



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

COMPARACIÓN DE MODELOS ANALÍTICOS DE
PROPAGACIÓN DE EMCs Y
SU VALIDACIÓN USANDO ESTALLIDOS DE RADIO
TIPO II

T E S I S
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
P R E S E N T A
CARLOS ARTURO PÉREZ ALANIS

COMITÉ TUTOR

DR. ERNESTO AGUILAR RODRÍGUEZ
Instituto de Geofísica, Unidad Morelia

DR. MARIO RODRÍGUEZ MARTÍNEZ
ENES, Morelia

DR. PEDRO CORONA ROMERO
SCiESMEX, Instituto de Geofísica, Unidad Morelia

JURADO EXAMINADOR

DR. ERNESTO AGUILAR RODRÍGUEZ
Instituto de Geofísica, Unidad Morelia

DR. MARIO RODRÍGUEZ MARTÍNEZ
ENES, Morelia

DR. PEDRO CORONA ROMERO
SCiESMEX, Instituto de Geofísica, Unidad Morelia

DR. PRIMOZ KADJIC
Instituto de Geofísica, UNAM

DR. ROMÁN PÉREZ ENRÍQUEZ
Instituto de Geofísica, Campus Juriquilla



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.

*“Hay una fuerza más poderosa que el vapor,
la electricidad y la energía atómica: la voluntad.”*

Albert Einstein

Agradecimientos

- A mi tutor, el Dr. Ernesto Aguilar por brindarme todo su apoyo y tiempo, además de su confianza y amistad que siempre valorare.
- A mi jurado examinador, por dedicar parte de su tiempo en sus valiosos comentarios y correcciones, los Dres. Mario Rodríguez, Primož Kajidč, Román Pérez, y en especial, al Dr. Pedro Corona por haberme apoyado durante este proceso, y por haberse convertido en mi segundo jefe.
- A mis compañer@s del IGUM por hacer más ameno mis días en el cubículo, a mis profesores por sus enseñanzas, sus consejos y por guiarme durante estos dos años de maestría, a la administración del IGUM por apoyarme desde el primer día que pise este edificio.
- Con mucho cariño a mi familia, a mis papas a mi hermana y a mi jacko.
- Y en especial a mi abue, ya que gracias a ella me convertí en la persona que soy y se que siempre ahí estará donde yo vaya.

Resumen

Las Eyecciones de Masa Coronal (EMCs) son eventos súbitos y transitorios que ocurren en la corona solar y arrojan grandes cantidades de plasma magnetizado hacia el medio interplanetario, generando diversos cambios energéticos y morfológicos tanto en la región donde eruplan como a su paso a través del medio interplanetario. Las EMCs pueden estar asociadas con choques interplanetarios y éstos asociados con emisiones de estallidos de radio Tipo II. Algunas EMCs traen consigo cierta configuración magnética que pueden generar tormentas geomagnéticas una vez que llegan a la Tierra, lo que es de interés para el clima espacial. Por lo tanto es importante predecir tiempos de arribo de las EMCs que son potencialmente geoeffectivas para generar una tormenta geomagnética. En el presente trabajo usamos modelos hidrodinámicos de fuerza de arrastre (viscoso e inercial) para aproximar la propagación de una EMC a través del medio interplanetario. Analizando un conjunto de EMCs rápidas para encontrar los coeficientes de arrastre apropiados que simultáneamente aproximan: llegadas in-situ de los eventos, su asociación con estallidos de radio Tipo II y observaciones satelitales de estos fenómenos. Nuestros resultados sugieren que la fuerza de arrastre cuadrático e inercial son los agentes dinámicos que prevalecen en la propagación de las EMCs rápidas.

Abstract

Coronal mass ejections (CMEs) are sudden and transitory events which occur at coronal scales, liberating large amounts of magnetized plasma into the interplanetary (IP) medium, and generating several energetic and morphological changes in the near-Sun and IP regions. CMEs may be associated with interplanetary shocks and these with type II radio bursts emissions. Some of the CMEs carry a magnetic configuration that can generate geomagnetic storms, the main interest in space weather studies. It is therefore important to predict arrival times of CMEs that are potentially geoeffective to generate a geomagnetic storm. In this work we used a number of hydrodynamic (viscous and inertial) drag force models to approximate the trajectory of a CME. We analyzed a set of fast CMEs by finding the appropriate drag coefficients that simultaneously approximated: the in-situ arrivals of the events, their associated type II radio-burst and satellite observations of these phenomena. Our results suggest that quadratic and inertial drag are the dynamic agent that prevails for fast CMEs propagation.

Preámbulo

Las eyecciones de masa coronal (EMCs) son el resultado de procesos de inestabilidad y reconexión de campo magnético solar. Junto con las fulguraciones solares, las EMCs son los eventos eruptivos más energéticos de las manifestaciones de la actividad solar ($E_k \sim 10^{30} \text{ ergs}$, Vourlidas, et al, 2000). Las EMCs son observadas por distintas misiones espaciales como Skylab [1973-1974], Solar Maximum Mission [1980; 1984-1989], y actualmente la nave espacial SOHO, que tiene un sistema de coronógrafos conocidos como LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph), ampliando la visión sobre la dinámica y cómo evolucionan estas estructuras en el tiempo mientras son expulsadas desde el Sol. Distintos estudios han confirmado que la velocidad de salida de las EMCs va desde 200 a más de 2500 km s^{-1} (Gosling, et al, 1976; Howard, et al, 1985; Hundhausen, et al, 1984). Para hacer el seguimiento de la evolución heliocéntrica, los coronógrafos de LASCO nos permiten hacerlo, sin embargo están restringidos con un campo de visión de $32R_{\odot}$. Más allá de esta distancia es posible hacer el rastreo de estas estructuras, usando las observaciones de la emisión de radio Tipo II del choque que las produce, es decir, cuando las EMCs se propagan a una velocidad mayor a la velocidad magnetosónica del medio. Las EMCs pueden impulsar ondas de choque mientras se propagan a través del medio interplanetario (Russell, et al, 1974; Gosling, et al, 1991). Sin embargo, no todas las EMCs están asociadas a estallidos de radio Tipo II, por lo que solo algunas de éstas pueden seguirse desde que salen del Sol hasta que llegan a 1 UA. Debido a estas limitaciones, se han desarrollado otras técnicas, observacionales y teóricas, para darles seguimiento a las EMCs, el centelleo interplanetario (CIP) y simulaciones magnetohidrodinámicas son algunos ejemplos de estas.

Desde el punto de vista teórico, distintos estudios han permitido un mejor entendimiento sobre la evolución y la dinámica de las EMCs a través del medio interplanetario, en particular precisar los tiempos de arribo y velocidades promedio de EMCs a 1 UA nos da una herramienta de predicción para aminorar los posibles daños sobre el entorno terrestre. Además de investigar que mecanismos físicos rigen la interacción entre el viento solar (VS) y una EMC. Distintos trabajos han abordado este tema. Autores como Gopalswamy et al, (2000) y Schween et al, (2004), mediante modelos semi-empíricos determinaron el tiempo de arribo de las EMCs a la órbita de la Tierra. Más adelante Vrsnak y Gopalswamy (2002), Cargill (2004) y Borgazzi et al, (2008) usando simulaciones hidrodinámicas estudiaron la propagación de las EMCs considerando fuerzas de arrastre, obteniendo buena correlación con resultados obtenidos con EMCs observadas a 1 UA. Por otro lado, Cantó et al, (2000, 2005) presento un modelo analítico para la dinámica de las fluctuaciones de la velocidad en el viento solar, particularmente EMCs viajando en el medio interplanetario. Adicionalmente, Gonzalez-Esparza et al, (2003) muestra resultados numéricos y analíticos sobre la evolución radial de la velocidad de la eyecta, mostrando que siguen dos fases de aceleración. Finalmente, Corona-Romero et al, (2011) amplía este modelo para analizar la evolución heliocéntrica de EMCs interplanetarias e investigar cómo y dónde se aceleran en el medio interplanetario, utilizando como datos iniciales mediciones in-situ para este modelo.

A pesar de la vasta información que han aportado toda esta serie de trabajos para comprender la evolución heliocéntrica de las EMCs. Distintos autores (Vrsnak y Gopalswamy, 2002; Cargill, 2004; Tappin, 2006; Borgazzi et al, 2008; Corona-Romero, 2011) han mostrado resultados acerca de la evolución dinámica de EMCs con base a distintos modelos analíticos y empíricos, enfatizando que en ningún trabajo se ha propuesto estudiar todos los modelos de propagación existentes en la literatura, cada trabajo ha mostrado resultados aislados de los modelos, además de limitarse a corroborar cada modelo usando observaciones in-situ. La motivación principal de este trabajo

es analizar la diferencia entre los distintos modelos para determinar cuál es el mecanismo físico que rige la interacción entre VS-EMC y validarlos usando estallidos de radio Tipo II. Con esta finalidad, este trabajo pretende responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué tan válidos son estos modelos desde el punto de vista físico?
- Debido a que los modelos de propagación cuentan con uno o más parámetros libres, entonces, ¿de qué manera deben ajustarse estos parámetros libres para poder estimar el arribo de las eyecciones a la Tierra y que estos ajustes sean físicamente consistentes?

Estructura de la tesis

La tesis está dividida en 6 capítulos. El primer capítulo presenta una breve descripción del viento solar, así como las principales manifestaciones de la actividad solar; fulguraciones, estallidos de radio Tipo II y EMCs. Además de explicar brevemente algunas firmas características que presentan las EMCs in-situ a través del medio interplanetario. En el capítulo 2 nos centramos en hacer una revisión detallada de los distintos modelos existentes, para entender desde un punto de vista empírico y analítico, la propagación de EMCs a través del medio interplanetario. A su vez, discutimos los diferentes mecanismos físicos que describen la desaceleración de una EMC rápida en el medio interplanetario. En el capítulo 3 nos dedicamos a presentar la metodología expuesta para realizar este trabajo de tesis, en esta parte describimos el procedimiento para la identificación de los eventos y el criterio que se siguió para poder analizarlo con cada uno de los modelos de propagación y, a su vez, la manera en que se validó cada modelo usando estallidos de radio Tipo II. En el capítulo 4 engloban los resultados que encontramos derivado del análisis de este trabajo. En el capítulo 5 se presenta la discusión e interpretación de nuestros resultados, acerca de las diferencias y similitudes de los modelos, y la validación de los modelos usando estallidos de radio Tipo II. Además de encontrar qué mecanismos físicos son los que mejor describen la interacción entre el viento solar y la EMC, esto con base en los resultados que arrojó el análisis de este

trabajo. Finalmente en el capítulo 6 presentamos nuestras conclusiones derivadas de nuestro estudio.

Índice general

Resumen	I
Preámbulo	III
1. Introducción	1
1.1. Viento solar	1
1.2. Principales manifestaciones de la actividad solar	4
1.2.1. Fulguraciones	5
1.2.2. Eyecciones de masa coronal	7
1.2.2.1. Firmas de EMCIs	10
1.2.3. Estallidos de radio Tipo II	11
2. Modelos analíticos de la propagación de una EMC	15
2.1. Marco teórico	16
2.2. Fuerzas de arrastre	17
2.3. Modelos teóricos de propagación	21
2.3.1. Modelos de fuerza de arrastre	21
2.3.2. Modelos de conservación	23
2.3.3. Parámetros libres	25
3. Metodología del análisis	29
3.1. Identificación de eventos	29
3.2. Validación por medio de estallidos de radio Tipo II	30

3.3. Cálculo de los parámetros in-situ	33
3.4. Lista de eventos	36
4. Resultados	39
4.1. Estudios de caso	39
4.2. Parámetros libres	55
5. Discusión	59
5.1. Parámetros libres	66
6. Conclusiones	69

Índice de figuras

1.1.	Mediciones realizadas por la nave espacial Ulysses, durante el período 1994-1995, 2000-2001. La figura muestra las distintas configuraciones del viento solar durante el mínimo (panel izquierdo) y máximo (panel derecho) solar. Esta figura muestra la dependencia helio-latitudinal de la velocidad del VS durante un mínimo y máximo solar. [Tomada de http://solarprobe.gsfc.nasa.gov/solarwind.jpg].	2
1.2.	Flujo de rayos X por el satélite GOES entre el 8 al 11 de noviembre de 2011. [Tomada de http://swpc.noaa.gov].	8
1.3.	Imagen de una eyección de masa coronal. [Tomada de http://solarprobe.gsfc.nasa.gov/solarwind.jpg].	10
1.4.	Ejemplo de una EMC detectada in-situ. Los paneles corresponden a: magnitud del campo magnético, componentes del campo magnético (B_x , B_y y B_z), velocidad, densidad de protones y temperatura. La línea vertical segmentada indica el comienzo del choque, y el rectángulo en líneas verticales solidas representa las firmas de la eyecta.	12
1.5.	Firma característica de una estallido de radio Tipo II en el espectro dinámico. El Tipo II se caracteriza por una estrecha banda de emisión que deriva a frecuencias menores mientras transcurre el tiempo. El color representa la intensidad.	14

2.1. Desarrollo de la capa límite para una placa delgada, donde U es la velocidad de la corriente, δ es el espesor de la capa límite y x la longitud característica de la placa. Si la placa suficientemente larga, siempre existirá un punto de transición donde el régimen se vuelva turbulento. Esta región está asociada a un incremento del espesor de la capa límite en dirección de la velocidad U . En esta región las trayectorias de las partículas se vuelven desordenadas, convirtiéndose en una estela turbulenta y difusa. [Tomada de <http://www.fem.unicamp.br/~phoenics>]. 21

3.1. Ilustración que muestra la metodología usada para aproximar la deriva de frecuencia obtenida por los modelos con la deriva de frecuencia observada por datos in-situ. En el panel (a) se muestra donde se esta produciendo el estallido Tipo II, y en el panel (b) se muestra la deriva de frecuencia obtenida por los modelos, antes y después de hacer la corrección, línea continua y segmentada, respectivamente. 32

3.2. Firma característica de una EMCI observada in-situ a 1 UA, correspondiente a los días 13 al 18 de Mayo de 2005. La línea punteada indica el tiempo donde se tomaron los valores del VS de entrada para los modelos, en línea segmentada y línea continua el tiempo de inicio del choque y de la EMC, respectivamente.[Tomada de: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>] 34

4.1. Resultados de los modelos analíticos. En el panel (A) se muestra el perfil de la velocidad de la EMC en función del tiempo, en el panel (B) la posición heliocéntrica de la EMC mientras transcurre el tiempo y en el panel (C) el espectro dinámico correspondiente a la fecha que ocurre el evento. La línea continua representa la deriva de frecuencia calculada a partir de los modelos. Los valores de arriba in-situ se identifican por medio de un asterisco. 41

4.2. Resultados de los modelos analíticos. En el panel (A) se muestra el perfil de la velocidad de la EMC en función del tiempo, en el panel (B) la distancia n heliocéntrica de la EMC en función del tiempo y en el panel (C) el espectro dinámico correspondiente a la fecha que ocurre el evento. La línea continua muestra la deriva de la frecuencia calculada a partir de los modelos. Los valores de arribo in-situ se identifican por medio de un asterisco. 44

