

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y
NATURALES

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA Y ASTRONOMÍA

LICENCIATURA EN ASTRONOMÍA

**Ondas de radio kilométricas de tipo
II generadas por ECMs: relación
con estructuras interplanetarias y
grado de geoefectividad**

Autor:

FRANCO MANINI

Asesor:

DR. FERNANDO LÓPEZ

Co-Asesora:

DRA. HEBE CREMADES

Co-Asesor:

DR. CARLOS FRANCILE

SAN JUAN 12 de marzo de 2020

Índice general

Resumen	IV
Índice de figuras	VI
Índice de cuadros	IX
1. El Sol: Estructura y fenómenos de interés	1
1.1. Aspectos generales	1
1.2. La Atmósfera Solar	3
1.2.1. Fotósfera	3
1.2.2. Cromósfera	5
1.2.3. Región de transición	5
1.2.4. Corona	6
1.3. La Heliosfera	7
1.3.1. Estructuras presentes en el viento solar	7
1.3.2. Emisiones de radio generadas por ondas de choque	9
1.3.3. Actividad geomagnética	10
2. Instrumentación	14
2.1. Wind/WAVES	14
2.1.1. WAVES	14
2.2. Instrumentación complementaria	15
2.2.1. ACE	15
2.2.2. STEREO	16
2.2.3. SOHO	17
3. Datos utilizados y metodología	20
3.1. Espectros dinámicos	20
3.2. Catálogos utilizados	22
3.3. Metodología	23

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	II
4. Análisis de ECMs asociadas	31
5. Resultados	34
5.1. Indicador de actividad geomagnética y la emisión km en radio tipo II	34
Agradecimientos	37
Bibliografía	38

*After sleeping through a hundred million centuries
We have finally opened our eyes on a sumptuous planet, sparkling with color, bountiful with life
Within decades we must close our eyes again
Isn't it a noble and enlightened way of spending our brief time in the sun
To work at understanding the universe and how we have come to wake up in it?
Nightwish - The Greatest Show on Earth*

Resumen

El Sol es quizás el objeto astronómico que más tiempo lleva siendo estudiado por el ser humano, y el que más adoración ha recibido por las diferentes culturas antiguas. Uno estaría tentado a pensar que, debido a esto, deberíamos conocer todo sobre nuestra estrella. Sin embargo esto no es así: Aún quedan muchos misterios por ser resueltos.

Es bien sabido que el Sol es un escenario vibrante donde ocurren fenómenos físicos de forma frecuente, y es en cierta forma un laboratorio con el cual se pueden ensayar y corroborar teorías físicas. Al estar nuestro planeta orbitando alrededor del mismo, es esperable que la actividad del Sol repercuta de forma casi directa sobre la Tierra, así como en el resto de los cuerpos celestes bajo su influencia. Una de las tantas formas de actividad solar se manifiesta mediante las llamadas Eyecciones Coronales de Masa (ECM). Éstas son grandes erupciones de plasma caliente y energético que se libera al espacio en periodos cortos de tiempo. Cuando se detectan in situ en el medio interplanetario, se llaman Eyecciones Coronales de Masa Interplanetarias (ECMI). Éstas tienen una alta relevancia en las condiciones de la meteorología del espacio. En particular, una ECMI viajando en dirección a la Tierra puede afectar significativamente el entorno de nuestro planeta, generando tormentas geomagnéticas y acarreando una serie de efectos indeseables para la sociedad. Es por esto que su estudio es de fundamental importancia.

Algunas ECMs, usualmente las más rápidas, están acompañadas de una onda de choque magnetohidrodinámica (MHD) que viaja por delante del frente de la ECM. Durante su propagación, la onda de choque excita electrones, los cuales emiten radiación en radio de tipo II a la frecuencia local del plasma. Esta emisión comienza a frecuencias de aproximadamente 400 MHz (longitudes de onda métricas) a distancias cercanas al Sol, hasta llegar a frecuencias de 300-30 kHz (longitudes de onda kilométricas) para distancias heliocéntricas comprendidas en el rango de 20-170 radios solares. La emisión en radio de tipo II se genera durante la interacción de ondas de choque MHD que viajan por delante de las ECMs con la estructura frontal de estos eventos (Reiner et al., 1997; Bale et al., 1999). La estrecha relación entre la emisión en radio de tipo II con la existencia de ondas de choque generadas por ECMs, permitió relacionar estos fenómenos. En base al análisis de 92 eventos que presentaron onda de choque MHD y emisión kilométrica en radio, Cremades and St. Cyr O.C. and Kaiser (2007) desarrollaron un método empírico para determinar la velocidad de la onda de choque, a partir de la emisión kilométrica de tipo II asociada. Luego, Cremades et al. (2015) basándose en los mismos datos (en ese caso sobre 71 eventos), desarrollaron un método predictivo para determinar la hora de arribo a la Tierra de una onda de choque y su ECMI, en base a la observación de su emisión kilométrica.

El estudio de la emisión de ondas de radio kilométricas resulta de interés fundamental ya que nos permite analizar propiedades del medio interplanetario como su densidad, a la vez que guarda información de vital importancia respecto a los procesos físicos involucrados en la interacción entre las ECMs con sus ondas de choque asociadas. Uno de los principales interrogantes que permanecen sin respuesta es el por qué no todas las ondas de choque que acompañan a ECMs producen emisiones de radio de tipo II kilométricas, y cuáles son las condiciones necesarias para que se produzca esta emisión en radio.

El objetivo general del trabajo es tratar de explicar qué determina que una onda de choque asociada a una ECM produzca ondas de radio kilométricas detectables, y qué características presenta esta emisión. Para ello, se construyó una pormenorizada base de datos que interrelaciona

las características de emisiones de radio de baja frecuencia con estructuras interplanetarias detectadas in situ potencialmente asociadas a las emisiones de radio. Los datos utilizados en este trabajo provienen fundamentalmente del detector TNR perteneciente al instrumento WAVES a bordo de la misión Wind, de la NASA. Se inspeccionaron los espectros dinámicos para el periodo que abarca desde el 01/01/2000 hasta el 31/12/2012 (un espectro dinámico por día) de modo de abarcar un ciclo solar completo. Éstos se analizaron minuciosamente para identificar eventos no detectados previamente, es decir, que no hayan estado reportados por el catálogo oficial de emisiones de radio de tipo II de Wind/WAVES. Todos los eventos de tipo II de baja frecuencia -kilométricos- identificados fueron correlacionados con ondas de choque detectadas in situ así como también con las propiedades de las ECMIs que las originaron, mediante su comparación con los eventos caracterizados por Nieves-Chinchilla et al. (2018) y Richardson and Cane (2010). Se busca de esta manera lograr comprender las condiciones que dan origen a emisiones de radio de tipo II de baja frecuencia, así como también aquellas que no favorecen su producción y/o detección.

Para 21 eventos comprendidos entre los años 2011 y 2012 para los que fue posible identificar la ECM asociada a la emisión en radio, cuando estuvieron disponibles, se compilaron los valores de masa y velocidad a partir de catálogos correspondientes a las distintas misiones. A modo de identificar observacionalmente los eventos que pudieron dar origen a la emisión en radio, se revisaron las imágenes coronográficas proporcionadas por los instrumentos COR1 y COR2 a bordo de la misión STEREO, y de C2/C3 de la misión SOHO.

Finalmente, se buscó la asociación entre el índice de intensidad de tormenta geomagnética DsT (Zhang et al., 2004), y emisión en radio kilométrica de tipo II para estudiar la geoeffectividad de eventos con una ECMI o nube magnética asociada a partir de su emisión en radio.

Se obtuvieron 105 eventos de tipo II kilométricos, producto del análisis de los espectros dinámicos de TNR, de los cuales se pudieron asociar 60 a una onda de choque. 46 eventos fueron reportados como ECMI, y de estos, 36 poseen características de nube magnética. 32 eventos no habían sido reportados previamente por el catálogo de tipo II kilométrico de Wind/WAVES, ampliando así la base de datos existentes sobre estos eventos. Para 74 eventos se pudo obtener los valores del Dst correspondiente. Los resultados indican que las tormentas geomagnéticas más intensas se dieron conjuntamente en periodos cercanos al máximo de actividad solar. Sin embargo, también se detectaron algunos eventos de gran intensidad en momentos en que la actividad del ciclo solar se encontraba en disminución.

Además, se pudieron asociar 16 eventos de radio de tipo II a las ECMs que les dieron origen, entre los años 2011 y 2012, y se encontraron propiedades tales como masa, energía, velocidad, ancho angular para cada una.

Índice de figuras

1.1.	Representación de las diferentes regiones del interior y de la atmósfera solar. Imagen tomada de https://www.slideshare.net/islm2/el-soltrabajo-45568512/6?smtNoRedir=1	
1.2.	Perfil de densidad y temperatura de la atmósfera solar. Tomado de Lang (2001).	3
1.3.	Opacidad atmosférica en función de la longitud de onda.	4
1.4.	Irradiancia solar y bandas de absorción provocadas por moléculas atmosféricas. .	4
1.5.	a) Disco Solar completo observado en luz visible por el Mauna Loa Solar Observatory. b) Mancha solar. c) Fácúlas. d) gránulos. Tomado de (Cremades, 2005). .	5
1.6.	Ciclo solar 23. Los puntos rojos indican el valor promedio de manchas para cada mes, en tanto que la línea continua azul representa un promedio corrido de 13 meses. Los datos se obtuvieron de http://sidc.oma.be/silso/	6
1.7.	Izquierda: Imagen de un eclipse total de Sol, donde se puede apreciar la corona de color blanco y la cromósfera en tonos rojizos, sobre el borde del disco. Derecha: Imagen de la corona solar captada por el coronógrafo SOHO/LASCO el día 27/02/2000, donde se aprecia una ECM al norte. El pequeño círculo blanco en el centro del disco ocultador -y de la imagen- representa el tamaño y ubicación del disco solar.	6
1.8.	Dibujo esquemático de una ECMI mostrando además la onda de choque (<i>Shock</i> en inglés) y la región de vaina (<i>Sheath region</i> en inglés). La ECMI mostrada aquí posee una estructura de cuerda de flujo, no siempre detectada in-situ. Tomado de Kilpua et al. (2017).	8
1.9.	Datos in situ obtenidos por la misión ACE. Los paneles muestran, de arriba hacia abajo: (a) magnitud del campo magnético, ángulos de longitud (b) y latitud (c) del campo magnético en coordenadas GSM, (d) velocidad del viento solar, (e) temperatura de los protones (medida en negro, esperada en rojo), y (f) beta del plasma. El ángulo $\theta_B = 90^\circ$ (ó $\theta_B = 270^\circ$) se define con dirección al este (oeste), y $\phi_B = +90^\circ$ (ó $\phi_B = -90^\circ$) se define hacia el norte (sur). Izquierda: ECMI con nube magnética en abril del 2004. Derecha: ECMI sin nube magnética en diciembre de 2004. Las líneas continuas verticales color rojo muestran el intervalo que abarcan las ECMIs, y las líneas punteadas rojas el intervalo con características de NM. La línea azul punteada muestra el instante de la onda de choque. Tomado de Kilpua et al. (2017)	8
1.10.	Ejemplo de emisión de radio de tipo II el día 26 de diciembre de 2011. Panel superior: primeras horas del evento, detectado en el rango de alta frecuencia por el instrumento RAD2. Panel inferior: RAD1 complementa a RAD2, agregando el rango 1024-100 kHz. Cortesía Consorcio Wind/WAVES.	11

1.11. Evolución de parámetros del medio interplanetario e índices de actividad geomagnética durante el paso de una ECMI. La Figura muestra: a) La magnitud del campo magnético, b) La componente norte-sur del campo magnético en coordenadas GSM, c) Velocidad del viento solar, d) Componente del campo eléctrico del viento solar, e), f) y g) corresponden respectivamente a los índices DsT, AE, y Kp. La región entre líneas verticales negras es la correspondiente a la nube magnética. La región entre la línea a trazos roja y la primer línea vertical negra corresponde a la vaina de plasma formada entre la onda de choque y la nube magnética. Tomado de Kilpua et al. (2017).	13
2.1. Representación de la nave <i>Wind</i> . Imagen cortesía del consorcio WIND/WAVES. .	15
2.2. Representación artística de la misión STEREO, mostrando la órbita y la ubicación de las naves A y B en diferentes años. Imagen cortesía del consorcio STEREO (NASA).	17
2.3. Imagen ilustrativa de las naves STEREO. Se muestra la ubicación de los paquetes de instrumentos descritos en el texto. Imagen cortesía del consorcio STEREO (NASA).	17
2.4. Ejemplo de una ECM observada en los campos visuales de los coronógrafos SOHO/LASCO C2 (campo visual interno) y C3 (campo externo). El disco blanco central indica el limbo solar. Imagen cortesía del consorcio SOHO/LASCO. . . .	19
3.1. Espectro dinámico de los días 12 al 14 de febrero del 2004. Se puede observar una gran cantidad de eventos de radio superpuestos entre sí.	21
3.2. Espectro dinámico para los días 2 al 4 de diciembre de 2009. Se observa que para dicha época el medio interplanetario estaba mucho más calmo. La línea en tonos azulados corresponde a la <i>plasma frequency line</i> o PFL, que corresponde a la frecuencia característica del plasma en la nave a la cual oscila el plasma no perturbado, en torno a los 24 khz.	21
3.3. Espectro dinámico de los días 23 y 24 de enero de 2012, donde además se observa un evento de tipo II (ver texto para detalles).	22
3.4. Espectro dinámico de los días 18 y 19 de abril de 2011, donde se observa en la parte superior del gráfico (hacia altas frecuencias, aproximadamente entre las 18:00 GMT del día 18 y las 6:00 GMT del día 19) un evento que no decae sustancialmente en frecuencia y por lo tanto no puede asegurarse que corresponde a una onda de choque generada por una ECMI.	24
3.5. Espectro dinámico del día 10 de octubre de 2009, donde se observa entre las 9:00 y 13:00 GMT un evento atípico que fue catalogado como emisión aislada, y por lo tanto no puede asegurarse que sea una emisión de radio de tipo II asociada a una onda de choque delante de una ECMI.	24
4.1. Posiciones de las naves STEREO para el periodo en que ocurrieron las ECMs analizadas. Panel izquierdo: ubicación el día 15/04/2011. Panel derecho: ubicación el día 28/10/2012.	31
4.2. Se muestra información de los eventos para los cuales se pudo asociar una ECM a las emisiones en radio detectadas en este trabajo. Los eventos corresponden a los años 2011-2012. Ver texto para detalles.	33
5.1. Histograma correspondiente a la totalidad de eventos detectados en este trabajo, por año. Se aprecia una gran cantidad de eventos en los máximos del ciclo solar 23 y 24, así como un número considerable de eventos en el año 2005, cuando el ciclo 23 estaba en la fase descendente.	35

5.2. La gráfica compara para el período 2000-2012, el número de manchas solares promediado cada 13 y el número anual de eventos de tipo II detectados en este trabajo. Ambas cantidades fueron normalizadas para mejorar su visualización. El número de manchas solares es provisto por el observatorio Real de Bélgica. . . .	35
5.3. Valores de Dst en función del tiempo. En el eje vertical está graficado el valor que toma el Dst. Cabe aclarar que mientras más negativo es el Dst, la tormenta es mayor. Existe una clara distribución en torno a los máximos que delimitan el ciclo solar 23.	36

Índice de cuadros

1.1. Características macroscópicas del	1
1.2. Intensidad de tormentas geomagnéticas	12
5.1. Resumen de los valores encontrados para los eventos analizados. Se agruparon los resultados de acuerdo a las diferentes clasificaciones consideradas en este trabajo.	36

Capítulo 1

El Sol: Estructura y fenómenos de interés

Antes de intentar explicar detalladamente los fenómenos analizados en este trabajo final, es propicio comenzar por algunas cuestiones básicas. Vamos a abarcar distintos conceptos introductorios que nos van a permitir una mejor comprensión de los temas aquí tratados.

1.1. Aspectos generales

El Sol, nuestra estrella más cercana, aquella que permitió el desarrollo de la vida en la Tierra y que ha sido motivo de adoración desde sus orígenes, es un cuerpo que a simple vista parece estático e inamovible. Sin embargo, al comenzar su estudio hace varios siglos, los primeros astrónomos descubrieron que este cuerpo celeste es un vibrante escenario donde todo el tiempo suceden una gran cantidad de procesos físicos.

El Sol es una estrella de tipo espectral G2 con una clase de luminosidad V, es decir, una estrella enana amarilla de secuencia principal, con una temperatura superficial efectiva de 5778 K, que está convirtiendo hidrógeno en helio en su núcleo por el mecanismo de la fusión nuclear.

La Tabla 1.1 presenta algunos valores característicos del Sol.

El Sol posee una estructura interna, separada en 4 regiones, de acuerdo a los diferentes procesos que ocurren en cada una. Si comenzamos el análisis desde la parte más interna de nuestra estrella, tenemos que comenzar hablando del núcleo. El núcleo solar es la región central donde, como se dijo previamente, suceden reacciones nucleares, que liberan la energía que finalmente emana de la superficie en forma de luz visible y radiación a otras frecuencias del espectro electromagnético. Las reacciones son altamente sensibles a la temperatura y densidad de plasma solar. La temperatura en el centro del Sol es de unos 15 MK, y su densidad de unos 150 g/cm^3 , con ambas cantidades disminuyendo a medida que nos alejamos del centro. La quema de combustible nuclear casi no sucede en el límite superior del núcleo (aproximadamente 25 % de la distancia del centro a la superficie, o 175000 km del centro). En ese punto la temperatura tiene sólo la

Distancia a la Tierra	149597870 km (1 UA)
Masa	$1,989 \pm 0,0003 \times 10^{30} \text{ kg}$
Radio	$(6,96 \pm 0,001) \times 10^8 \text{ m}$
Densidad media	$1,408 \text{ g/cm}^3$
Aceleración gravitatoria	274 m/s^2
Luminosidad	$(3,844 \pm 0,001) \times 10^{26} \text{ W}$

Cuadro 1.1: Características macroscópicas del Sol.



