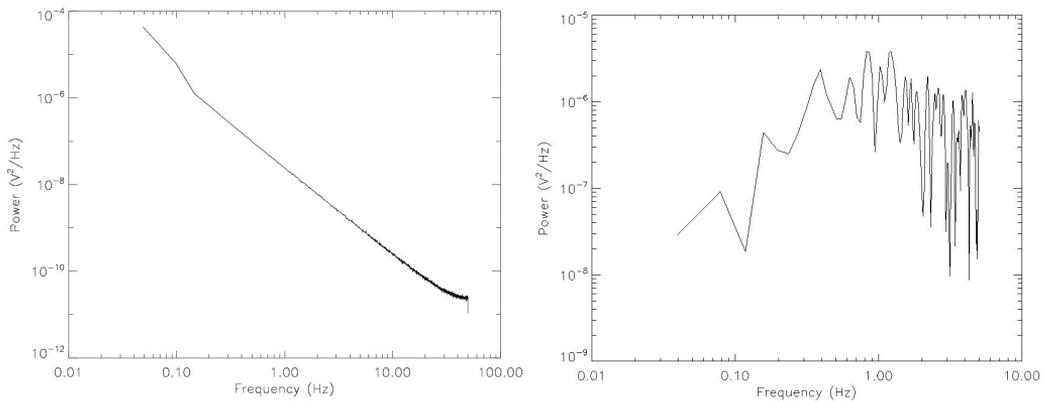


**Figura 4.6:** Serie de datos del satélite perturbado sin tendencia.

subrutinas en ambiente de programación IDL <sup>4</sup> desarrolladas por Gilberto A. Casillas P. (Casillas-Pérez, 2012) se obtiene, a partir de la serie de datos sin tendencia, el espectro de potencia de la fluctuación del satélite. La figura 4.7 muestra los espectros de potencia de los satélites de la figura 4.5. La gráfica de la izquierda esta asociada al satélite sin perturbación mientras que la gráfica de la derecha es la correspondiente al satélite con intenso centelleo.

Con el fin de obtener el comportamiento de las fluctuaciones de cada satélite se uso la herramienta matemática conocida como Transformada rápida de Fourier (o FFT por sus si-

<sup>4</sup>[www.itvis.com/](http://www.itvis.com/).



**Figura 4.7:** Espectros de potencia del satélite sin perturbación ionosférica (izquierda) y satélite con centelleo (derecha).

glas en inglés). La presencia y características del IONS fueron cuantificados por el análisis de series de tiempo obteniendo el espectro de potencia de cada satélite. Al aplicar FFT a los datos sin tendencia estamos pasando del espacio voltaje-tiempo al de potencia-frecuencia. El espectro de potencia de las fluctuaciones en la amplitud de la fuente de radio es importante para entender los mecanismos físicos de la formación y evolución de las irregularidades. Note que para el satélite sin perturbación, el espectro sigue una ley de potencia  $f^{-n}$  en la región de altas frecuencias (Fremouw et al., 1980). En cambio, en casos de centelleo moderado e intenso, la zona de bajas frecuencias sigue una distribución gaussiana más que una ley de potencia (Wernik et al., 2003). Esto puede verse en los espectros de la figura 4.7.

Para el análisis de todos los satélites con centelleo se tomó la frecuencia a máxima potencia del espectro como el valor de frecuencia de oscilación asociada a la ionosfera; las frecuencias de menor potencia, que en algunos casos son armónicos de la frecuencia principal, fueron ignoradas. Finalmente, con los valores de  $RMS_{off-satelite}$  y  $RMS_{on-satelite}$ , definimos un índice de centelleo ionosférico ( $I_{IONS}$ ) como:

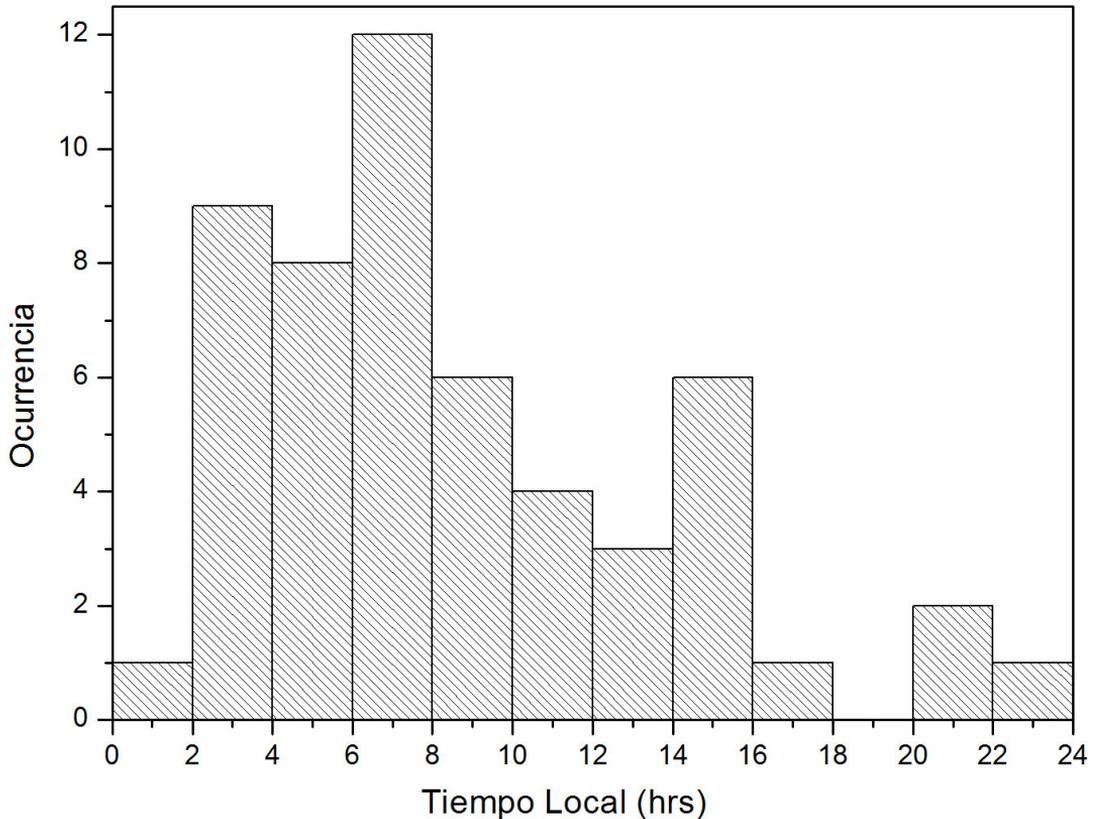
$$I_{IONS} = \frac{RMS_{on-satelite}}{RMS_{off-satelite}} \quad (4.4)$$

Los parámetros de frecuencia de centelleo  $F$  e índice  $I_{IONS}$  son cantidades importantes que usamos para el análisis cualitativo del centelleo. Además la fecha y hora de ocurrencia del centelleo son factores a considerar al momento de analizar el IONS.

#### 4.2.1. Comportamiento diurno del centelleo

En la figura 4.8 se muestra un histograma de ocurrencia de tránsitos satelitales en función de la hora local del MEXART. De los 53 satélites polares con marcada oscilación, 33 ocurrieron en las horas siguientes a la puesta de Sol hasta el amanecer mientras que el número

de satélites con centelleo en el día es de 20. Del histograma se nota que el periodo de la noche de mayor detección de centelleo es de 2:00 a 8:00 hrs con un máximo entre las 6:00 y 8:00 hrs.



**Figura 4.8:** Histograma de ocurrencia de centelleo como función de la hora local.

De la figura 4.2 se puede apreciar que el centelleo en regiones cercanas en latitud al ecuador es máximo después del atardecer y disminuye su intensidad después de media noche. Sin embargo, el tiempo de decaimiento en intensidad de centelleo varía con la frecuencia. Frecuencias de pocos  $GHz$  decaen después de media noche pero a frecuencias más bajas que  $250 MHz$  (que es nuestro caso) el centelleo se prolonga por varias horas después de medianoche (Basu et al., 2002), hecho que explica porque hay un máximo de ocurrencia en la hora cercana al amanecer.

Se distingue otro máximo de ocurrencia entre 14:00 y 16:00 hrs porque después de que el Sol pasa sobre el cenit, la ionosfera alcanza su máxima tasa de fotoionización. Hay que decir que existen otros factores que no hemos tomado en cuenta. Como se explicó en las secciones 2.3.1 y 2.3.2, hay variaciones tanto regulares como irregulares que no hemos toma-

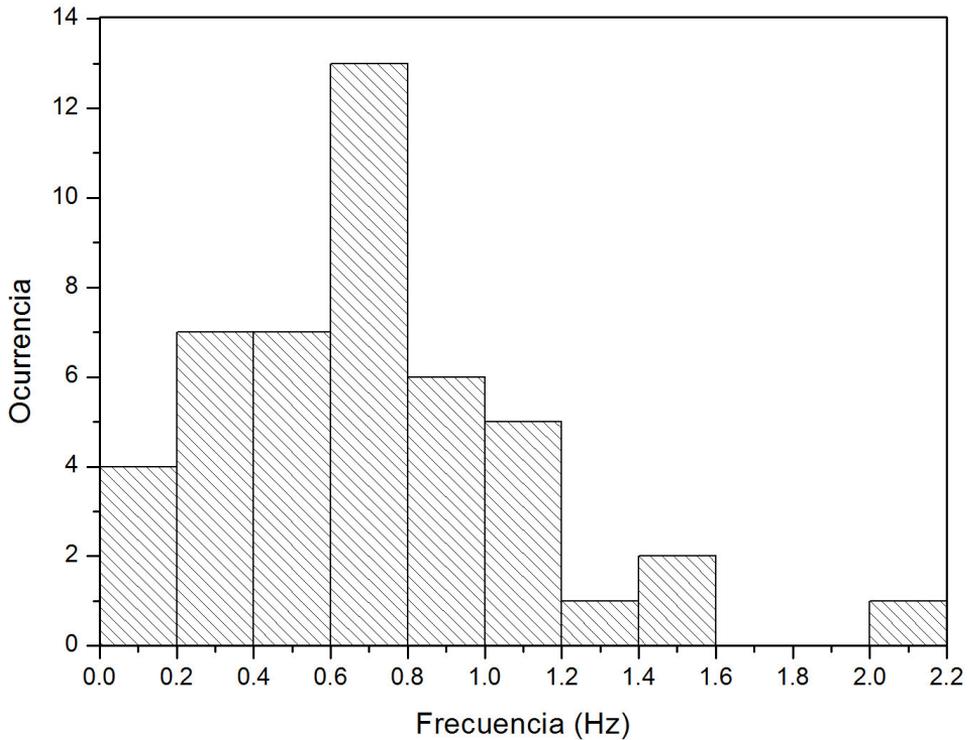
do en cuenta en este análisis. Las variaciones estacionales no se han tomado en cuenta para hacer este análisis. El centelleo tiene, además de una clara dependencia latitudinal y diurna, dependencia estacional y longitudinal. (Basu et al., 2002; Tanadori, 2001) muestran que el fenómeno de ensanchamiento  $F$  (y por ende el centelleo), ocurre estacionalmente a ciertas longitudes. Por ejemplo, en longitudes del océano Atlántico ocurren predominantemente en el hemisferio norte en meses de invierno, contrario a longitudes del Pacífico norte, aquí ocurren sobre todo en verano; mientras que en la India y Japón se detectan éstos dos fenómenos sobre todo en primavera y otoño. Debido a que no hay estudios de esta naturaleza en la ubicación geográfica del MEXART, no se toman en cuenta los posibles efectos estacionales en los datos.

Tampoco se han discriminado los datos correspondientes a fechas de actividad solar (en particular, fechas en que hay tormentas geomagnéticas), ese análisis se describirá más adelante. Por último, hay que tener en cuenta que el centelleo detectado solo nos da información del estado de la ionosfera en la región del cielo cerca del cenit por la configuración del patrón de radiación del MEXART y no se puede conocer el panorama global de las irregularidades en la ionosfera a partir de estos datos.

### 4.2.2. Frecuencia de centelleo ionosférico

El periodo del fading que caracteriza al centelleo ionosférico está directamente relacionada con la frecuencia de observación. (Lawrence et al., 1965; Crane, 1975; Hargreaves, 1993; Aarons, 1997) reportan que el periodo de oscilación típico de centelleo está acotado entre 10 y 1 segundos (dependiendo de la frecuencia de observación). Las ondas de radio del orden de pocos  $GHz$  (como las de los GPS) que atraviesan la ionosfera presentan ocasionalmente IONS cercano a  $0.1 Hz$  mientras que para ondas de radio cercanas a  $150 MHz$  el centelleo es más intenso, llegando a frecuencias superiores a  $1 Hz$ . La figura 4.9 muestra el histograma de distribución de frecuencia de oscilación del centelleo ionosférico detectado en las señales de satélites.