4.3. Resultados de los modelos analíticos. En el panel (A) se muestra el perfil de la velocidad de la EMC en función del tiempo, en el panel (B) la posición heliocéntrica de la EMC mientras transcurre el tiempo y en el panel (C) el espectro dinámico correspondiente a la fecha que ocurre el evento. La línea continua muestra la deriva de frecuencia calculada mediante los modelos. Los valores de arribo in-situ se identifican por medio de asterisco. 47

4.4. Resultados de los modelos analíticos. En el panel (A) se muestra el perfil de la velocidad de la EMC en función del tiempo, en el panel (B) la posición heliocéntrica de la EMC mientras transcurre el tiempo y en el panel (C) el espectro dinámico correspondiente a la fecha que ocurre el evento. La línea continua se muestra la deriva de frecuencia simulada. Los triángulos, círculos y rombos corresponden a datos de coronógrafos (LASCO), deriva de frecuencia (WAVES/RAD1) y centelleo interplanetario (STEL, EISCAT-MERLIN y Ooty). Los valores de arribo in-situ se identifican por medio de un asterisco. 50

4.5. Resultados de los modelos analíticos. En el panel (A) se muestra el perfil de la velocidad de la EMC en función del tiempo, en el panel (B) la posición heliocéntrica de la EMC mientras transcurre el tiempo y en el panel (C) el espectro dinámico correspondiente a la fecha que ocurre el evento. En línea continua se muestra la deriva de frecuencia simulada. Los valores de arribo in-situ se identifican por medio de asterisco. 53

4.6.	Comparación entre los valores in-situ versus los valores arrojados por los modelos cuadráticos. En el panel (a) tenemos la velocidad in-situ vs velocidad calculada, y el panel (b) tenemos el tiempo de tránsito in-situ vs el tiempo de tránsito calculado. .	56
4.7.	Comparación entre los valores in-situ versus los valores calculados por los modelos lineales. En el panel (a) tenemos la velocidad in-situ vs velocidad calculada, y el panel (b) tenemos el tiempo de tránsito in-situ vs el tiempo de tránsito calculado. .	56
4.8.	Comparación entre los valores in-situ versus los valores calculados por los modelos de conservación de momento. En el panel (a) tenemos la velocidad in-situ vs velocidad calculada, y el panel (b) tenemos el tiempo de tránsito in-situ vs el tiempo de tránsito calculado.	57

Índice de tablas

1.1. Propiedades del Viento Solar a 1 UA. Adaptada de Priest (2014). . . .	3
2.1. De izquierda a derecha tenemos, modelo usado, autor (es) correspondiente de cada modelo, hipótesis de las que parte cada modelo y por ultimo el rango de valores de cada parámetro libre dónde esta limitado. *Para estos parámetros no existe un intervalo donde esten definidos. †Pérez de Tejada (2005). †Vourlidas et al.(2002), Chen(2011), Priest (2014). . . .	26
3.1. Lista de eventos y condiciones iniciales. De izquierda a derecha: número de evento, fecha, tiempo de la primera observación del coronógrafo, posición de la EMC, velocidad de la EMC, valores in-situ del VS ambiente (velocidad, densidad, temperatura y magnitud del campo magnético), duración de la fase creciente de la fulguración asociada al evento, velocidad de llegada de la EMC a 1 UA y tiempo de tránsito. * Valores obtenidos por el catálogo de LASCO. ★ Valores estimados usando registros in-situ.	37
4.1. Valores de los parámetros libres y resultados del análisis. De izquierda a derecha: Modelo usado, parámetro (s) libre (s) que mejor aproximó el arribo de la eyecta, velocidad de arribo y tiempo de tránsito calculados, y diferencia entre los resultados obtenidos con los valores in-situ. . . .	40

4.2.	Valores de los parámetros libres y resultados del análisis. De izquierda a derecha: Modelo usado, parámetro (s) libre (s) que mejor aproximó el arribo de la eyecta, velocidad de arribo y tiempo de tránsito calculados, y diferencia entre los resultados obtenidos con los valores in-situ.	42
4.3.	Valores de los parámetros libres y resultados del análisis. De izquierda a derecha: Modelo usado, parámetro (s) libre (s) que mejor aproximó el arribo de la eyecta, velocidad de arribo y tiempo de tránsito calculados, y diferencia entre los resultados obtenidos con los valores in-situ.	46
4.4.	Valores de los parámetros libres y resultados del análisis. De izquierda a derecha: Modelo usado, parámetro (s) libre (s) que mejor aproximó el arribo de la eyecta, velocidad de arribo y tiempo de tránsito calculados, y diferencia entre los resultados obtenidos con los valores in-situ.	49
4.5.	Valores de los parámetros libres y resultados del análisis. De izquierda a derecha: Modelo usado, parámetro (s) libre (s) que mejor aproximó el arribo de la eyecta, velocidad de arribo y tiempo de tránsito calculados, y diferencia entre los resultados obtenidos con los valores in-situ.	52
4.6.	Resultados de los valores de los parámetros libres correspondientes a los 5 eventos descritos anteriormente.	54
4.7.	Resultados de la constante (Δr_{cme}) que se uso para aproximar ambas derivas, la deriva de frecuencia calculada con los modelos y la deriva de frecuencia asociada al choque.	54
4.8.	Resultados de los valores promedios de los parámetros libres.	55

Capítulo 1

Introducción

El Sol es la estrella más cercana a nuestro planeta y la responsable de dotarnos de la principal fuente de energía para la vida. Por sí solo, representa el 99.86 % de la masa total del sistema solar y se encuentra aproximadamente a 1.5×10^8 km de distancia a la Tierra. Desde que la comunidad científica empezó a hacer las primeras observaciones del Sol, se inició el estudio de algunos fenómenos solares, ya sea usando telescopios situados en la Tierra o por medio de naves espaciales. Tradicionalmente, los fenómenos solares han sido divididos en dos clases: quietos y activos. En este esquema, el Sol quieto comprende el estudio de las condiciones físicas y características de cada una de sus diferentes capas que lo forman. Por otro lado, el Sol activo comprende el estudio de una serie de fenómenos transitorios, tales como protuberancias, fulguraciones o eyecciones de masa coronal, donde la dinámica y los procesos magnéticos que ocurren dentro y sobre la superficie del Sol influyen notoriamente en estos fenómenos transitorios. En este capítulo nos centraremos en revisar algunas manifestaciones de la actividad solar, así como también sus firmas características dentro del esquema de Sol activo.

1.1. Viento solar

Debido a que la corona solar no está en equilibrio hidrostático, ésta se encuentra continuamente expulsando material solar de la corona hacia el medio interplanetario,

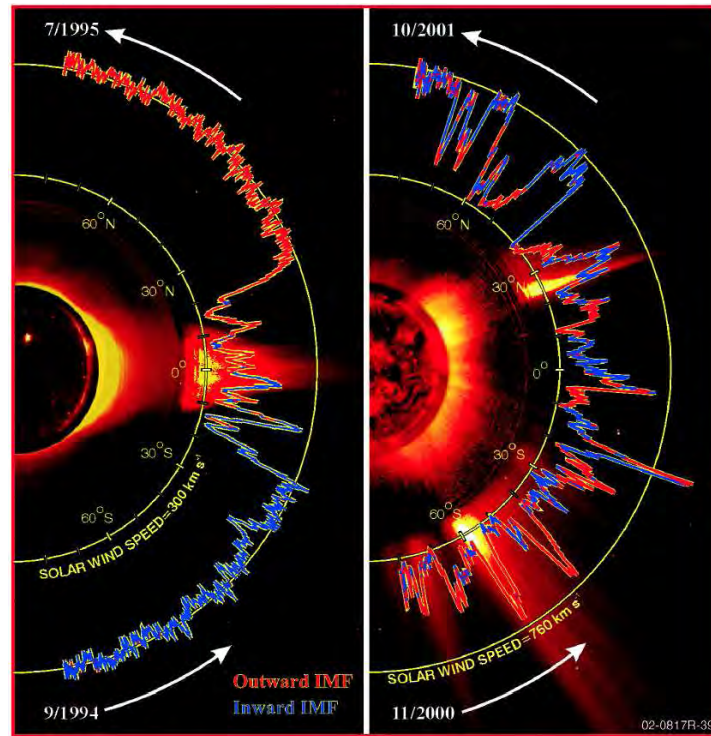


Figura 1.1: Mediciones realizadas por la nave espacial Ulysses, durante el período 1994-1995, 2000-2001. La figura muestra las distintas configuraciones del viento solar durante el mínimo (panel izquierdo) y máximo (panel derecho) solar. Esta figura muestra la dependencia helio-latitudinal de la velocidad del VS durante un mínimo y máximo solar. [Tomada de <http://solarprobe.gsfc.nasa.gov/solarwind.jpg>].

a este flujo de partículas y campo magnético que permea el medio interplanetario se le llama viento solar (VS) (Parker, 1958). El VS es un plasma compuesto principalmente por electrones, protones y trazas de iones más pesados (principalmente núcleos de helio). Debido a que el VS posee una alta conductividad eléctrica, éste le permite llevar consigo al campo magnético (Burlaga, 1984; Friedberg, 1987; Kivelson y Russell, 1995; Aschwanden, 2006). La expansión del VS provoca que la presión dinámica del VS disminuya, éste llega a un punto en el que es frenado por la presión dinámica del medio interestelar. Por lo tanto, el viento solar está confinado en una burbuja llamada Heliosfera (Burlaga, 1995).

De acuerdo con su velocidad y características físicas (densidad, temperatura y campo magnético) existen dos tipos de viento solar: rápido y lento. A la distancia heliocéntrica de la órbita terrestre el VS lento se expande con una velocidad aproximada de 450 km s^{-1} , y la temperatura promedio de protones es de $8 \times 10^4 \text{ K}$, mientras que el VS rápido, a 1 UA^1 , se registra con velocidades cercanas a los 750 km s^{-1} . En la Tabla 1.1

propiedades	mínimo	promedio	máximo
velocidad [kms^{-1}]	200	400	900
densidad [m^{-3}]	4×10^5	6.5×10^6	10^8
temperatura de electrones [K]	5×10^3	2×10^5	10^6
temperatura de protones [K]	3×10^3	5×10^4	10^6
campo magnético [nT]	0.2	6	80
velocidad de Alfvén [kms^{-1}]	30	60	150

Tabla 1.1: Propiedades del Viento Solar a 1 UA. Adaptada de Priest (2014).

se muestran algunas propiedades típicas del VS a 1 UA. La principal diferencia entre el VS rápido y lento es su origen. Se considera que el VS lento se origina a latitudes heliográficas bajas, donde predominan los cascos coronales que transportan plasmas desde su interior a lo largo de arcos magnéticos cerrados (ver, Lang, 2000; Harra et al., 2008). Por otro lado, se considera que el VS rápido se origina en los hoyos coronales, que son regiones donde el campo magnético no puede confinar al plasma, y éste escapa hacia el medio interplanetario, alcanzando velocidades supersónicas (Eckart y Chuanyi, 2008). En la Figura 1.1 se muestran las mediciones de la velocidad y la configuración magnético de los patrones de corrientes del VS a diferentes latitudes durante la fase máxima (panel derecho) y mínima (panel izquierdo) del ciclo solar 23, hechas por la nave espacial Ulysses. Esta nave ha sido la única en orbitar al Sol fuera del plano de la eclíptica. Su órbita heliocéntrica se extendía desde la órbita de Júpiter hasta 1.4 UA alrededor del Sol, con un periodo de 6.2 años. Las gráficas fueron superpuestas sobre

¹Unidad Astronómica $1 \text{ UA} = 149.6 \times 10^6 \text{ km}$

una imagen de rayos X suaves del satélite Yohkoh (durante el máximo y el mínimo) y una imagen del coronógrafo C1 de SOHO. De acuerdo con las observaciones de Ulysses, durante la fase mínima los hoyos coronales están a altas latitudes y por lo tanto, el VS rápido emana de zonas polares, mientras que el VS lento se origina a latitudes medias. Cuando nos encontramos en la fase máxima del ciclo de actividad, los hoyos coronales migran hacia latitudes medias, generando la compleja configuración de corrientes del VS que se observa del lado derecho. La Figura 1.1 también muestra la configuración del campo magnético, en donde el color de la traza representa la polaridad del campo magnetico interplanetario, polaridad positiva (color rojo) y polaridad negativa (color azul).

1.2. Principales manifestaciones de la actividad solar

Debido a algunos procesos físicos que ocurren en el interior del Sol, éste experimenta una serie de cambios morfológicos y energéticos que pueden dar lugar a la formación de regiones donde se llevan a cabo manifestaciones propias de la actividad solar. Por ejemplo, las regiones activas, son regiones donde el campo magnético es muy intenso, cuentan con concentraciones de aproximadamente $100 G$ (Priest, 2014)² (el campo magnético terrestre es de $0.5 G$ en la superficie). Otro ejemplo son las “playas” (plages en francés) las cuales están formadas por tubos de flujo magnético intenso que se encuentran emergiendo de la fotosfera y se observan como pequeños puntos brillantes. A continuación haremos una breve descripción de las principales manifestaciones de la actividad solar.

²Un gauss (G) es una unidad de campo magnético en el sistema CGS que se define como $1 \text{ gauss} = 1 \text{ maxwell/cm}^2$, o en el sistema SI, $1 \text{ gauss} = 1 \times 10^5 nT$.

1.2.1. Fulguraciones

Las fulguraciones solares son eventos súbitos y muy violentos que ocurren en la superficie del Sol. Donde el plasma de las regiones activas es calentado hasta decenas de millones de grados Kelvin y se aceleran electrones, protones e iones pesados a velocidades relativistas (Shibata, 2011). Probablemente sean los eventos más explosivos que ocurren en el Sol, liberando una gran cantidad de energía, de aproximadamente 10^{32} erg, en tiempos de escala de minutos u horas (Priest, 2014). Antes de la era espacial se definió a la fulguración como un rápido abrillantamiento transitorio en la banda de emisión Balmer-alfa del hidrógeno a 6563 \AA , conocida como $H\alpha$ (esta línea es emitida cuando el electrón en un átomo de hidrógeno se desplaza desde su segundo nivel de excitación hasta el primero). En la actualidad es posible también observarlas en todo el rango del espectro electromagnético, desde los rayos γ hasta las ondas de radio. La primera observación de una fulguración fue hecha por Richard Carrington el 1 de septiembre de 1859, que la describió como “dos parches de intensa luz blanca y brillante” (Carrington, 1859). A este evento se le llamó el evento Carrington debido a que ocasionó la tormenta solar más intensa registrada en la historia reciente.

Desde el descubrimiento del campo magnético en el Sol (Hale, 1908), el papel del campo magnético en la actividad solar ha sido investigado intensamente. La misión espacial Skylab (1973-1979) fue la primera en hacer un detallado estudio de la corona usando un telescopio de rayos-X suaves, revelando que las regiones brillantes en estas longitudes de onda están correlacionadas con campos magnéticos intensos. Actualmente es aceptado que el campo magnético es el que provee la principal fuente de energía de la actividad solar incluyendo las fulguraciones solares.