Figura 1.1: Representación de las diferentes regiones del interior y de la atmósfera solar. Imagen tomada de <https://www.slideshare.net/islm2/el-soltrabajo-45568512/6?smtNoRedir=1>

mitad del valor que en el centro, y la densidad cae a unos 20 g/cm^3 . En estrellas como el Sol, la quema nuclear tiene lugar a través de un proceso de 3 etapas, llamada cadena protón-protón.

Siguiendo nuestro análisis, la siguiente zona posterior al núcleo se llama **zona radiativa**. Ésta se extiende desde el límite superior del núcleo hasta la tacoclina en la base de la zona de convección (es decir, desde 0.25 a $0.70 R_{\odot}$, donde un R_{\odot} es un radio solar. La zona radiativa está caracterizada por el método de transporte de energía, la radiación. La energía generada en el núcleo es transportada por los fotones que van colisionando y rebotando de partícula en partícula a través de la zona radiativa. Aunque los fotones viajan a la velocidad de la luz, ellos colisionan tantas veces a través de este material denso que a un fotón individual le toma aproximadamente 1 millón de años llegar a la tacoclina. La densidad cae de 20 g/cm^3 en la base de la zona radiativa a sólo $0,2 \text{ g/cm}^3$ en el límite superior. La temperatura en tanto, cae de unos 7 MK a 2 MK en la misma distancia.

La **tacoclina** es la zona que se encuentra entre las zonas radiativa y convectiva. Los movimientos de fluidos que se encuentran en la zona convectiva van desapareciendo en el borde superior de esta capa hacia el límite inferior, donde las condiciones se equiparan a la zona radiativa calma. Esta fina capa ha tenido mayor protagonismo en años recientes debido a los detalles que se han ido descubriendo en ella. Ahora se cree que el campo magnético solar se genera por un dínamo magnético en ésta zona. Los cambios en las velocidades de los fluidos a través de la capa, pueden estirar líneas de campo magnético y hacerlas más fuertes. Este cambio de velocidad del fluido le da el nombre de tacoclina a esta capa. Trabajos actuales sugieren que existen cambios grandes en la composición química a través de la tacoclina.

La **zona de convección** es la capa más externa del interior solar. Se extiende desde una profundidad de 200000 km hasta la superficie visible. En la base de ésta la temperatura es de 2 MK , lo cual es lo suficientemente “frío” para que los iones más pesados, como carbono, nitrógeno, oxígeno, calcio y hierro, puedan mantener algunos de sus electrones. Esto hace al material más opaco, de modo que es más difícil que la radiación pueda atravesarlo. Esto atrapa el calor, que en última instancia hace al fluido inestable y comienza a moverse hacia arriba, equivalente a una olla de agua hirviendo. Los movimientos convectivos llevan calor de forma bastante rápida hacia la superficie. El fluido se expande y se enfría mientras se eleva. En la superficie visible (la fotosfera) la temperatura ha disminuido a sólo 5700 K y la densidad es de $0,0000002 \text{ g/cm}^3$ (o $1/10000$ veces la densidad del aire a nivel del mar). Los movimientos convectivos son visibles en la superficie como granulaciones y super-granulaciones.

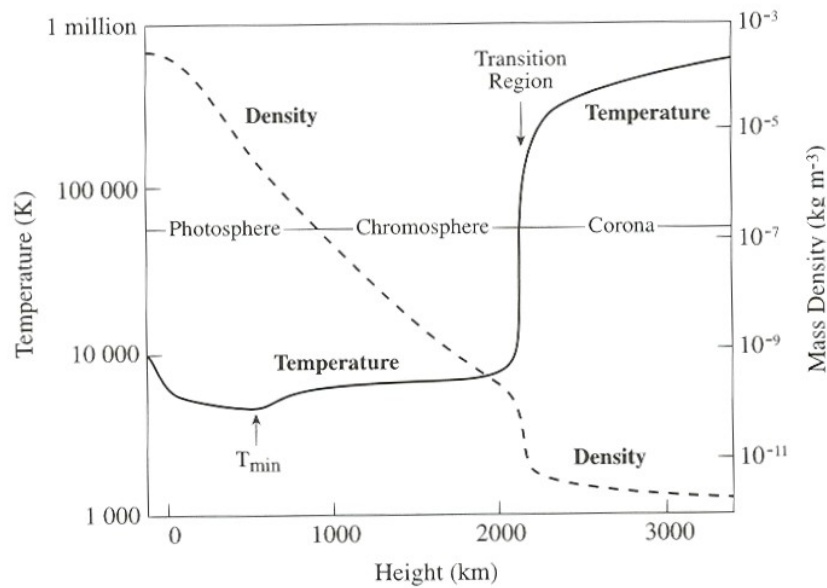


Figura 1.2: Perfil de densidad y temperatura de la atmósfera solar. Tomado de Lang (2001).

1.2. La Atmósfera Solar

La atmósfera del Sol está compuesta por diferentes regiones de plasma caliente y gases dominados por campos magnéticos. Varían ampliamente entre ellas en lo que respecta a sus características físicas. Éstas capas se denominan: fotosfera, cromósfera, región de transición y corona. Si bien aquí se refiere a ellas como “capas”, es preciso tener en cuenta que existe un solapamiento entre las mismas, siendo gradual la modificación de sus propiedades al trasladarse de una región a otra. Esto se pone de manifiesto en la Figura 1.2, donde se muestra la variabilidad de la temperatura y la densidad en función de la altura con respecto a la superficie solar, comenzando en la base de la fotosfera.

Como cada región posee diferentes temperaturas, y ésta a su vez está relacionada con la energía, es esperable que cada región pueda ser observada en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. Algunas regiones del espectro electromagnético, en particular las de altas energías, no pueden ser detectadas desde Tierra debido a la opacidad de nuestra atmósfera en esas frecuencias (figura 1.3). Es por esto que para obtener una descripción completa del Sol en todo el espectro electromagnético, se torna necesario realizar observaciones desde el espacio, sorteando así la limitación impuesta por nuestra atmósfera. En cuanto a las partículas energéticas solares, son bloqueadas en su mayoría por la magnetósfera terrestre, por lo que su detección y caracterización se lleva a cabo de manera *in situ* por instrumentos también a bordo de naves espaciales.

1.2.1. Fotosfera

El disco visible del Sol, llamado en ocasiones la “superficie solar”, puede ser considerado la base de la fotosfera. Esta es la parte más baja y densa de la atmósfera solar con un espesor de unos 400 km. A pesar de ser muy fina, es tan opaca que muestra la apariencia de un cuerpo sólido. El flujo espectral, es decir, la distribución de energía en función de la longitud de onda λ , se asemeja a un cuerpo negro con $T_{eff}=5778$ K (ver figura 1.4), y la densidad es de unos $10^{-6}g/cm^3$. al desplazarse hacia afuera, es decir, hacia la cromósfera, la temperatura y la densidad disminuyen. La temperatura se hace mínima, del orden de 4500 K en el límite entre la fotosfera y la cromósfera (figura 1.2).

La fotosfera irradia la mayor parte de la energía del Sol, abarcando mayormente un rango de

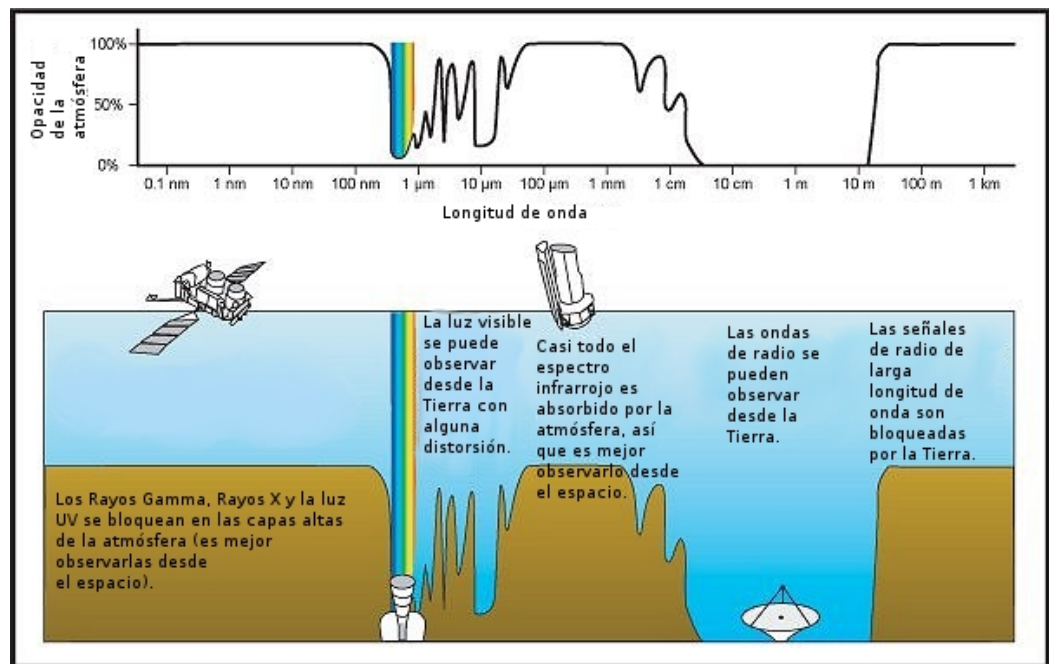


Figura 1.3: Opacidad atmosférica en función de la longitud de onda.

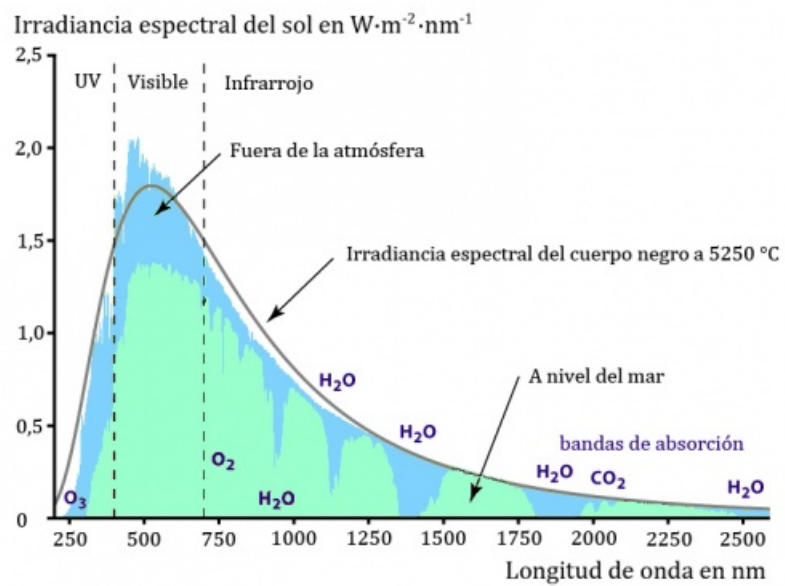


Figura 1.4: Irradiancia solar y bandas de absorción provocadas por moléculas atmosféricas.

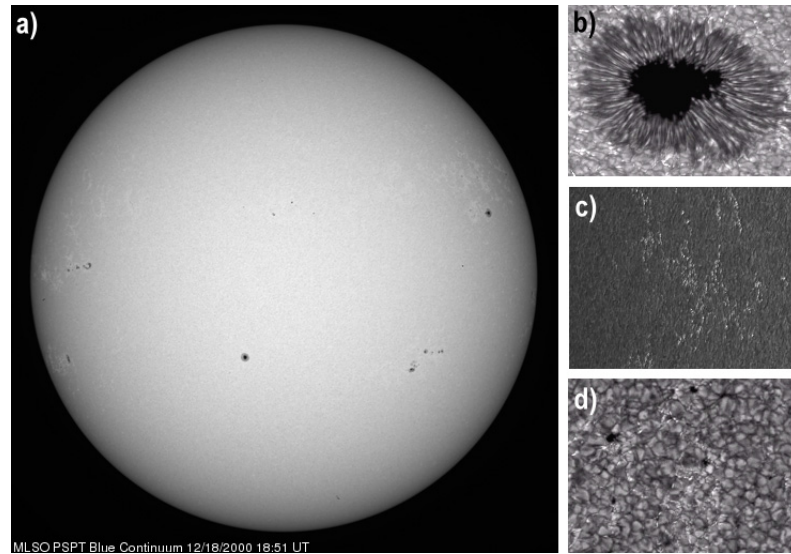


Figura 1.5: a) Disco Solar completo observado en luz visible por el Mauna Loa Solar Observatory. b) Mancha solar. c) Fáculas. d) gránulos. Tomado de (Cremades, 2005).

longitudes de onda que va desde los 200 nm (ultravioleta) a algunos μm (infrarrojo), cubriendo la zona visible del espectro.

Los principales rasgos que se observan en la fotosfera son: manchas solares, gránulos, súper-gránulos y fáculas (ver figura 1.5).

La variación observada en la cantidad de manchas solares en la fotosfera con el tiempo, dio lugar a lo que se conoce como ciclo solar. Éste es un ciclo que dura aproximadamente 11 años y que modula la actividad solar, pasando por periodos de mínima y máxima actividad. En la figura 1.6 puede verse la variación de la misma, usando datos de uso público de la base de datos *Sunspot Index and Long-term Solar Observations* (SILSO), proporcionados por el Observatorio Real de Bélgica.

1.2.2. Cromósfera

La capa con un espesor de unos 2500 km sobre la fotosfera se llama cromósfera. Ésta posee una temperatura de unos 4500 K en su base, la cual coincide con la parte superior de la fotosfera. Es muy débil tenue debido a que la atmósfera se hace transparente (ópticamente delgada) en el espectro continuo. Puede ser observada durante un eclipse total de Sol cuando la Luna bloquea la luz fotosférica del disco solar visible, observando una banda angosta y de tonos rosas en el limbo del Sol, lo que le da el nombre a esta región. La cromósfera es ópticamente fina en líneas intensas como $\text{H}\alpha$ y CaII K .

Los rasgos más prominentes de esta región son los filamentos, prominencias, espículas y la red cromosférica asociada con los límites de las células super-granulares. Los filamentos y prominencias corresponden al mismo fenómeno visto desde diferentes perspectivas y con diferente fondo. Los filamentos se observan en absorción como trazas oscuras contra el disco brillante, mientras que las prominencias se ven brillantes cuando se encuentran por encima del limbo, al estar en emisión contra el espacio oscuro del fondo.

1.2.3. Región de transición

Ésta es considerada la interfase entre la cromosfera más fría y la corona súper caliente. Aquí la temperatura y densidad cambian drásticamente, como se aprecia en la Figura 1.2. Comenzando por la fotosfera, la temperatura cae suavemente hasta la parte superior de la cromósfera, de a poco aumenta en la cromósfera antes de incrementarse drásticamente en la zona de transición,

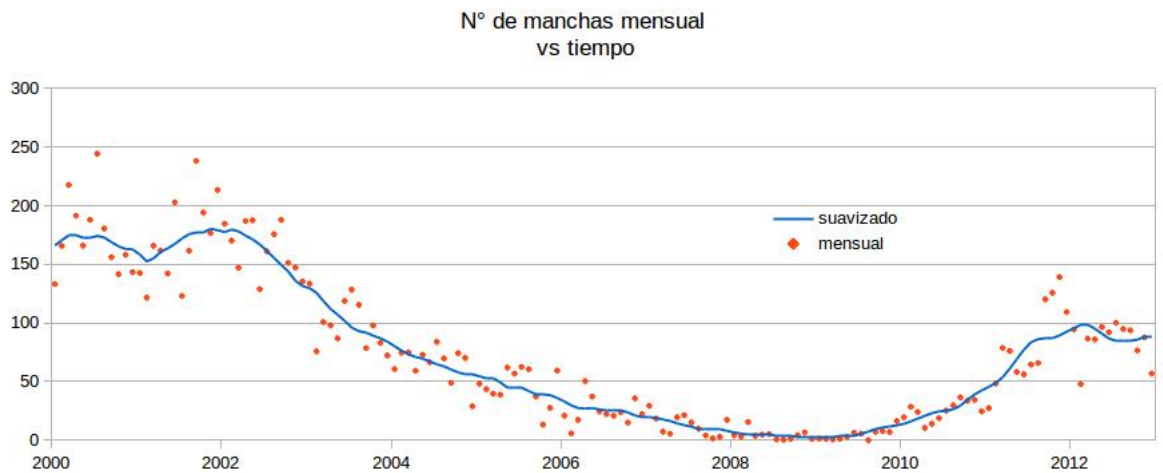


Figura 1.6: Ciclo solar 23. Los puntos rojos indican el valor promedio de manchas para cada mes, en tanto que la línea continua azul representa un promedio corrido de 13 meses. Los datos se obtuvieron de <http://sidc.oma.be/silso/>.

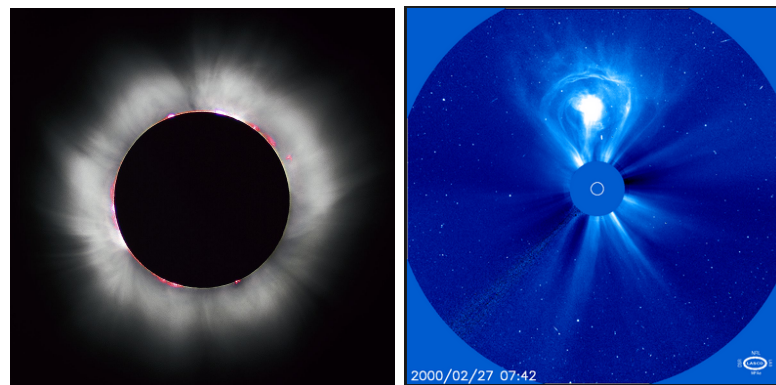


Figura 1.7: Izquierda: Imagen de un eclipse total de Sol, donde se puede apreciar la corona de color blanco y la cromósfera en tonos rojizos, sobre el borde del disco. Derecha: Imagen de la corona solar captada por el coronógrafo SOHO/LASCO el día 27/02/2000, donde se aprecia una ECM al norte. El pequeño círculo blanco en el centro del disco ocultador -y de la imagen- representa el tamaño y ubicación del disco solar.

donde pasa de 10000 K a algunos millones de grados K. A su vez, la densidad cae abruptamente de la fotosfera a la corona (figura 1.2). La longitud de onda apropiada para observar esta región es entre 50 a 160 nm, que pertenece al rango ultravioleta. En el espectro aparecen numerosas líneas de emisión y un continuo, originado por los iones que coexisten a diversas temperaturas en el rango antes mencionado.