Se distingue un máximo de ocurrencia a frecuencia entre  $0.6$  y  $0.8 Hz$  aunque entre  $0.2$  y  $1.2 Hz$  se encuentra el  $82.6 \%$  de los casos de centelleo, que corresponde a periodos de  $5$  y  $0.83$  segundos respectivamente, lo cual es consistente con los valores típicos reportados. Comparando con otros trabajos de centelleo similares, tenemos que (Wernik et al., 2003) reporta valores de frecuencia (asociado con centelleo ionosférico intenso) de aproximadamente  $1 Hz$  mientras que (Carrillo-Vargas et al., 2012) reporta valores de  $1.323 Hz$ ,  $0.735 Hz$  y  $2.158 Hz$  para tres satélites detectados por el MEXART con centelleo ionosférico durante una tormenta geomagnética en el mes de diciembre del 2006.



**Figura 4.9:** Histograma de distribución de frecuencias de IONS.

### 4.2.3. Comportamiento del índice $I_{IONS}$

Usando la ecuación 4.4 se calculó el índice de centelleo ionosférico  $I_{IONS}$  para cada satélite a partir de los valores *off-satellite* y *on-satellite*, correspondientes a la desviación estándar de la señal del ruido de fondo y del fading del satélite una vez removida la tendencia. El cociente de estas dos cantidades nos da una idea del grado de centelleo que tiene el satélite con respecto al ruido de fondo. Si al remover la tendencia  $I_{IONS}$  es muy cercano a 1, entonces la perturbación del satélite es pequeña. En cambio si  $I_{IONS}$  es grande, la perturbación entonces es considerable. El valor de  $I_{IONS}$  es una cantidad mayor que 1 y es adimensional. En la figura 4.10 se muestra un gráfico de los valores de  $I_{IONS}$  para cada satélite como función de la hora de detección.

En el gráfico podemos ver que sobresalen 6 puntos que tienen valores de  $I_{IONS}$  mayores a 30. Veremos en el siguiente capítulo que estos satélites con intenso centelleo ocurren en fechas de actividad geomagnética. Salvo por un punto, todos los demás satélites tienen  $I_{IONS}$  menor a 15, la mayoría de ellos tienen lugar, como vimos anteriormente, en el intervalo de tiempo entre la media noche y el amanecer. El hecho de haber definido de manera arbitraria el índice de centelleo ionosférico no nos proporciona información acerca de la naturaleza

física del centelleo, solo nos es útil para distinguir entre satélites con moderada e intensa perturbación debida a la ionosfera. Otros índices de centelleo ionosférico que son usados comunmente pueden consultarse en (Crane,1976; Fremouw et al., 1980; Hargreaves, 1993; Tanadori, 2001; Wernik et al., 2003).

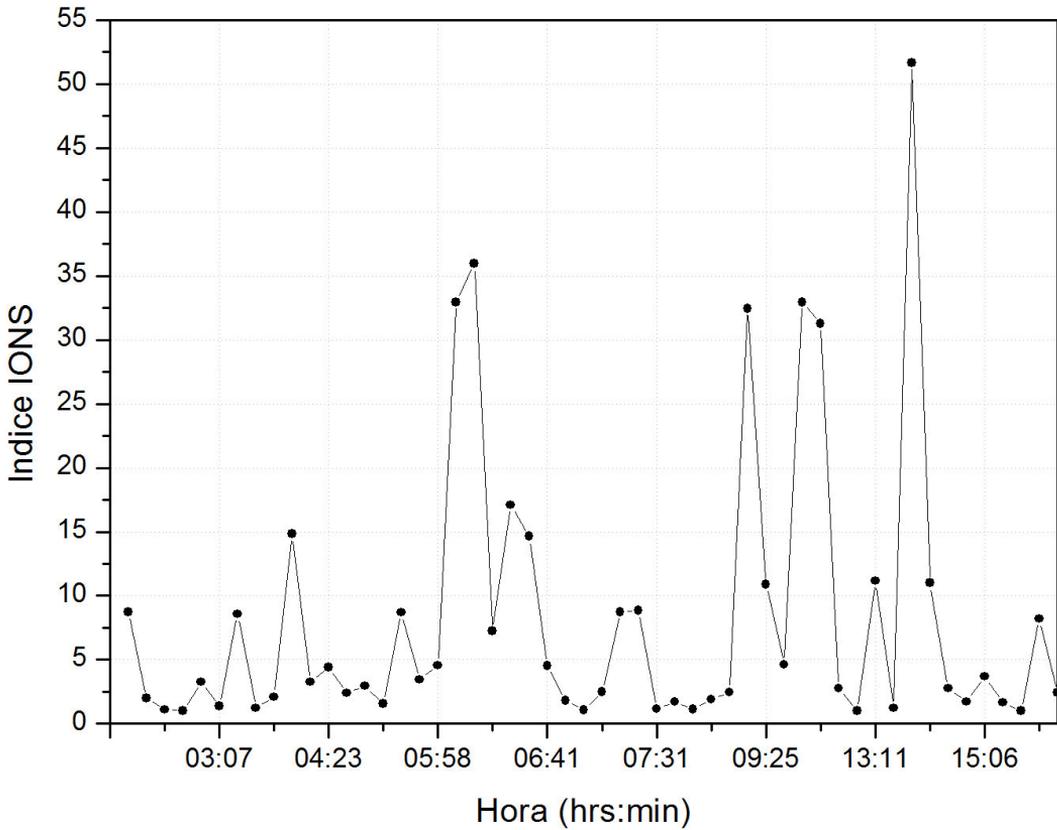


Figura 4.10: Valores del índice  $I_{IONS}$  de varios satélites como función de la hora local.

# Tormentas geomagnéticas y el centelleo ionosférico

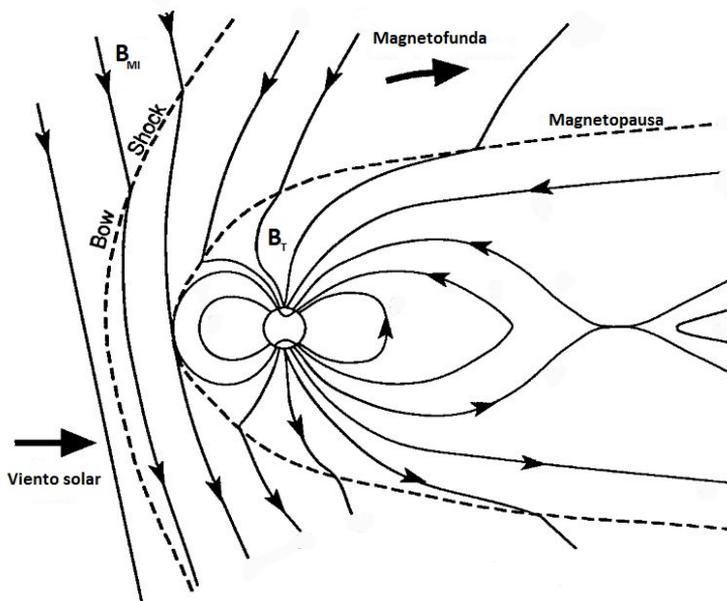
---

NUESTRO planeta tiene un campo magnético intrínseco que se aproxima como el campo de un dipolo con su eje inclinado  $11^\circ$  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. El campo tiene una intensidad promedio de entre 25 000 y 65 000  $nT$  en la superficie. Se extiende desde la superficie terrestre hacia el espacio, hasta aproximadamente  $12 R_T$  ( $R_T$  son radios terrestres, es común usar el radio de nuestro planeta como unidad de distancia) del lado día y más allá de  $200 R_T$  el lado noche (Kivelson y Russell, 1995), perdiendo claramente su forma dipolar debido al confinamiento que surge por la presencia del viento solar, dando lugar a una región del espacio poblada de plasma (en su mayoría de origen terrestre) dominado por el campo magnético conocida como *magnetosfera terrestre*. Uno de los objetivos del estudio del magnetismo terrestre es el estudio de los cambios que presenta el campo geomagnético, en particular las variaciones del campo en sus componentes horizontal (H), declinación (D) y vertical (Z). Para fines de este, las variaciones globales del campo que son de particular interés son las *tormentas geomagnéticas*. La principal característica de una tormenta magnética es el decremento en la componente horizontal del campo y su posterior recuperación.

## 5.1. Tormentas geomagnéticas

Ya sea estimulada por las variaciones del viento solar o alterada por el exceso de partículas y energía que se deposita constantemente en ella, la magnetosfera terrestre sufre cambios tanto globales como localizados que dan lugar a diferentes fenómenos que podemos detectar en la Tierra. Durante años el problema a resolver era explicar el mecanismo mediante el cual el viento solar transfiere energía al interior de la magnetosfera terrestre. Hoy en día se sabe que es el campo magnético interplanetario y no el viento solar como tal el responsable. El físico inglés J. W. Dungey (Dungey, 1988) propuso que si el campo magnético interplanetario (denotado también como  $B_{MI}$ ) tiene una componente importante dirigida hacia el sur,

éste puede conectarse con las líneas de alta altitud del campo dipolar de la Tierra. Una vez que esto sucede las líneas de campo son arrastradas por el viento solar hacia la cola magnetosférica para después reconectarse y regresar a la configuración dipolar anterior, liberando en ese momento la energía magnética almacenada al momento de ser arrastrada por el viento solar. Este mecanismo es conocido como *reconexión magnética* (ver capítulo 9 de (Kivelson y Russell, 1995) y (Dungey, 1988)). Cuando hay reconexión entre las líneas del campo proveniente del Sol y las líneas de campo magnético terrestre, hay ingreso de plasma solar al interior de la magnetosfera, mismo que da lugar, entre muchos fenómenos, a las auroras boreales en la alta atmósfera cerca de los polos, subtormentas magnéticas por el incremento y aceleración de plasma en la cola magnética y por supuesto al incremento en la población de partículas en la corriente de anillo, hecho que da lugar a la tormenta geomagnética (ver figura 5.1, tomada de (Kivelson y Russell, 1995)).



**Figura 5.1:** Esquema del mecanismo de reconexión magnética.

Si bien es cierto que la componente en el eje norte-sur del campo magnético es importante en la transferencia de energía a la magnetosfera, el principal parámetro físico es la cantidad de *flujo magnético dirigido hacia el sur* por unidad de tiempo. Este parámetro representa la componente de un campo eléctrico que está dirigido en la dirección este-oeste. Las variaciones en este campo son las que regulan el flujo convectivo de plasma a la cola magnetosférica el cual a su vez modula la aceleración e inyección de plasma energético a la magnetosfera. La precipitación de partículas, además de incrementar la conductividad de la ionosfera, causa intensos flujos de corriente en la ionosfera. Las partículas atrapadas en la magnetosfera por las líneas de campo geomagnético experimentan derivas en dirección este-oeste y opuesta, es decir, los iones y electrones derivan en sentidos contrarios, hacia el oeste

los primeros y hacia el este los segundos, dando lugar a una corriente eléctrica neta extendida sobre el planeta conocida como *corriente de anillo*. Dado que el campo magnético inducido por el anillo de corriente apunta en dirección contraria al campo magnético intrínseco de la Tierra, la intensidad de la componente horizontal del campo geomagnético en escala global se ve reducido. Esto es lo que define una *tormenta geomagnética*.

Históricamente el término de tormenta geomagnética se usa para referirse a la reducción en la intensidad del campo geomagnético global pero una definición más adecuada de éste fenómeno es una tormenta en el espacio que causa fuertes corrientes eléctricas en toda la magnetosfera e ionosfera, perturbando así el campo geomagnético intrínseco del planeta. La principal característica de una tormenta magnética es un decremento en la intensidad horizontal del campo geomagnético y su subsecuente recuperación. Inician varias horas después de que tiene lugar un evento solar intenso y pueden perdurar varias horas después del cese de actividad solar.