Estudios de numerosas observaciones y avances teóricos han ofrecido un escenario para la formación de las fulguraciones. Giovanelli (1946) argumentó que las fulguraciones ocurren en la cromosfera solar y están directamente relacionadas con grupos de manchas solares. La liberación de energía es producida por partículas cargadas que se mueven

alrededor de campos magnéticos inducidos a través de las manchas. Estas partículas se excitan lo suficiente para poder liberar grandes cantidades de energía. Posteriormente, Hoyle (1949) presentó el mecanismo físico que da lugar a una fulguración, la reconexión magnética. Este proceso ocurre en plasmas altamente conductores donde las líneas de campo magnético de diferentes dominios magnéticos se empalman una con la otra, cambiando sus topologías magnéticas. La energía magnética es convertida en energía cinética y térmica de las partículas. Un ejemplo claro de la reconexión magnética ocurre en la magnetósfera terrestre, cuando la interacción de un agente perturbador como una eyección de masa coronal, que lleva consigo una componente B_z sur muy intensa (en promedio, la intensidad del campo magnético del VS es de ≈ 5 nT, para una tormenta geomagnética, la intensidad del campo magnético debe de ser más alto a este valor, W.D. Gonzalez et al., 1999), y al interactuar con el campo magnético terrestre, ocasionando que se comprima el campo magnético terrestre debido a la intensa presión dinámica por parte del viento solar, así como un aumento en la corriente de anillo terrestre por la inyección de partículas energéticas, provocando una tormenta geomagnética.

Posteriormente se desarrollaron modelos clásicos describiendo la reconexión magnética para explicar la fenomenología de las fulguraciones solares: Carmichael (1964), Sturrock (1966), Hirayama (1974) y Knopp y Pneuman (1976). Estos modelos asumían configuraciones del campo magnético y la dinámica de éste. A estos modelos se les conoce como el modelo unificado CSHKP. Actualmente este modelo se usa para explicar las características observables de las fulguraciones con base en la reconexión magnética, lo que fue recientemente confirmado por las observaciones del Yohkoh (Shibata et al., 1995).

La evolución de las fulguraciones consta de tres etapas (Priest, 2014):

- pre-ráfaga: se comienza a observar un pequeño aumento gradual en la emisión térmica de rayos X suaves. La energía magnética comienza a aumentar debido a

movimientos causados por el campo magnético (10-30 min).

- impulsiva: en esta etapa se llevan a cabo procesos de desestabilización magnética y liberación súbita de energía. Se observan, por varios minutos, estallidos en microondas y rayos X duros (100-1000 s).
- principal: las partículas son aceleradas a través del medio interplanetario perturbándolo a su paso.

Las fulguraciones se clasifican de distintas maneras. En el óptico se cuantifica qué tan grandes y brillantes son, usando las etiquetas: F (débil), N (normal) y B (brillante). Otra clasificación, que es la más común, se basa en el flujo de rayos X suaves (en unidades de Watts/m²) observados por las naves espaciales GOES, en un rango de longitud de onda de 1-8 Angstroms. En esta clasificación logarítmica se utilizan las letras A, B, C, M y X, en orden creciente con la emisión. Dentro de esta clasificación, existe una escala lineal del 1 al 9, por lo que una fulguración X2 es dos veces más potente que una X1, y ésta última cuatro veces más potente que una M5. En la Figura 1.2 se muestra el flujo de rayos X de una fulguración solar captada por el satélite GOES entre el 8-11 de noviembre de 2015

1.2.2. Eyecciones de masa coronal

Otro de los principales fenómenos eruptivos en el Sol son las Eyecciones de Masa Coronal (EMCs). Las EMCs son liberación súbita de grandes cantidades de materia coronal que ocurren en la parte baja de la corona solar. Sus tiempos característicos varían de minutos hasta horas y sus masas oscilan entre 10^{11} y 4×10^{13} kg (Chen, 2011). El ancho angular de las EMCs varía de $\sim 2^\circ$ a 360° (Yashiro et al., 2004), además su energía cinética es de $10^{22} - 10^{25}$ J, similares a las fulguraciones solares (Vourlidis et al., 2002; Emslie et al., 2004).

La contraparte interplanetaria de las EMCs que salen del Sol, son las eyecciones de masa coronal interplanetarias (EMCIs). Estas son EMCs que, después de ser expulsadas,

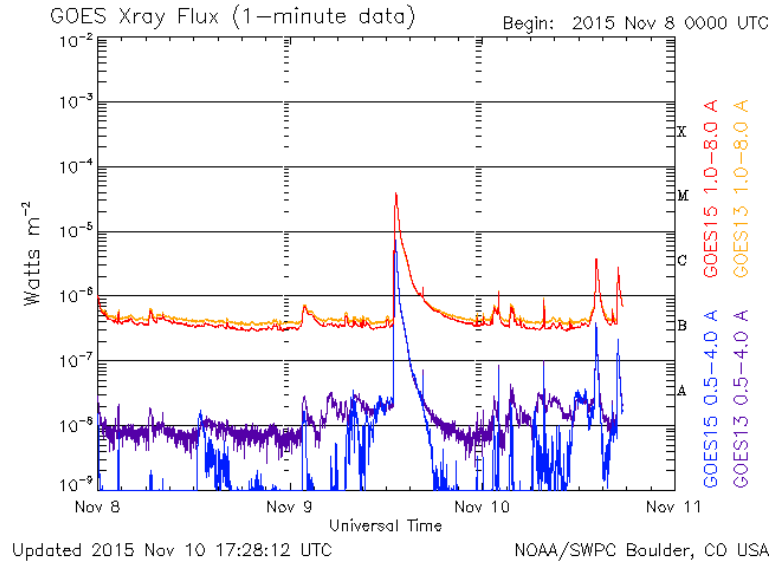


Figura 1.2: Flujo de rayos X por el satélite GOES entre el 8 al 11 de noviembre de 2011. [Tomada de <http://swpc.noaa.gov>].

se propagan a través del MI. Un subconjunto de las EMCIs que se caracterizan por un campo magnético muy intenso respecto a la del viento solar ambiente y donde la dirección del campo magnético rota suavemente durante un intervalo del orden de un día, se llaman nubes magnéticas. Este tipo de EMCIs fue definido por Burlaga et al. (1981).

La primera observación de una EMC hecha por una nave espacial fue el 14 de diciembre de 1971 a cargo de OSO-7 (Orbiting Solar Observatory), 112 años después de la primera observación de una fulguración solar. Las EMCs fueron observadas, inicialmente, con la ayuda de coronógrafos situados en la Tierra. Más adelante, misiones de naves espaciales, como Skylab (1973-1974) y Solar Maximum Mission (1980; 1984-1989), tenían montados coronógrafos que permitieron una mejor resolución para la observación de las EMCs, además de estudiar su ocurrencia en el disco solar con más precisión. Su tasa de ocurrencia es variada. El sistema de coronógrafos LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph) abordo de la nave espacial SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) ha observado miles de EMCs a partir del ciclo solar 23 hasta la fecha. Antes de SOHO, la razón de ocurrencia de las EMCs se estimaba en 0.2 y 3.5

EMCs por día para el mínimo y máximo solar, respectivamente. Sin embargo, gracias a la sensibilidad de LASCO, se han podido detectar EMCs con mayor frecuencia. El catálogo³ en línea de EMCs, a cargo del CDAW Data Center de la NASA, mostró que la razón de ocurrencia de las EMCs se incrementó de ~ 0.5 por día cerca del mínimo a ~ 6 cerca del máximo solar. Se detectaron más de 13,000 EMCs durante el ciclo solar 23 (Gopalswamy, et al., 2003; Yashiro et al., 2004). Sin embargo, para el mismo periodo de observaciones, el software automático CACTus⁴ identificó muchos más eventos, con un incremento de < 2 por día cerca del mínimo, hasta ~ 8 por día durante el máximo (Robbrecht, et al., 2009).

El origen de las EMCs está parcialmente entendido. Es aceptado que provienen de estructuras cerradas de campo magnético, como las protuberancias o arcos coronales. De acuerdo con Wilson et al. (1991), los arcos de campo magnético intentan redistribuirse entre ellos mismos a una configuración más estable, desencadenando una fulguración o que las líneas de campo magnético se abran. En la fase pre-eruptiva de una EMC, comienza el estiramiento y brillantamiento de los filamentos o arcos magnéticos. Estas estructuras ascienden y están conectados aún en la fotosfera. Una cavidad oscura de baja densidad a menudo se observa dentro de estos arcos, acompañado, de una región compacta y brillante llamada núcleo. Estas son las tres partes (estructura central, cavidad y núcleo) de las EMCs, sin embargo, no siempre se encuentran presentes en todas las EMCs, ya que en ciertas ocasiones depende de la orientación de las EMCs con respecto al observador. La Figura 1.3 muestra la secuencia de 6 imágenes de una EMC observada el 18 de Agosto de 1980 por el coronógrafo de la nave Solar Maximum Mission, esta EMC tuvo su origen en el limbo solar Este, lo que nos permite apreciar la estructura frente-cavidad-núcleo. Las EMCs juegan un papel importante en la evolución y estructura de la corona solar y son el principal eslabón entre la actividad solar y el clima espacial.

³<http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME-list>

⁴<http://sidc.oma.be/cactus/scan>

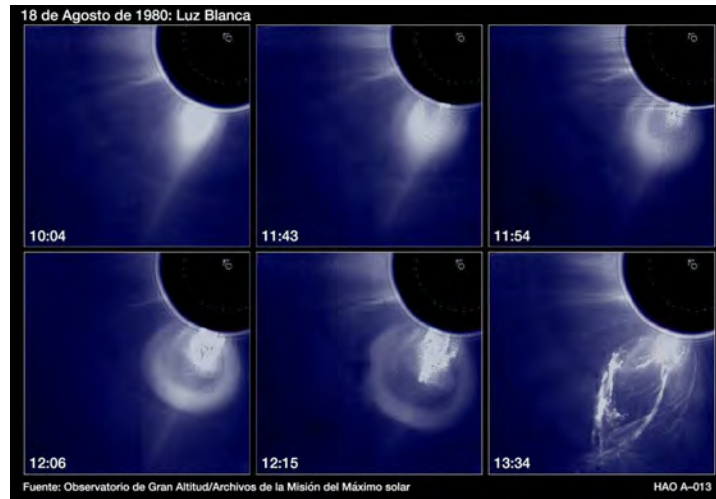


Figura 1.3: Imagen de una eyección de masa coronal. [Tomada de <http://solarprobe.gsfc.nasa.gov/solarwind.jpg>].

1.2.2.1. Firmas de EMCIs

Cuando una EMC transita por una nave espacial en el MI. La EMC puede ser identificada por firmas características relacionadas con las propiedades del plasma y el campo magnético que la componen. Sin embargo, no todas las EMCIs presentan firmas bien definidas y tampoco existe una característica distintiva que esté presente en todas las EMCs observadas por una nave espacial. Las firmas características que pueden presentar las EMCIs, y las diferencian del viento solar ambiente son:

- Un incremento en la magnitud del campo magnético seguido por un decrecimiento suave (Pudovkin et al., 1979; Klein y Burlaga, 1982).
- Rotación en los componentes del campo magnético (Klein y Burlaga, 1982, Leppig et al., 1979).
- Baja densidad de protones respecto al viento solar ambiente (Richardson et al., 2000).
- Temperatura de iones y/o electrones inusualmente baja respecto al viento solar ambiente (Richardson y Cane, 1995).

- Flujos bidireccionales de electrones supratérmicos.
- Anomalías en las abundancias de otras especies o elementos de iones, en especial de partículas α .
- Además de incrementos súbitos en temperatura, densidad e intensidad del campo magnético, esto ocasionado por la onda de choque causada por las EMC rápidas (Parker, 1961).

En la Figura 1.4 se muestra un ejemplo de una EMCI observada in-situ, durante los días 13 al 18 de Mayo de 2005. En esta figura se muestran algunas de las firmas que anteriormente citamos, pero como ya hemos mencionado, no necesariamente aparecen todas en este evento. Los paneles corresponden (de arriba hacia abajo) a mediciones del campo magnético, tanto en magnitud como en sus componentes, y mediciones de la velocidad, densidad y temperatura del viento solar. La línea vertical segmentada indica el comienzo del evento, el cual presenta un choque (todos los parámetros aumentan abruptamente). Detrás del choque viene la funda que es una zona de plasma comprimido por el choque, donde la temperatura, densidad y campo magnético son más intensos. El paso de la eyecta (línea vertical sólida) se identifica como una caída en temperatura, densidad y campo magnético, consecuencia de la expansión que sufre la EMCI.

1.2.3. Estallidos de radio Tipo II

Uno de los fenómenos que están íntimamente relacionados con las EMCIs rápidas son los estallidos de radio Tipo II. Estos se definen como la firma característica de una onda de choque que viaja a través del medio interplanetario. Cuando la onda de choque interactúa con el plasma que se encuentra a su paso, ésta perturba a los electrones. Mediante procesos de emisión de plasma se producen ondas electromagnéticas en la banda de radio a la frecuencia local del plasma.