1.2.4. Corona

La corona es la región más extendida de la atmósfera solar. La corona sólo puede ser observada en luz visible durante un eclipse solar total (ver Figura 1.7), o por medio de un instrumento llamado coronógrafo, el cual crea un eclipse artificial a través de un disco ocultador que bloquea la intensa luz fotosférica. El brillo en “luz blanca” exhibido por la corona es el resultado de la dispersión Thomson por parte de los electrones presentes en ella. Estos electrones reflejan la luz fotosférica, y se organizan de acuerdo a las líneas de campo magnético que dominan la corona solar. Por lo tanto, el brillo observado en la corona solar es representativo de la manera en que

están organizados los campos magnéticos coronales.

Eyecciones coronales de masa:

Las eyecciones coronales de masa (ECMs) son enormes erupciones de plasma que se propagan desde la atmósfera solar al espacio interplanetario, en el transcurso de minutos a horas (ver Figura 1.7). Se detectan mediante coronógrafos de luz blanca, cuyo principio de funcionamiento consiste en el bloqueo del disco solar para poder vislumbrar la tenue corona. El descubrimiento de estos eventos es atribuido a los coronógrafos a bordo de la nave OSO-7 (Orbiting Solar Observatory) y Skylab, en 1973, las cuales observaron una docena y unas 100 ECMs respectivamente. El número diario de ECMs observadas varía sustancialmente según el ciclo solar (presentado en la figura 1.6).

1.3. La Heliosfera

La heliosfera es la región del espacio que se encuentra dominada por el viento solar y por su campo magnético, formando así una especie de burbuja que se proyecta hasta más allá de la órbita de Plutón, y que protege al sistema solar del viento interestelar. El viento solar, que posee velocidades supersónicas, llena este espacio dominando hasta lo que se conoce como “heliopausa”, que es la región donde el viento solar deja de tener la fuerza suficiente como para empujar el medio interestelar, y la velocidad del viento solar pasa a ser subsónica. Las regiones más estudiadas de la heliosfera abarcan el espacio interplanetario de nuestro sistema solar, y en particular, el trayecto desde el Sol y hasta 1 UA. Como parte del viento solar pueden encontrarse diversas estructuras, algunas de las cuales se enumerarán brevemente a continuación. Asimismo, secciones posteriores se introduce el concepto de tormenta geomagnética.

1.3.1. Estructuras presentes en el viento solar

Eyecciones coronales de masa interplanetarias

Las eyecciones coronales de masa interplanetarias (ECMIs) son estructuras de gran escala formadas por plasma magnetizado que se propagan por el medio interplanetario. Corresponden a ECMs detectadas in situ por sondas en el medio interplanetario. Las ECMIs presentan características diferentes a las ECMs y al ambiente del viento solar donde están inmersas. Un dato interesante es que la existencia de estos eventos fue propuesta antes de la era espacial y del descubrimiento de las ECMs. Algunas especulaciones surgieron de intentos de explicar las perturbaciones geomagnéticas y los llamados decrecimientos Forbush en la intensidad de los rayos cósmicos. Las primeras detecciones se hicieron en la década de 1970, sugiriendo estructuras con forma de burbuja o de helicoide detrás de las ondas de choque interplanetarias (ver un esquema más actual en la figura 1.8).

La figura 1.9 presenta dos eventos distintos a gran escala, ambos clasificados como ECMI. Las líneas sólidas rojas marcan el comienzo y final de estas ECMIs, de la misma manera en que se definen en la lista de Richardson y Cane (Richardson and Cane, 1993; Richardson and Cane, 2010) que será descrita más adelante. La ECMI de la izquierda posee además una onda de choque (línea azul punteada), caracterizada por un abrupto y simultáneo incremento en la magnitud del campo magnético, velocidad del viento solar y temperatura.

El panel (d) de la figura 1.9 muestra cómo en ambos ejemplos la velocidad del viento solar decrece desde el borde frontal hasta el posterior de la ECMI. Ésta es una característica común en estos eventos, que indica que estas estructuras se expanden mientras se propagan. La expansión lleva a una baja temperatura de los protones, lo cual fue notado por primera vez por Gosling et al. (1973), y es, hoy en día, uno de los parámetros más usados para distinguir una ECMI. Richardson and Cane (1995) usaron una relación entre velocidad del viento solar y temperatura

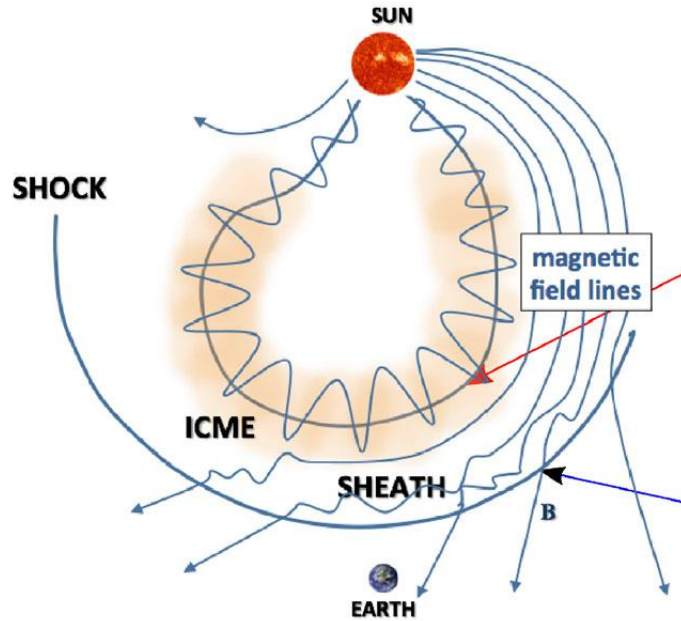


Figura 1.8: Dibujo esquemático de una ECMI mostrando además la onda de choque (*Shock* en inglés) y la región de vaina (*Sheath region* en inglés). La ECMI mostrada aquí posee una estructura de cuerda de flujo, no siempre detectada in-situ. Tomado de Kilpua et al. (2017).

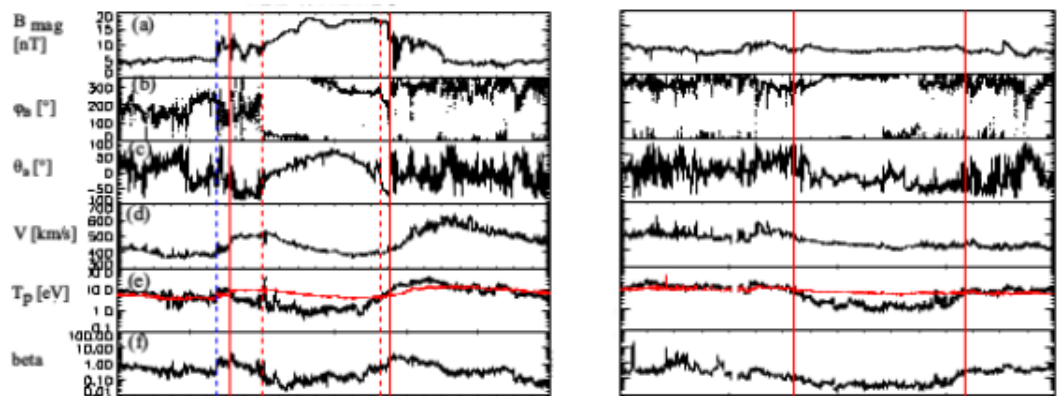


Figura 1.9: Datos in situ obtenidos por la misión ACE. Los paneles muestran, de arriba hacia abajo: (a) magnitud del campo magnético, ángulos de longitud (b) y latitud (c) del campo magnético en coordenadas GSM, (d) velocidad del viento solar, (e) temperatura de los protones (medida en negro, esperada en rojo), y (f) beta del plasma. El ángulo $\theta_B = 90^\circ$ (ó $\theta_B = 270^\circ$) se define con dirección al este (oeste), y $\phi_B = +90^\circ$ (ó $\phi_B = -90^\circ$) se define hacia el norte (sur). Izquierda: ECMI con nube magnética en abril del 2004. Derecha: ECMI sin nube magnética en diciembre de 2004. Las líneas continuas verticales color rojo muestran el intervalo que abarcan las ECMI, y las líneas punteadas rojas el intervalo con características de NM. La línea azul punteada muestra el instante de la onda de choque. Tomado de Kilpua et al. (2017)

obtenida de Lopez (1987) para calcular una ‘temperatura esperada’ (T_{exp}) a partir de la velocidad del viento solar medido. Ellos demostraron que intervalos de temperatura bajos ($T_p < 0,5 T_{exp}$) que no estaban asociados con el plasma heliosférico, estaban predominantemente asociados a regiones donde otras características de las ECMIs estaban presentes. La línea horizontal roja en la Figura 1.9 muestra la temperatura esperada, que es claramente mayor que la temperatura medida en ambos ejemplos de ECMI.

A pesar de lo discutido anteriormente, la identificación de ECMI es a veces ambigua, como muestran por ejemplo Gosling (1997); Richardson and Cane (2010); Kilpua et al. (2013). El punto más relevante, como lo muestra el ejemplo anterior, es que no existe una característica específica que esté siempre presente en una ECMI, y que diferentes características pueden aparecer y desaparecer durante el pasaje de una ECMI dada.

Nubes magnéticas

Una ECMI que presenta características adicionales particulares se llama **nube magnética (NM)**. Según Burlaga (1991) para que una ECMI sea considerada NM, ésta debe presentar: 1) Una suave rotación de la dirección del campo magnético, durante un intervalo del orden de un día, en un plano perpendicular a la dirección de propagación. 2) Valor bajo del parámetro $\beta = \frac{nkT}{\mu_0 B^2}$ del plasma (cociente entre la presión térmica y la presión magnética), debido a que la intensidad del campo magnético B dentro de la NM es mayor que el promedio para el viento solar, lo que genera la expansión de la nube por el medio interplanetario, además de tener valores bajos de temperatura del plasma (T) y densidad (n). 3) Un campo magnético en la nube de mayor intensidad que en su entorno (> 10 nT).

La región limitada por las dos líneas rojas punteadas en el lado izquierdo de la Figura 1.9 se caracteriza por un intenso campo magnético y una suave rotación de las componentes de éste. Estas son las características de NM definidas. La ECMI en la derecha de la figura 1.9, carece tanto de un campo magnético intensificado como de una rotación suave de la dirección de éste a través de todo el intervalo. La variabilidad del campo es, sin embargo, apenas menor cuando se compara con el entorno.

Ondas de choque

Por definición, una onda de choque es una onda de presión que se mueve más rápido que la velocidad de sonido en el medio en el cual se propaga. Podría entenderse como una “superficie” o discontinuidad en la cual algunas cantidades físicas, por ejemplo la densidad y la presión, son diferentes a ambos lados de ésta. Sería una transición irreversible de aumento de entropía. También existe un alto gradiente de temperatura, por lo cual no se puede despreciar la conducción térmica. La disipación dentro del frente de onda produce una conversión gradual de la energía llevada por la onda de calor, es decir que el pasaje de una onda de choque comprime y calienta el gas, así como modifica el campo magnético, en caso de una onda magnetoacústica.

En el caso de una ECM, cuando es eyectada desde el Sol y comienza su viaje a través del espacio, la parte frontal de la ECM va barriendo el medio interplanetario, y puede producir grandes ondas de choque Magnetohidrodinámicas (MHD) si posee una velocidad lo suficientemente alta (ver figura 1.8).

1.3.2. Emisiones de radio generadas por ondas de choque

Algunas ECMs, usualmente las más rápidas, producen una onda de choque MHD. A medida que se propaga, la onda de choque que acompaña a la ECM excita electrones que se encuentran en el medio interplanetario. Ésta excitación produce que los electrones emitan a la frecuencia local del plasma, relacionada a la densidad del medio (n_e) a través de $n_e = (f/9)^2$ (con f en [kHz]) y/o a su primer armónico (Reiner et al., 1997).

A medida que la onda de choque se propaga en el espacio, intercambia energía con el medio, lo que produce una desaceleración de la misma (Gosling et al., 1968). Esto comprimiendo el plasma que está entre ésta y el frente de la ECM que viaja por detrás (Bale et al., 1999; Reiner et al., 1997), generando emisión en radio. A medida que la onda de choque se propaga se encuentra con un medio menos denso. Esto genera que la frecuencia de la emisión disminuya en el tiempo, dando lugar a una emisión de radio que cae suavemente en frecuencia, que se denomina **emisión en radio de tipo II** (TII). Cerca del Sol, en la baja corona, esta emisión comienza a frecuencias altas, en torno a 400 MHz (longitudes de onda métricas, deca- y hecto-métricas), para luego decaer a medida que la onda de choque se propaga alejándose del Sol (ver figura 1.10). Para distancias heliocéntricas en el rango de 20-170 radios solares, esta emisión tiene longitudes de onda kilométricas. La diferente naturaleza entre las ondas métricas y kilométricas, parecería radicar en que las primeras son debidas a la expansión lateral de la ECM en sus comienzos, a diferencias de las segundas, generadas en la parte frontal de las ECMs.

Existen también otros tipos de ráfagas de radio:

- Tipo I: Asociadas a regiones activas, fulguraciones y emisión de protones. Emisión entre 80 y 200 MHz.
- Tipo III: Asociadas a regiones activas y fulguraciones. Emisión entre 10 kHz y 1 GHz.
- Tipo IV: Existen dos tipos, las primeras emiten entre 20 MHz y 2 GHz y se asocian con fulguraciones y emisión de protones; las segundas se las asocia a prominencias eruptivas y ondas de choque MHD, y emiten entre 20-400 MHz.
- Tipo V: Emisión entre 10 y 200 MHz, asociadas a regiones activas y fulguraciones.

Estos otros tipos de emisiones no son tenidos en cuenta en este trabajo, debido a que son generados en relación a otros fenómenos ajenos a las ondas de choque asociadas a ECMs.

1.3.3. Actividad geomagnética

Las tormentas magnéticas se definen como perturbaciones en la componente vertical del campo geomagnético, que pueden durar horas, días e incluso semanas. Dungey (1961) sugirió que existe un mecanismo llamado, en este contexto, de convección, que energiza y transporta partículas hacia la porción de la magnetósfera más cercana a la Tierra. Éste mecanismo crea una corriente de electrones e iones con energías desde algunas decenas hasta varios miles de keV, que es peligrosa para satélites de gran altitud, ya que puede dañar sus circuitos. La reconexión magnética, responsable de llevar las partículas cargadas hacia la Tierra, ocurre en el lado diurno cuando la componente vertical del campo magnético (B_z) del viento solar o de la ECMI y el campo terrestre son antiparalelos.

Existen diversos parámetros para representar la intensidad de una tormenta geomagnética:

- Dst: El índice Dst (Disturbance Storm Time) es un índice de actividad magnética derivado de una red de observatorios en Tierra, que miden la intensidad del “anillo de corriente”. Brinda información respecto a la fuerza del anillo de corriente que se encuentra alrededor de la Tierra causado por protones y electrones solares. Éste produce un campo magnético que es directamente opuesto al campo magnético terrestre, es decir, si la diferencia entre los electrones y protones solares aumenta, entonces el campo magnético terrestre se debilita. Mientras más negativo es el Dst, más débil se encuentra el campo magnético terrestre. Éste es el caso en tormentas solares. WDC Kyoto y NGDC son los encargados de mantenerlo.
- Kp: El *índice de perturbación geomagnética planetaria*, o Kp, es otro índice que se utiliza para medir la actividad geomagnética mundial. Es la media estandarizada del índice

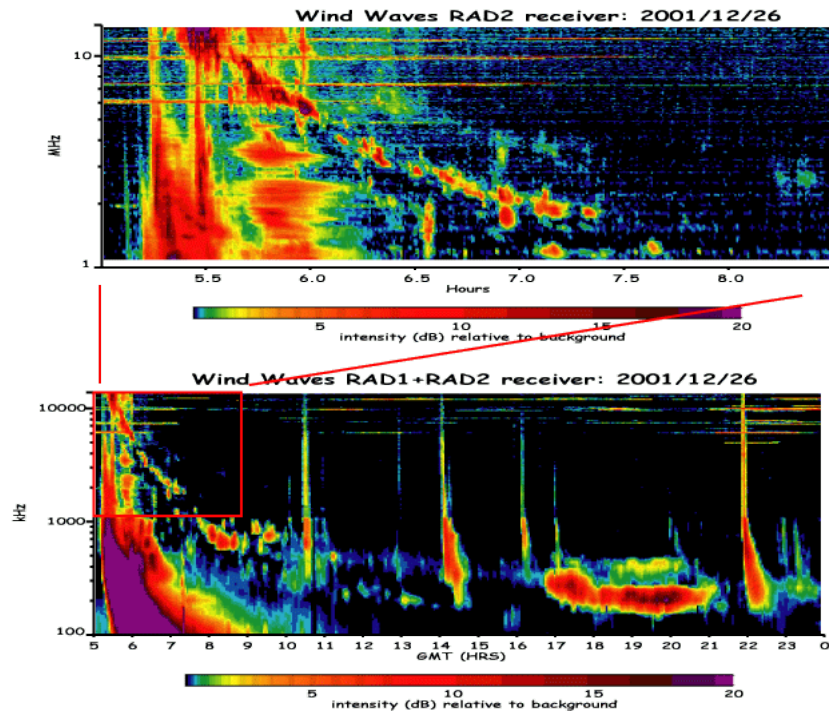


Figura 1.10: Ejemplo de emisión de radio de tipo II el día 26 de diciembre de 2011. Panel superior: primeras horas del evento, detectado en el rango de alta frecuencia por el instrumento RAD2. Panel inferior: RAD1 complementa a RAD2, agregando el rango 1024-100 kHz. Cortesía Consorcio Wind/WAVES.

K, medido desde 13 observatorios geomagnéticos entre los 44 y 60 grados de latitud geomagnética, al norte o al sur. La escala se mide del 0 al 9 expresada en tercios de unidad. Está diseñado para medir la relación de la radiación de partículas solares por sus efectos magnéticos.