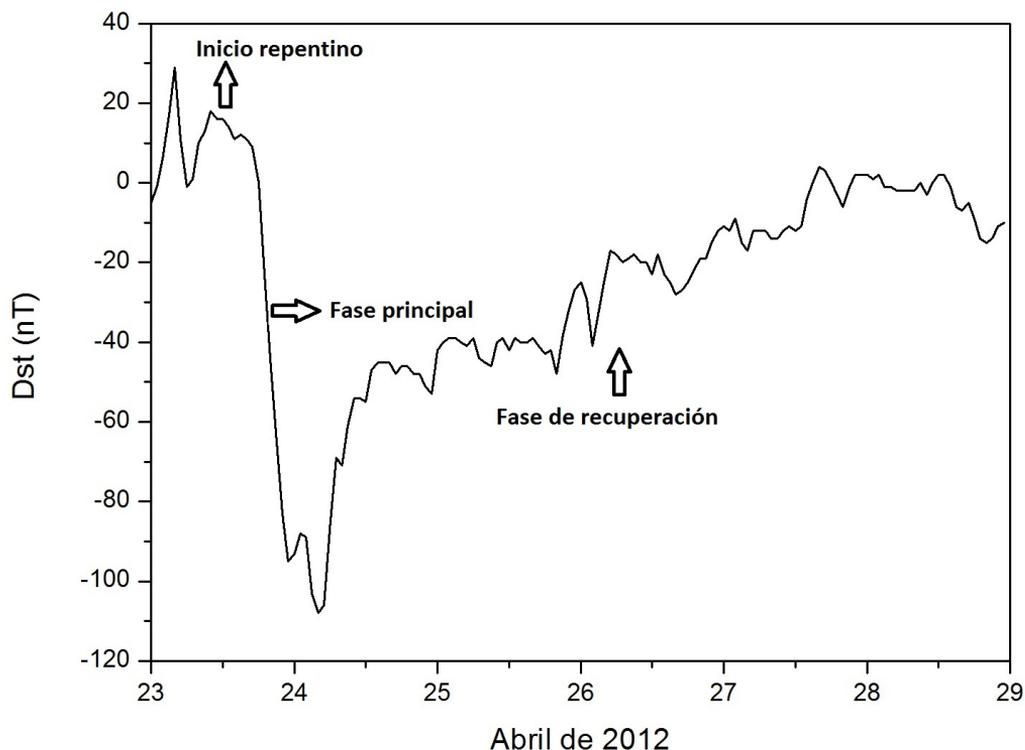
Además del plasma magnetizado que fluye constantemente del Sol, la actividad solar también altera el estado de la magnetosfera. Cuando una ráfaga solar o una EMC se presenta en el Sol, gran material es, como se mencionó antes, expulsado hacia el medio interplanetario a grandes velocidades. Este plasma turbulento impacta a su vez al viento solar produciendo una onda de choque que avanza junto con la nube de plasma. Si esta configuración choca con el entorno terrestre se da una tormenta magnetosférica, resultado de la colisión del sistema onda de choque-plasma magnetizado con la magnetosfera lo que resulta en una rápida compresión de esta última. Dependiendo de la magnitud de la componente  $z$  del  $B_{MI}$  será el impacto global de la tormenta geomagnética. Los posibles daños de una tormenta de este tipo van desde interrupciones en los sistemas de comunicación por satélite y GPS hasta alteraciones en las plantas generadoras de electricidad (Lanzerotti, 2007).

### 5.1.1. Índice $D_{st}$ y clasificación de tormentas

Para medir la intensidad de una tormenta geomagnética se usan varios índices dependiendo de la latitud magnética y del fenómeno que se desee estudiar. Para el presente trabajo usaremos únicamente el índice  $D_{st}$ <sup>1</sup> porque éste se usa para cuantificar el valor del campo en latitudes medias y ecuatoriales. Esta expresado en nanoteslas ( $nT$ ) y nos dice el valor promedio global de la componente horizontal (H) del campo magnético terrestre alrededor del ecuador. En condiciones quietas, el valor de  $D_{st}$  es cero o muy cercano. Las tormentas se clasifican en 3 tipos principales: tormentas de baja intensidad ( $0 \geq D_{st} \geq -30 nT$ ), moderadas ( $-50 nT \geq D_{st} \geq -100 nT$ ) e intensas ( $-100 nT \geq D_{st}$ ). Se reconoce una tormenta geomagnética identificando 3 fases principales como se muestra en la figura 5.2, correspondiente a una tormenta geomagnética del mes de abril de 2012.

---

<sup>1</sup>[wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/).



**Figura 5.2:** Fases de una tormenta geomagnética en el registro del índice  $D_{st}$ .

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 o evento de actividad solar. Le sigue la *fase principal*, caracterizada por el decremento en el valor de  $D_{st}$  hasta un valor mínimo, mismo que indica si la tormenta fue de baja intensidad, moderada o intensa; 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. Este incremento en la corriente induce un campo magnético con sentido contrario al campo magnético intrínseco que disminuye su intensidad, por eso el valor del índice  $D_{st}$  es negativo. La *fase de recuperación* corresponde a la reducción de la energía y partículas en la corriente de anillo, se observa en las mediciones una recuperación gradual del  $D_{st}$  que dura unos cuantos días.

### 5.1.2. Efectos de las tormentas geomagnéticas en la ionosfera

Cuando ocurre una tormenta geomagnética, una las consecuencias de los cambios en el campo magnético terrestre es que la ionosfera reacciona de diferentes formas ante esta variación. Dependiendo de la hora en que ocurra el mínimo de la tormenta, de la latitud e incluso de la estación del año en que se encuentre un cierto lugar, la ionosfera, en todas sus

capas, se comportará de diferente manera. A menudo se le conocen como *perturbaciones ionosféricas* a las variaciones repentinas, locales y breves en la densidad de electrones de la ionosfera, mientras que el término de *tormenta ionosférica* se usa para referirse a perturbaciones de escala global de la ionosfera, en particular de la capa  $F_2$ , que duran uno o varios días asociadas con perturbaciones de la alta atmósfera pero sobre todo del campo geomagnético. Las tormentas ionosféricas consisten en una reducción o incremento en la concentración de electrones respecto a la concentración promedio. A los decrementos se les conoce como *tormenta negativa* y a los incrementos *tormenta positiva*.

Una considerable cantidad de energía es inyectada en la ionosfera a altas latitudes durante una tormenta geomagnética. Una parte de esa energía es debida a partículas energéticas que se depositan en la ionosfera y el resto de la energía es debida al calentamiento Joule asociado a las fuertes corrientes inducidas al variar el campo magnético terrestre, mismo que calienta la parte alta de la atmósfera neutra. La expansión térmica de la atmósfera da como resultado un cambio en el perfil de altura y al mismo tiempo modifica la dinámica de la atmósfera en escala global. A la altura de la ionosfera, el aumento de temperatura causa el incremento en las concentraciones de  $N_2$  y  $O_2$  a la región  $F$  excediendo la de  $O$ . Como el oxígeno atómico es la principal fuente de electrones desprendidos por ionización de radiación UV, entonces,  $N_2^+$  y  $O_2^+$  se combinan con los electrones libres resultando en un coeficiente de recombinación mayor que el de ionización, reduciendo así la densidad electrónica (Tanadori, 2001). Dicho de otra manera, al expandirse y elevarse de las capas altas de la atmosfera, se altera la ionosfera reduciendo la densidad de electrones, lo cual resulta en la caída de las frecuencias utilizables en radiocomunicaciones.

Durante una tormenta geomagnética, irregularidades en el plasma ecuatorial y el centelleo han sido objeto de extenso estudio por más de 5 décadas. Esas irregularidades en la densidad de electrones de la ionosfera, que cubren un amplio rango de tamaños, afectan fuertemente la propagación de ondas de radio en las latitudes alrededor del ecuador durante la noche. Los mecanismos que las generan y las características de esas irregularidades en el plasma ionosférico, así como las del centelleo que ocasionan, están a la fecha razonablemente bien entendidas. Sin embargo, es considerablemente más complejo predecir y caracterizar su ocurrencia. La dificultad principal es la naturaleza altamente cambiante del campo eléctrico ionosférico que acompaña a una tormenta geomagnética, ya que éste es el principal mecanismo de generación de inestabilidades ionosféricas.

Las señales de radio satelitales se han convertido en una efectiva técnica para estudiar perturbaciones geomagnéticas que alteran la densidad electrónica de la ionosfera y provocan irregularidades en ésta. Durante esos eventos la ionosfera muestra una amplia variedad de efectos que dependen de la estación, latitud geográfica, hora local y momento de inicio de la perturbación geomagnética. Las tormentas geomagnéticas tienen una profunda influencia en la morfología global de la alta atmósfera y constituye uno de los enlaces más importantes

para el entendimiento de las complejas relaciones Sol-Tierra, que es de enorme importancia porque las comunicaciones de radio transionosféricas son degradadas severamente durante estas perturbaciones.

## 5.2. Análisis de tormentas geomagnéticas y centelleo

Las tormentas geomagnéticas afectan a la ionización de la región  $F$  de la ionosfera e introducen dinámicos cambios resultado de las interacciones viento solar-magnetosfera-ionosfera. La ionosfera de latitudes medias y ecuatoriales exhibe fuertes variaciones del lado noche durante tormentas geomagnéticas pero el efecto que tienen estas tormentas en la generación de irregularidades en el plasma depende a su vez de las variaciones regulares (estacionales, diurnas y el ciclo solar) de la ionosfera. Es por esto que cuando tiene lugar una tormenta geomagnética, las irregularidades (y por ende el centelleo) difieren de una tormenta a otra.

El centelleo de ondas de radio en VHF ha sido extensamente usado para el estudio de variaciones sub-kilométricas del plasma ionosférico. El rol de las tormentas geomagnéticas en la ocurrencia de centelleo ionosférico en VHF fue estudiado a detalle por (Aarons y Das Gupta, 1984). De sus observaciones de intenso centelleo en zonas ecuatoriales después a media noche y en las horas matutinas que proceden a tormentas geomagnéticas intensas, sugirieron que la probabilidad de ocurrencia de centelleo es mayor si la fase de recuperación de la tormenta inicia a media noche. Postularon entonces que la hora local a la cual ocurre el máximo valor de la intensidad de la corriente de anillo es un factor importante a considerar porque el instante en el que ocurre afecta de distinta manera tanto al campo eléctrico ecuatorial como a la estructura de la capa  $F$ .

Se sugirió entonces una clasificación de tormentas como función de la hora local de inicio de la fase de recuperación en el índice  $D_{st}$  para tormentas geomagnéticas moderadas e intensas. Si la máxima intensidad de la corriente de anillo (dada en función del  $D_{st}$ ) ocurría después de media noche, el efecto en la ionosfera es la generación de irregularidades que se prolonga hasta después del amanecer. Si el máximo valor negativo del  $D_{st}$  ocurría alrededor del atardecer o en las horas posteriores, las irregularidades nocturnas son inhibidas. Por último, si el  $D_{st}$  es máximo cerca de medio día, no hay efecto significativo en la generación o cancelación de irregularidades en las capas  $F$  por acción de la corriente de anillo. Así, se clasificaron tres tipos de tormentas de la siguiente manera (Aarons y Das Gupta, 1984; Dayanadan y Vyas, 2013):

1. *Categoría 1*: Si la fase de recuperación en el  $D_{st}$  inicia entre 8:00 - 16:00 hrs tiempo local, tanto centelleo como spread  $F$  son suprimidos total o parcialmente en la noche siguiente (dependiendo de la intensidad de la tormenta). Esto es, si el valor máximo negativo del  $D_{st}$  ocurre en horas cercanas al medio día, la difusión normal del lado

día en las capas  $F$  tiende a cancelar las irregularidades de densidad, por lo que no se observa intenso centelleo la siguiente noche.

2. *Categoría 2:* Si la fase de recuperación inicia cuando el mínimo valor del  $D_{st}$  se da entre 00:00 - 6:00 hrs, intenso centelleo post media noche que se extiende hasta el amanecer se detecta sobre el cinturón de  $21^\circ$  de latitud alrededor del ecuador porque cuando cesa la ionización solar al atardecer la altura de la capa  $F$  aumenta y después la tormenta geomagnética genera las irregularidades; el efecto conjunto de estos dos fenómenos son los causantes del intenso centelleo observado.
3. *Categoría 3:* Si la fase de recuperación en el  $D_{st}$  ocurre durante las horas siguientes a la puesta de Sol (entre 18:00 - 00:00 hrs) se tiene que la ocurrencia de centelleo no se ve afectada. Lo que sucede es que la altura de la capa  $F$  no es alterada por la tormenta, las irregularidades ocurren como lo hacen en una noche sin perturbaciones magnéticas.