La frecuencia del plasma depende solamente de la densidad local de electrones y está da-

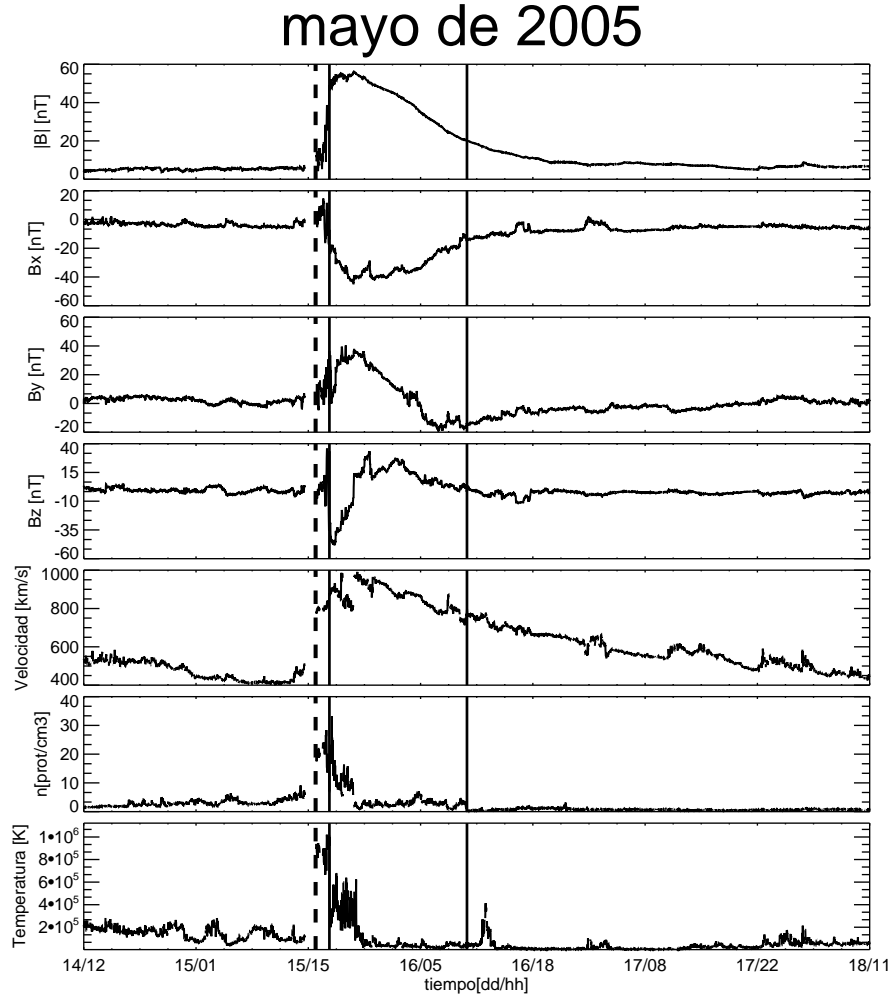


Figura 1.4: Ejemplo de una EMC detectada in-situ. Los paneles corresponden a: magnitud del campo magnético, componentes del campo magnético (B_x , B_y y B_z), velocidad, densidad de protones y temperatura. La línea vertical segmentada indica el comienzo del choque, y el rectángulo en líneas verticales solidas representa las firmas de la eyecta.

da por (Gopalswamy, 2000; Corona-Romero et al., 2012; Zheleznyakov, 1969)

$$\nu = \frac{e}{2\pi} \left(\frac{n_e}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2}, \quad (1.1)$$

donde e y m_e es la carga y la masa del electrón respectivamente, n_e es la densidad de electrones y ϵ_0 es la permitividad eléctrica en el vacío. La frecuencia observada define

la densidad de electrones en el sitio de emisión. Para la atmósfera solar, la densidad de electrones (y por ende la frecuencia) decrece conforme aumenta la distancia heliocéntrica. Esto tiene como consecuencia que cualquier emisión de radio detectada, debe de originarse por encima de cierta altura que puede ser calculada con la ayuda de modelos de la atmósfera solar. La intensidad de la radiación del plasma indica la existencia de cierto tipo de perturbación que excita al plasma y da origen a un mecanismo de emisión. También permite identificar el origen donde se lleva a cabo el proceso de emisión.

Observacionalmente, los estallidos de radio Tipo II se caracterizan en el espectro dinámico por una estrecha banda de emisión intensa cuyas frecuencias disminuyen con el tiempo. En ocasiones, los estallidos Tipo II pueden presentar, además de la frecuencia fundamental, un primer armónico, cuya frecuencia es dos veces la frecuencia fundamental. La intensidad del armónico puede ser comparable o aún mayor al fundamental y la emisión de ambas derivas provienen de la misma fuente. Los estallidos de radio ocurren a frecuencias menores a 150 MHz, aunque en ocasiones se observan a frecuencias más altas (Vrsnak et al., 1995; Klein et al., 1999). Las frecuencias más altas corresponden a emisiones de radio cerca del Sol, mientras que las bajas frecuencias, corresponden a emisiones en el medio interplanetario cerca de la Tierra. Si consideramos un modelo de densidad electrónica del viento solar, podemos asignar una distancia heliocéntrica a cada frecuencia de la siguiente manera:

- Frecuencias menores a 150 MHz corresponden distancias de 1-2.5 R_{\odot} , éstas pertenecen al dominio métrico (m). Las ondas de radio métricas probablemente se originan en la corona, arriba de la región donde estallan las fulguraciones.
- Frecuencias en el rango de 15-2 MHz corresponden distancias de 2-10 R_{\odot} , confinadas al dominio decamétrico/hectométrico (DH)
- Frecuencias de 2 MHz a 20 kHz corresponden distancias de 10 R_{\odot} hasta 1 UA. Éstas se encuentran en el dominio kilométrico (km).

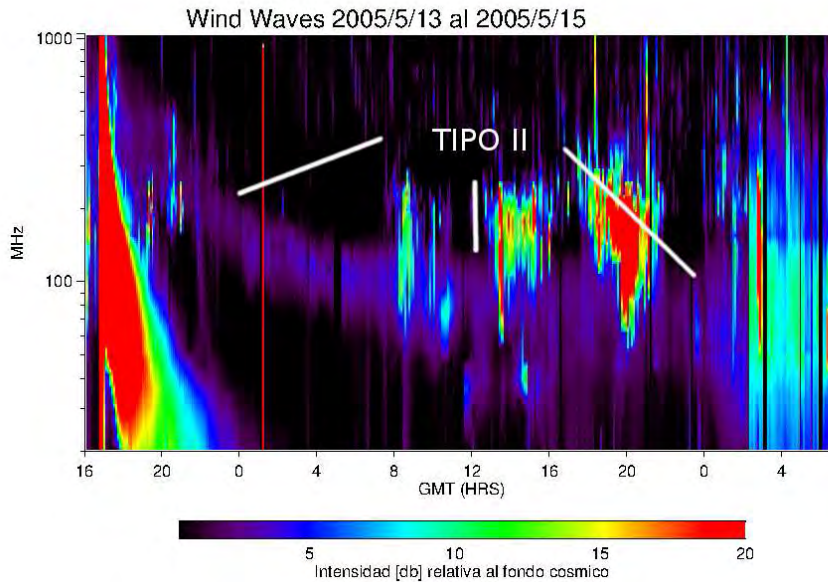


Figura 1.5: Firma característica de una estallido de radio Tipo II en el espectro dinámico. El Tipo II se caracteriza por una estrecha banda de emisión que deriva a frecuencias menores mientras transcurre el tiempo. El color representa la intensidad.

Una de las principales aplicaciones de los estallidos de radio Tipo II es el seguimiento de una eyección de masa coronal y de los choques (Corona-Romero et al., 2012a, 2015b). Debido que los Tipo II son producidos por ondas de choque, estas ondas de choque existen porque están asociadas a una onda de choque. Es importante señalar que aún está en discusión que es lo que provocan los estallidos de radio Tipo II a nivel coronal: la fulguración asociada a la EMC o el choque asociado a la EMC, sin embargo ya en el medio interplanetario se sabe que las EMCs producen los tipo II (Bastian, 1998; Gopalswamy, 2000). Frecuencias altas indican densidades altas (ya que la densidad del plasma es proporcional al cuadrado de la frecuencia de oscilación de los electrones), lo que significa que el choque y por consiguiente la EMC se encuentra muy cerca del Sol. Conforme disminuye la frecuencia, la EMC se aleja del Sol.

Capítulo 2

Modelos analíticos de la propagación de una EMC

El estudio y comprensión de las EMCs rápidas son de vital importancia ya que son los principales agentes que originan perturbaciones en la magnetósfera terrestre y definen de manera importante el clima espacial. Entonces el interés científico comienza en estudiar los distintos modelos empíricos y analíticos que aproximan la trayectoria de una EMC. Sin embargo, aún existe mucha incertidumbre en clasificar el mecanismo físico que rige la propagación de una EMC a través del MI. Por lo tanto es necesario investigar los mecanismos que rigen el acoplamiento dinámico entre la EMC y el MI.

En este capítulo nos centraremos en estudiar algunos de los posibles agentes físicos que dominan la propagación de las EMCs. Esto se hará a través de los distintos modelos analíticos que se encuentran presentes en la literatura; la mayoría de dichos se concentran en los mecanismos derivados de la fuerza de arrastre. Además, discutiendo las distintas diferencias que existen entre ellos.

2.1. Marco teórico

Teóricamente, la propagación de una EMCI se puede describir a través del momento lineal transferido de la interacción de un obstáculo, (la EMCI) moviéndose a través de un fluido ambiente (el VS). Si consideramos constante la masa inicial de la EMCI (m_{emc0}), la aceleración del centro de masa de la EMCI (a_{emc}) se puede expresar como (Corona-Romero, 2013)

$$m_{emc0}a_{emc}^i = - \oint_{\Sigma} \tau^{ij} ds_j + f^i. \quad (2.1)$$

Esta ecuación expresa la aceleración de una EMCI a través de las fuerzas de un cuerpo que pueden estar involucradas (f^i) y de los efectos de las fuerzas que actúan sobre la superficie Σ de la EMCI. Donde el tensor de esfuerzos (τ^{ij}) está dado como (Landau and Lifshitz, 1985)

$$\tau^{ij} = \rho v^i v^j + \left[p + \frac{B_k B^k}{2\mu_0} \right] g^{ij} - \eta \left[\nabla^i v^j + \nabla^j v^i - \frac{2}{3} g^{ij} \nabla_k v^k - \frac{B^i B^j}{\mu_0} \right], \quad (2.2)$$

donde ρ, v^i, p y B^i son los valores locales de la densidad, velocidad, presión y campo magnético, η es el coeficiente de viscosidad, g^{ij} el tensor métrico, y los índices i, j, k son índices que corren sobre las coordenadas esféricas r, θ y ϕ .

Debido a la alta complejidad de las ecuaciones (2.1, 2.2) para una solución directa, las condiciones del medio interplanetario nos permite hacer una serie de simplificaciones:

- La fuerza de gravedad es despreciable. De acuerdo a Chen (1996) la fuerza de gravedad tiende a cero a aproximadamente 110 min después de que la EMC inicia, lo que corresponde a una distancia $\sim 2R_{\odot}$.
- La fuerza de Lorentz es despreciable, (Chen, 1996), y es prácticamente nula después de 200 min de que la EMC inicia. A este tiempo le corresponde una distancia $\sim 6R_{\odot}$.
- Debido a la expansión supermagnétosónica del viento solar, los efectos de la presión térmica y la presión magnética se pueden despreciar en comparación con los efectos cinemáticos.

- Los efectos del campo magnético y gradientes térmicos no se consideran dentro de este esquema.

Entonces la propagación de una EMCI a través del medio interplanetario se puede aproximar como

$$m_{emc0}a_{emc}^i \approx - \oint_{\Sigma} \left[\rho_{vs} v^i v^i - \eta \left(\nabla^i v^j + \nabla^j v^i - \frac{2}{3} \nabla_k v^k g^{ij} \right) \right] ds_j, \quad (2.3)$$

donde ρ_{vs} es la densidad del viento solar y $v^i = v_{emc}^i - v_{vs}^i$ es la velocidad relativa entre el sistema EMC-VS. De acuerdo a (2.3), la propagación de una EMC va a estar gobernada por dos factores:

- Arrastre inercial: representa el primer término del lado derecho de (2.3). Una EMCI rápida (lenta) se desacelera (acelera) al reducir (incrementar) su inercia por medio de los flujos del momento lineal con el viento solar ambiente.
- Arrastre viscoso: representa el segundo término de (2.3), estas describen el acoplamiento entre la EMC y el VS a través de una interacción viscosa.

A continuación abordaremos los modelos referentes a las fuerzas de arrastre y haremos una breve descripción de cada uno de ellos.

2.2. Fuerzas de arrastre

Como ya hemos comentado, las eyecciones de masa coronal son las principales responsables de perturbaciones en el clima espacial terrestre, por lo que es necesario estimar el tiempo de arribo de una eyecta a 1 UA, desde el inicio de la erupción en la atmósfera solar. Sin embargo, esto presenta gran dificultad. Estudios hechos por Yashiro et al. (2004) mostraron que las EMCs lentas ($V \leq 250 \text{ km s}^{-1}$) muestran una aceleración, mientras que las EMCs rápidas ($V \geq 900 \text{ km s}^{-1}$) muestran una desaceleración, sugiriendo que la interacción entre una EMC y el VS es el principal mecanismo que determina la dinámica de las EMCs en el medio interplanetario. Estudios hechos por Hundhausen (1999) y St Cyr et al. (2000) mostraron que las velocidades típicas

de las EMCs vistas con un coronógrafo varían entre 100-2000 $km s^{-1}$, mientras que las correspondientes a las EMCIs en el medio interplanetario difieren solamente de 100-200 $km s^{-1}$ del viento solar. Entonces las fuerzas que actúan sobre las EMCIs tienden a equiparar las velocidades de las EMCs y del viento solar, a una distancia heliocéntrica estimada de $25 - 30R_{\odot}$ (Corona-Romero et al., 2011). A esta fuerza se le conoce como *fuerza de arrastre* viscoso y existe por la interacción por contacto de un cuerpo con un fluido viscoso (en nuestro caso la interacción entre la EMC con el VS). Esta fuerza es generada cuando un cuerpo se mueve a través de un fluido y existe una diferencia de velocidades entre el cuerpo y el fluido. Como el viento solar presenta efectos que se pueden interpretar macroscópicamente como viscosos. La viscosidad se encarga de equiparar la velocidad del fluido con la de un cuerpo de referencia (Landau and Lifshitz, 1985). En el caso particular de la EMC propagándose a través del medio interplanetario, la viscosidad tiende a anular la velocidad relativa entre EMC-VS. Este decremento en la velocidad relativa se puede interpretar como una fuerza de arrastre en el que el fluido provoca sobre el cuerpo para equiparar ambas velocidades.

La fuerza de arrastre, en estado estacionario, se puede aproximar como

$$f_D = -C_D \rho A V |V|, \quad (2.4)$$

donde C_D es el coeficiente de arrastre que es adimensional, ρ la densidad del fluido (viento solar), A el área de referencia (EMC) y V la velocidad relativa entre ambos sistemas (EMC-VS) (Vrsnak et al., 2002; Cargill 2004). Cargill (2004) estimó el valor de C_D aproximadamente a 15 radios solares mediante simulaciones MHD. Mostró que para EMCIs C_D variaba lentamente entre el Sol y a 1 UA alrededor de la unidad. Para los valores de la densidad entre la EMC y el VS eran similares, C_D estaba entre 3 y 10.

Para simplificar más (2.4), se introduce el número de Reynolds, dado como

$$\Re = \frac{\rho v \ell}{\mu} = \frac{2R_{emc} \rho_{vs}}{\mu} |v_{emc} - v_{vs}|, \quad (2.5)$$

donde las cantidades ρ, v y ℓ son valores característicos de la densidad, velocidad y longitud. Para el caso de una EMC inmersa en el viento solar, estos valores serán la densidad del viento solar, la velocidad relativa EMC-VS y R_{emc} el espesor de la EMC a lo largo de la dirección de propagación. En general, \Re es usado para describir el desarrollo del sistema (VS-EMC), cuando dominan los efectos cinemáticos ($\Re > 1$) o cuando dominan los efectos viscosos ($\Re < 1$). El coeficiente de arrastre C_D es función de \Re y este ultimo nos describe tres distintas regiones. Estas regiones están caracterizadas a través de los regímenes lineal ($C_l \approx \Re^{-1}$), cuadrático ($C_c \approx \Re^{-1/2}$) y turbulento ($C_t \approx cte$) (Landau and Lifshitz, 1985).