- AE: El índice AE (Auroral Electrojet, por sus siglas en inglés), está diseñado para proveer una medida cuantitativa global de la actividad de auroras producidas por corrientes ionosféricas. Es el rango total de desviación de valores del campo magnético horizontal alrededor del anillo auroral, en un instante de tiempo, respecto de un día calmo. Se utilizan para estudiar morfologías de tormentas, comportamiento de comunicación con satélites, y el acoplamiento entre el campo magnético interplanetario y la magnetósfera terrestre. Los datos de AE son mantenidos por WDC Kyoto y NGDC.

Las tormentas geomagnéticas pueden tener diferente intensidad, de acuerdo a la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). La descripción de las distintas escalas de intensidad de tormentas puede verse en la tabla 1.2.

Fuente: <https://www.swpc.noaa.gov/>, <https://www.ngdc.noaa.gov/>

ECMIs como desencadenantes de tormentas geomagnéticas

El rol de las ECMIs en la producción de tormentas geomagnéticas ha sido un tema largamente debatido. Para mediados del siglo XIX ya era evidente que algunas fulguraciones estaban conectadas con actividad geomagnética (Carrington, 1859) ocurrida alrededor de un día después, aunque no estaba clara la conexión entre los fenómenos. Luego de ser descubiertas las ECMs, se sucedieron disputas sobre si las tormentas geomagnéticas eran provocadas por éstas o por fulguraciones. Cuando se adquirió suficiente evidencia, se postuló que eran las ECMs las que provocaban las tormentas geomagnéticas más intensas (Gosling, 1993). En los comienzos de la

Escala	Descripción	Efecto	Frecuencia (por ciclo)
G5	Extrema	Por varias horas no se pueden transmitir ondas de radio de alta frecuencia. Pérdida en sistemas de posicionamiento.	Menos de 1
G4	Severa	Pérdida de comunicación de radio por una o dos horas. Errores en sistemas de posicionamiento por horas.	8
G3	Intensa	Pérdida de contacto por radio de una hora. Pérdida de señales de navegación de baja frecuencia por horas.	175
G2	Moderada	Pérdida de comunicación de radio por decenas de minutos. Pérdida de señales de navegación de baja frecuencia por minutos.	350
G1	Leve	Ocasional pérdida de señales de radio. Degradación de señales de navegación por breves intervalos.	2000

Cuadro 1.2: Intensidad de tormentas geomagnéticas

década de 1990 se crea el Programa Internacional para la Física Solar-Terrestre (*ISTP: International Solar Terrestrial Physics*, por su nombre en inglés), para estudiar la conexión Sol-Tierra con múltiples naves enfocadas en el Sol, el viento solar, y diferentes partes de la magnetósfera. Este programa fue exitoso al estudiar numerosos casos que demostraron la secuencia de eventos desde la superficie solar hasta la magnetósfera e ionósfera.

La Figura 1.11 muestra un ejemplo de la variación de parámetros asociados a una tormenta magnética provocada por una nube magnética y su vaina de plasma (del inglés *plasma sheath*). Ambas son distinguibles por el nivel de fluctuaciones en el campo magnético. La lámina tiene variaciones grandes de amplitud en B_z , en tanto el campo en la NM es más suave y B_z se mantiene hacia el sur durante todo el pasaje de la NM. El índice Dst comienza a decrecer durante el pasaje de la región de la lámina, pero el decrecimiento principal ocurre durante la primer mitad de la NM, donde el campo dirigido hacia el sur es más fuerte y persistente.

Hoy en día sabemos que las ECMIs son la principal fuente de tormentas geomagnéticas intensas, y por lo tanto la tasa de ocurrencia de ambas sigue el ciclo de actividad solar. Como se mencionó anteriormente, la NOAA clasifica las tormentas de menor intensidad (G1, correspondiente a un $K_p=5$) a extremas (G5, con un $K_p=9$). De acuerdo al trabajo de Richardson and Cane (2012), en cuatro ciclos solares casi todas las tormentas intensas fueron producidas por ECMIs, pero también fueron factores importantes en las tormentas débiles y moderadas, particularmente cerca del mínimo solar.

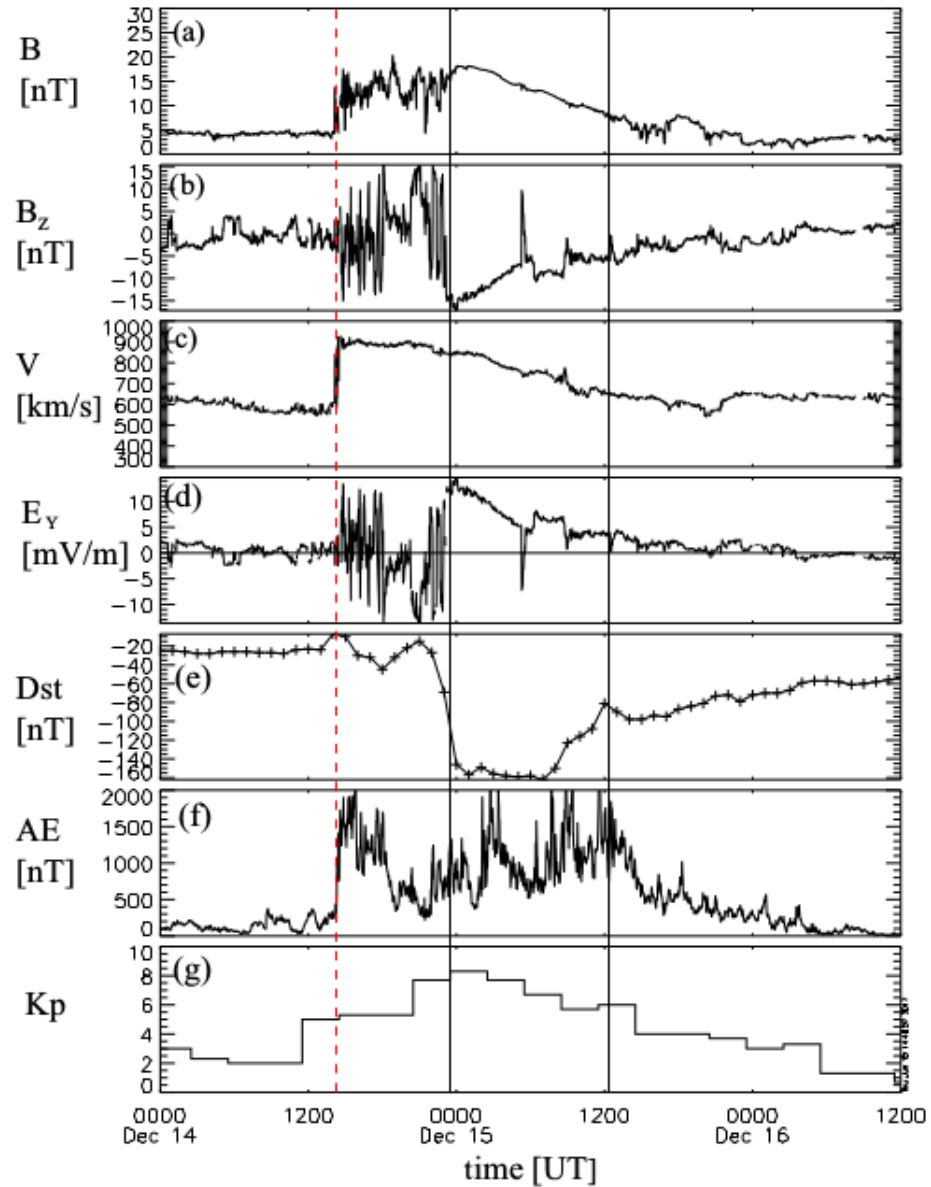


Figura 1.11: Evolución de parámetros del medio interplanetario e índices de actividad geomagnética durante el paso de una ECMI. La Figura muestra: a) La magnitud del campo magnético, b) La componente norte-sur del campo magnético en coordenadas GSM, c) Velocidad del viento solar, d) Componente del campo eléctrico del viento solar, e), f) y g) corresponden respectivamente a los índices Dst, AE, y Kp. La región entre líneas verticales negras es la correspondiente a la nube magnética. La región entre la línea a trazos roja y la primer línea vertical negra corresponde a la vaina de plasma formada entre la onda de choque y la nube magnética. Tomado de Kilpua et al. (2017).

Capítulo 2

Instrumentación

La búsqueda de eventos en radio de tipo II fue realizada mediante el análisis de espectros dinámicos, que corresponden a gráficos de intensidad de emisión (dB) en el dominio de la frecuencia (f)⁻¹ en función del tiempo. Los espectros dinámicos utilizados en este trabajo fueron obtenidos por la nave WIND, precisamente haciendo uso de WAVES, uno de sus instrumentos a bordo. Para el posterior análisis, también se hizo uso de datos e imágenes proporcionados por otros instrumentos complementarios. En esta sección se introducen las misiones e instrumentos utilizados en este trabajo.

2.1. Wind/WAVES

El satélite *Wind* es una nave espacial de la NASA, lanzada el 1 de noviembre de 1994, y es la primera nave del programa “Global Geospace Science”. Fue lanzada para estudiar ondas de radio y de plasma que ocurren en el viento solar y en la magnetósfera terrestre. En la actualidad se encuentra ubicada en el punto lagrangiano L_1 desde Mayo de 2004.

El objetivo de *Wind* es medir las propiedades del viento solar antes que alcance la Tierra, y así contribuir a predecir cómo la atmósfera terrestre responde a los cambios en el viento solar. En particular, los objetivos de la misión son entre otras cosas, proveer datos del plasma, partículas energéticas y campo magnético para estudios magnetosféricos e ionosféricos.

Wind tiene a bordo diversos instrumentos para cumplir con los objetivos de la misión. Los instrumentos KONUS y TGRS se dedican primordialmente a observar fotones de altas energías (hasta rayos gamma) de las fulguraciones solares. El experimento SMS mide la masa y la relación carga-masa de iones pesados. Los experimentos SWE y 3DP sirven para medir/analizar los protones y electrones de baja energía del viento solar (menos de 10 MeV). Los experimentos WAVES y MFI fueron diseñados para medir los campos eléctricos y magnéticos observados en el viento solar. Mediante estos instrumentos, *Wind* permite una descripción completa de los fenómenos del plasma en el viento solar en el plano de la eclíptica.

2.1.1. WAVES

Para el experimento *Radio and Plasma Wave Investigation*, o simplemente WAVES (Bougeret et al., 1995), se diseñaron 5 receptores: FFT (0.3 Hz a 11 kHz), *Thermal Noise Receiver* o TNR (4-256 kHz), RAD1 (20-1040 kHz), RAD2 (1075-13825 kHz) y el *Time Domain Sampler* o TDS.

Los espectros dinámicos inspeccionados en detalle para llevar a cabo este trabajo fueron obtenidos por el instrumento TNR. Éste mide campos eléctricos para frecuencias entre 4 y 256 kHz en hasta 5 bandas de frecuencias espaciadas logarítmicamente, aunque típicamente configurada para 3 bandas, de 32 o 16 canales por banda, con una sensibilidad de 7 nV/(Hz)^{1/2}, ancho de banda de 400 Hz a 6.4 kHz, y un rango dinámico de 100 dB. Los datos son tomados

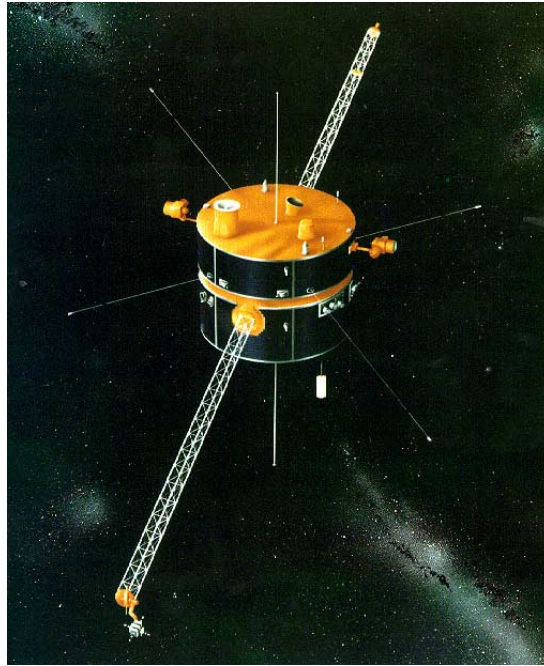


Figura 2.1: Representación de la nave *Wind*. Imagen cortesía del consorcio WIND/WAVES.

por dos receptores multicanales que muestrean a 20 ms a una tasa de 1 Mhz. El TNR suele usarse para determinar la densidad local del plasma observando la línea del plasma, una emisión a la frecuencia local debido a una respuesta de ruido térmico del cable de la antena dipolo. Hay que tener en cuenta que la observación de la línea local del plasma requiere que el dipolo de la antena sea más largo que la longitud de Debye. Para condiciones típicas del viento solar, este valor oscila entre 7-20 m, mucho mas pequeño que el dipolo de la antena de *Wind*.

2.2. Instrumentación complementaria

Para la comparación de los espectros dinámicos y para encontrar las ECMs asociadas a algunos eventos, se utilizaron datos e imágenes provistos por diversas misiones espaciales: ACE, STEREO y SOHO.

2.2.1. ACE

Advanced Composition Explorer o ACE, es el nombre de la misión de la NASA lanzada el 25 de agosto de 1997, cuyo objetivo es estudiar características del viento solar y el medio interplanetario. Se encuentra en el punto lagrangiano L_1 , aproximadamente a 1,5 millones de km de la Tierra en dirección al Sol, donde la gravedad combinada del Sol y la Tierra mantienen a ACE en una órbita estable y anclada a la línea Sol-Tierra.

Posee 9 instrumentos, a saber:

-*Solar Wind Electron, Proton and Alpha Monitor* (SWEPAM): El Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor, mide el flujo de iones y electrones (con sensores separados) del plasma del viento solar (tasa de flujo de partículas) como función de la dirección y la energía. Estos datos proveen conocimiento detallado de las condiciones del viento solar y su estado interno, en cada minuto. también provee observaciones de viento solar en tiempo real, las cuales son codificadas y enviadas por telemetría a Tierra, con propósitos de meteorología espacial.

-*Magnetometer* (MAG):El *ACE Magnetic Field Instrument* mide la dirección y magnitud del campo magnético interplanetario (IMF en inglés) y establece la estructura a gran escala y

las características de las fluctuaciones del IMF a 1UA como funciones del tiempo. Consiste en un par de sensores y una unidad de control electrónica.

Datos tanto de MAG como de SWEPAM fueron utilizados para confeccionar las bases de datos de ECMs, nubes magnéticas, y ondas de choque consultadas ampliamente en este trabajo.

-*Cosmic Ray Isotope Spectrometer* (CRIS): Estudia y determina la composición isotópica de los rayos cósmicos en un intento de esclarecer su origen.

-*Real Time Solar Wind* (RTSW): Provee advertencias hasta con una hora de anticipación sobre actividad inusual en el Sol, que pueden causar tormentas geomagnéticas.

-*Solar Wind Ion Mass Spectrometer y Solar Wind Ion Composition Spectrometer* (SWIMS y SWICS): Estos dos instrumentos son espectrómetros de masa, cada uno destinado a diferentes medidas. Analizan la composición química e isotópica del viento solar y la materia interestelar.

-*Ultra-Low Energy Isotope Spectrometer* (ULEIS): Este instrumento mide el flujo de iones en el rango del helio hasta el níquel para determinar las características de las partículas energéticas solares y el mecanismo por el cual las mismas se cargan por el sol.

-*Solar Energetic Particle Ionic Change analyzer* (SEPICA): Detecta el estado de carga iónica, energía cinética y carga nuclear de los iones provenientes del Sol.

-*Solar Isotope Spectrometer* (SIS): Provee medidas de alta resolución de la composición isotópica de núcleos energéticos desde el Helio al Níquel.

(Fuente: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/>)

2.2.2. STEREO

La misión *STEREO* (Solar-Terrestrial Relations Observatory) de la NASA consiste en dos observatorios espaciales que se encuentran viajando en la eclíptica por delante (*STEREO-A, Ahead*) y por detrás, (*STEREO-B, Behind*), de la órbita terrestre. Fue lanzada el 25 de octubre de 2006, desde el Centro Espacial Kennedy en Cabo Cañaveral, Florida. Ambas naves se asistieron gravitacionalmente con la Tierra y la Luna en trayectorias opuestas. La nave *STEREO-A* orbita más rápido que *STEREO-B*, dado que su órbita es levemente más cercana al Sol. Esto provoca una velocidad relativa entre ambas naves. La Figura 2.2 muestra el concepto de la misión *STEREO*. La idea basal de la misma es disponer de imágenes estereoscópicas del Sol de forma permanente. Ya que los satélites se encuentran distantes entre sí, pueden tomar imágenes de partes del Sol que no son visibles desde la perspectiva terrestre. Las dos naves fueron lanzadas juntas, pero con el paso del tiempo se fueron separando a un ritmo de 22° por año, alcanzando la primer cuadratura entre ellas el 24 de enero de 2009. En 2011 las naves se encontraron en cuadratura respecto a la línea Sol-Tierra, lo que significó que por primera vez se pudo obtener imágenes simultáneas de la esfera solar completa. Esta misión aún está vigente, y forma parte de la flota del HSO (Heliophysics System Observatory), compuesto por misiones de apoyo al estudio de la conexión Sol-Tierra.

Estas naves poseen cuatro sets de instrumentos a bordo:

-*SECCHI* (*Sun-Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation*) consiste en un *Extreme Ultraviolet Imager* (EUVI), dos coronógrafos de luz blanca (COR1 y COR2) y dos *Heliospheric Imagers* (HI1 y HI2). Estos permiten estudiar la evolución 3D de las ECMs desde su nacimiento en la corona solar, y a través del medio interplanetario a su eventual impacto en la Tierra.

-*IMPACT* (*In situ Measurements of Particles and CME Transients*) está compuesto por SWEA (Solar Wind Electron Analyzer), STE (Suprathermal Electron Telescope), MAG (Magnetometer), SEPT (Solar Electron Proton Telescope), SEP (Solar Energetic Particles), SIT (Suprathermal Ion Telescope), LET (Low Energy Telescope) y HET (High Energy Telescope). Se centra en las conexiones magnéticas al sol y la topología de las perturbaciones interplanetarias relacionadas con las ECMs, así como también en las partículas energéticas que preceden y acompañan a estas perturbaciones a medida que avanzan hacia la Tierra.