Para conocer el impacto de las tormentas geomagnéticas en las observaciones de tránsitos de satélites y fuentes de radio cósmicas del MEXART primero se hizo una tabla con todas las tormentas geomagnéticas moderadas e intensas del 2012, mismas que se muestran en el cuadro 5.1. En la tabla se muestran las fechas y horas del inicio, máximo (fecha y hora en que el  $D_{st}$  alcanza su valor mínimo) y fin de la tormenta, así como el máximo valor negativo que se alcanza en el registro del  $D_{st}$ . Se usa únicamente el índice  $D_{st}$  como indicador de la intensidad de las tormentas geomagnéticas para este trabajo porque es el principal parámetro que nos da la variabilidad del campo magnético a la latitud del MEXART.

En el 2012 hubo 18 tormentas geomagnéticas, 13 moderadas y 5 intensas. Como las tormentas 1, 3, 4, 10, 11 y 12 coinciden con fechas en la que no hay datos del MEXART, se excluyen del análisis. Además en las tormentas 5, 8, 17 y 18 no hubo suficiente número de satélites con IONS por lo que también se excluyen del análisis. Por lo tanto, se procede a analizar las 8 tormentas restantes. Una vez que se determinan las fechas en que hay actividad geomagnética, se analiza el centelleo únicamente en fuentes de radio cósmicas. Las fuentes de radio cósmicas que se usaron para esta parte del análisis se muestran en el cuadro 3.1 del capítulo 3.

Procedemos de la misma manera que hicimos con los satélites: Una vez ubicada la fuente de radio se toma la desviación estandar de la señal antes y después de la fuente (es decir, se calcula el  $RMS_{off-source}$ ) para después aplicar un ajuste gaussiano a la fuente y hacer la posterior resta del ajuste a la serie de datos original (es decir, le quitamos la tendencia a la fuente) para luego, con la serie de datos sin tendencia, calcular la desviación estandar ( $RMS_{on-source}$ ) del centelleo que presenta la fuente (si es que tiene centelleo). Finalmente, usando la ecuación 3.2 del capítulo 3 se calcula el índice de centelleo de la fuente  $G$ .

**Tormentas geomagnéticas moderadas e intensas en el 2012**

Número	Día y Hora de inicio (hrs)	Día y Hora del máximo (hrs)	Día y Hora de término (hrs)	Índice $D_{st}$ (nT)
1	2 ene / 17:00	3 ene / 10:00	5 ene / 23:00	- 34
2	21 ene / 13:00	23 ene / 6:00	28 ene / 12:00	- 69
3	14 feb / 16:00	15 feb / 17:00	17 feb / 23:00	- 58
4	17 feb / 10:00	19 feb / 5:00	21 feb / 23:00	- 54
5	26 feb / 00:00	27 feb / 20:00	29 feb / 12:00	- 48
6	7 mar / 00:00	7 mar / 20:00	8 mar / 12:00	- 75
7	8 mar / 15:00	9 mar / 9:00	11 mar / 15:00	- 133
8	27 mar / 11:00	28 mar / 5:00	29 mar / 8:00	- 56
9	23 abr / 8:00	24 abr / 5:00	27 abr / 16:00	- 107
10	16 jun / 00:00	17 jun / 14:00	21 jun / 7:00	- 71
11	8 jul / 22:00	9 jul / 13:00	12 jul / 18:00	- 68
12	15 jul / 2:00	15 jul / 19:00	20 jul / 8:00	- 127
13	1 sept / 21:00	3 sept / 11:00	9 sept / 23:00	- 75
14	30 sept / 9:00	1 oct / 4:00	2 oct / 23:00	- 116
15	7 oct / 17:00	9 oct / 9:00	11 oct / 23:00	- 105
16	12 oct / 3:00	13 oct / 8:00	16 oct / 1:00	- 87
17	1 nov / 5:00	1 nov / 14:00	2 nov / 23:00	- 61
18	12 nov / 2:00	14 nov / 8:00	17 nov / 10:00	- 108

**Cuadro 5.1**

Note que este índice es arbitrario y no nos dice nada de la naturaleza que causa el centelleo, solamente nos da el grado de perturbación de la fuente. Además el centelleo que presenta una fuente de radio cósmica que detecta el MEXART puede deberse al medio interplanetario, a la ionosfera, o ambos, por lo que el comportamiento de la señal de las fuentes en días de actividad geomagnética solo nos dan una idea del grado de perturbación del medio interplanetario y de la ionosfera pero no por separado. Recordemos que el CIP es una técnica potencialmente útil para predecir actividad geomagnética días posteriores a la ocurrencia del mismo (Hapgood y Lucek, 1999), por lo que no es de sorprenderse que se registre centelleo en las fuentes antes del inicio de las tormentas geomagnéticas.

Una vez que tenemos el valor de  $G$  de todas las fuentes de radio para los días con actividad magnética, buscamos en nuestra lista de satélites aquellos cuya fecha de ocurrencia coincide con fechas de tormentas, de tal manera que podemos comparar el comportamiento de fuentes de radio cósmicas y satélites para días de tormenta geomagnética a través de los valores de los índices  $D_{st}$ ,  $G$  e  $I_{IONS}$ . Se llevará a cabo este análisis para las 8 tormentas geomagnéticas en que se tienen datos del MEXART.

### 5.2.1. Centelleo durante la tormenta geomagnética 2: Del 21 al 28 de enero.

En el cuadro 5.2 se muestran los parámetros principales de los satélites con IONS que se detectaron en los días de esta tormenta. Para estos días la resolución de los datos del MEXART fue de 50 muestras por segundo.

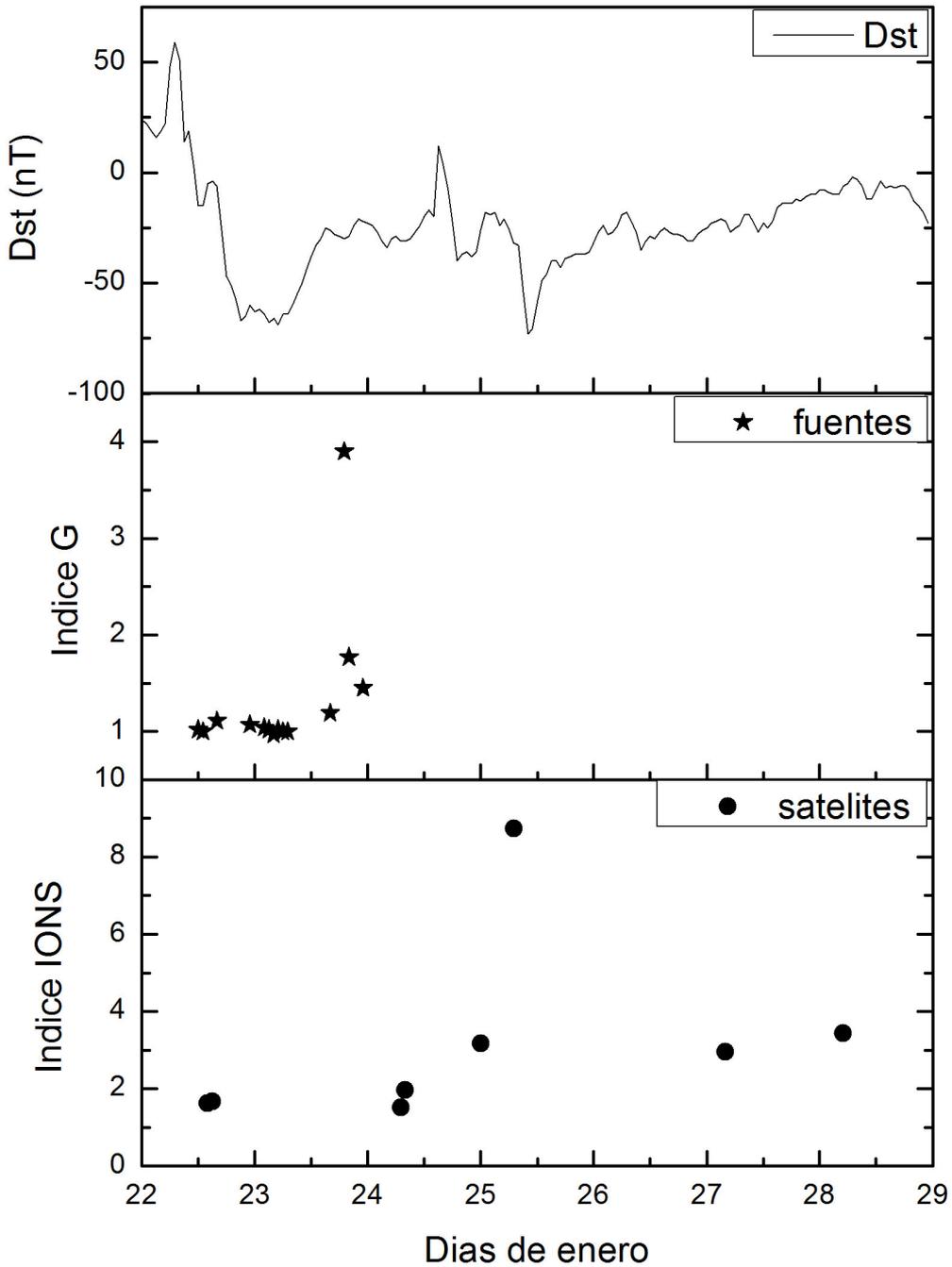
Satélites con centelleo ionosférico en la tormenta 2						
Satélite	Día	Hora (hrs:min)	Amplitud (Volts)	S/N	Índice $I_{IONS}$	Frecuencia (Hz)
1	22	14:39	0.43	35.92	2.009	0.613
2	22	15:39	0.45	37.59	1.663	0.613
3	24	8:47	0.75	63.56	1.907	0.196
4	24	9:02	0.60	50.85	2.473	0.196
5	25	6:58	1.10	91.74	8.378	0.982
6	26	0:58	0.30	24.50	3.170	0.982
7	27	4:47	0.93	76.23	2.955	0.589
8	28	5:47	1.02	85.86	3.434	0.295

**Cuadro 5.2**

De acuerdo al cuadro 5.1 esta tormenta inicia el día 21 de enero a las 13:00 hrs, alcanza el valor mínimo de  $D_{st}$  (- 69 nT) el 23 de enero a las 6:00 hrs y concluye el 28 de enero a las 12:00 hrs. De acuerdo a la clasificación de (Aarons y Das Gupta, 1984) esta es una tormenta de clase 1 porque ocurre justo antes del amanecer. El día 23 de enero no hubo datos de satélites para verificar si se cumple la hipótesis de Aarons y Das Gupta.

La figura 5.3 muestra las gráficas de los índices  $D_{st}$ ,  $G$  e  $I_{IONS}$  entre el 22 y 29 de enero, correspondientes a la tormenta geomagnética número 2. De esta figura vemos un apreciable aumento en el índice  $G$  el día 23 en horas cercanas al atardecer que contradice la idea de que las irregularidades matutinas generadas por una tormenta de categoría 1 se anulan a lo largo del día.

Esta tormenta geomagnética tiene otro mínimo valor de  $D_{st}$  el día 25 cerca del medio día, donde se observa un satélite cuyo índice de centelleo tiene valor de 8.378 de acuerdo al cuadro 5.2. Los días de la fase de recuperación continúan con ligera perturbación ionosférica, lo cual queda en evidencia por los satélites 7 y 8 del cuadro 5.2, que muestran centelleo con valores de  $I_{IONS}$  de 2.955 y 3.434 respectivamente, en horas previas al amanecer.



**Figura 5.3:** Tormenta geomagnética del mes de enero de 2012 y su relación con el centelleo observado por el MEXART en satélites y fuentes de radio cósmicas.

### 5.2.2. Centelleo durante las tormentas geomagnéticas 6 y 7: Del 7 al 11 de marzo.

En el cuadro 5.3 se muestran los parámetros principales de los satélites con IONS que se detectaron en los días de estas dos tormentas. Para estos días la resolución de los datos del MEXART fue de 10 muestras por segundo. Dado que los satélites que tienen  $I_{IONS}$  muy cercano a 1 no tienen centelleo importante, su frecuencia de centelleo no es apreciable, por lo que no se incluye ese valor en el cuadro siguiente.