Régimen lineal

Este régimen existe cuando el movimiento del fluido es ordenado y estratificado. En este régimen el fluido se mueve en parcelas paralelas y no se mezcla, las partículas siguen una trayectoria definida. Para este caso el número de Reynolds es pequeño ($0 \leq \Re < 1$) por lo tanto, los efectos viscosos son mucho más importantes que los efectos cinemáticos. Esto nos permite considerar al obstáculo y al fluido en un estado estacionario, y este último fluyendo laminarmente alrededor del obstáculo (Landau and Lifshitz, 1985). El coeficiente de arrastre para el régimen lineal estará dado como $C_\ell = k_\ell/\Re$, por lo tanto en este régimen (2.3) se puede reescribir como

$$m_{emc} a_{emc}^i = -\eta k_\ell (v_{emc} - v_{vs}), \quad (2.6)$$

donde $k_\ell = k_\ell(R_{emc})$ es un factor de proporcionalidad.

Régimen cuadrático

En el régimen cuadrático ($10 < \Re < 10^3$), los objetos moviéndose a altas velocidades a través del fluido están sujetos a una fuerza de arrastre proporcional al cuadrado de la velocidad. El coeficiente de arrastre cuadrático se define adimensionalmente como

$C_c = k_c/\sqrt{\Re}\rho v|v|\ell^2$. Entonces podemos escribir (2.3) como

$$m_{emc0}a_{emc0}^i = -C_c\rho_{vs}S_t(v_{emc}^r - v_{vs}^r)|v_{emc}^r - v_{vs}^r|, \quad (2.7)$$

donde S_t es la sección transversal de la EMC.

Régimen turbulento

En este régimen, el movimiento del fluido ocurre de forma caótica. Las partículas se mueven desordenadamente y la trayectoria de las partículas forma pequeños remolinos periódicos. Esto sucede cuando el número de Reynolds sobrepasa al rango de arrastre cuadrático ($\Re \gg 10^4$). Para este caso (2.3) va a estar dada como

$$m_{emc0}a_{emc}^i = -C_t\rho_{vs}S_t(v_{emc} - v_{vs})|v_{emc} - v_{vs}|, \quad (2.8)$$

donde el coeficiente de arrastre C_t será independiente de \Re y sólo dependerá de la geometría del obstáculo. Borgazzi, et al. (2009), haciendo uso de la teoría hidrodinámica estimaron los valores de los coeficientes de arrastre lineal y turbulento, considerando EMCIs observadas hasta 1 UA.

Dentro de la teoría de la mecánica de fluidos y las fuerzas de arrastre, es importante el concepto de capa límite. Se define la capa límite como la región alrededor del cuerpo, donde los efectos viscosos no son despreciables, y más allá de la capa límite se considera como un flujo ideal. La Figura 2.1 muestra el desarrollo de la capa límite sobre una placa plana inmersa en un fluido con un número de Reynolds grande, δ es el espesor de la capa límite, y ℓ la longitud característica de la capa límite. En la primera parte, cuando ℓ es pequeño y $\Re < 1$, tenemos la capa laminar. En esta región las partículas siguen una trayectoria bien definida y paralela a la placa. El espesor de la capa límite δ aumentará con ℓ debido al flujo que entra en esta región por la corriente libre. Entonces \Re también se incrementará por la dependencia de ℓ , esta región es la llamada estela turbulenta. La aparición de un régimen turbulento está asociado a un aumento notable en el espesor de la capa límite. En esta región las partículas estarán

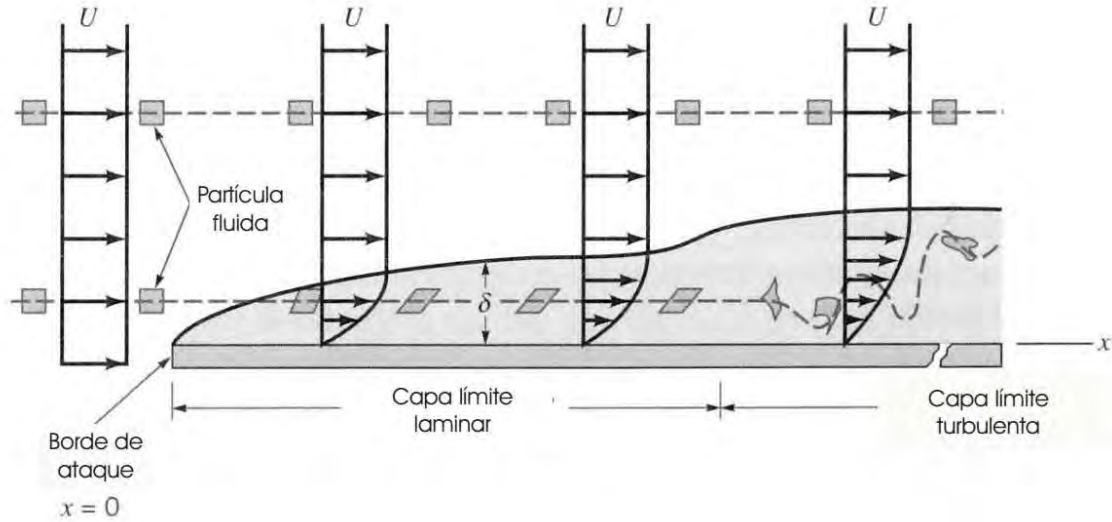


Figura 2.1: Desarrollo de la capa límite para una placa delgada, donde U es la velocidad de la corriente, δ es el espesor de la capa límite y x la longitud característica de la placa. Si la placa suficientemente larga, siempre existirá un punto de transición donde el régimen se vuelva turbulento. Esta región está asociada a un incremento del espesor de la capa límite en dirección de la velocidad U . En esta región las trayectorias de las partículas se vuelven desordenadas, convirtiéndose en una estela turbulenta y difusa. [Tomada de <http://www.fem.unicamp.br/~phoenics>].

sometidas a movimientos caóticos en todas las direcciones y existirá una mezcla entre las distintas capas del fluido (Landau and Lifshitz, 1985).

2.3. Modelos teóricos de propagación

2.3.1. Modelos de fuerza de arrastre

Modelo AC1

Cargill (2004) empleó simultáneamente un método basado en fuerzas de arrastre viscosas y simulaciones MHD. Su estudio reproduce bastante bien la propagación de EMCs en el MI. La ecuación de arrastre que utilizó está dada por

$$m_* a_{emc} = -\rho_{vs} AC_D (v_{emc} - v_{vs}) |v_{emc} - v_{vs}|, \quad (2.9)$$

donde A es la sección transversal de la EMC y $m_* = m_{emc} + m_{vs} = \tau(\rho_{emc} + \rho_{vs}/2)$. El término m_{vs} masa virtual toma en cuenta los efectos dinámicos de desplazar el VS que se encuentra a lo largo de la trayectoria de la EMC. Cargill dedujo que el coeficiente de arrastre se encuentra alrededor de la unidad más allá de 15-20 Rs, además de que depende de la geometría de la EMC. En consistencia con el régimen cuadrático.

Modelos AC2 y AL1

Partiendo de las fuerzas de arrastre lineal y cuadrática como mecanismos para describir el acoplamiento entre EMC-VS, Vrsnak y Gopalswamy (2002) investigaron la propagación y momentos de arribo de una EMC a 1 UA. En su estudio expresaron la aceleración radial de la EMC dada por:

$$a_{emc} = \alpha_2 R^{\beta_2} (v_{emc} - v_{vs}) |v_{emc} - v_{vs}|, \quad (2.10)$$

donde $R = r_{emc}/R_{\odot}$, α_2 y β_2 parámetros libres y $v_{vs} = v_{vs}(R)$ dada por (Sheeley et al., 1997)

$$v_{vs}(R) = v_{vs0} \sqrt{1 - e^{-\frac{R-2.8}{8.1}}}, \quad (2.11)$$

con $v_{vs0} = 298.3 \text{ km s}^{-1}$

De forma similar, Vrsnak (2001) explora la posibilidad de que las fuerzas de arrastre sean lineales entre el sistema VS-EMC, considerando la ecuación

$$a_{emc} = -\alpha_1 \left[\frac{r_{emc}}{R_{\odot}} \right]^{\beta_1} [v_{emc} - v_{vs}], \quad (2.12)$$

donde α_1 y β_1 son constantes a fijar.

Modelos AL2 y AC3

Borgazzi et al. (2008) estudiaron la dinámica de las EMCs en el medio interplanetario asumiendo que el sistema EMC-VS está dominado por dos tipos de fuerzas de arrastre: lineal y turbulenta. En su trabajo consideraron variaciones del radio de la

EMC (R) y de la densidad del viento solar (ρ_{vs}) en función de la distancia (r), dadas como $R(r) = x^{0.78}$ y $\rho_{vs}(x) = 1/r^2$, respectivamente. Para el régimen lineal consideraron la siguiente ecuación

$$a_{emc} = -6\pi(0.24UA)\frac{\eta}{M_{emc}}\left(\frac{r_{emc0}}{1UA}\right)^{0.78}(v_{emc} - v_{vs}). \quad (2.13)$$

Dentro de este mismo esquema, propusieron que es una interacción turbulenta la que gobierne la desaceleración de la EMC. La ecuación que utilizaron está dada de la forma

$$a_{emc} = -C_t\pi(0.24UA)^2\frac{\rho_{vs}}{2M_{emc0}}\left(\frac{r_{emc}}{1UA}\right)^{-0.44}(v_{emc} - v_{vs})^2, \quad (2.14)$$

donde C_t es el coeficiente de arrastre turbulento y la densidad la consideran como $\rho_{vs}(r) = \rho_{vs1}(1UA/r)^2$. Básicamente sus estudios mostraron buena correlación de sus resultados obtenidos con EMCs observadas a 1 UA, además de que la fuerza de arrastre es la que predomina, después de $\sim 30R_\odot$. Sin embargo, analizando estallidos de radio Tipo II, Reiner et al. (2003) encontraron que la fuerza de arrastre no explica la frecuencia de deriva asociada al estallido de radio Tipo II.

2.3.2. Modelos de conservación

Modelo CM1

Estos modelos se basan en la conservación de momento lineal. El primer modelo comienza con estudios de Cantó (2000) donde presenta un nuevo método para resolver las ecuaciones de un jet hipersónico visto como una perturbación de la velocidad y densidad viajando a través del medio estelar. En su formalismo Cantó (2000) consideró la conservación del momento. Posteriormente, usando este mismo formalismo, Cantó et al. (2005) presentaron un modelo analítico para la dinámica de las fluctuaciones de la velocidad en el viento solar. Particularmente consideraron EMCs viajando en el medio interplanetario. Encontraron que su modelo reproduce de manera correcta las observaciones de estos fenómenos, además de ampliar la visión física de la evolución dinámica de las EMCs. Adicionalmente, Corona-Romero et al. (2011) utilizaron este modelo para analizar la evolución heliocéntrica de EMCs e investigar cómo y dónde

se desaceleran en el medio interplanetario, utilizando como datos iniciales mediciones in-situ para el modelo de Cantó et al. (2005).

De acuerdo a este modelo, la velocidad de la parte frontal o “nariz” de la EMC (\dot{L}_{emc}) está dada por

$$\dot{L}_{emc} = \begin{cases} v_{emc0} & : t < \tau_{c1} \\ v_{vs1} \left(1 + \frac{(a-1)\sqrt{ac}\Delta t_f}{\sqrt{2(a-1)\Delta t_f t - a(1-c)(\Delta t_f)^2}} \right) & : t \geq \tau_{c1}, \end{cases} \quad (2.15)$$

donde $\dot{L}_{emc} = v_{emc} + \dot{R}_{emc}$, con v_{emc} la velocidad del centro de masa y \dot{R}_{emc} la velocidad de expansión de la EMC. En la ecuación anterior notamos que la desaceleración de la EMC inicia a partir del tiempo τ_{c1} , dado por

$$\tau_{c1} = \frac{a(1 + \sqrt{c})}{a - 1} \Delta t_f, \quad (2.16)$$

con a y c constantes relacionadas con la cinemática de la EMC, dadas como

$$a = \frac{v_{emc0}}{v_{vs1}} \left(\frac{1 + \sqrt{c}}{\sqrt{c}} \right) - \frac{1}{\sqrt{c}} \quad (2.17)$$

y

$$c = \frac{\rho_{emc0}}{\rho_{vs1}} \left(\frac{r_{emc0}}{1UA} \right)^2. \quad (2.18)$$

v_{emc0} es la velocidad de la nariz de la EMC cerca del Sol, en $t = 0$, estimada a partir de imágenes de coronógrafo, v_{vs1} es la velocidad del viento solar a 1 UA, Δt_f la duración de la fase creciente de la fulguración asociada a la EMC. r_{emc0} la distancia heliocéntrica inicial, en $t = 0$, de la vanguardia de la EMC registrada a través de coronógrafos y por último, ρ_{emc0} es la densidad media inicial de la EMC, valor que es tomado como parámetro libre.

Modelo CM2

Tappin (2006) propone un modelo en el cual la masa de la EMC incrementa mientras se propaga por el VS. Esta acumulación de masa lleva un intercambio del momento lineal entre la EMC y el VS. Esto ocasiona que disminuya la velocidad de la EMC.

Este modelo es descrito por un conjunto de ecuaciones diferenciales acopladas:

$$a_{emc}^r = -\frac{dM_{emc}}{dt} \frac{v_{emc} - v_{vs}}{M_{emc}}, \quad (2.19)$$

$$\frac{dM_{emc}}{dt} = \rho_{vs} S_f |v_{emc} - v_{vs}|. \quad (2.20)$$

2.3.3. Parámetros libres

En la sección anterior se hizo una descripción sobre los modelos analíticos de propagación de una EMC a través del medio interplanetario. Todos estos modelos se basan en mecanismos físicos diferentes que condicionan su aplicabilidad y limitan su validez. Para describir una EMC, los modelos requieren de datos iniciales que caracterizan cada evento, por otro lado, cada uno de los modelos cuentan con uno o más parámetros libres que se deben de ajustar para aproximar la llegada de la EMC a 1 UA.

En la Tabla 2.1 se muestran los modelos descritos en la sección anterior, los rangos de variación de \mathfrak{R} que cada modelo considera, así como también las restricciones que se imponen a los mismos. Cabe mencionar que estos rangos son estimados teóricamente. Por otro lado, para los parámetros libres de los modelos de arrastre lineal y cuadrático (AL1 y AC2), debido a que no existe un rango de valores los cuales estos parámetros esten definidos, podemos recurrir a tomar en cuenta los siguientes resultados; en Vrsnak y Gopalswamy (2002) obtienen valores de los parámetros libres para los modelos de arrastre lineal (AL1) y arrastre cuadrático (AC2). Considerando EMCs con velocidades de 200-1000 $km s^{-1}$ reportan valores de $\alpha_1 = 2 \times 10^{-3}$, para $\beta_1 = 1.5$, y $\alpha_1 = 2 \times 10^{-3}$ para $\beta_1 = 1$. Para el modelo cuadrático reportan valores de $\alpha_2 = 5 \times 10^{-6}$ para $\beta_2 = 1.5$ y $\alpha_2 = 60 \times 10^{-6}$ para $\beta_2 = 2$. Para el parámetro libre del modelo de conservación de momento (CM1), debido a que c está en función del cociente entre las densidades de la EMC y la del VS, por lo tanto, podemos argumentar que este parámetro libre está sujeto a $0 < c < \infty$.