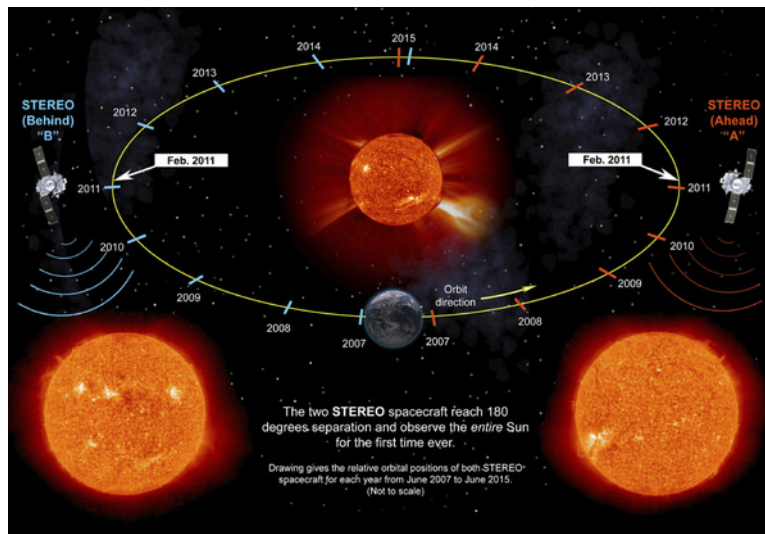


Figura 2.2: Representación artística de la misión STEREO, mostrando la órbita y la ubicación de las naves A y B en diferentes años. Imagen cortesía del consorcio STEREO (NASA).

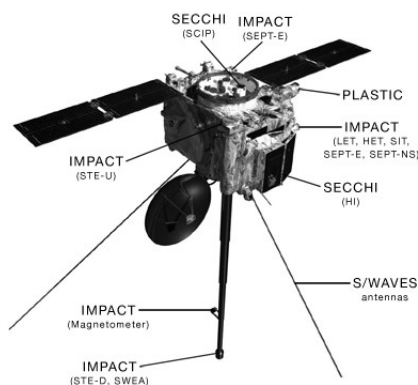


Figura 2.3: Imagen ilustrativa de las naves STEREO. Se muestra la ubicación de los paquetes de instrumentos descritos en el texto. Imagen cortesía del consorcio STEREO (NASA).

-PLASTIC (PLasma and Supra Thermal Ion and Composition). El objetivo de PLASTIC es estudiar el viento solar coronal y los procesos del viento heliosférico, y medir iones en el rango de energía por carga de 0,3 a 100 keV/e.

-SWAVES (STEREO/WAVES) realiza detecciones para todos los objetivos primarios de la misión STEREO, generación de ECMs, evolución e interacción con la magnetósfera de la Tierra.

La Figura 2.3 es una representación esquemática de las naves de la misión. Se indica en la figura la ubicación de cada uno de los paquetes de instrumentos que posee cada nave.

2.2.3. SOHO

El Observatorio Solar y Heliosférico (SOHO, por sus siglas en inglés), es un proyecto de cooperación internacional entre la ESA y la NASA para estudiar el Sol, desde el núcleo hasta la corona, y el viento solar. Fue lanzado por NASA desde Cabo Cañaveral, Florida, el 2 de diciembre de 1995. Se encuentra en el punto lagrangiano L_1 , al igual que ACE. Fue diseñado para tratar de responder varias preguntas respecto al Sol, entre ellas: ¿Dónde se produce el viento solar y cómo se acelera?, ¿Por qué existe la corona solar y cómo se calienta hasta el millón de grados centígrados?, ¿Cuál es la estructura y la dinámica del interior solar?, entre otras.

Tiene 12 instrumentos a bordo, a saber:

-*Coronal Diagnostic Spectrometer* (CDS): Detecta líneas de emisión en la corona y región de transición.

-*Charge, Element, and Isotope Analysis System* (CELIAS): Hace un muestreo continuo del viento solar e iones solares, interplanetarios e interestelares. Analiza la composición de las partículas presentes en el viento solar. Advierte sobre tormentas solares que podrían dañar satélites artificiales.

-*Comprehensive Suprathermal and Energetic Particle Analyzer* (COSTEP): Detecta y clasifica poblaciones de partículas energéticas de origen solar, interplanetario o galáctico.

-*Extreme ultraviolet Imaging Telescope* (EIT): Provee imágenes del disco solar completo en el extremo ultravioleta del espectro electromagnético, mapeando el plasma en la baja corona y región de transición a temperaturas de entre 80000 y 2.5 millones de grados centígrados.

-*Energetic and Relativistic Nuclei and Electron experiment* (ERNE): Complementa a COSTEP en la medición de partículas de alta energía.

-*Global Oscillations at Low Frequencies* (GOLF): Estudia la estructura interna del Sol midiendo oscilaciones de velocidad en todo el disco solar.

-*Large Angle and Spectrometric Coronagraph* (LASCO): Observa la corona desde cerca del limbo hasta $1/7$ de la distancia Sol-Tierra. Posee un ocultador que bloquea la luz directa de la superficie del Sol, creando un eclipse artificial permanente. La Figura 2.4 muestra a modo de ejemplo una ECM observada por los instrumentos C2 y C3 de LASCO. El campo visual más interno corresponde al instrumento C2 (de 2 a $6 R_{\odot}$), mientras que el campo visual más externo (de 3.5 a $30 R_{\odot}$) corresponde a C3. El disco de aspecto sólido central es el ocultador de C2.

-*Michelson Doppler Imager/Solar Oscillations Investigation* (MDI/SOI): Estudia los movimientos verticales de la superficie del Sol en 1 millón de puntos a la vez, y la componente longitudinal del campo magnético solar.

-*Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation* (SUMER): Se usa para realizar diagnósticos espectroscópicos precisos de plasma de la atmósfera solar.

-*Solar Wind Anisotropies* (SWAN): es el único instrumento que no apunta al Sol, sino que mira el resto del cielo, midiendo el hidrógeno que está siendo emanado hacia el Sistema Solar desde el espacio interestelar, y estudiando ésto junto con el viento solar, permite determinar cómo está distribuido éste último.

-*UltraViolet Coronagraph Spectrometer* (UVCS): Hace mediciones de la corona en luz ultravioleta (entre 1.3 y 12 radios solares desde el centro del Sol), creando un eclipse artificial.

-*Variability of Solar Irradiance and Gravity Oscillations* (VIRGO): Caracteriza las oscilaciones de intensidad solar y mide la irradiancia solar total y sus variaciones.

Para este trabajo final se utilizaron los datos provistos por los coronógrafos de luz blanca COR2 de STEREO/SECCHI y C2/C3 de SOHO/LASCO a fin de buscar y corroborar la existencia de ECMs asociadas a las emisiones detectadas en radio.

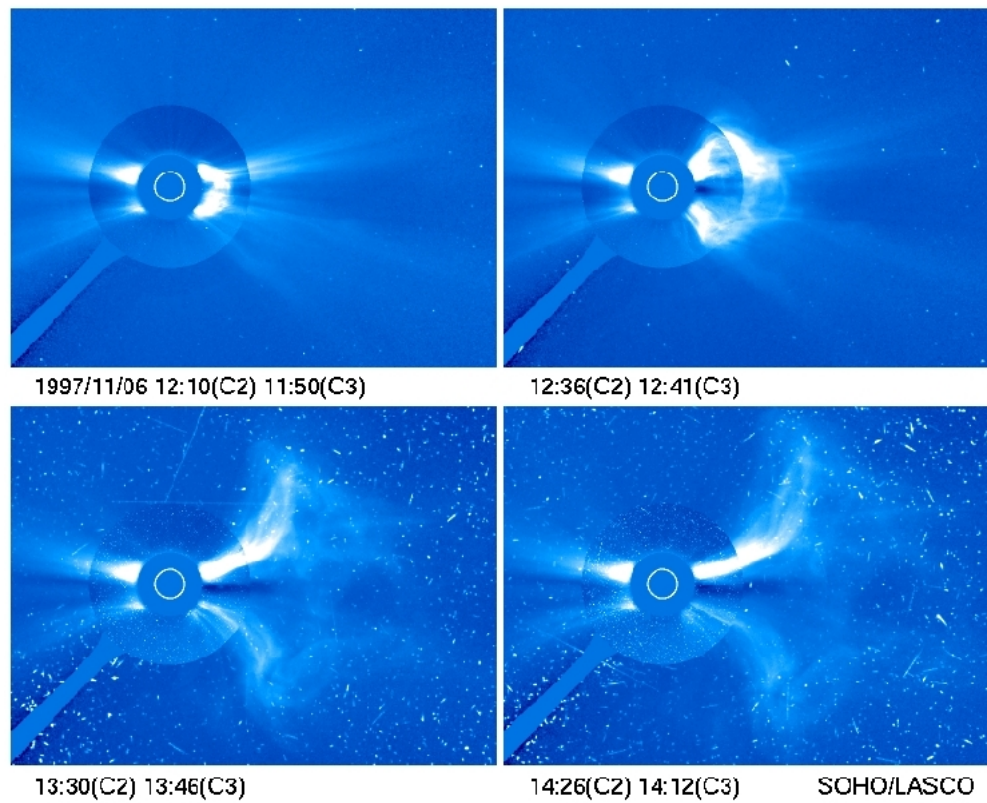


Figura 2.4: Ejemplo de una ECM observada en los campos visuales de los coronógrafos SOHO/LASCO C2 (campo visual interno) y C3 (campo externo). El disco blanco central indica el limbo solar. Imagen cortesía del consorcio SOHO/LASCO.

Capítulo 3

Datos utilizados y metodología

Los datos utilizados en este trabajo fueron provistos por el experimento WAVES, a bordo de la nave WIND. En particular se utilizó el receptor TNR, que detecta frecuencias entre 4 y 245 kHz. Los datos son de público acceso, disponibles en el sitio oficial de WIND/WAVES: https://solar-radio.gsfc.nasa.gov/wind/data_products.html. Desde este sitio se descargaron los archivos diarios provistos por el receptor TNR para su manipulación en IDL (Interactive Data Language), desde el 1 de enero del 2000 hasta el 31 de diciembre de 2012, contabilizando así en total 4749 archivos a leer, cada uno con un tamaño promedio de 0,5 Mb. Estos archivos contienen los espectros dinámicos (ED) de cada día registrados por este receptor. Para su lectura no sólo se requiere del lenguaje de programación IDL, sino también del conjunto de rutinas llamado SolarSoft. Con el paquete *xwavesds* se pueden leer los EDs para su análisis. En este capítulo se detallan algunos conceptos concernientes a los EDs y a los eventos de radio de tipo II.

Dado que uno de los objetivos principales del trabajo es caracterizar las emisiones km de tipo II en el contexto de la actividad solar, se utilizaron además una serie de catálogos en línea que proveen información sobre detecciones in situ de: ondas de choque, ECMIs y nubes magnéticas. Esta información permitió determinar la asociación o no de los eventos encontrados en radio con estas estructuras interplanetarias. Adicionalmente se utilizaron catálogos de ECMs para compilar los valores de masa, velocidad y energía de un número reducido de ECMs que pudieron ser asociadas a los eventos en radio. En la sección 3.2 se detallan los diversos catálogos que sirvieron de base para este análisis.

3.1. Espectros dinámicos

Los espectros dinámicos muestran valiosa información sobre lo que está sucediendo en el medio interplanetario. Son gráficas bidimensionales que representan la frecuencia e intensidad de la emisión en radio que es generada por los electrones en el medio interplanetario, y detectada en el receptor respecto al tiempo. En los espectros dinámicos pueden observarse las emisiones -o ráfagas- de radio de tipo II como consecuencia del decaimiento de la frecuencia local del plasma, a la que vibran los electrones del medio interplanetario cuando son excitados por una onda de choque que se propaga desde el Sol. Un espectro dinámico puede ser complicado de analizar, bien sea por la cantidad de actividad solar (ver Figura 3.1), pero tomando algunos recaudos se puede obtener información muy valiosa sobre procesos en el Sol y el medio interplanetario.

En el eje horizontal se puede apreciar el tiempo avanzando hacia la derecha, en tanto en el eje vertical aparece la frecuencia, aquí representada como $1/f$. Trabajar en el dominio de $1/f$ simplifica el análisis y la inspección visual de los eventos de tipo II, ya que $1/f$ puede considerarse equivalente a la distancia heliocéntrica, por lo que el perfil de decaimiento de la emisión de tipo II aparece típicamente como una línea recta. Un ejemplo de esto puede verse en la figura 3.3, en contraposición al decaimiento exhibido en la figura 1.10, donde el eje de las

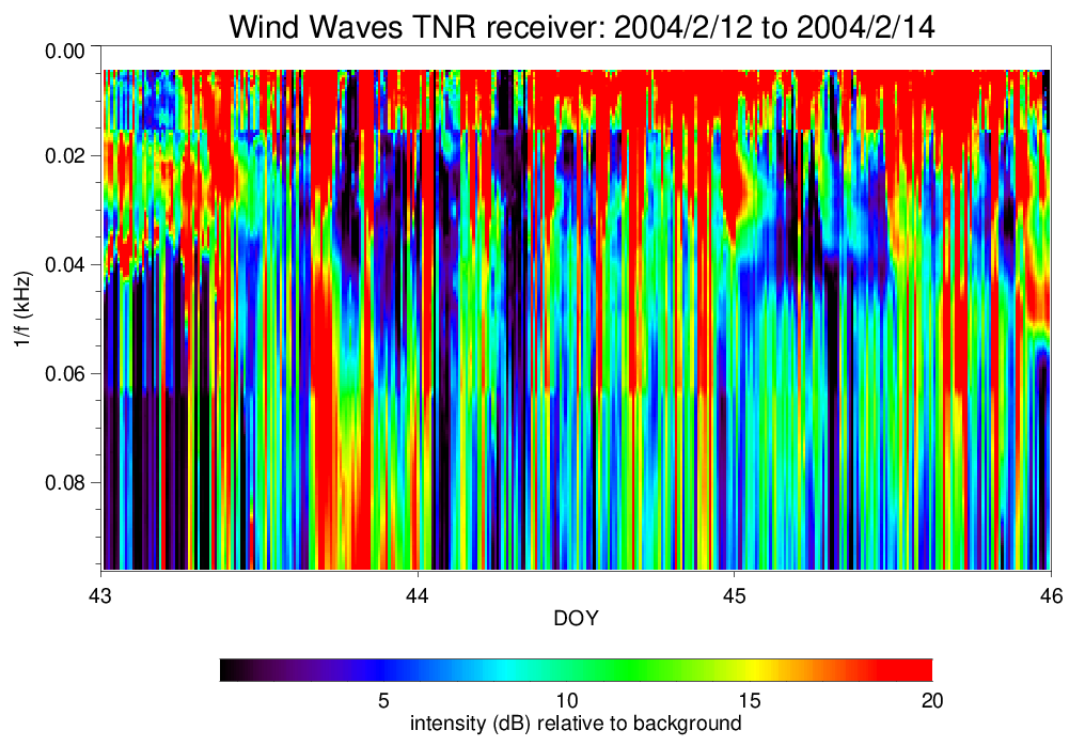


Figura 3.1: Espectro dinámico de los días 12 al 14 de febrero del 2004. Se puede observar una gran cantidad de eventos de radio superpuestos entre sí.

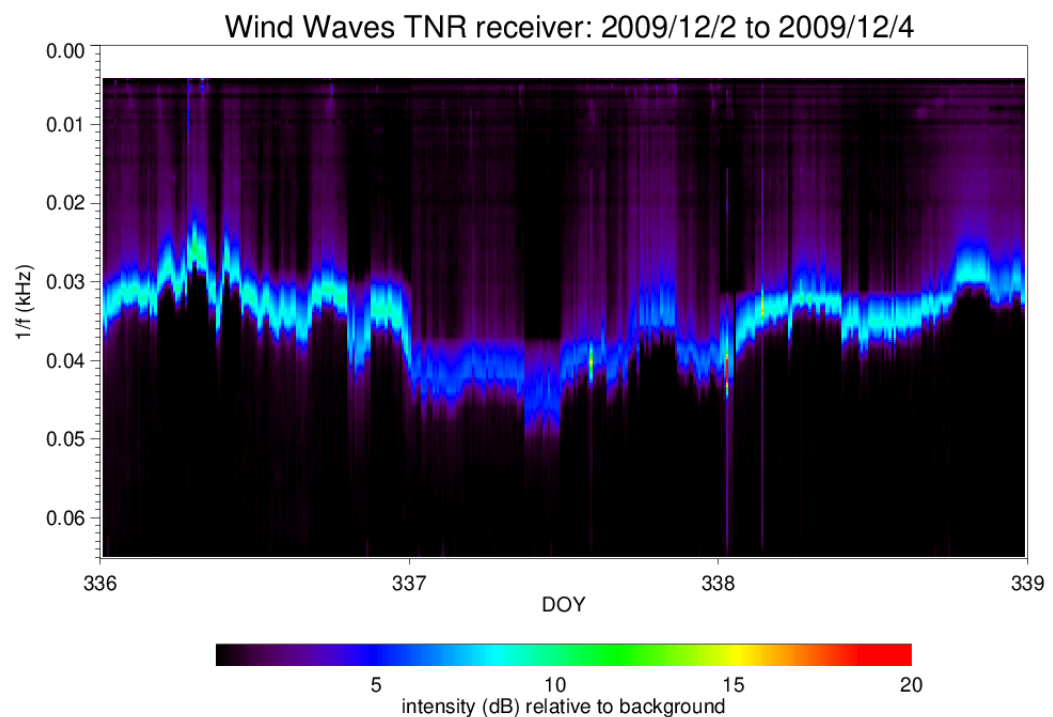


Figura 3.2: Espectro dinámico para los días 2 al 4 de diciembre de 2009. Se observa que para dicha época el medio interplanetario estaba mucho más calmo. La línea en tonos azulados corresponde a la *plasma frequency line* o PFL, que corresponde a la frecuencia característica del plasma en la nave a la cual oscila el plasma no perturbado, en torno a los 24 khz.