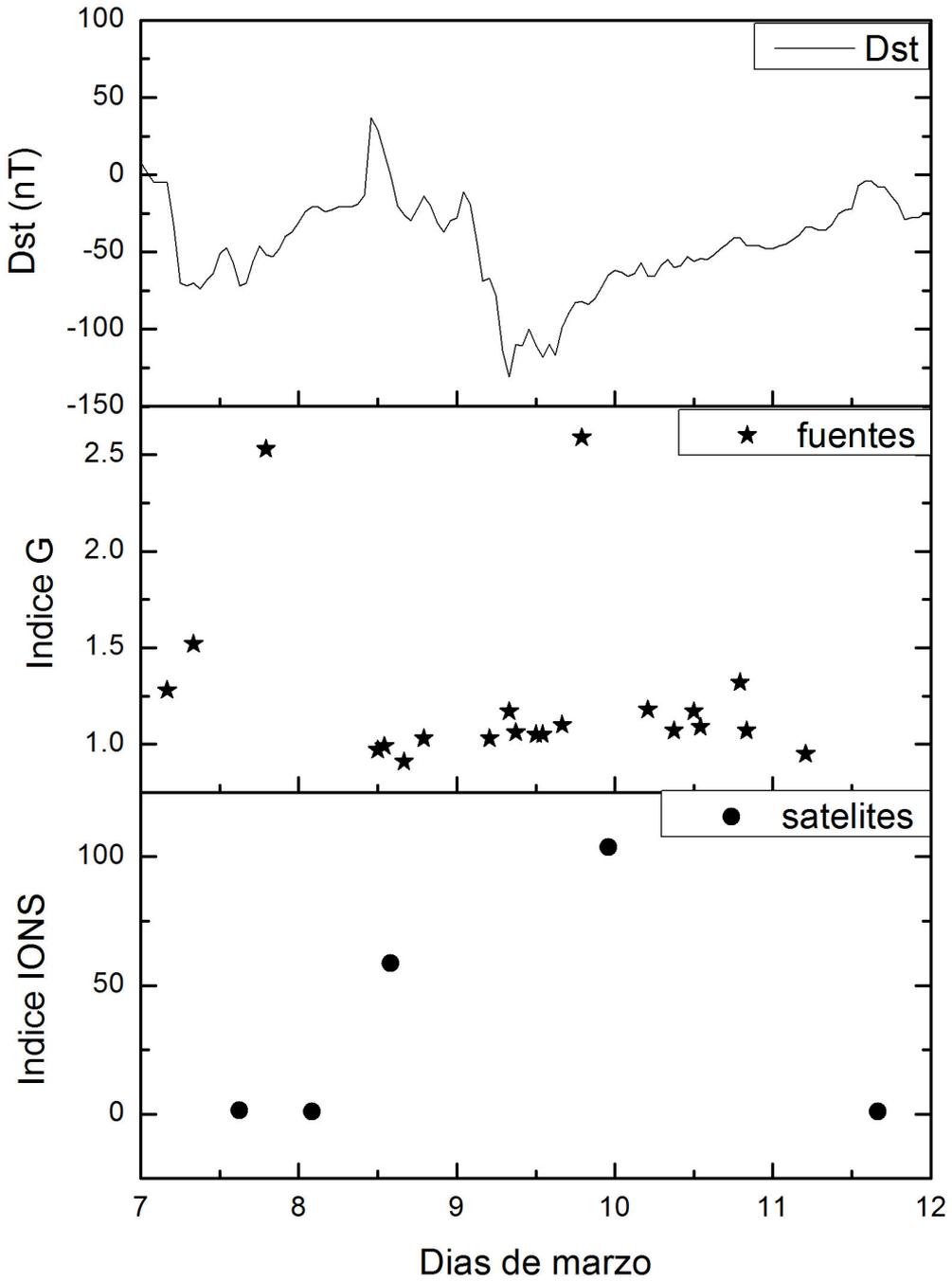
Satélites con centelleo ionosférico en las tormentas 6 y 7						
Satélite	Día	Hora (hrs:min)	Amplitud (Volts)	S/N	Índice $I_{IONS}$	Frecuencia (Hz)
1	7	15:03	0.49	22.82	1.73	0.49
2	8	03:03	0.25	17.60	1.00	
3	8	14:03	1.20	81.63	51.67	0.39
4	9	23:50	3.20	253.97	103.78	0.76
5	11	16:33	0.62	48.82	1.01	

**Cuadro 5.3**

Del al cuadro 5.1 vemos que la tormenta 6 inicia el día 7 de marzo a las 2:00 hrs, alcanza el valor mínimo de  $D_{st}$  ( $-75 nT$ ) el 7 de marzo a las 10:00 hrs y concluye el 8 de marzo a las 11:00 hrs; la tormenta 7 inicia el día 8 de marzo a las 15:00 hrs, alcanza el valor mínimo de  $D_{st}$  ( $-133 nT$ ) el 9 de marzo a las 9:00 hrs y concluye el 11 de marzo a las 15:00 hrs. De acuerdo a la clasificación de (Aarons y Das Gupta, 1984) estas dos tormentas son de clase 1 porque ocurren después del amanecer.

La figura 5.4 muestra las gráficas de los índices  $D_{st}$ ,  $G$  e  $I_{IONS}$  entre el 7 y 11 de marzo, correspondientes a las dos tormentas geomagnéticas número 6 y 7. El día 7 de marzo hay una fuente de radio en horas del atardecer que presenta claro centelleo, . En los satélites no se ve un cambio apreciable solo hay un satélite con valor de  $I_{IONS}$  de 1.73, aunque un días después hubo un satélite con índice de centelleo de 51.67, valor bastante alto considerando que tuvo lugar a las 14:03 hrs durante la fase de recuperación de la tormenta 6.

El segundo mínimo valor de  $D_{st}$  del día 9 de marzo muestra una fuente con valor de  $G$  de 2.5 de nuevo después del atardecer que contrasta con las demás fuentes. Curiosamente es la misma fuente del día 7 de marzo presentaba un valor de centelleo casi igual. Unos instantes después tuvo lugar centelleo muy intenso en un satélite (alcanzó un valor de  $I_{IONS} = 103.78$  de acuerdo al cuadro 5.3), lo cual es un claro indicio de que la hipótesis de Aarons y Das Gupta para tormentas categoría 1 no aplica en este caso, la intensa tormenta del día 9 de marzo provocó intenso centelleo en un satélite y una fuente de radio después del atardecer.



**Figura 5.4:** Tormentas geomagnéticas del mes de marzo de 2012 y su relación con el centelleo observado por el MEXART en satélites y fuentes de radio cósmicas.

### 5.2.3. Centelleo durante la tormenta geomagnética 9: Del 23 al 27 de abril.

En el cuadro 5.4 se muestran los parámetros principales de los satélites con IONS que se detectaron en los días de esta tormenta geomagnética. Para estos días la resolución de los datos del MEXART fue de 10 muestras por segundo.

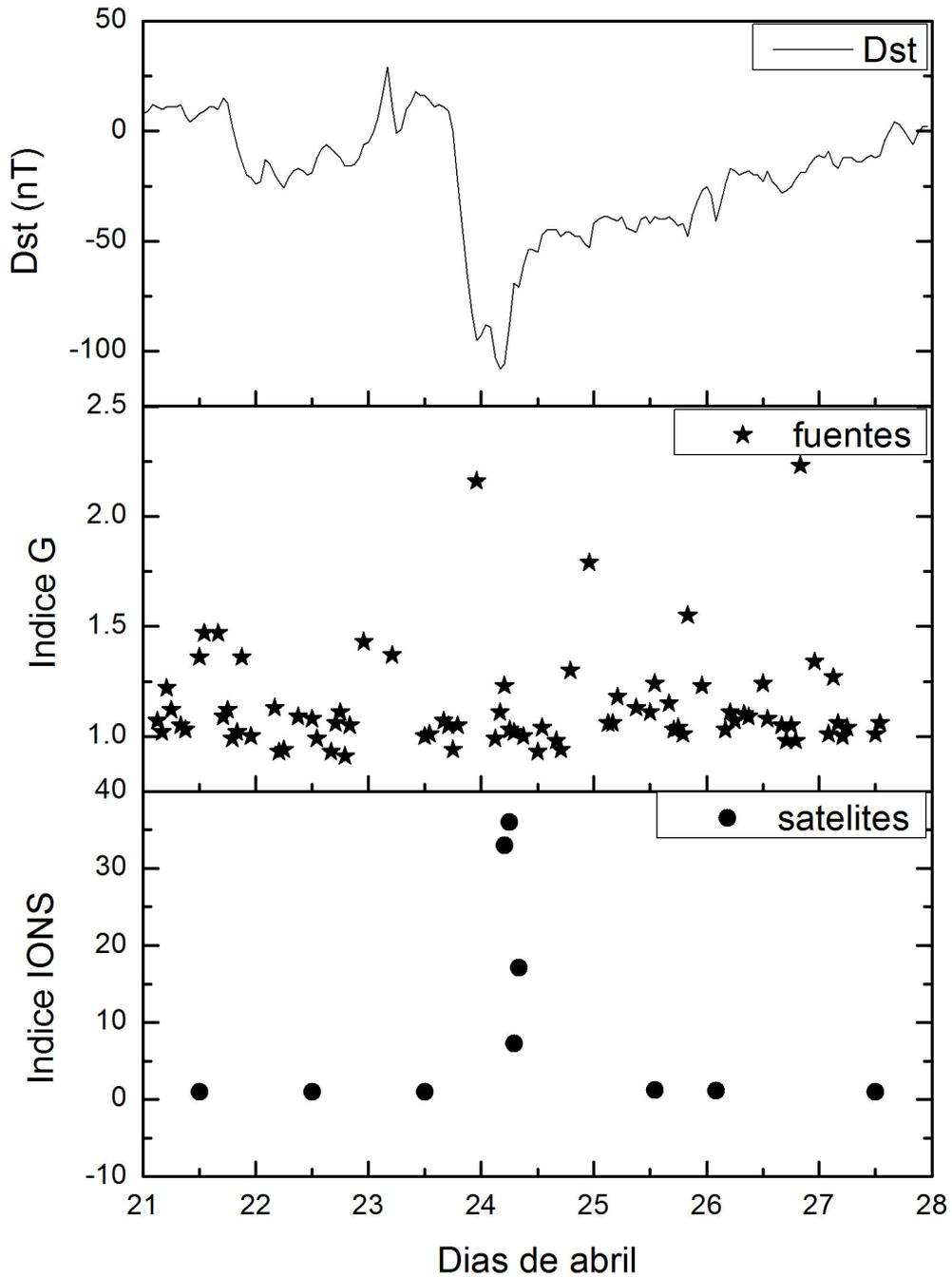
Satélites con centelleo ionosférico en la tormenta 9						
Satélite	Día	Hora (hrs:min)	Amplitud (Volts)	S/N	Índice $I_{ION}$	Frecuencia (Hz)
1	24	6:08	3.50	263.16	32.949	1.019
2	24	6:13	1.50	112.78	35.962	0.627
3	24	6:18	0.50	37.60	7.245	0.117
4	24	6:23	0.70	52.63	17.097	0.940
5	25	13:47	0.66	98.68	1.217	
6	26	2:47	0.20	15.62	1.119	

**Cuadro 5.4**

Del cuadro 5.1 vemos que la tormenta 9 inicia el día 23 de abril a las 8:00 hrs, alcanza el valor mínimo de  $D_{st}$  ( $-107 nT$ ) el 24 de abril a las 5:00 hrs y concluye el 27 de abril a las 16:00 hrs. De acuerdo a la clasificación de (Aarons y Das Gupta, 1984) esta tormenta es de clase 2 porque ocurre antes del amanecer.

La figura 5.5 muestra las gráficas de los índices  $D_{st}$ ,  $G$  e  $I_{IONS}$  entre el 21 y 27 de abril, correspondiente a la tormenta número 9 del cuadro 5.1. De acuerdo a la hipótesis de Aarons y Das Gupta, esta tormenta que alcanza su valor mínimo de  $D_{st}$  en la madrugada del día 24 de abril produce intenso centelleo en una fuente que alcanza el valor  $G$  mayor a 2 además de un claro y marcado centelleo en 4 satélites, dos de ellos con valores de  $I_{IONS}$  mayores a 30 justo en las horas del mínimo de la tormenta, lo cual confirma la idea de que las tormentas de clase 2 intensifican el centelleo por el reforzamiento del efecto fuente producido por la anomalía ecuatorial (Dayanadan y Vyas, 2013).

En las noches posteriores también se nota un ligero aumento en el centelleo de fuentes de radio, lo cual nos da una idea de la persistencia de las variaciones en la densidad de electrones en la fase de recuperación de la tormenta aunque este comportamiento no se consigue con los satélites.



**Figura 5.5:** Tormenta geomagnética del mes de abril de 2012 y su relación con el centelleo observado por el MEXART en satélites y fuentes de radio cósmicas.