En este capítulo hemos hecho una revisión de algunos de los distintos modelos exis-

Modelo	Autor(es)	Hipótesis	Restricciones
AC1	Cargill (2004)	$10^2 < \Re < 10^4$	$C_c \sim k_q \Re^{-1/2}$
AC2	Vrsnak y Gopalswamy (2002)	$10^2 < \Re < 10^4$	α_2^* y β_2^*
AC3	Borgazzi et al. (2008)	$\Re > 10^5$	$C_t < C_c$
AL1	Vrsnak y Gopalswamy (2002)	$\Re < 10$	α_1^* y β_1^*
AL2	Borgazzi et al. (2008)	$\Re < 10$	$10^{-10} kgs^{-1}m^{-1} < \eta^\ddagger$ y $\eta^\ddagger < 10^{-9} kgs^{-1}m^{-1}$
CM1	Corona-Romero et al. (2011)	$v_{emc} - v_{vs} > \text{supersónico}$	c^*
CM2	Tappin (2006)	$M_{emc} > 0$	$10^{11} kg < M_{emc0}^\dagger < 10^{13} kg$

Tabla 2.1: De izquierda a derecha tenemos, modelo usado, autor (es) correspondiente de cada modelo, hipótesis de las que parte cada modelo y por ultimo el rango de valores de cada parámetro libre dónde esta limitado.

*Para estos parámetros no existe un intervalo donde esten definidos.

‡Pérez de Tejada (2005).

†Vourlidas et al.(2002), Chen(2011), Priest (2014).

tentes en la literatura para entender, desde un punto de vista empírico y analítico, la propagación de EMCs a través del medio interplanetario. Distintos autores han mostrado resultados acerca de la evolución dinámica de EMCs a su paso en el medio interplanetario con base en distintos modelos analíticos y empíricos. Sin embargo, es importante enfatizar que en ningún trabajo se ha propuesto estudiar todos los modelos analíticos existentes en la literatura, cada trabajo ha mostrado resultados aislados de los modelos, además de limitarse a corroborar cada modelo usando observaciones in-situ. Por lo tanto, es necesario hacer un estudio comparativo entre todos los modelos para obtener resultados más precisos sobre la evolución dinámica de las EMCs, y a su vez, validarlos usando observaciones de estallidos de radio Tipo II.

Capítulo 3

Metodología del análisis

En este capítulo se expone la metodología general usada para analizar los eventos individuales, así como la manera en que se usaron los modelos para estimar el momento de arribo de las EMCs a la Tierra, y el criterio utilizado para validar cada uno de los modelos con la deriva de frecuencia de los estallidos de radio Tipo II.

3.1. Identificación de eventos

Para identificar los eventos de EMCs, se consideró un periodo entre los años 1996 a 2015. Los eventos se seleccionaron del catálogo en línea de SOHO/LASCO¹. Se eligieron los eventos que cumplieran las siguientes características:

- Eventos relacionados con eyecciones de masa coronal rápidas, es decir, con velocidades mayores a 750 km s^{-1} .
- Cada evento debe ser tipo halo. Para corroborar que cumplieran esta característica se busco la región geográfica en el disco solar de la fulguración asociada con cada evento, rectificando que se dirigía hacia la Tierra. Para esto se utilizó la base de datos en línea de SOLAR MONITOR².
- Se seleccionó aquellos eventos que tuviera un estallido de radio Tipo II asociado.

¹<http://cdaw.gsfc.nasa.gov>

²<http://www.solarmonitor.org>

Por otro lado, como ya comentamos anteriormente, cada modelo resuelve la posición y la velocidad para cada tiempo, además de estimar tiempos de viaje y velocidad de arribo a 1 UA.

Es importante notar que cada modelo requiere parámetros de entrada, los cuales corresponden a los valores locales del viento solar a 1 UA (densidad de protones, temperatura, intensidad del campo magnético, velocidad del VS ambiente). También se requieren las condiciones iniciales de cada evento como son: la posición y velocidad de inicio que fueron tomados de la base de datos de los coronógrafos LASCO. Los datos in-situ fueron obtenidos de la página OMNI WEB³. Además, se requieren los valores in-situ de arribo de los eventos, para este caso, se emplearon: 1) el catálogo de Richardson y Cane (2010) y 2) detección por medio de las firmas características de valores in-situ a 1 UA.

3.2. Validación por medio de estallidos de radio Tipo II

En esta sección, presentaremos la metodología usada para validar cada uno de los modelos analíticos usando observaciones de estallidos de radio Tipo II. La combinación de observaciones de radio obtenidas desde radiotelescopios en la Tierra, así como desde las naves espaciales nos brindan una herramienta importante para estudiar la evolución de las emisiones Tipo II en el espacio Sol-Tierra.

Para analizar la deriva de los estallidos Tipo II asociados con nuestra lista de eventos, usamos los datos obtenidos por el Radio and Plasma Waves Experiment (WAVES⁴). Éste se encuentra a bordo de la nave Wind, y registra a lo largo del intervalo de frecuencias de 20 kHz a 13.85 MHz. Sin embargo, para este estudio, solamente se consideraron datos del receptor de baja frecuencia (RAD1) que corresponde al intervalo de 20 a

³http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow_min.html

⁴http://ssed.gsfc.nasa.gov/waves/data_products.html

1040 kHz. Con base en estos datos, generamos el espectro dinámico asociado a cada uno de los eventos analizados anteriormente. Por otro lado, para calcular la frecuencia asociada a la propagación del choque interplanetario, se utilizó la posición de la EMC que fue calculada por los modelos. Usamos datos in-situ de densidad de protones, que asumimos igual a la de los electrones. Entonces la frecuencia del plasma está expresada por (Corona-Romero et al., 2012):

$$f_p(t) = \sqrt{\frac{e^2 n_{1UA}}{4\pi^2 \epsilon_0 m_e}} \left[\frac{1UA}{r_{cme}(t)} \right], \quad (3.1)$$

donde e y m_e son la carga y la masa del electrón, respectivamente, y r_{cme} es la distancia heliocéntrica de la parte frontal de la EMC obtenida a partir de los modelos. Se usó la ecuación (3.1) para relacionar la emisión de radio (f_p) con la propagación de la eyecta (r_{cme}).

Para validar los modelos analíticos de propagación utilizando estallidos de radio Tipo II, comparamos la deriva de frecuencia observada con la deriva de frecuencia obtenida con estos modelos. Ahora bien, debido a que los modelos analíticos nos reproducen la deriva de frecuencia en la parte frontal de la EMC, la cual es distinta a la deriva asociada al Tipo II. Para corregir esta diferencia entre ambas derivas, fue necesario introducir un factor multiplicativo (Δr_{cme}) en la posición de la eyecta (r_{cme}) de tal manera que se aproximara con la deriva de frecuencia usando datos in-situ.

En la Figura 3.1 (panel (a)), se muestra una EMC que va saliendo del Sol, la curva segmentada negra indica la parte frontal de la EMC, la curva continua negra indica el choque frontal y la curva segmentada roja indica la región donde se está produciendo el estallido Tipo II. En el panel (b), se muestra la deriva de frecuencia asociada al choque, y la deriva de frecuencia obtenida por los modelos. La parte inferior de la banda de emisión (línea segmentada roja) está asociada a la parte adelante del choque, la parte superior de la banda de emisión (línea segmentada blanca) está asociada con la parte frontal de la EMC, y finalmente la línea continua blanca está asociada al choque frontal. En términos de distancia heliocéntrica, la parte frontal de una EMC, se encuentra

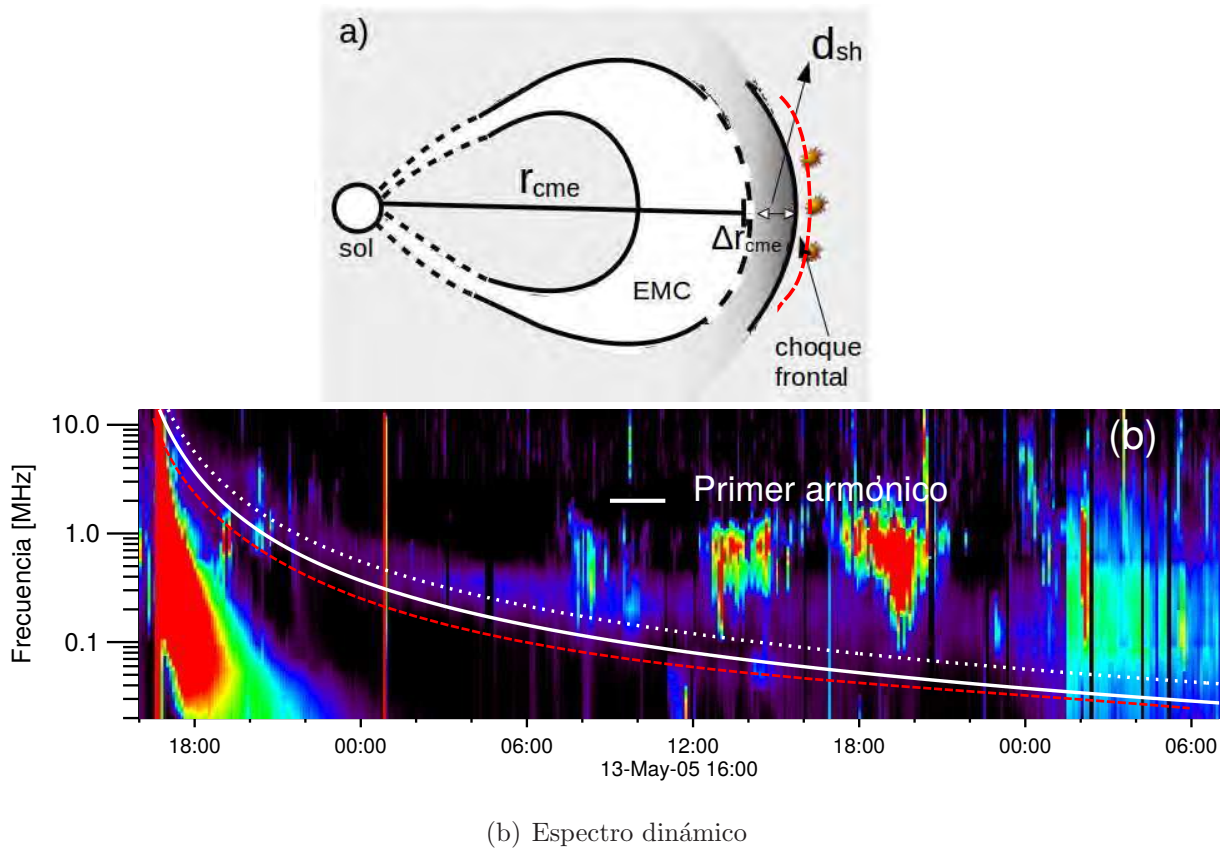


Figura 3.1: Ilustración que muestra la metodología usada para aproximar la deriva de frecuencia obtenida por los modelos con la deriva de frecuencia observada por datos in-situ. En el panel (a) se muestra donde se está produciendo el estallido Tipo II, y en el panel (b) se muestra la deriva de frecuencia obtenida por los modelos, antes y después de hacer la corrección, línea continua y segmentada, respectivamente.

más cerca del Sol que el choque asociado a ésta. Por lo tanto, hay una mayor densidad en la parte frontal de la EMC que en el choque, entonces en el espectro dinámico, se observa que la deriva de frecuencia obtenida por los modelos, se encuentra por arriba de la deriva de frecuencia asociada al choque (ya que la $f_p \propto \sqrt{n}$).

3.3. Cálculo de los parámetros in-situ

Para estimar los parámetros in-situ requeridos por los modelos, se construyeron gráficas con los datos de plasma y campo magnético, para visualizar los parámetros del viento solar (intensidad del campo magnético, densidad, velocidad, temperatura, porcentaje de partículas alfa y de la densidad de la EMC). Primero, se identificaron estos parámetros para obtener valores promedio del VS ambiente, y además identificar el momento de arribo de la eyecta a la Tierra. Se usaron los criterios mencionados en el Capítulo 1 para identificar el paso de una eyecta.

En la Figura 3.2 mostramos un ejemplo de los eventos analizados. En particular, este evento ocurrió del 13 al 18 de mayo de 2005, y fue detectado por las naves IMP 8, Wind y ACE. En la Figura 3.2 se muestran, de arriba hacia abajo, la magnitud del campo magnético, la temperatura, la densidad, la velocidad y la razón entre partículas alfa respecto a los protones del VS. La línea punteada indica el tiempo en el cual se tomaron los valores de entrada del viento solar ambiente que son usados para los modelos. La línea segmentada y la línea continua indican los tiempo de inicio del choque y de la EMC, respectivamente. En el caso de las EMCs rápidas, su estructura está conformada por una región comprimida de alta densidad, temperatura y turbulencia conocida como funda, seguida de la eyecta (o nube magnética) de baja densidad y temperatura, además presenta un campo magnético muy intenso. En línea segmentada y línea continua se muestran las estructuras que componen las EMCs (choque, funda y eyecta).