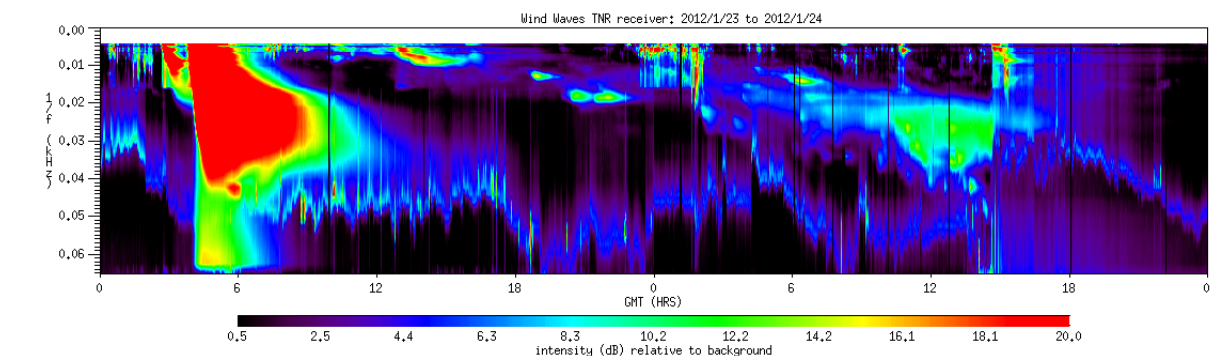


Figura 3.3: Espectro dinámico de los días 23 y 24 de enero de 2012, donde además se observa un evento de tipo II (ver texto para detalles).

ordenadas corresponde a la frecuencia. Los colores muestran la intensidad de las emisiones en dB, relativa al fondo, siendo los colores oscuros (violetas, negro) los de menor intensidad, en tanto los rojos representan a los de mayor intensidad.

Como se aprecia en las Figuras 3.1 y 3.2, los EDs pueden variar en gran medida, existiendo periodos sumamente calmos en cuanto a actividad, y otros en los que existe tanta actividad, que resulta sumamente difícil identificar algún evento de interés. Sin embargo, un ED típico se puede apreciar en la figura 3.3. En este caso, alrededor de las 4:00 GMT del día 23 de diciembre de 2012 el comienzo del evento está marcado por una intensa emisión de tipo III, muy probablemente asociada a una fulguración. La emisión de tipo II aparece en el receptor TNR alrededor de cuatro horas después, y se la ve decaer gradualmente en frecuencia hasta llegar a 1 UA, alrededor de las 15:00 GMT del día 24. En ese momento, se aprecia el salto en frecuencia de la PFL como producto del aumento repentino en la densidad por la llegada del frente del choque a la nave.

3.2. Catálogos utilizados

Como se explicó anteriormente, este trabajo utilizó información de diversos catálogos. Estos son:

- Catálogo de WIND/WAVES: La lista de ráfagas de radio de tipo II y tipo IV provista por el equipo científico de esta misión de la NASA. En él se reportan todos los eventos candidatos en radio desde 1994 al 2015, con la fecha de comienzo y fin, y el rango de frecuencia en el que se observa el evento. Cabe aclarar que la lista se confecciona en base exclusiva a las detecciones realizadas por los receptores RAD1 y RAD2, desestimando las emisiones de más baja frecuencia como las captadas por TNR.
- Catálogo de ondas de choque interplanetarias: Se utilizó el catálogo del *Center for Astrophysics* (CfA) de Harvard, el cual es una base de datos en línea de choques observados por Wind y ACE. Los eventos están listados por año, con la fecha y hora en que fueron detectados, junto con gran variedad de otros parámetros calculados en base a diversos modelos. También se consultó la *ACE List of Disturbances and Transients* de la Universidad de New Hampshire, que cataloga los eventos de ondas de choque de manera similar al anterior, aunque sin extraer información extra de las detecciones como lo hacen los catálogos provistos por el CfA. Los catálogos de choques de WIND y ACE pueden encontrarse en <https://www.cfa.harvard.edu/shocks/> y http://www.ssg.sr.unh.edu/mag/ace/ACElists/obs_list.html.
- Catálogos de ECMIs: Para consultar la asociación de eventos de TII con ECMIs se utilizaron dos catálogos. El de Ian Richardson y Hillary Cane (de aquí en adelante R-C) (Richard-

son and Cane, 2010; Cane and Richardson, 2003), se indican las ECMIs con su hora de comienzo y fin, desde 1996 al 2019, así como una gran cantidad de parámetros asociados a las mismas, entre ellos la velocidad, campo magnético, índice Dst, y también si se consideró que cumplían los requisitos para ser NM. Para algunos eventos también se brinda información sobre asociación con ECMs detectadas en luz blanca por LASCO. El otro catálogo de ECMIs que se utilizó fue el de Teresa Nieves-Chinchilla (TNC) (Nieves-Chinchilla et al., 2018), que es el catálogo de ECMIs de WIND, donde se reporta la fecha y hora de los eventos detectados por la misión Wind desde 1995 al 2015, así como una serie de otros parámetros de utilidad. Estos catálogos son de público acceso y se encuentran disponibles en: [http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm#\(m\)](http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm#(m)) y <https://wind.nasa.gov/fullcatalogue.php>.

- Catálogos de NM: Para encontrar las NM asociadas a los eventos se hizo uso de los catálogos de ECMI de TNC y R-C. En adición, se utilizó el catálogo de NM de WIND.
- Catálogos de propiedades de ECMs: Se utilizó por un lado el catálogo de *The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory* (JHUAPL) que es un catálogo de ECMs basado en las identificaciones pseudo-automáticas de eventos en los telescopios SECCHI/COR2 de ambas naves STEREO. Por otro lado, se usó el *LASCO CME catalog*, que muestra las ECMs a partir de su aparición en el campo visual de C2, y lista una serie de parámetros para estos eventos, con la posibilidad de visualizarla en video. De éste catálogo fueron obtenidas las masas para las ECMs asociadas a los eventos de radio. También se utilizó el catálogo CACTus, el cual brinda una lista de ECMs detectadas de forma automática, usando secuencias de imágenes de LASCO y STEREO, y brinda algunos parámetros, como velocidad, masa, ancho angular, etc.
- Base de datos de índice Dst: Se utilizó el provisto por el *World Data Center for Geomagnetism, Kyoto*(WDC), que brinda el valor del Dst para cada hora de cada día del año.

3.3. Metodología

La base fundamental de este trabajo es el registro minucioso de eventos de radio de muy baja frecuencia (kilométricos) detectados en el rango de frecuencias del detector TNR. Para ello, se realizó una inspección visual de los espectros dinámicos (ED) de TNR provistos en el sitio oficial del instrumento Wind/WAVES. Esto implicó la cuidadosa examinación de los más de 4700 espectros dinámicos de TNR, para cada día dentro del periodo de tiempo analizado. En particular se buscaron eventos que no estuvieran reportados por el catálogo de emisiones de TII de Wind/WAVES.

Todo evento identificado fue agregado a la lista de eventos compilada en la Tabla 3.3, registrando fecha y hora de comienzo y fin del evento, así como también el rango en frecuencia correspondiente. Dicha información fue obtenida directamente de cada ED. En un paso posterior se examinó el catálogo de emisiones de TII de Wind/WAVES para comprobar si algún evento había sido registrado en esos días, en conexión al evento de TII identificado en TNR. El criterio para determinar si ambas emisiones de tipo II (métricas a decamétricas en el catálogo de Wind/WAVES empleando RAD1 y RAD2; y kilométricas identificadas en este trabajo usando TNR) estaban asociadas entre sí, implicó que los rangos de frecuencia de ambas emisiones fueran compatibles. Es decir, el límite superior o inferior de la frecuencia catalogada dada en la lista oficial de Wind/WAVES debía ser menor a 256 kHz (el límite superior del receptor TNR). Además de que debía haber concordancia temporal entre la ocurrencia del registro oficial de la lista de Wind/WAVES y del evento kilométrico identificado en TNR.

La identificación de los eventos kilométricos en los EDs distó de ser sencilla, dada una serie de dificultades que se enumeran a continuación. De hecho, hubo ciertos eventos, que si bien tenían

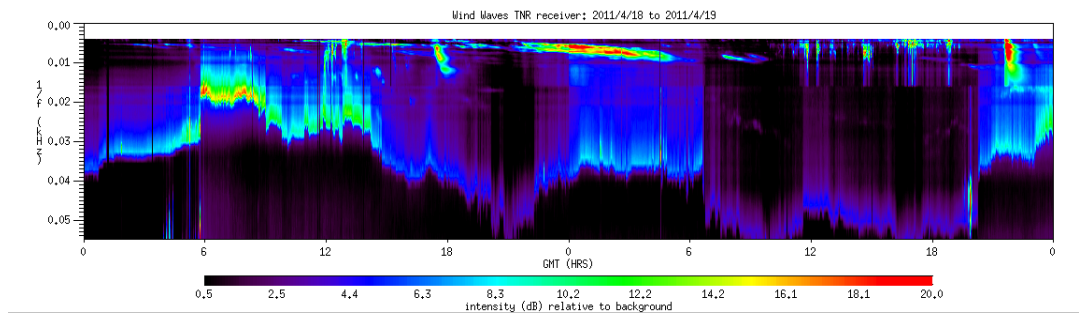


Figura 3.4: Espectro dinámico de los días 18 y 19 de abril de 2011, donde se observa en la parte superior del gráfico (hacia altas frecuencias, aproximadamente entre las 18:00 GMT del día 18 y las 6:00 GMT del día 19) un evento que no decae sustancialmente en frecuencia y por lo tanto no puede asegurarse que corresponde a una onda de choque generada por una ECMI.

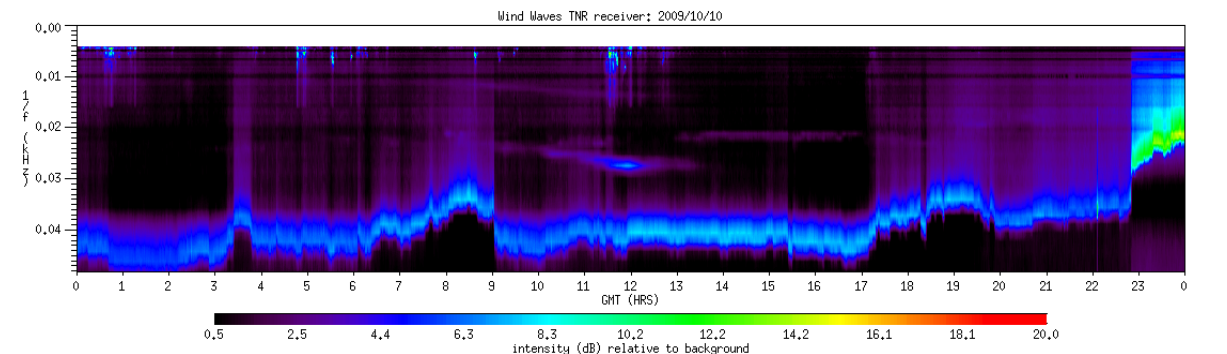


Figura 3.5: Espectro dinámico del día 10 de octubre de 2009, donde se observa entre las 9:00 y 13:00 GMT un evento atípico que fue catalogado como emisión aislada, y por lo tanto no puede asegurarse que sea una emisión de radio de tipo II asociada a una onda de choque delante de una ECMI.

características que podían ser atribuidas a una emisión TII, finalmente no fueron incluidos en la compilación. La lista inicial contenía 224 entradas, de las cuales 45 correspondían a emisiones catalogadas por la lista de Wind/WAVES como TII de baja frecuencia, pero no pudieron ser identificados en los EDs de TNR. Por otro lado, también hubo que desechar 74 eventos, que si bien en los EDs mostraron un perfil suave y lineal progresando en el tiempo, para ser estrictos no fueron catalogados como TII kilométricos. Dos razones motivaron esta decisión: 51 de estas emisiones de radio no decaían sustancialmente en frecuencia (ver ejemplo en la figura 3.4), mientras que 23 de ellas aparecieron aisladas, sin un suceso anterior que pudiera asociarse a su origen, ni una onda de choque detectada posteriormente a 1 UA (ver figura 3.5). Dado que ambas situaciones cuestionan el origen de estas emisiones como producidas por ondas de choque delante de ECMs, fueron dejadas de lado en este trabajo. El resultado final fue la selección de 105 eventos de radio de baja frecuencia para su análisis.

Para asociar las emisiones de radio TII de baja frecuencia con sus correspondientes ondas de choque, se acudió a los catálogos de choques descritos anteriormente. El criterio para elegir ondas de choque candidatas para su asociación conllevó encontrar choques detectados no más de 4 días posteriores a la fecha de finalización del TII. En caso de que hubiera uno o más choques candidatos, se inspeccionó el ED correspondiente proyectando el TII hacia el eje de las abscisas (tiempo). Una asociación positiva implica que esta proyección coincide con la hora de llegada del choque a 1 UA de acuerdo al catálogo de ondas de choque consultado. Existieron casos para los cuales la asociación TII-choque no fue trivial, por lo que se agregó la columna CA (Confiablez)

de Asociación) en la tabla, que expresa la incerteza respecto a la asociación.

Para asociar las emisiones TII de baja frecuencia con sus ECMIs correspondientes, se buscó el evento en los catálogos de R-C y TNC. El criterio fue tomar aquellos cuya fecha de comienzo para la ICME reportada por uno o ambos catálogos, no fuera superior a 2 días posteriores a la fecha de finalización del TII. Se buscó que fuera lo más cercano en el tiempo posible. En estos mismos catálogos se encuentra la información respecto a si ese evento es clasificado como una nube magnética o no.

Para obtener valor del Dst asociado a los 105 eventos analizados, se actuó de la siguiente forma. En el caso de aquellos eventos relacionados con ECMIs según la lista de R-C, se otorgó el mismo valor de Dst reportado por ellos. En el caso que no fuera reportado por la lista de R-C, pero sí por la lista de TNC (que no brinda el valor del Dst correspondiente a sus eventos, a diferencia de R-C), se registró el menor valor de Dst durante el intervalo de pasaje de la ECMI. Este criterio es el mismo usado en la lista de R-C, por consistencia. Si la emisión TII de baja frecuencia posee un choque asociado, pero no hay ECMI reportada por TNC o R-C lo que se hizo fue tomar el menor valor del Dst en el periodo comprendido entre la hora de llegada de la onda de choque y las 6 horas posteriores (Nieves-Chinchilla, comunicación personal). En caso de que no hubiese onda de choque asociada ni detección en las listas TNC y R-C, no tuvo sentido determinar un valor para el índice Dst.

Tipo II km				Eventos tipo II según catálogo Wind/Waves				In situ						CA	
Comienzo		Final		Comienzo		Final		Dia del año	Hora choque	Catálogo	ECMI		CFM	DST	
Fecha	Hora	Fecha	Hora	Fecha	Hora	R-C	TNC				R-C	NM			
20000109	1500	20000110	1500	20000109	1530	20000110	1200	11,569745	1340	ace	n	n	n	-48	G
20000208	2000	20000210	0400	20000208	0905	20000211	0220	42,107795	0235	wind/ace	n	n	n	-1	G
20000210	1800	20000211	0000	-	-	-	-	-	-	-	n	n	n	-27	G
20000211	0830	20000211	2330	20000211	0845	20000211	2335	42,982101	2334	wind/ace	y	y	2	-25	D
20000310	0030	20000312	0300	20000309	2030	20000313	1200	-	-	-	n	n	n	-	G
20000317	0600	20000318	0030	20000317	0200	20000317	1000	-	-	-	y	n	0	-3	G
20000406	0000	20000406	1300	20000405	1800	20000406	1600	97,689045	1632	wind	y	n	1	-288	G
20000516	0440	20000516	1400	20000515	1645	20000516	1400	-	-	-	y	n	1	-92	G
20000913	0700	20000913	1230	20000912	1200	20000913	1220	-	-	-	n	n	n	-	G
20000914	0845	20000914	2130	-	-	-	-	259,185885	0427	wind	n	n	n	8	G
20000930	1300	20001001	2130	20000930	1300	20001001	2200	277,043351	0102	wind	n	n	n	-62	D
20001015	1200	20001016	2300	20001015	0630	20001016	2200	-	-	-	n	n	n	-	D
20001101	0330	20001102	1200	20001101	1940	20001102	1300	309,101233	0225	wind/ace	n	n	n	-34	G
20001110	0015	20001110	1300	20001109	1615	20001111	0400	316,175399	0412	wind/ace	n	y	n	-24	G
20001124	1100	20001124	1500	20001124	0510	20001124	1500	331,230677	0532	wind/ace	n	n	n	10	G
20001125	0400	20001126	0800	-	-	-	-	331,488524	1143	wind/ace	y	y	0	-80	D
20010110	0500	20010111	1300	20010110	0600	20010111	1200	-	-	-	n	n	n	-	D
20010112	0000	20010113	0000	20010112	0330	20010113	1000	13,101128	0225	wind/ace	n	n	n	5	G
20010122	1700	20010123	0545	-	-	-	-	23,451128	1049	wind/ace	y	y	1	-61	G
20010130	0000	20010130	1800	-	-	-	-	31,357865	0835	wind/ace	n	n	n	-25	G
20010331	0200	20010401	1730	-	-	-	-	-	-	-	y	n	n	-	D
20010407	0630	20010407	1715	20010406	1935	20010407	1700	98,47276	1120	wind/ace	n	n	n	-46	D
20010409	1930	20010410	0040	20010409	1553	20010410	0100	101,589774	1409	wind/ace	n	n	n	-104	D
20010418	0900	20010418	1420	20010418	0255	20010418	1400	111,645295	1529	wind/ace	y	n	0	-114	D
20010424	1700	20010425	0630	20010423	1226	20010425	0700	-	-	-	n	n	n	-	G
20010611	1100	20010612	0700	20010611	1130	20010612	0400	-	-	-	n	n	n	-	G
20010615	0630	20010615	1015	20010615	0645	20010615	1000	-	-	-	n	n	n	-	G
20010618	1800	20010619	1800	20010618	1800	20010619	2100	-	-	-	n	n	n	-	G
20010720	0140	20010720	0630	20010720	0200	20010720	0700	-	-	-	n	n	n	-	G
20010810	1400	20010810	1930	20010810	0100	20110810	2200	224,464844	1109	wind/ace	n	n	n	34	G
20010816	1500	20010816	2230	20010816	0010	20010816	2000	229,459497	1101	wind/ace	y	y	0	-105	D
20010825	2100	20010826	1100	20010825	1650	20010825	2300	239,818351	1938	wind/ace	n	n	n	-10	D
20010912	1000	20010912	1530	20010912	1000	20010912	2200	256,105191	0231	wind	n	n	n	-49	D
20010913	1700	20010914	0330	20010913	1740	20010914	0545	-	-	-	y	n	1	-57	G
20011010	1115	20011010	2200	20011009	1310	20011010	2300	284,702031	1650	wind/ace	n	n	n	-43	G