### 5.2.4. Centelleo durante la tormenta geomagnética 13: Del 1 al 9 de septiembre.

En el cuadro 5.5 se muestran los parámetros principales de los satélites con IONS que se detectaron en los días de esta tormenta geomagnética. Para estos días la resolución de los datos del MEXART fue de 100 muestras por segundo.

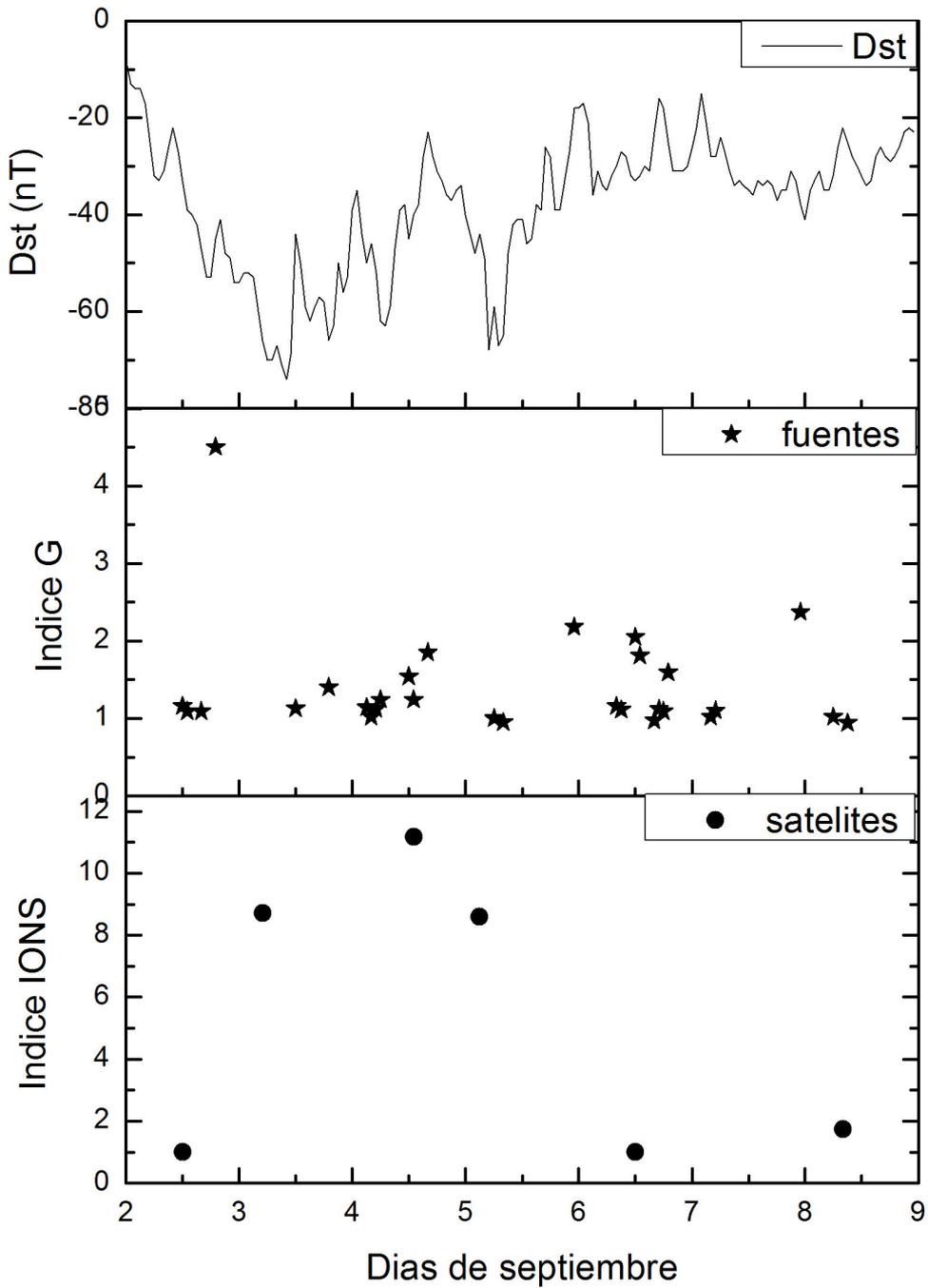
Satélites con centelleo ionosférico en la tormenta 13						
Satélite	Día	Hora (hrs:min)	Amplitud (Volts)	S/N	Índice $I_{IONS}$	Frecuencia (Hz)
1	3	5:18	0.45	51.30	8.712	0.680
2	4	13:11	2.33	217.52	11.165	0.634
3	5	3:11	0.60	57.14	8.586	0.073
4	6	12:03	0.30	26.78	1.008	
5	8	8:29	0.25	25.00	1.733	0.390

**Cuadro 5.5**

Del cuadro 5.1 vemos que la tormenta número 13 inicia el día 1 de septiembre a las 21:00 hrs, alcanza el valor mínimo de  $D_{st}$  ( $-75 nT$ ) el 3 de septiembre a las 11:00 hrs y concluye el 9 de septiembre a las 23:00 hrs. De acuerdo a la clasificación de (Aarons y Das Gupta, 1984) esta tormenta es de clase 1 porque ocurre cerca de medio día.

La figura 5.6 muestra las gráficas de los índices  $D_{st}$ ,  $G$  e  $I_{IONS}$  entre el 1 y 9 de septiembre, correspondiente a la tormenta número 13 del cuadro 5.1. De acuerdo a la hipótesis de Aarons y Das Gupta, esta tormenta que alcanza su valor mínimo de  $D_{st}$  cerca de medio día el día 3 de septiembre, debería tener una tendencia a inhibir el centelleo pero no es así. Esta tormenta es distinta a las que se analizaron anteriormente porque el  $D_{st}$  tiene marcadas variaciones en su comportamiento, por lo que ninguna de las fases típicas de una tormenta geomagnética está bien definida, esto queda en evidencia porque aunque el mínimo de la tormenta ocurre a las 11:00 hrs del día 3, una fuente exhibe intenso centelleo 12 horas antes, cuando la tormenta se encuentra en su fase principal. En los días siguientes se ve un aumento en el centelleo de algunas fuentes sin mostrar una dependencia diurna, probablemente porque las variaciones de la corriente de anillo inducían a su vez irregularidades en la ionosfera.

Para los satélites se ve un incremento en el índice de centelleo significativo horas posteriores al mínimo valor de  $D_{st}$  que se prolonga dos días para después decaer. El comportamiento irregular y prolongado de esta tormenta, aunado a los pocos datos con que se cuentan, impiden hacer una buena descripción del impacto que tuvo esta tormenta geomagnética en la ionosfera.



**Figura 5.6:** Tormenta geomagnética del mes de septiembre de 2012 y su relación con el centelleo observado por el MEXART en satélites y fuentes de radio cósmicas.

### 5.2.5. Centelleo durante la tormenta geomagnética 14: Del 30 de septiembre al 2 de octubre.

En el cuadro 5.6 se muestran los parámetros principales de los satélites con IONS que se detectaron en los días de esta tormenta geomagnética. Para estos días la resolución de los datos del MEXART fue de 100 muestras por segundo.

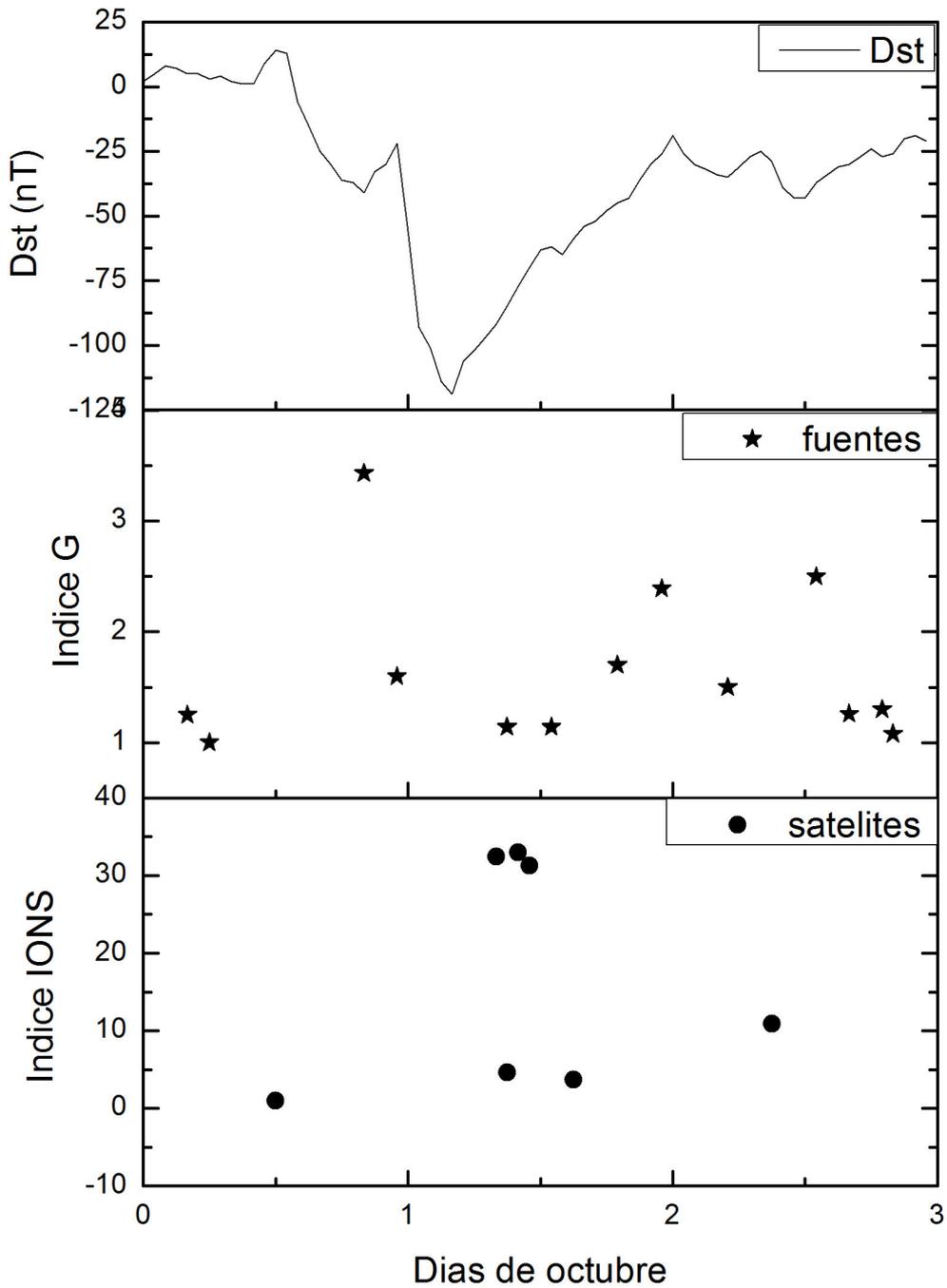
Satélites con centelleo ionosférico en la tormenta 14						
Satélite	Día	Hora (hrs:min)	Amplitud (Volts)	S/N	Índice $I_{IONS}$	Frecuencia (Hz)
1	1	9:10	1.46	148.98	32.464	1.315
2	1	10:06	0.49	50.00	4.621	1.073
3	1	10:36	3.48	355.10	32.952	1.563
4	1	11:34	2.74	279.59	31.278	1.168
5	1	15:06	0.76	77.55	3.696	0.975
6	2	9:25	2.08	208.00	10.891	1.170

**Cuadro 5.6**

Del cuadro 5.1 vemos que la tormenta número 14 inicia el día 30 de septiembre a las 9:00 hrs, alcanza el valor mínimo de  $D_{st}$  (- 116 nT) el 1 de octubre a las 4:00 hrs y concluye el 2 de septiembre a las 23:00 hrs. De acuerdo a la clasificación de (Aarons y Das Gupta, 1984) esta tormenta es de clase 2 porque ocurre después de media noche.

La figura 5.7 muestra las gráficas de los índices  $D_{st}$ ,  $G$  e  $I_{IONS}$  entre el 30 de septiembre y el 2 de octubre, correspondiente a la tormenta número 14 del cuadro 5.1. De acuerdo a la hipótesis de Aarons y Das Gupta, esta tormenta que alcanza su valor mínimo de  $D_{st}$  a las 4:00 hrs del día 1 de octubre, debería incrementar los efectos de centelleo en las horas siguientes, y de hecho así sucede. Esta tormenta es un tanto peculiar que tiene una pequeña fase principal, hay un leve incremento y después el valor de  $D_{st}$  cae hasta el mínimo. Durante el primer decremento se distingue una fuente con centelleo, las demás fuentes tienen valores de  $G$  mayores a 1 pero solo los días del periodo de recuperación de la tormenta.