Por otro lado, debido a que existe una diferencia de presiones con el plasma solar ambiente ($P_{emc} > P_{VS}$), las EMCs sufren una expansión a su paso en el medio inter-

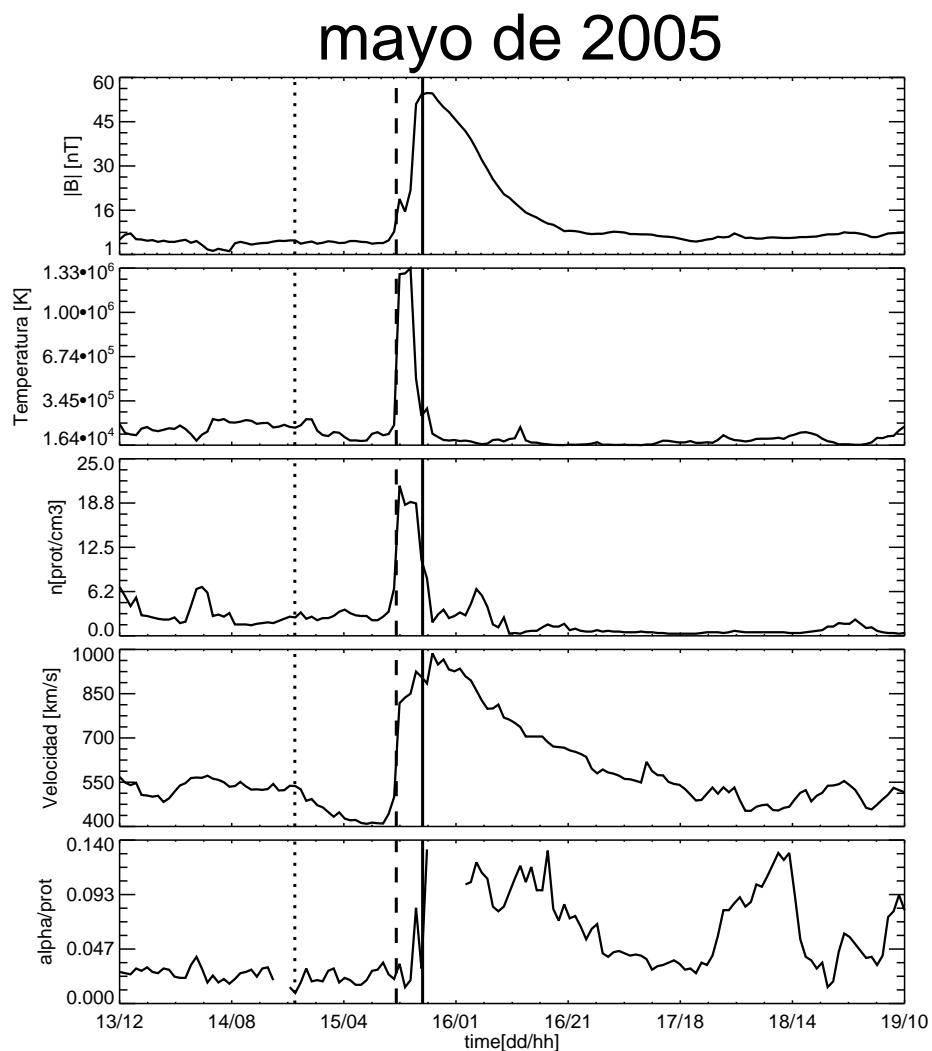


Figura 3.2: Firma característica de una EMCI observada in-situ a 1 UA, correspondiente a los días 13 al 18 de Mayo de 2005. La línea punteada indica el tiempo donde se tomaron los valores del VS de entrada para los modelos, en línea segmentada y línea continua el tiempo de inicio del choque y de la EMC, respectivamente. [Tomada de: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>]

planetario. En el segundo panel (de arriba hacia abajo) de la Figura 3.2, se muestran las mediciones de temperatura de la EMCI. El plasma cuya temperatura de protones es más baja que la esperada para una expansión normal de viento solar, se le considera una posible manifestación de EMCs en el MI. Gosling (1973) sugiere que la temperatura de protones inusualmente baja podría indicar regiones de plasma expandiéndose. Si la EMC es suficientemente rápida con respecto al viento solar ambiente, se forma un choque (línea segmentada de la Figura 3.2) que origina una región compuesta por viento solar acelerado, calentado y comprimido. Esta región se caracteriza por un intenso y turbulento campo magnético, así como un incremento en la velocidad del flujo del plasma. Otra firma que resulta de la expansión es el decremento gradual de la velocidad del plasma. La nave espacial, mide en la parte frontal de la EMC una mayor velocidad que en la parte trasera de la eyecta, por lo tanto en el registro se observa este decrecimiento en la velocidad. Es importante señalar que en ocasiones el criterio de identificación de los eventos puede ser arbitrario y propio de cada autor, además de que es necesario que cada evento no presente eventos complejos (interacción de dos o más EMCIs) o presencia de regiones de interacción. Esto con el fin de obtener los valores del VS y datos de arribo de la eyecta lo más preciso posible. Una vez determinados estos valores, el análisis consistirá en seleccionar los valores adecuados de los parámetros libres de cada modelo, para igualar el tiempo de tránsito (TT_{emc}) y la velocidad de arribo de la EMC que fue calculada con los registros in-situ. Debido a que cada uno de los modelos está basado en mecanismos físicos diferentes, es interesante encontrar bajo qué condiciones es válido cada modelo y cuál de todos es el que mejor aproxima los valores de arribo con los datos in-situ.

3.4. Lista de eventos

Con la metodología ya expuesta anteriormente, listamos a continuación los eventos analizados en este trabajo. Se analizaron 43 eventos que corresponden a eyecciones de masa coronal rápidas, observadas durante el periodo de 1997 al 2014. En la Tabla 3.1 la primera columna contiene el número de evento, en la segunda y tercera columna están

la fecha y la hora de inicio de los eventos, en la cuarta y quinta columna la distancia de la EMC y su velocidad a esta posición, y finalmente, en las últimas columnas están los valores in-situ a 1 UA del viento solar ambiente (velocidad, densidad, temperatura y magnitud del campo magnético).

Evento		Condiciones Iniciales			Parámetros in-situ (~ 1 UA)						
No.	*Fecha	*Hora [UT]	*ro [R_{\odot}]	* v_{0emc} [km^{-1}]	* V_{1UA} [kms^{-1}]	* n_{1UA} [$prot/cm^{-3}$]	* T_{1UA} [K]	* B_{1UA} [nT]	* τ [h]	* v_{cme} [kms^{-1}]	* TT_{cme} [h]
1	1997-04-07	14:27	2.60	878	320	15.0	95000	15.0	0.68	460	87.5
2	1998-04-29	16:58	3.87	1374	400	7.9	100000	8.1	0.28	600	60
3	1998-05-02	14:06	3.45	938	476	7.0	31260	8.27	0.15	646	65.3
4	2000-01-18	17:54	3.79	739	366	5.13	29000	5.0	0.37	380	95.1
5	2000-02-17	21:30	5.60	728	340	4.5	35000	6.0	0.23	460	71.5
6	2000-06-06	15:54	3.98	1119	530	4.5	2000	5.7	0.51	770	44.1
7	2000-07-14	10:54	5.21	1674	670	3.5	110000	8.0	0.36	1000	32.1
8	2000-08-09	16:30	3.33	701	408	2.0	36000	11.1	0.4	640	34.1
9	2000-09-12	11:54	2.83	1550	326	5.5	22200	3.4	0.13	570	64.7
10	2000-09-16	05:18	9.03	1215	670	4.5	70000	6.5	0.25	750	46.7
11	2000-11-24	15:30	3.20	1245	376	4.0	56800	5.8	0.32	679	66.2
12	2001-03-29	10:26	5.49	942	440	7.5	15000	3.0	0.69	700	65.1
13	2001-04-09	15:54	3.23	1191	550	2.0	100000	4.5	0.26	720	55.1
14	2001-04-10	05:30	2.84	2411	550	2.0	130000	4.0	0.73	730	40.5
15	2001-04-26	12:30	4.83	1006	450	2.2	5500	6.0	0.11	740	51
16	2001-09-28	08:54	3.17	845	495	9.8	62400	7.6	0.33	730	40.5
17	2001-11-22	20:30	2.48	1443	420	4.5	20000	7.0	0.86	720	41.5
18	2001-12-13	14:54	3.32	864	330	11.0	24600	9.7	0.48	735	44.1
19	2002-03-15	23:06	4.38	957	284	11.3	29600	4.4	1.12	700	77.9
20	2002-04-15	03:50	3.99	720	336	10.8	33700	6.30	0.87	610	72.3
21	2002-04-17	08:26	3.68	1240	450	6.5	10000	13.0	0.19	500	39.5
22	2002-07-15	20:30	4.54	1151	410	4.5	20000	5.0	0.44	460	63.5
23	2002-08-16	12:30	3.70	1585	408	3.4	11500	4.1	0.61	560	56.2
24	2003-05-28	00:50	4.97	1366	643	2.7	54500	3.9	0.04	640	46.2
25	2003-05-29	01:27	4.95	1237	650	3.5	20000	6.5	0.22	680	44.3
26	2003-10-28	11:30	5.84	2459	650	7.5	2000	5.7	0.26	1500	23.5
27	2003-11-18	08:50	6.30	1660	450	4.0	10000	3.5	0.34	580	49.16
28	2004-01-20	00:06	2.90	965	462	4.2	88900	5.1	1.39	710	49
29	2004-11-07	16:54	5.70	1759	590	1.5	10000	5.5	0.54	780	52
30	2005-05-13	17:12	4.57	1689	410	3.5	2000	5.0	0.5	900	36.8
31	2005-08-31	11:30	2.34	825	460	5.8	82200	4.4	1.51	780	42.2

32	2005-09-13	20:00	3.87	1866	550	1.6	89500	4.6	0.18	810	46
33	2006-08-16	16:30	4.37	888	322	16.0	35400	5.5	1.44	780	49.3
34	2006-12-13	02:54	5.31	1774	460	1.5	20000	4.8	0.31	860	43.1
35	2011-02-15	02:24	2.43	669	380	5.0	10000	3.5	0.42	580	88.6
36	2012-01-19	14:36	2.68	1120	340	9.0	20000	6.0	0.57	440	80.4
37	2012-03-09	04:26	4.24	950	422	7.1	80600	5.0	0.29	760	86
38	2012-06-14	14:12	3.32	986	360	10	50000	7.5	1.7	530	56.8
39	2012-07-12	16:48	2.85	884	350	3.0	20000	5.5	0.92	610	62.2
40	2012-09-28	00:12	3.60	947	286	5.8	11700	3.8	0.44	430	74.8
41	2013-03-15	07:12	4.12	1063	425	2.6	64600	3.6	1.23	740	54.2
42	2013-04-11	07:24	2.79	862	390	4.0	50000	4.0	0.37	460	81.6
43	2014-09-10	18:00	3.75	1267	460	6.5	40000	6.0	0.82	700	52.6

Tabla 3.1: Lista de eventos y condiciones iniciales. De izquierda a derecha: número de evento, fecha, tiempo de la primera observación del coronógrafo, posición de la EMC, velocidad de la EMC, valores in-situ del VS ambiente (velocidad, densidad, temperatura y magnitud del campo magnético), duración de la fase creciente de la fulguración asociada al evento, velocidad de llegada de la EMC a 1 UA y tiempo de tránsito.

* Valores obtenidos por el catálogo de LASCO.

★ Valores estimados usando registros in-situ.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presentarán los resultados que obtuvimos del análisis de los eventos mencionados anteriormente. Haciendo una descripción detallada de los eventos más importantes con el fin de ilustrar la propagación de las EMCs en el medio interplanetario, además de resaltar la utilidad de validar los modelos analíticos a través de estallidos de radio Tipo II, y a su vez, reportar la constante (Δr_{cme}) que se ajustó para aproximar la deriva de frecuencia calculada con los modelos con la deriva de frecuencia observada. También, mostraremos los resultados y el análisis de los parámetros libres que mejor aproximaron los tiempos de viaje y la velocidad de arribo de cada evento, esto en base a lo expuesto en el Capítulo 2.3.3.

4.1. Estudios de caso

Evento del 6 de junio de 2000

El primer evento fue detectado por LASCO/C2 el día 6 de junio de 2000 a las 15:54 UT. La parte frontal de la EMC se detectó a $3.98 R_{\odot}$ y se reporta con una velocidad inicial de 1119.3 km s^{-1} . De acuerdo a los datos in-situ, la EMC llegó al ambiente terrestre el día 8 de junio a las 12:00 UT, con una velocidad de 770 km s^{-1} . Por lo tanto, su tiempo de tránsito fue de 44.1 h.

En la Figura 4.1 se muestran los resultados calculados por los distintos modelos, además del espectro dinámico asociado a la fecha en el que ocurrió este evento. En la Tabla 4.1 mostramos los resultados y los datos correspondientes a este evento.

Modelo	Parámetro(s) libre(s)	Resultados			
		$v_{cme}[kms^{-1}]$	$TT_{cme}[h]$	$\Delta v_{cme}[kms^{-1}]$	$\Delta TT_{cme}[h]$
AC1	$C_c = 0.435$	806.5	45.6	36.5	1.5
AC2	$\alpha_2 = 2.78 \times 10^{-11}, \beta_2 = -0.11$	792.4	44.97	22.4	0.87
AC3	$C_t = 3.06$	810.9	45.76	40.9	1.66
AL1	$\alpha_1 = 0.89 \times 10^{-7}, \beta_1 = 0.89$	683.4	41.8	86.6	2.3
AL2	$\eta = 4.7 \times 10^{-5} kgs^{-1}m^{-1}$	691.2	42.0	78.8	2.1
CM1	$c = 13.51$	804.7	45.7	34.7	1.6
CM2	$M_{cme0} = 3.17 \times 10^{12} kg$	814.7	46.0	44.7	1.9

Tabla 4.1: Valores de los parámetros libres y resultados del análisis. De izquierda a derecha: Modelo usado, parámetro (s) libre (s) que mejor aproximó el arribo de la eyecta, velocidad de arribo y tiempo de tránsito calculados, y diferencia entre los resultados obtenidos con los valores in-situ.

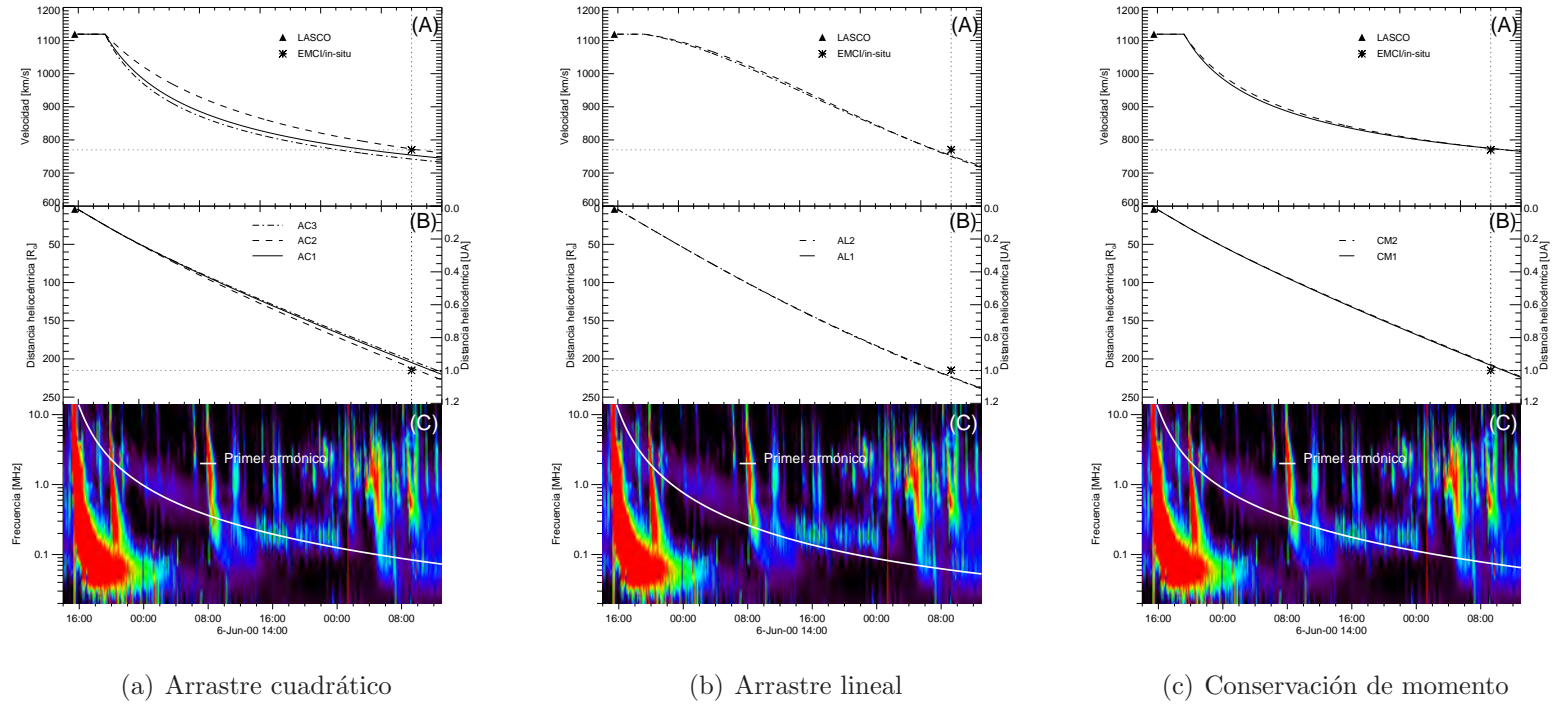


Figura 4.1: Resultados de los modelos analíticos. En el panel (A) se muestra el perfil de la velocidad de la EMC en función del tiempo, en el panel (B) la posición heliocéntrica de la EMC mientras transcurre el tiempo y en el panel (C) el espectro dinámico correspondiente a la fecha que ocurre el evento. La línea continua representa la deriva de frecuencia calculada a partir de los modelos. Los valores de arriba in-situ se identifican por medio de un asterisco.