Tipo II km				Eventos tipo II según catálogo Wind/Waves				In situ				CA				
Comienzo		Final		Comienzo		Final		Comienzo		Final		Comienzo		Final		
Fecha	Hora	Fecha	Hora	Fecha	Hora	Fecha	Hora	Fecha	Hora	Catálogo	ECMI	NM	CFM	DST		
											R-C	TNC	R-C			
20011020	0600	20011021	1600	20011019	1645	20011021	1640	20011019	1640	wind/ace	y	y	0	F	-187	G
20011024	0300	20011024	2045	-	-	-	-	-	-	wind/ace	n	n	n	n	-6	G
20011026	0000	20011027	2330	20011025	1530	20011027	2300	20011025	1400-30	wind	y	n	0	n	-27	D
20011028	1700	20011028	2215	20011028	1400	20011029	2400	20011028	725-190	wind	y	y	0	E	-157	D
20011107	1900	20011108	0800	-	-	-	-	-	-	wind	y	n	1	n	-292	G
20011117	1600	20011118	0400	20011117	1700	20011118	0330	20011117	175-90	wind/ace	y	n	1	n	-47	D
20020311	1030	20020314	1000	-	-	-	-	-	-	UNH	n	n	n	n	19	D
20020412	0400	20020415	2300	-	-	-	-	-	-	wind/ace	y	n	1	n	-32	G
20020417	1330	20020419	0130	20020417	0830	20020419	0400	20020417	5000-40	wind/ace	y	y	2	F	-127	G
20020421	0800	20020421	2400	20020421	0130	20020421	2400	20020421	10000-60	wind/ace	n	n	n	n	-42	G
20020508	0115	20020508	1845	-	-	-	-	-	-	ace	n	y	n	F	21	G
20020517	0800	20020518	1000	-	-	-	-	-	-	wind/ace	n	y	n	F	-3	G
20020522	1600	20020523	?	20020522	0410	20020523	1040	20020522	500-30	-	y	y	2	F	-109	G
20020524	2300	20020525	1730	-	-	-	-	-	-	-	n	n	n	n	-	G
20020730	0200	20020801	1200	-	-	-	-	-	-	wind/ace	y	y	2	F	-51	D
20020824	0700	20020824	1240	-	-	-	-	-	-	UNH	n	n	n	n	-31	D
20020906	0000	20020907	0800	20020905	1655	20020907	1622	20020905	16000-30	wind/ace	n	n	n	n	-142	G
20021115	0410	20021115	1830	-	-	-	-	-	-	ace	n	n	n	n	-5	G
20021219	1000	20021220	1800	-	-	-	-	-	-	-	n	n	n	n	-	G
20030319	2330	20030320	0930	-	-	-	-	-	-	-	y	y	2	F	-64	G
20031105	1130	20031105	1800	-	-	-	-	-	-	-	n	n	n	n	-	G
20040725	2330	20040726	2200	20040725	1500	20040726	2255	20040725	1000-28	-	y	y	1	F	-	G
20040729	1930	20040730	1815	20040729	1320	20040730	2030	20040729	1000-50	-	n	n	n	n	-	G
20040812	0315	20040812	0930	-	-	-	-	-	-	-	n	n	n	n	-	G
20040913	0000	20040913	1930	20040912	0045	20040913	2100	20040912	14000-40	-	y	y	1	E	-38	G
20041105	0230	20041105	2300	-	-	-	-	-	-	-	n	n	n	n	-	G
20041107	2200	20041108	1930	20041107	1625	20041108	2000	20041107	14000-60	wind	y	y	2	F	-374	D
20041203	0700	20041204	?	20041202	0007	20041204	0430	20041202	10000-60	-	n	n	n	n	-	G
20050116	0900	20050117	0600	20050115	2300	20050116	2400	20050115	3000-40	-	y	y	1	F	-65	G
20050117	1300	20050118	1200	20050117	0925	20050118	1600	20050117	14000-30	-	y	y	0	F	-80	G
20050212	1400	20050213	0900	-	-	-	-	-	-	-	n	n	n	n	-	G
20050513	2130	20050515	0215	20050513	1700	20050515	0210	20050513	5000-40	-	y	y	2	F	-247	G
20050724	1700	20050724	1400	-	-	-	-	-	-	-	n	n	n	n	-	G
20050724	1530	20050724	2200	20050724	1350	20050724	2230	20050724	14000-150	-	n	n	n	n	-	G
20050730	1130	20050801	0100	20050730	0740	20050731	2000	20050730	9000-80	-	n	n	n	n	-	G
20050822	0800	20050824	1630	20050822	1715	20050823	1300	20050822	12000-40	wind/ace	y	n	1	n	-2	G

Tipo II km				Eventos tipo II según catálogo Wind/Waves				In situ								
Comienzo Fecha	Hora	Final		Comienzo Fecha	Hora	Final Fecha	Hora	Frecuencia	Dia del año	Hora choque	Catálogo	ECMI		CFM	DST	CA
		Fecha	Hora									R-C	TNC			
20050909	2100	20050910	0900	20050909	1945	20050910	2200	10000-50	255,250573	0600	wind	n	n	n	-65	D
20050912	2200	20050913	0615	-	-	-	-	-	258,358698	0836	wind/ace	y	n	0	-88	G
20050913	1200	20050913	1930	20050913	2020	20050915	0600	1100-35	258,360498	0839	wind	y	n	0	-86	D
20050914	0430	20050915	0515	-	-	-	-	-	-	-	-	n	n	n	-	G
20050915	1700	29950916	0830	20050915	1130	20050916	0930	100-20	-	-	-	y	n	1	-80	G
20060817	0030	20060817	0500	-	-	-	-	-	231,401962	0938	wind	n	n	n	-19	D
20061202	1350	20061202	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	n	n	n	-	G
20061206	2130	20061207	0700	20061206	1900	20061208	2400	16000-30	-	-	-	n	n	n	-	G
20061213	0820	20061213	2340	20061213	0245	20061213	1040	12000-150	350,732205	1734	wind/ace	y	y	2	-162	D
20070125	0013	20070125	2330	20070125	0655	20070125	2330	14000-90	-	-	-	n	n	n	-	G
20110415	1930	20110417	2100	-	-	-	-	-	108,240851	0546	wind	n	n	n	4	D
20110530	0400	20110530	1000	20110529	2110	20110530	1340	16000-90	-	-	-	n	n	n	-	G
20110616	0130	20110617	0200	-	-	-	-	-	-	-	-	y	y	1	-5	G
20110804	0700	20110805	1800	20110804	0415	20110805	0017	13000-60	217,730747	1732	wind	y	n	1	-115	D
20110809	2230	20110810	2300	-	-	-	-	-	-	-	-	n	n	n	-	G
20110922	1600	20110924	1800	20110922	1105	20110922	2400	14000-70	268,448976	1025	wind	n	n	n	-29	G
20111022	1800	20111023	0600	20111022	1400	20111022	2000	700-200	-	-	-	y	y	2	-147	G
20111126	1200	20111128	0500	20111126	0715	20111127	2400	10000-50	332,875087	2100	wind	y	y	2	-25	G
20111127	1610	20111128	0400	-	-	-	-	-	-	-	-	n	y	n	-	G
20120119	1900	20120121	?	20120119	1500	20120120	0245	16000-100	22,231267	0533	wind	y	y	2	-10	G
20120123	0700	20120124	1430	20120123	0400	20120124	1500	16000-40	24,611163	1440	wind	n	n	n	-42	G
20120127	2200	20120128	0800	20120127	1830	20120128	0445	16000-150	30,655017	1543	wind	n	n	n	-12	G
20120224	2330	20120226	1200	20120224	1030	20120226	2100	900-50	-	-	-	y	y	2	-57	G
20120307	0300	20120309	0800	20120307	0100	20120308	1900	16000-30	71	1300	UNH	y	y	1	-145	G
20120310	2300	20120311	1100	20120310	1755	20120311	1230	14000-30	72,362222	0841	ace	n	y	n	-38	G
20120314	0500	20120314	1200	-	-	-	-	-	75	1230	UNH	y	y	1	-88	G
20120420	2115	20120420	2400	-	-	-	-	-	114,093872	0215	wind	n	n	n	-10	D
20120517	0530	20120517	1930	-	-	-	-	-	141,056024	0120	wind	n	n	n	-17	G
20120708	1900	20120710	2030	-	-	-	-	-	-	-	-	n	n	n	-	G
20120710	1530	20120712	1600	-	-	-	-	-	196,735503	1739	wind	n	n	n	-1	G
20120717	2345	20120718	0545	20120717	1440	20120718	0500	12000-150	202	0430	UNH	n	n	n	-11	G
20120901	1500	20120902	2200	-	-	-	-	-	247,47349	1121	wind	y	y	1	-69	D
20120920	0200	20120920	0530	20120920	1510	20120920	2300	16000-150	-	-	-	n	n	n	-	G
20120928	1400	20120929	1300	-	-	-	-	-	274,427091	1014	wind	y	y	0	-39	G

La Tabla 3.3 presenta los eventos de emisión en radio km de tipo II compilados para su análisis, junto con sus fenómenos asociados (ECMIs, NMs, ondas de choque). A continuación, se detalla la información contenida en dicha tabla.

La primer columna (“Tipo II km”) muestra los eventos de tipo II identificados en este trabajo, a través de la inspección visual de los EDs del instrumento TNR. Se detallan las fechas (año-mes-día) y horas (hh:mm, en Tiempo Universal) de comienzo y fin del evento, así como el rango de frecuencias, en kHz, que abarca el evento.

La segunda columna, Eventos tipo II según catálogo Wind/WAVES, muestra los eventos que figuran reportados por dicho catálogo. Debe leerse de la misma forma que la columna anterior. Aquí se puede ver que hay ciertos eventos que no han sido identificados en el catálogo, ya que para este se usaron los datos provistos por el instrumento RAD1. Si bien el rango en frecuencia de RAD1 abarca parte del rango que también abarca TNR, el primero pierde mucha resolución a frecuencias bajas, es por esto que hay eventos que nosotros pudimos detectar, pero que no fueron reportados por el catálogo de emisiones TII de Wind/WAVES. De la misma forma, hay ciertos eventos que han sido catalogados por WIND/WAVES, pero que en nuestro análisis de los espectros dinámicos no pudimos detectar, por lo tanto no fueron considerados en este trabajo.

La tercer columna (In situ) muestra los datos y eventos detectados localmente en las naves WIND y ACE, presumiblemente asociados a nuestros eventos de tipo II kilométricos. Las columnas “Día del año”, “Hora choque” y “Catálogo” muestran si existe onda de choque detectada, que estuviera asociada al evento en radio, y de qué catálogo se tomó esa información.

La columna ECMI hace referencia a la detección de una eyección coronal de masa interplanetaria asociada a los eventos de radio según dos de catálogos provistos en línea para toda la comunidad científica internacional. Para cada evento de radio tipo II kilométrico se colocó una “y” (yes) o una “n” (no) dependiendo de si se encontró relación entre el catálogo de ICME correspondiente y los eventos encontrados a través de la inspección visual de los espectros dinámicos de TNR.

Un aspecto importante que consideramos es si esas ECMIs tenían características de Nubes Magnéticas, para lo cual se consultó nuevamente al catálogo de RC. Esto se indica en la siguiente columna “NM”. La forma en que se clasifican estos eventos es la siguiente:

- n: si RC no encontraron ECMI, por lo tanto tampoco NM.
- 0: Se encontró ECMI pero no exhibe características propias de NM.
- 1: Indica que la ECMI posee rotación del campo magnético en alguna dirección, pero carece de algunas de las otras características necesarias, por ejemplo, un aumento del campo magnético.
- 2: Indica que RC reportan una NM en asociación con la ECMI. Mas detalles de esta clasificación pueden encontrarse en el sitio web de este catálogo.

La columna CFM indica la presencia de una cuerda de flujo magnética según Nieves-Chinchilla et al. (2018), de acuerdo a su catálogo de ECMIs detectadas por la misión WIND. Donde la definición de NM es compatible con una configuración magnética de una cuerda de Flujo. Los eventos con características de NM, están indicados con una F en la columna CFM de la Tabla 3.3. Para los eventos con algunas, pero no todas las características de NM, se utiliza la denominación “C” (de *Complex Ejecta*). Si bien estas estructuras no se identifican a 1 UA como NM, pueden explicarse suponiendo que la nave las atraviesa por uno de sus extremos, por la pérdida de flujo magnético mediante procesos de reconexión en el frente del obstáculo magnético, o bien por ECMIs sucesivas interactuando entre sí (Richardson et al., 1997; Dasso et al., 2007; Lugaz et al., 2017). Con frecuencia, estos casos complejos son modelados usando técnicas de reconstrucción de cuerda de flujo.

La columna “Dst” muestra el valor del índice Dst encontrado, descrito en la sección 3.3.

La última columna “CA” es la Confiabilidad de Asociación Radio-In situ. Aquí se colocó una G (good) si había una gran certeza respecto a la asociación del evento en radio con la onda de choque/ECMI, y una D (doubtful) en caso que existieran ciertas dudas respecto a la asociación. Gran nivel de certeza implicó que la emisión de radio kilométrica de tipo II decayera sistemáticamente en frecuencia y que su proyección hacia la línea de la frecuencia del plasma local (en la nave) coincidiera con la detección de una onda de choque. Este es el caso del ejemplo mostrado en la Figura 3.3.

Capítulo 4

Análisis de ECMs asociadas

En este capítulo se presenta el análisis correspondiente a las propiedades de las ECMs que pudieron ser asociadas a los eventos de emisión en radio tipo II detectados. La búsqueda de ECMs asociadas se realizó para los años 2011 y 2012. En dicho período, las naves STEREO se encontraron en cuadratura con la línea Sol-Tierra (ver figura 4.1). Dado que es esperable que los eventos que dieron lugar a la emisión en radio detectada se hayan propagado en dirección a la tierra, esta configuración permite obtener resultados mas confiables para las propiedades de las ECMs, al reducir los efectos de proyección.

Para asociar eventos de emisión en radio con ECMs en la corona de luz blanca, se consultaron los catálogos de LASCO (para ECMs vistas desde la perspectiva terrestre) y JHUAPL (para ECMs vistas desde las naves STEREO), que ocurrieran a lo sumo dos días antes de la detección en radio del TII de baja frecuencia. Mediante la identificación de sus regiones fuente, y la visualización de imágenes coronagráficas se buscaron ECMs cuya dirección de propagación sea en sentido hacia la Tierra. Dado que las ondas de choque están asociadas a las ECMs más energéticas, no se consideraron como eventos candidatos a aquellos mas lentos y de menor tamaño angular. La búsqueda se centró eventos que fueran observados por los coronógrafos de LASCO y STEREO en forma simultánea.

La Tabla 4.2 muestra los 21 eventos a los que inicialmente se trató de asociar la ECM correspondiente. Para 16 eventos se logró asociar una ECM observada en luz blanca. Los eventos que fueron asociados se muestran en la columna ECM de la Tabla 4.2. Allí se muestra la fecha y hora de la misma y el catálogo del cual se obtuvo la información. Los valores correspondientes a la masa (en gramos), velocidad lineal (en km/s), y energía (en ergios) se obtuvieron del catálogo de CME de LASCO. Sin embargo, para 3 de los eventos esta información no se encontraba

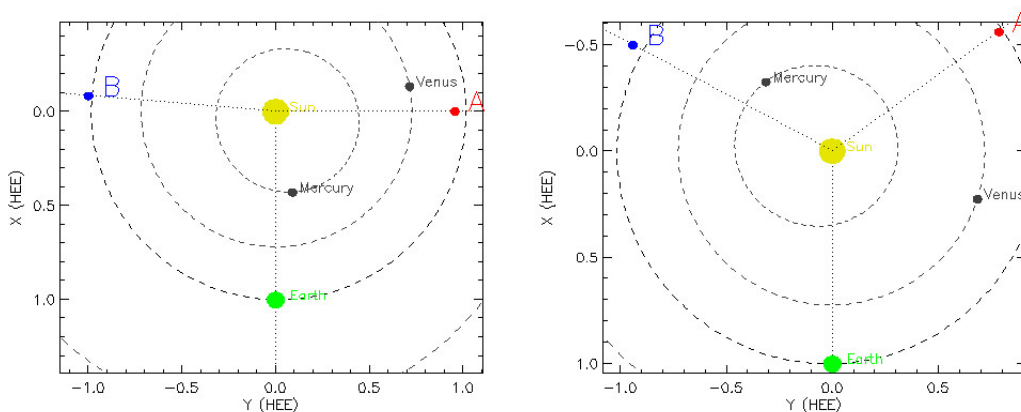


Figura 4.1: Posiciones de las naves STEREO para el periodo en que ocurrieron las ECMs analizadas. Panel izquierdo: ubicación el día 15/04/2011. Panel derecho: ubicación el día 28/10/2012.

disponible. La última columna "AA" se refiere al ancho angular de la ECM, medido en grados desde el norte solar en sentido anti-horario.

Para 5 eventos TII, sin embargo, no se logró asociar ECM. Para el primer evento (20110415) existían dos candidatas, una al principio del día 15 y otra alrededor de las 13 hs del mismo día, pero según CACTus, tienen velocidades de alrededor de 300 km/s, lo cual la hace muy lenta como para ser asociada. En el segundo y tercer evento sin ECM (20120708 y 20120710) no se encontró ECM de acuerdo a los criterios utilizados. Para el cuarto evento sin ECM (20120717) hay una CME el día 16 alrededor de las 21hs, pero es demasiado lenta y no parece ser candidata. En el último evento sin ECM (20120920), se encontraron 4 ECM en un rango horario factible, sin embargo no apuntaban hacia la Tierra y por ende queda descartado.