Para los satélites la situación es ligeramente distinta. En las horas siguientes al inicio de la fase de recuperación hay un notable incremento en los valores de  $I_{IONS}$  de tres satélites, siendo mayor a 30 en los tres casos. Este hecho confirma la hipótesis de Aarons y Das Gupta de que el centelleo se intensifica si la tormenta es de categoría 2. Es de llamar la atención que los 6 satélites del cuadro 5.6 tienen frecuencia de oscilación asociada al centelleo muy cercana a 1 Hz, lo cual es indicador de que las irregularidades inducidas en la ionosfera se mantienen durante los 3 días que dura la tormenta, dando como resultado el mismo patrón de difracción en los 6 satélites aunque con distinta intensidad dependiendo de la fecha en que se registró el tránsito del satélite.



**Figura 5.7:** Primera tormenta geomagnética del mes de octubre de 2012 y su relación con el centelleo observado por el MEXART en satélites y fuentes de radio cósmicas.

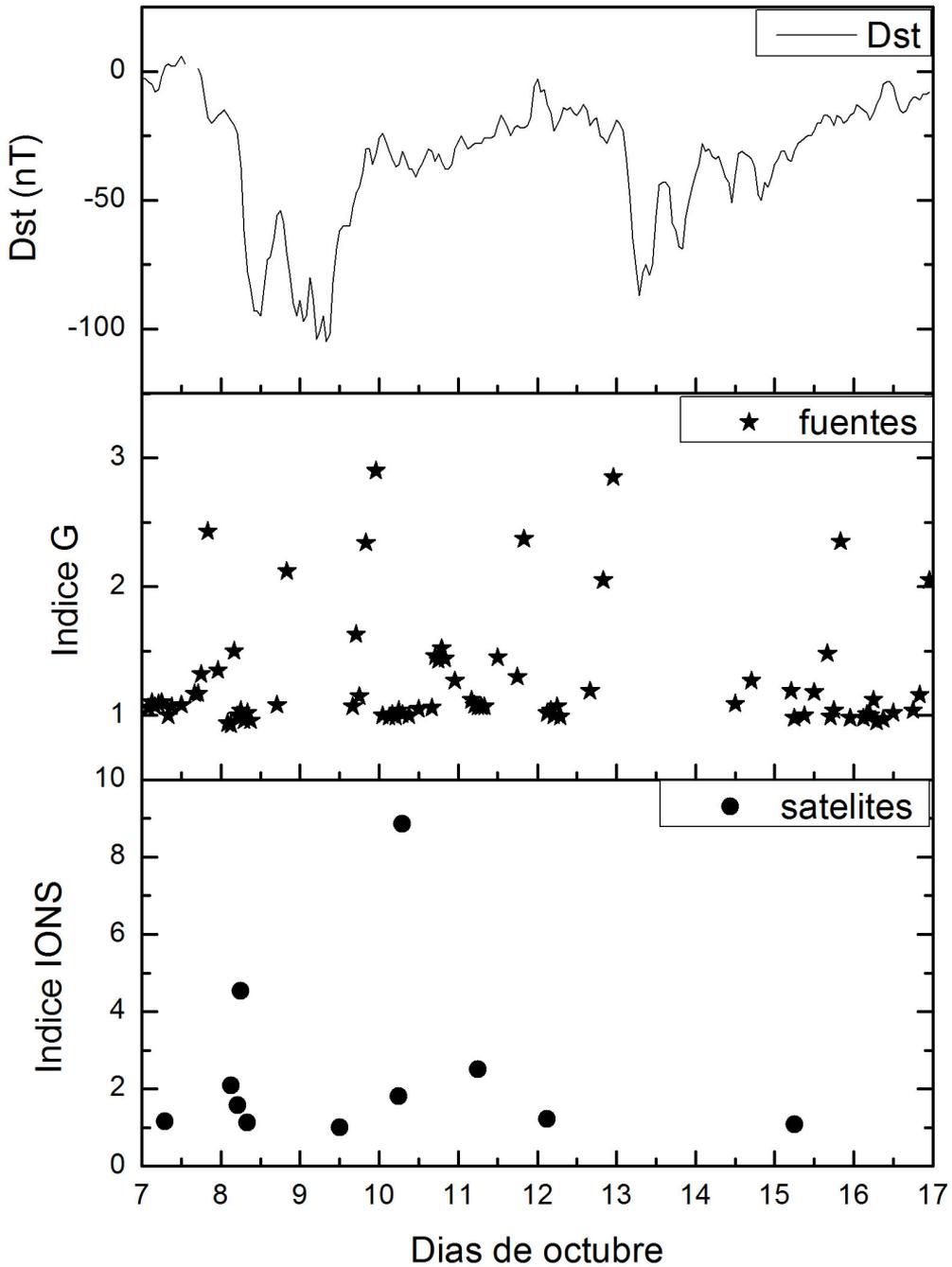
### 5.2.6. Centelleo durante las tormentas geomagnéticas 15 y 16: Del 7 al 16 de octubre.

En el cuadro 5.7 se muestran los parámetros principales de los satélites con IONS que se detectaron en los días de estas tormentas geomagnéticas. Para estos días la resolución de los datos del MEXART fue de 100 muestras por segundo. Aquellos satélites cuyo índice  $I_{IONS}$  es muy cercano a 1 (es decir, que el centelleo que presentan es muy débil) no tienen una frecuencia de centelleo apreciable, por esta razón no se incluyen en el cuadro 5.7.

Satélites con centelleo ionosférico en las tormentas 15 y 16						
Satélite	Día	Hora (hrs:min)	Amplitud (Volts)	S/N	Índice $I_{IONS}$	Frecuencia (Hz)
1	7	7:31	0.30	29.13	1.16	
2	8	3:21	0.15	13.27	2.095	0.974
3	8	5:10	0.82	72.57	1.573	0.340
4	8	8:31	0.39	34.95	1.131	
5	8	6:41	0.18	15.92	4.536	0.683
6	10	6:45	0.27	24.55	1.816	
7	10	7:01	3.12	283.63	8.858	2.142
8	11	6:51	1.35	135.00	2.503	0.683
9	12	3:14	0.30	28.04	1.214	
10	15	6:47	0.32	32.32	1.085	

Cuadro 5.7

Del cuadro 5.1 vemos que la tormenta número 15 inicia el día 7 de octubre a las 17:00 hrs, alcanza el valor mínimo de  $D_{st}$  ( $-105 nT$ ) el 9 de octubre a las 9:00 hrs y concluye el 11 de octubre a las 23:00 hrs; la tormenta número 16 inicia el día 12 de octubre a las 3:00 hrs, alcanza el valor mínimo de  $D_{st}$  ( $-87 nT$ ) el 13 de octubre a las 8:00 hrs y concluye el 16 de octubre a las 1:00 hrs. De acuerdo a la clasificación de (Aarons y Das Gupta, 1984) las 2 tormentas son de clase 1 porque ocurren después del amanecer. La figura 5.8 muestra las gráficas de los índices  $D_{st}$ ,  $G$  e  $I_{IONS}$  entre el 7 de octubre y el 16 de octubre, correspondiente a las tormentas número 15 y 16 del cuadro 5.1. En cuanto a las fuentes se refiere, no se aprecia una tendencia clara sobre la ocurrencia de centelleo en momentos específicos. Se tienen 9 fuentes con valor de  $G$  superior a 2 y menor a 3 distribuidos aleatoriamente sobre los días de las dos tormentas sin que aprecie algún efecto común a ellas. El resto de las fuentes tiene valores de  $G$  apenas superiores a 1. Para los satélites tenemos una situación similar. Sobresalen dos satélites con valores de  $I_{IONS}$  de 4.536 y 8.858 que ocurren antes y después del valor mínimo de  $D_{st}$  de la tormenta 15. Para la tormenta 16, no hay datos del MEXART ese día, además el comportamiento de las fuentes y del único satélite en los días de la fase de recuperación muestran un débil centelleo, lo cual valida la hipótesis de Aarons y Das Gupta sobre tormentas de categoría 1.



**Figura 5.8:** Tormentas geomagnéticas (15 y 16) del mes de octubre de 2012 y su relación con el centelleo observado por el MEXART en satélites y fuentes de radio cósmicas.

# Conclusiones

---

EN esta tesis se ha estudiado el impacto que tiene la ionosfera en las observaciones del radiotelescopio MEXART. Esto se realizó usando tránsitos de satélites con órbitas polares detectados por el MEXART que usamos como fuentes de radio puntuales. Perturbaciones en la señal de estos satélites (que atribuimos a la ionosfera) son usadas como principal parámetro para conocer el estado de la ionosfera en un momento y región del cielo específica. Definimos un índice de centelleo ionosférico  $I_{IONS}$  para hacer un análisis cualitativo de las características de la ionosfera a lo largo de todo el 2012. A grandes rasgos analizamos el comportamiento del centelleo ionosférico (IONS) como función de la hora local de observación, en presencia de tormentas geomagnéticas, así como la hora de ocurrencia del centelleo y el rango de frecuencia de IONS que se observa en el MEXART.

En primer lugar debemos hacer notar el efecto que tiene la ionosfera en las observaciones de CIP del MEXART. El radiotelescopio MEXART esta ubicado a una latitud de  $19^\circ$  que corresponde aproximadamente a  $25^\circ$  de latitud magnética, por lo que, aunque se encuentra en el límite entre latitud media y ecuatorial, exhibe en ocasiones características de ionosfera ecuatorial. Esto se debe, en parte, al hecho de que la frecuencia central del MEXART ( $139.65\text{ MHz}$ ) es apenas un orden de magnitud superior al valor típico de frecuencia crítica de la ionosfera ( $13\text{ MHz}$ ), que si bien es suficiente para atravesar la ionosfera sin mayor complicación, esta más expuesta a IONS que los observatorios Ooty y STEL que operan a una frecuencia central de  $327\text{ MHz}$ . Si a esto le agregamos que el centelleo ionosférico se intensifica con la ocurrencia de eventos esporádicos relacionados con la actividad solar, tenemos como resultado contaminación ionosférica en los datos de CIP. En las tres últimas décadas diversas publicaciones hacen énfasis en la importancia de considerar interferencias ionosféricas en el análisis de datos de CIP (Hapgood y Lucek, 1999; Pérez-Enríquez et al., 2008; Shishov et al., 2010). En particular, (Carrillo-Vargas et al., 2012) muestra un detallado análisis de las perturbaciones ionosféricas que son detectadas por el MEXART.

Encontramos que el centelleo observado en satélites tiene una clara dependencia nocturna. La mayor parte de los satélites que se tomaron en cuenta para hacer el análisis presentaron centelleo entre media noche y 8:00 hrs con un máximo de ocurrencia al amanecer

(entre 6:00 hrs y 8:00 hrs), resultado que es consistente con los resultados de (Aarons, 1982; Basu, 1981; Tanadori, 2001; Wernik et al., 2003) y con lo que se muestra en la figura 4.2. Se observa además en la figura 4.8 una hora de ocurrencia máxima durante el día (entre 14:00 hrs y 16:00 hrs) debido a que después de que el Sol pasa por el cenit la ionosfera alcanza su máxima tasa de ionización, lo cual causa centelleo en las señales que se transmiten a través de la ionosfera del lado día.

En cuanto a la frecuencia del centelleo se refiere, el valor más común para las oscilaciones detectadas en las señales de los satélites por el MEXART esta entre 0.6 y 0.8  $Hz$ . Recordemos que el CIP se caracteriza por frecuencias de centelleo en fuentes de radio estelares entre 0.1 y 3  $Hz$  (Hewish y Duffet-Smith, 1987; Manoharan y Ananthakrishnan, 1990; Carrillo-Vargas, 2007), entonces encontramos que hay un traslape de ambos fenómenos en frecuencia. En otras palabras, si se detecta una fuente de radio con centelleo, uno *a priori* no puede distinguir si se trata de CIP, de IONS o ambos. En ese sentido, la presencia de los satélites resulta ser un discriminante entre ambos. Si se observa centelleo en una fuente de radio cósmica pero no en un satélite que transite en un tiempo cercano a la fuente, podemos asegurar, a reserva de otras consideraciones, que se trata de CIP. En cambio, si tanto la fuente cósmica como el satélite presentan centelleo, lo único que podemos asegurar es que hay contaminación de la ionosfera en los datos.