Tipo II km				Catálogo wind/waves de eventos tipo II				ECM						
Comienzo	Final	Frecuencia		Comienzo	Final	Frecuencia		Fecha	Hora	Catálogo	Masa	Vel	Energía	AA
Fecha	Fecha	Hora	Final	Fecha	Fecha	Hora	Final	Fecha	Hora					
20110415	20110417	1930	2100	200-59	-	-	-	20110629	21:24:08	NO ECM	NO ECM	1407	2,00E+31	
20110530	20110530	400	1000	200-100	20110529	2110	20110530	1340	07:24:00	CDAW	2,00E+15	520	2,50E+31	55
20110616	20110617	130	200	66-20	-	-	-	20110614	07:24:00	APL	1,50E+16	1808	9,30E+31	107
20110804	20110805	700	1800	240-16	20110804	415	20110805	17	04:24:00	APL	1,10E+16	1610	1,50E+32	360
20110809	20110810	2230	2300	30-245	-	-	-	20110809	08:12:06	CDAW	1,10E+16	1905	3,70E+32	
20110922	20110924	1600	1800	30-245	20110922	1105	20110922	2400	10:48:06	CDAW	2,10E+16	1005	6,20E+31	
20111022	20111023	1800	600	40-200	20111022	1400	20111022	2000	10:24:05	CDAW	1,20E+16	1139	5,20E+31	89
20111126	20111128	1200	500	35-245	20111126	715	20111127	2400	07:24:00	APL	1,20E+16	?	1,20E+32	
20120119	20120121	1900	?	?	20120119	1500	20120120	245	12:24:00	APL	1,90E+16	1685	6,20E+32	
20120123	20120124	700	1430	20-245	20120123	400	20120124	1500	03:24:00	APL	2,60E+16	816	2,00E+31	105
20120224	20120226	2330	1200	245-30	20120224	1030	20120226	2100	03:39:00	APL	6,30E+15	1825	5,00E+32	360
20120307	20120309	300	800	245-30	20120307	100	20120308	1900	00:24:06	CDAW	1,40E+16	795	?	112
20120310	20120311	2300	1100	245-50	20120310	1755	20120311	1230	17:54:00	APL	?	678	?	54
20120420	20120420	915	2400	245-58	-	-	-	20120419	16:24:24	APL	?	1582	4,50E+32	360
20120517	20120517	530	1930	245-80	-	-	-	20120517	01:48:05	CDAW	3,60E+16			
20120708	20120710	1900	2030	245-35	-	-	-			NO ECM	NO ECM			
20120710	20120712	1530	1600	165-40	-	-	-			NO ECM	NO ECM			
20120717	20120718	2345	545	200-100	20120717	1440	20120718	500	20:00:05	CDAW	2,00E+16	1442	2,10E+32	360
20120901	20120902	1500	2200	100-30	-	-	-	20120831	20:00:05	CDAW	2,00E+16			
20120920	20120920	200	530	200-142	20120920	1510	20120920	2300	23:54:00	APL	NO ECM	1137		107
20120928	20120929	1400	1300	240-45	-	-	-							

Figura 4.2: Se muestra información de los eventos para los cuales se pudo asociar una ECM a las emisiones en radio detectadas en este trabajo. Los eventos corresponden a los años 2011-2012. Ver texto para detalles.

Capítulo 5

Resultados

La Figura 5.1 muestra la frecuencia anual de eventos de radio km de tipo II durante el periodo de estudio (2000-2012). Las columnas azules corresponden a la totalidad de eventos por año, en tanto que las verdes son los eventos con onda de choque asociada. El histograma está en concordancia con el ciclo solar, según lo demuestra el número mensual de manchas graficado en la Figura 1.6. Durante el máximo del ciclo 23 y la fase ascendente del 24, se observa el máximo número de eventos km-TII. El pico del ciclo 23 se condice con el máximo número de eventos detectados en un mismo año (25 eventos). Se distingue además un pico de eventos km de tipo II en el año 2005, que se corresponde con la fase decreciente del ciclo solar. Esto indica que durante la etapa de descenso de actividad del ciclo solar 23, se mantuvo un número elevado de eventos capaces de emitir radiación km en radio del tipo II.

La figura 5.2 compara el número de manchas solares promediado cada 13 meses (ver figura 1.6), y la frecuencia anual de eventos de emisión en radio TII que fueron analizados en este trabajo. Ambas cantidades se grafican normalizadas en función del tiempo. La figura muestra que existe un buen acuerdo entre el número de manchas solares y la ocurrencia de eventos en radio del tipo II. Es sabido que el número de manchas observadas en el Sol es uno de los indicadores más utilizados para representar la variación de la actividad solar. Por esta razón, resulta de interés que la emisión en radio asociada a la propagación de ondas de choque, se correlacione con el número de manchas. De esta manera, este tipo de eventos podrían utilizarse también como un indicador de la actividad solar. Sin embargo, se debe recalcar que en nuestro trabajo sólo se analizaron datos para un ciclo solar completo (ciclo 23 y parte del 24). Por lo tanto, se requiere un estudio más amplio de manera de corroborar si la correlación entre estas variables se cumple para varios ciclos solares.

La información de los eventos se resume en la tabla 5.1. Se encontraron 105 eventos TII, 38 de los cuales no habían sido previamente catalogados por Wind. 60 eventos presentaron onda de choque asociada, un 57%. Notable es remarcar el hecho de que existen 45 eventos TII que no tienen onda de choque asociada y aún así existe emisión de radio kilométrica.

Se asociaron 46 ECMIIs a los eventos de radio TII, y 36 de las cuales eran nubes magnéticas. 60 eventos no fueron.

5.1. Indicador de actividad geomagnética y la emisión km en radio tipo II

Los valores del índice Dst correspondientes a todos los eventos en los cuales pudo ser determinado este valor, es decir aquellos asociados a EMCIs, son graficados en función del tiempo en la Figura 5.3. De la misma manera que para el histograma de la figura anterior, los menores valores de Dst, ocurren durante los máximos de ambos ciclos solares, de acuerdo con el acontecimiento de tormentas geomagnéticas más intensas en torno a éstas fechas. Al igual que en la Figura 5.1, para los años 2004-2006 se encontró que hubieron varios eventos que afectaron de

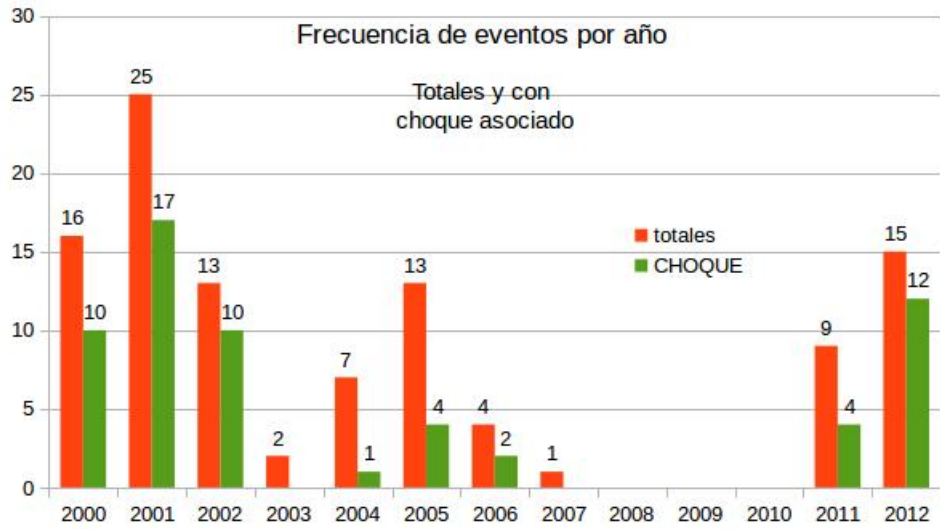


Figura 5.1: Histograma correspondiente a la totalidad de eventos detectados en este trabajo, por año. Se aprecia una gran cantidad de eventos en los máximos del ciclos solar 23 y 24, así como un número considerable de eventos en el año 2005, cuando el ciclo 23 estaba en la fase descendente.

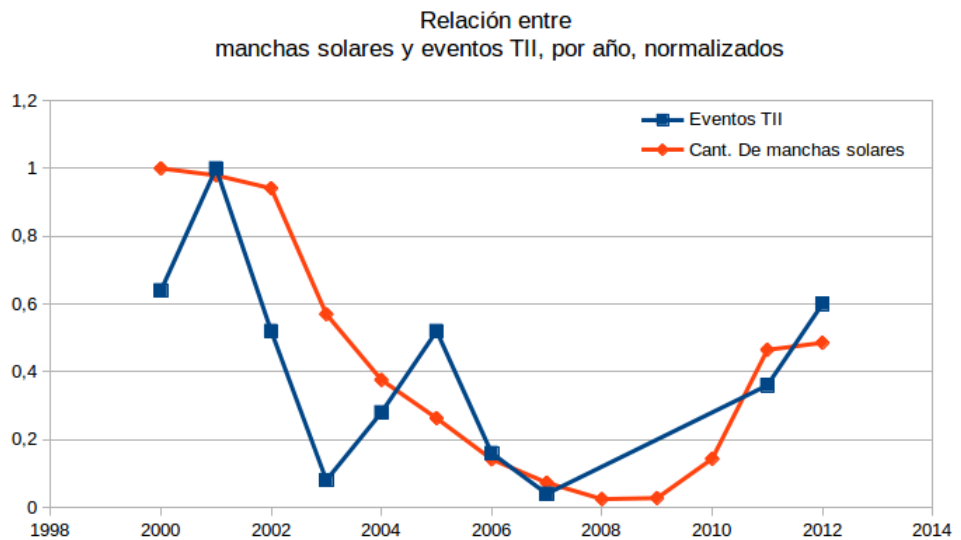


Figura 5.2: La gráfica compara para el período 2000-2012, el número de manchas solares promediado cada 13 y el número anual de eventos de tipo II detectados en este trabajo. Ambas cantidades fueron normalizadas para mejorar su visualización. El número de manchas solares es provisto por el observatorio Real de Bélgica.

	KmTII	Wind	Choque	Sin Choque
KmTII	105	73	60	45
choque	60	38	-	-
ECMI	46	-	30	16
MC	36	-	23	14
Choque + ECMI	30	19	-	-
Choque + MC	23	14	-	-

Cuadro 5.1: Resumen de los valores encontrados para los eventos analizados. Se agruparon los resultados de acuerdo a las diferentes clasificaciones consideradas en este trabajo.

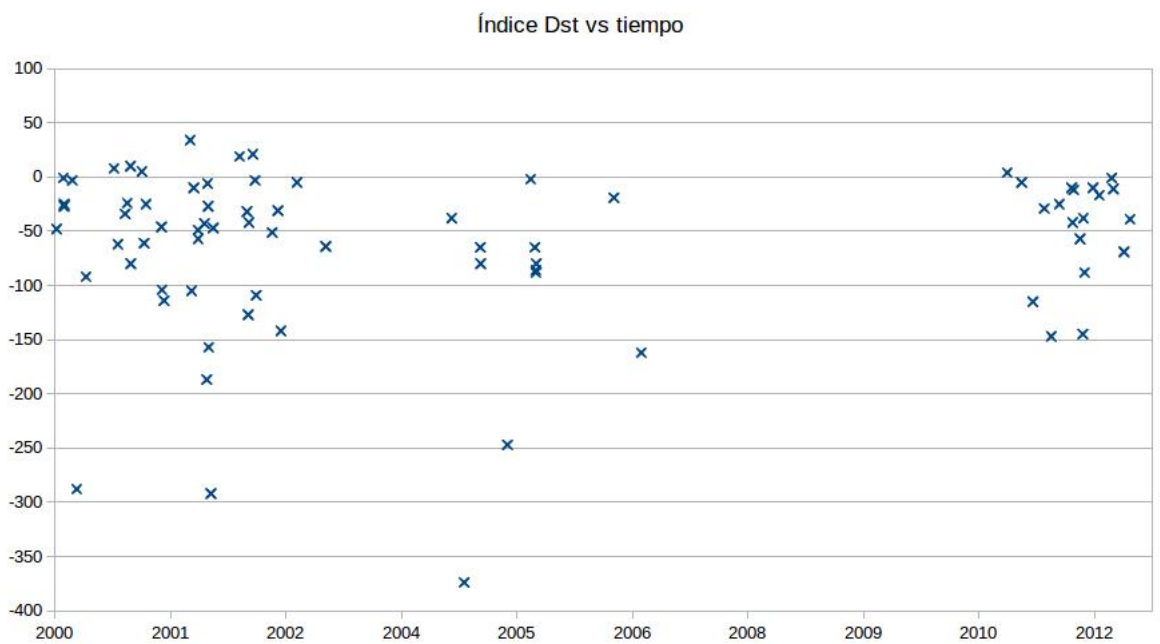


Figura 5.3: Valores de Dst en función del tiempo. En el eje vertical está graficado el valor que toma el Dst. Cabe aclarar que mientras más negativo es el Dst, la tormenta es mayor. Existe una clara distribución en torno a los máximos que delimitan el ciclo solar 23.

manera considerable la magnetósfera terrestre. Resulta interesante notar los puntos mas intensos se encuentran en la fase decreciente del ciclo solar.

Agradecimientos

A mi familia y amigos por el apoyo brindado, ánimos en momentos difíciles y su ayuda en todo mi contexto no universitario;

A Hebe Cremades, Carlos Francile y Fernando López, por su contribución por su ayuda incondicional y siempre buena predisposición;

A la FCEF N y docentes de la Licenciatura de Astronomía.

Bibliografía

- Bale, S. D., Reiner, M. J., Bougeret, J. L., Kaiser, M. L., Krucker, S., Larson, D. E., and Lin, R. P. (1999). The source region of an interplanetary type II radio burst. *grl*, 26(11):1573–1576.
- Bougeret, J. L., Kaiser, M. L., Kellogg, P. J., Manning, R., Goetz, K., Monson, S. J., Monge, N., Friel, L., Meetre, C. A., Perche, C., Sitruk, L., and Hoang, S. (1995). WAVES: The radio and plasma wave investigation on the wind spacecraft. *Space Sci. Rev.*, 71:231–263.
- Burlaga, L. (1991). *Magnetic Clouds, in physics of the inner heliosphere, vol II: Particles, waves and turbulence*. Springer.
- Cane, H. V. and Richardson, I. G. (2003). Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996-2002. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 108(A4):1156.
- Carrington, R. (1859). Description of a singular appearance seen in the sun on september 1, 1859. *Mon Not R Astron Soc*, 20:13–15.
- Cremades, H., Iglesias, F., St. Cyr, O., and et al. (2015). Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space. *Sol. Phys.*, 2455(290).
- Cremades, H. and St. Cyr O.C. and Kaiser, M. (2007). *Space Weather*, 8001(5).
- Cremades, M. H. (2005). *Three-Dimensional Configuration and Evolution of Coronal Mass Ejections*. PhD thesis, Fakultat für Physik und Geowissenschaften, Universität Carolo-Wilhelmina.
- Dasso, S., Nakwacki, M., Démoulin, P., and et al. (2007). Progressive transformation of a flux rope to an icme. *Sol. Phys.*, 244:115–137.
- Dungey, J. (1961). Interplanetary magnetic field and the auroral zones. *Phys Rev Lett*, 6:47–48.
- Gosling, J. (1993). The solar flare myth. *J Geophys Res*, 98:18937–18950.
- Gosling, J. (1997). *Coronal mass ejections: an overview*, volume 99. American Geophysical Union, Washington, DC, geophysical monograph edition.
- Gosling, J., Pizzo, V., and Bame, S. (1973). Anomalously low proton temperatures in the solar wind following interplanetary shock waves - evidence for magnetic bottles? *J Geophys Res.*, 78:2001.
- Gosling, J. T., Asbridge, J. R., Bame, S. J., Hundhausen, A. J., and Strong, I. B. (1968). Satellite observations of interplanetary shock waves. *jgr*, 73(1):43.
- Kilpua, E., Koskinen, H. E. J., and Pulkkinen, T. I. (2017). Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space. *Living Rev. Sol. Phys.*, 14(5).
- Kilpua, E., Savnin, I., Vourlidas, A., Koskinen, H., and Rodriguez, L. (2013). On the relationship between interplanetary coronal mass ejections and magnetic clouds. *Ann Geophys*, 31:1251–1265.

- Lang, K. R. (2001). *The Cambridge Encyclopedia of the Sun*.
- Lopez, R. (1987). Solar cycle invariance in solar wind proton temperature relationships. *J Geophys Res*, 92:11189–11194.
- Lugaz, N., Temmer, M., Wang, Y., and Farrugia, C. J. (2017). The Interaction of Successive Coronal Mass Ejections: A Review. *Sol. Phys.*, 292(4):64.
- Nieves-Chinchilla, T., Vourlidas, A., Raymond, J., Linton, M., Al-Haddad, N., Savani, N., Szabo, A., and Hidalgo, M. (2018). Understanding the internal magnetic field configurations of icmes using more than 20 years of wind observations. pages 27–57.
- Reiner, M. J., Kaiser, M. L., Fainberg, J., Bougeret, J. L., and Stone, R. G. (1997). Remote Radio Tracking of Interplanetary CMEs. In Wilson, A., editor, *Correlated Phenomena at the Sun, in the Heliosphere and in Geospace*, volume 415 of *ESA Special Publication*, page 183.
- Richardson, I. and Cane, H. (1993). Signatures of shock drivers in the solar wind and their dependence on the solar source location. *J Geophys Res*, 98(A9):15295–15304.
- Richardson, I. and Cane, H. (1995). Regions of abnormally low proton temperature in the solar wind (1965-1991) and their association with ejecta. *J Geophys Res*, 100:23397–23412.
- Richardson, I. and Cane, H. (2012). Solar wind drivers of geomagnetic storms during more than four solar cycles. *J Space Weather Space Clim*, 2(27)(A01).
- Richardson, I., Cane, H., and Wibberenz, G. (1997). Helios i and 2 observations of particle decreases, ejecta, and magnetic clouds. *J Geophys Res.*, 102(A4):7075–7086.
- Richardson, I. G. and Cane, H. V. (2010). Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996-2009): Catalog and Summary of Properties. *Sol. Phys.*, 264(1):189–237.
- Zhang, J., Liemohn, M. W., Kozyra, J. U., Lynch, B. J., and Zurbuchen, T. H. (2004). A statistical study of the geoeffectiveness of magnetic clouds during high solar activity years. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 109(A9):A09101.