La figura 4.10 muestra los valores de  $I_{IONS}$  como función de la hora local del MEXART. Vemos que no hay una dependencia del valor de centelleo ionosférico con la hora puesto que casi todos los valores del índice son menores a 15. Sin embargo resaltan 6 satélites con índice de centelleo mayor a 30. Todos estos valores corresponden a fechas en la que ocurrió una tormenta geomagnética. Por lo tanto, es claro que el centelleo ionosférico se intensifica cuando hay una perturbación magnética de gran escala. Si bien es cierto que los mecanismos que generan el centelleo de señales de radio que se propagan a lo largo de la ionosfera no son bien entendidos todavía, es claro que el campo geomagnético juega un papel muy importante en su origen, tanto que cuando el campo geomagnético esta perturbado, el centelleo se intensifica.

Por otra parte, se analizó individualmente el impacto que tienen las tormentas geomagnéticas en la ocurrencia e impacto del centelleo, encontrando que están altamente correlacionados. De los 53 satélites que conforman la base de datos completa de satélites con centelleo ionosférico, 40 de ellos ocurren en el transcurso de una tormenta geomagnética, claro indicio de que éstas últimas son el principal mecanismo que genera centelleo a la latitud en que se encuentra el MEXART. Para tener una idea más completa de la manera en que las disminuciones en la intensidad del campo magnético de nuestro planeta generan centelleo de señales tanto cósmicas como satelitales, usamos la hipótesis de (Aarons y Das Gupta, 1984) de que la hora en que inicia la fase de recuperación de la tormenta es un factor determinante en la generación o anulación de irregularidades que causan centelleo. De

---

acuerdo a esa hipótesis, de las 8 tormentas analizadas, 6 son de categoría 1, 2 de categoría 2 y ninguna de categoría 3. De las 6 tormentas categoría 1 no se puede confirmar o negar la hipótesis de Aarons y Das Gupta de que las irregularidades tienden a anularse ya que en todas ellas hubo distinto comportamiento del centelleo, tanto en fuentes como en satélites. Lo que podemos decir es que en los 6 casos hubo centelleo entre 24 y 48 horas después del mínimo valor de  $D_{st}$  sin que se apreciara una dependencia con la hora local.

Para las dos tormentas de clasificación 2 el comportamiento es distinto. Las tormentas número 9 y 14 del cuadro 2, cuyo mínimo valor de  $D_{st}$  ocurre después de media noche presentan un marcado aumento en el centelleo en las horas siguientes así como en la noche siguiente, confirmando la persistencia de las irregularidades inducidas por la tormenta geomagnética, hecho que confirma la hipótesis de Aarons y Das Gupta. Como no tenemos tormentas categoría 3 no podemos decir nada de ellas. Hay que hacer notar que solo se analizaron 8 tormentas, por lo que no podemos sacar muchas conclusiones a partir de tan poca información. Valdría la pena hacer este análisis para más tormentas en otros años con el fin de tener una mejor estadística y sacar conclusiones más completas con un mayor número de datos.

Finalmente debemos destacar la naturaleza y circunstancias en que se obtuvieron los datos. Originalmente el MEXART no fue planeado para que detectara o fuera afectado por los efectos de la ionosfera y por señales de satélites. En condiciones ideales estos dos efectos deberían mitigarse por completo de las observaciones para tener registros de fuentes de radio cósmicas de CIP sin contaminación de ninguna clase. Sin embargo no se puede negar el impacto que tienen en dichas observaciones. Una alternativa interesante es complementar las observaciones de CIP e IONS, de tal manera que se pueda tener una imagen global del sistema medio interplanetario-magnetosfera-ionosfera y así estudiar el impacto que tienen los eventos solares en el sistema Sol-Tierra. Además abre la puerta para profundizar en el estudio de la ionosfera en México.



# Bibliografía

---

- [1] BRAVO, S.: Plasmas en todas partes. La Ciencia desde México 126, FCE, México, 1997.



- 
- (González, 1994) Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A., Kamide, Y., Kroehl, H.W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T. y Vasyliunas, V. M. *What is a magnetic storm?*, J. Geophys. Res., 99(A4), 5771–5792.
  - (González-Esparza et al, 2004) González-Esparza, J. A., Carrillo, A., Andrade, E., Pérez, R. y Kurtz, S. *The MEXART interplanetary scintillation array in Mexico*. Geofísica Internacional, Vol. 43, Num. 1, pp. 61-73. 2004
  - (González-Esparza et al, 2006) González-Esparza, J. A., Carrillo, A., Andrade, E., Sierra, P., Vázquez, S., Rodríguez, C., Pérez Enríquez, R., Kurtz, S. y Blanco Cano, X. *Calibration testings of the MEXART antenna measuring solar transits*. Advances in Space Research, 38, 1824-1827, 2006
  - (Hapgood y Lucek, 1999) Hapgood, M. y Lucek, E. *Interplanetary scintillation and space weather monitoring*. ESTEC, Noordwijk, Netherlands. ESA WPP, 155, 487-490, 1999
  - (Hargreaves, 1993) Hargreaves, J. K. *The solar-terrestrial environment*. Cambridge University Press, UK, 1993
  - (Hewish et al, 1964) Hewish A., Scott P. F., y Willis D. *Interplanetary scintillation of small diameter radio sources*. Nature, 203, 1214-1217, 1964
  - (Hewish y Bravo, 1986) Hewish, A. y Bravo S. *The sources of large-scale heliospheric disturbances*. Solar physics, 106, 185-200, 1986
  - (Hewish y Duffet-Smith, 1987) Hewish, A. y Duffet-Smith, P. J. *A new method of forecasting geomagnetic activity and proton showers*. Planet. Space Sci., 35, 487-491, 1987
  - (Hewish, 1990) Hewish, A. *IPS-imaging and short-term solar-terrestrial predictions, Solar Terrestrial Predictions: Proceedings of a workshops at Leura, Australia*. NOAA, Environment Research Laboratories, Boulder, Colorado, 1, 81-101, 1989
  - (Hewish, 1992) Hewish, A. *Pulsar scintillation as a physical tool*. Phil. Trans. R. Soc. Lond. 341, 167-173, 1992
  - (Hey et al., 1946) Hey, J. S., Parsons, S. J. y Phillips, J. W. *Fluctuations in cosmic radiation at radio frequencies*. Nature, 158, 234, 1946
  - (Hines et al., 2001) Hines, C. O., Paghis, I., Hartz, T. R. y Fejer, J. A. *Physics of the Earth's Upper Atmosphere*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ USA, 2001
  - (Kivelson y Russell, 1995) Kivelson, M. G. y Russell, C. T. *Introduction to space physics*. Cambridge University Press, UK, 1993
-

- (Koster, 1972) Koster, J. R. *Equatorial scintillation*. Planet. Space Sci., 20, 1999-2014, 1972
- (Lanzerotti, 2007) Lanzerotti, L. J. *Space weather effects on communications*. Space weather physics and effects. Springer, Praxis Publishing, Chichester, pp 247-268, 2007
- (Lawrence et al., 1964) Lawrence, R. S., Little, C. G. y Chivers, H. J. *A survey of ionospheric effects upon earth-space radio propagation*. Proc. IEEE. Vol. 52, No. 1, pp. 4-27. 1964
- (Liu y Franke, 1986) Liu, C. y Franke, S. J. *Experimental and theoretical studies of ionospheric irregularities using scintillation techniques*. Radio Science, 21, 363, 1986
- (Makela, 2006) Makela, J. *A review of imaging low latitude ionospheric irregularity processes*. Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics. Vol. 68, 13, 1441-1458, 2006
- (Manoharan y Ananthkrishnan, 1990) Manoharan, P. K., Ananthkrishnan, S. *Determination of solar wind velocities using single-station measurements of interplanetary scintillation*. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 224, 691-695, 1990
- (Manoharan et al., 2000) Manoharan, P. K., Kojima, N., Gopalswamy, T. K. y Smith, Z. *Radial evolution and turbulence characteristics of a coronal mass ejection*. Astrophys. J., 530, 1061-1070, 2000
- (Manoharan et al., 2001) Manoharan P. K., Tokumaru, M., Pick, P., Subramanian, F. M., Ipvich, K., Schenk, M., Kaiser, L., Lepping, R. P. y Vourlidas, A. *Coronal mass ejection of 2000 July 14 flare event: Imaging from near-sun to earth environment*. Astrophys. J., 559, 1108-1189, 2001
- (Pérez-Enríquez et al., 2008) Pérez-Enríquez, R., Carrillo, A., Kotsarenko, A. y Cruz-Abeyro, J. A. L. *State of the inner heliosphere as given by the G index of interplanetary scintillation and the Dst index of geomagnetic activity*. Journal of Geophysical Research, 113, 2008
- (Prasad et al., 2005) Prasad, D. S. V. V. D., Rama Rao, P. V. S., Uma, G., Gopi Krishna, S. y Venkateswarlu, K. *Geomagnetic activity control on VHF scintillations over an Indian low latitude station, Waltair*. J. Earth Syst. Sci. 114, 437-441, 2005
- (Pryse et al., 1991) Pryse S. E., Kerseley L. and Russell, D. *Scintillation near the F layer trough over northern Europe*. Radio Science, 26, 1105-1114, 1991
- (Rastogi et al., 1981) Rastogi, R. G., Mullen, J. P. y MacKenzie, E. *Effect of geomagnetic activity on equatorial VHF scintillations and spread F*. Journal of Geophysical Research, 86, 3661-3664, 1981

- 
- (Ratcliffe, 1959) Ratcliffe, J. A. *The magneto - ionic theory and its application to the ionosphere*. Cambridge University Press, UK, 1959
  - (Ratcliffe, 1972) Ratcliffe, J. A. *An introduction to ionosphere and magnetosphere*. Cambridge University Press, UK, 1972
  - (Rickett, 1973) Rickett, B. J., *Power spectrum of density irregularities in the solar wind plasma*. Journal of Geophysical Research, 78, 1543, 1973
  - (Ryle y Hewish, 1950) 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. 110, 381-394, 1950
  - (Shishov et al., 2010) Shishov, V. I., Tyul'Bashev, S. A., Chasei, I. V., Subaev, I. A. y Lapaev, K. A. *Interplanetary and ionosphere scintillation monitoring of radio sources ensemble at solar activity minimum*. Sol. Phys. 265, 277-291, 2010
  - (Silberstein, 1959) Silberstein, R. *The prigin of the current nomenclature for the ionospheric layers*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics., 13, 382. 1959
  - (Smith et al., 1950) Smith, F. G., Little, C. G. y Lovell, A. C. B. *Origin of the fluctuations in the intensity of radio waves from galactic sources*. Nature, 165, 422-424, 1950
  - (Smith, 1990) Smith, A. *Radioexploración del Sol*. Editorial Reverte Mexicana, México, 1990
  - (Swarup, 1971) Swarup, R. T., Nature Phys. Sci., 230, 185, 1971
  - (Tanadori, 2001) Tadanori, O. *Science of space environment*. Ohmsha Ltd, Tokio, 2001
  - (Tascione, 1988) Tascione, Thomas F. *Introduction to the space environment*. Orbit book company, Florida, 1988
  - (Tokumar et al., 2000) Tokumary, M., Kojima, M., Fujiki, K. y Yokobe, A. *Three-dimensional propagation of interplanetary disturbances detected with radio scintillation measurements at 327 MHz*. Journal of Geophysical Research, 105, 10453-10453, 2000
  - (Tsunoda, 1988) Tsunoda, R. T. *High latitude F region irregularities: A review and syntesis*. Reviews of Geophysics, 26, 719, 1988
  - (Van Allen, 1984) Van Allen, J. A. *Genesis of the International Geophysical Year, in History of Geophysics*. Ed. C. S. Gillmor, American Geophysical Union, 4, 49, 1984
-

- (Villanueva, 2009) Villanueva, P. *Observaciones de fuentes de radio detectadas en el MEXART con una Matriz de Butler de 16 x 16*. Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009
- (Wernik et al., 2003) Wernik, A., W., Secan, J. A. y Fremouw, E. J. *Ionospheric irregularities and scintillations*. Adv. Space Res. Vol 31, No. 4, 971-981, 2003
- (Yeh y Liu, 1982) Yeh, K. C. y Liu, C. H. *Radio wave scintillations in the ionosphere*. Proc. IEEE, 70, 324-360, 1982
- (Zou, 2000) Zou, Y., Wang, D. *Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer*. I. Modelling. Annales Geophysicae. 18, 8, 927-944, 2000