Evento del 26 de abril de 2001

El segundo evento fue detectado por LASCO/C2 el 26 de abril de 2001 a las 12:30 UT. La parte frontal de la EMC se detectó a $4.83 R_{\odot}$ con una velocidad de 1006 km s^{-1} . Los datos in-situ mostraron que la EMC llegó a 1 UA el 28 de abril a las 15:30 UT del mismo año, con una velocidad aproximada de 740 km s^{-1} y un tiempo de tránsito (TT_{cme}) de 51 h.

En la Figura 4.2 se muestran los resultados de distintos modelos para este evento.

Modelo	Parámetro(s) libre(s)	Resultados			
		$v_{cme}[\text{km s}^{-1}]$	$TT_{cme}[\text{h}]$	$\Delta v_{cme}[\text{km s}^{-1}]$	$\Delta TT_{cme}[\text{h}]$
AC1	$C_c = 0.6$	673.5	47.8	66.5	3.2
AC2	$\alpha_2 = 1.75 \times 10^{-11}, \beta_2 = -0.11$	666.6	47.57	73.5	3.43
AC3	$C_t = 5.6$	684.5	48.31	55.5	2.69
AL1	$\alpha_1 = 0.6 \times 10^{-7}, \beta_1 = 0.89$	559.6	45.06	180.4	5.94
AL2	$\eta = 5.61 \times 10^{-5} \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-1}$	565.9	45.25	174.1	5.75
CM1	$c = 30.29$	684.2	47.8	55.8	3.2
CM2	$M_{cme0} = 3.38 \times 10^{12} \text{ kg}$	688.4	48.2	51.6	2.8

Tabla 4.2: Valores de los parámetros libres y resultados del análisis. De izquierda a derecha: Modelo usado, parámetro (s) libre (s) que mejor aproximó el arribo de la eyecta, velocidad de arribo y tiempo de tránsito calculados, y diferencia entre los resultados obtenidos con los valores in-situ.

Notamos que, en general, hubo una buena concordancia entre la velocidad calculada con la velocidad in situ. Además la deriva de frecuencia sintética se resultó consistente con la deriva de frecuencia observada. En la Tabla 4.2 mostramos los resultados y datos correspondientes para este evento para cada uno de los distintos modelos. Los parámetros libres que se ajustaron a los modelos para reproducir la EMC, siguieron la misma tendencia que el caso anterior. Valores menores de los parámetros libres a

los estimados por Vrsnak y Gopalswamy (2002) y Pérez de Tejada (2005) en los modelos AC2, AL1 y AL2 respectivamente. Para el coeficiente de arrastre turbulento, no cumplió la condición de $C_t \leq C_c$.

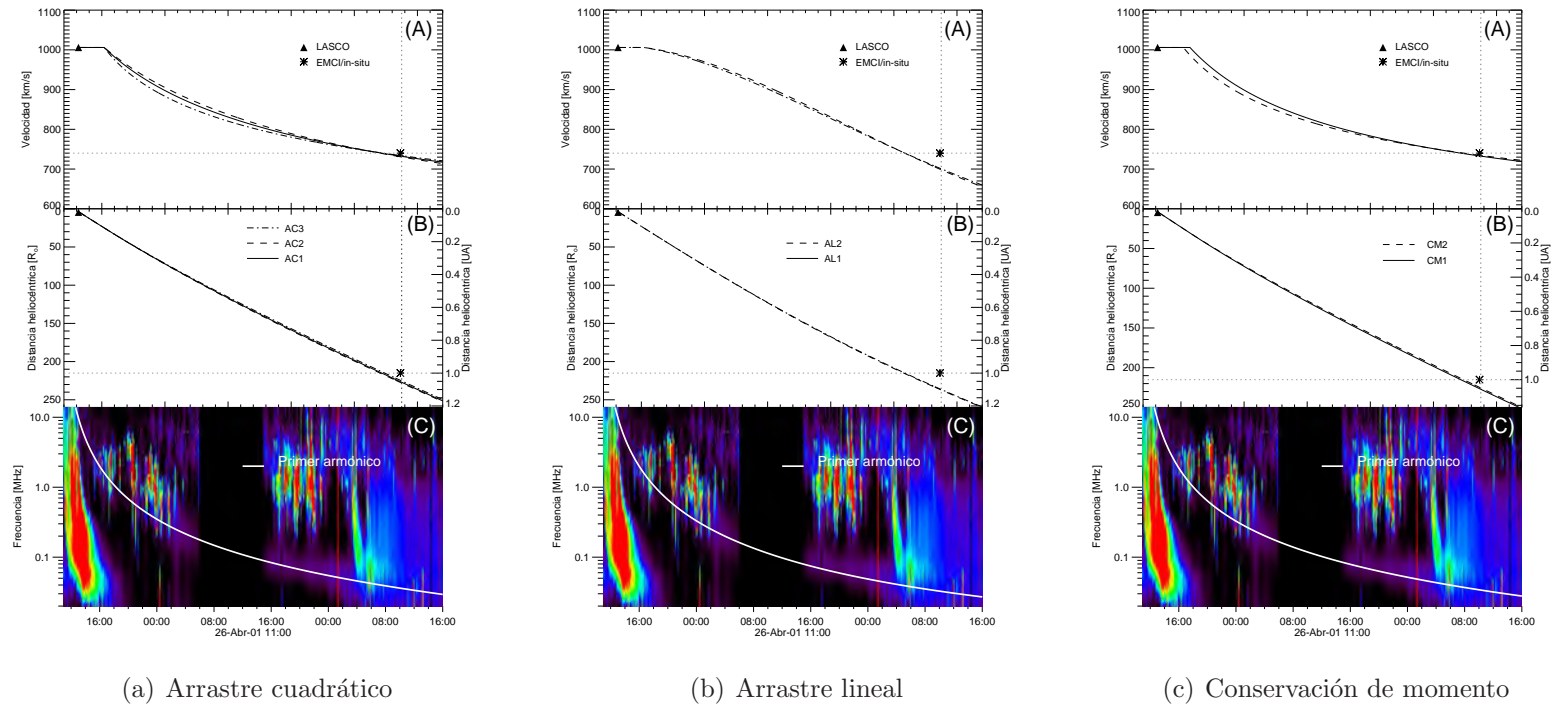


Figura 4.2: Resultados de los modelos analíticos. En el panel (A) se muestra el perfil de la velocidad de la EMC en función del tiempo, en el panel (B) la distancia n heliocéntrica de la EMC en función del tiempo y en el panel (C) el espectro dinámico correspondiente a la fecha que ocurre el evento. La línea continua muestra la deriva de la frecuencia calculada a partir de los modelos. Los valores de arriba in-situ se identifican por medio de un asterisco.

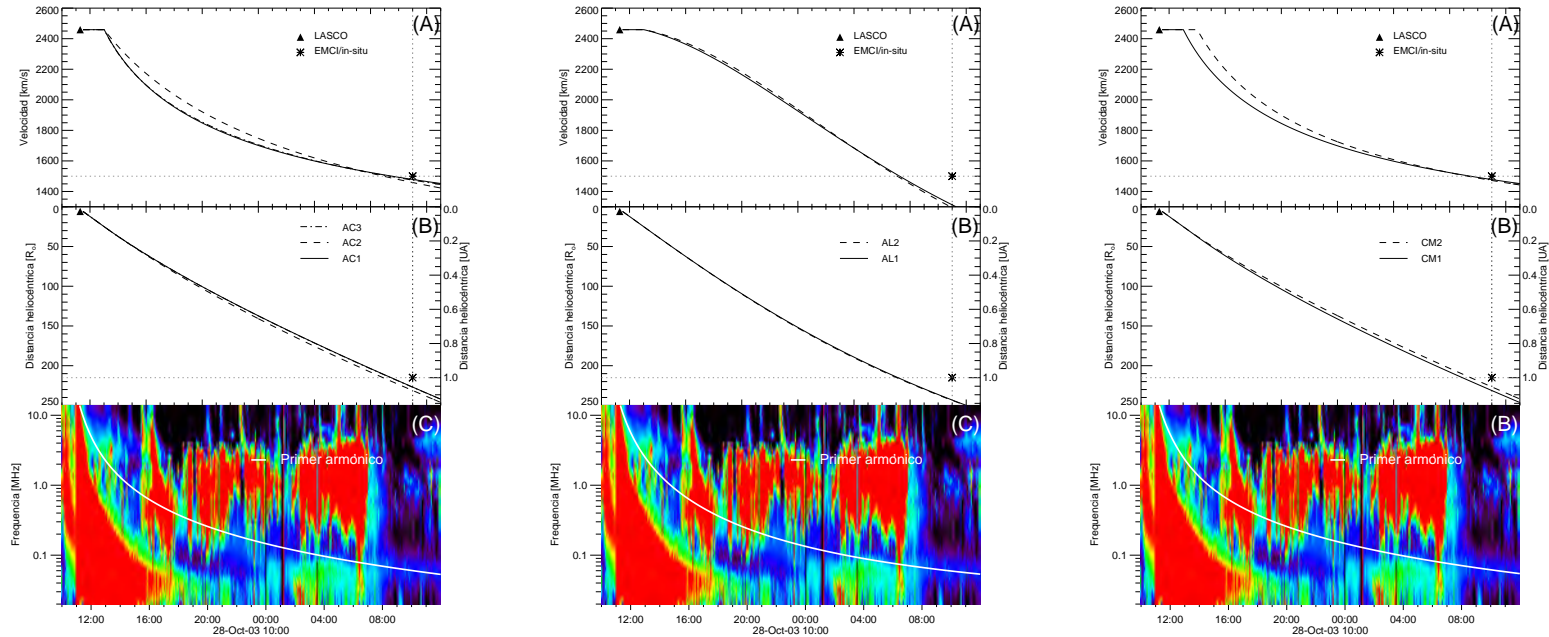
Evento del 28 de octubre de 2003

Este evento formó parte de una serie de eventos solares eruptivos que se desencadenaron a finales de octubre y principios de noviembre durante el 2003. Durante este periodo se detectó una gran número de EMCs, fulguraciones de clase X, eventos de partículas energéticas (SEPs) y choques interplanetarios que eventualmente generaron perturbaciones significativas al entorno terrestre. En particular se detectaron tormentas geomagnéticas muy intensas, conocidas como las tormentas de Halloween. Este tercer fue detectado por LASCO/C2 el día 28 de octubre de 2003 a las 11:30 UT, a $5.84 R_{\odot}$ del lugar de detección y con una velocidad de 2459 km s^{-1} . Este evento estuvo asociado a una fulguración X17, considerada como una de las fulguraciones más intensas registradas en los últimos años. Las observaciones in-situ indican que la EMC llegó al entorno terrestre el día 29 de octubre a las 11:30 UT con una velocidad de 1500 km s^{-1} . Su tiempo de tránsito (TT_{cme}) fue de 23.5 h, es decir, llegó a la Tierra en menos de un día.

En la Figura 4.3 se muestran los resultados calculados por cada uno de los modelos para este evento, así como el espectro dinámico asociado a la fecha en el que ocurrió el evento. En el espectro dinámico se resalta la alta concentración de ruido que hubo debido al gran número de fenómenos eruptivos que se desencadenaron durante esos días. Se puede observar que el espectro dinámico presenta mucha contaminación de otras emisiones no asociadas al estallido de radio Tipo II. Esto hizo que no fuera posible distinguir la deriva de frecuencia. Sin embargo, alrededor del las 8:00 UT del 29 de octubre fue posible seguir la parte final de la deriva de frecuencia, permitiéndonos compararla con la deriva de frecuencia sintética. En la Tabla 4.3 se muestran los resultados y los datos correspondientes a este evento. Se puede ver que los resultados son similares al evento anterior.

Modelo	Parámetro(s)	$v_{cme}[kms^{-1}]$	$TT_{cme}[h]$	$\Delta v_{cme}[kms^{-1}]$	$\Delta TT_{cme}[h]$
	libre(s)				
AC1	$C_c = 0.17$	1357.1	21.96	142.9	1.54
AC2	$\alpha_2 = 1.46 \times 10^{-11}, \beta_2 = -0.11$	1296.5	21.38	203.5	2.12
AC3	$C_t = 0.97$	1352.6	21.9	147.4	1.6
AL1	$\alpha_1 = 1.56 \times 10^{-7}, \beta_1 = 0.89$	946.7	19.53	553.3	3.97
AL2	$\eta = 10.25 \times 10^{-5} kgs^{-1}m^{-1}$	975.6	19.63	524.4	3.87
CM1	$c = 11.3$	1339.2	21.40	160.8	2.1
CM2	$M_{cme0} = 12.8 \times 10^{12} kg$	1354.0	21.98	146.0	1.52

Tabla 4.3: Valores de los parámetros libres y resultados del análisis. De izquierda a derecha: Modelo usado, parámetro (s) libre (s) que mejor aproximó el arribo de la eyecta, velocidad de arribo y tiempo de tránsito calculados, y diferencia entre los resultados obtenidos con los valores in-situ.



(a) Arrastre cuadrático

(b) Arrastre lineal

(c) Conservación de momento

Figura 4.3: Resultados de los modelos analíticos. En el panel (A) se muestra el perfil de la velocidad de la EMC en función del tiempo, en el panel (B) la posición heliocéntrica de la EMC mientras transcurre el tiempo y en el panel (C) el espectro dinámico correspondiente a la fecha que ocurre el evento. La línea continua muestra la deriva de frecuencia calculada mediante los modelos. Los valores de arriba in-situ se identifican por medio de asterisco.

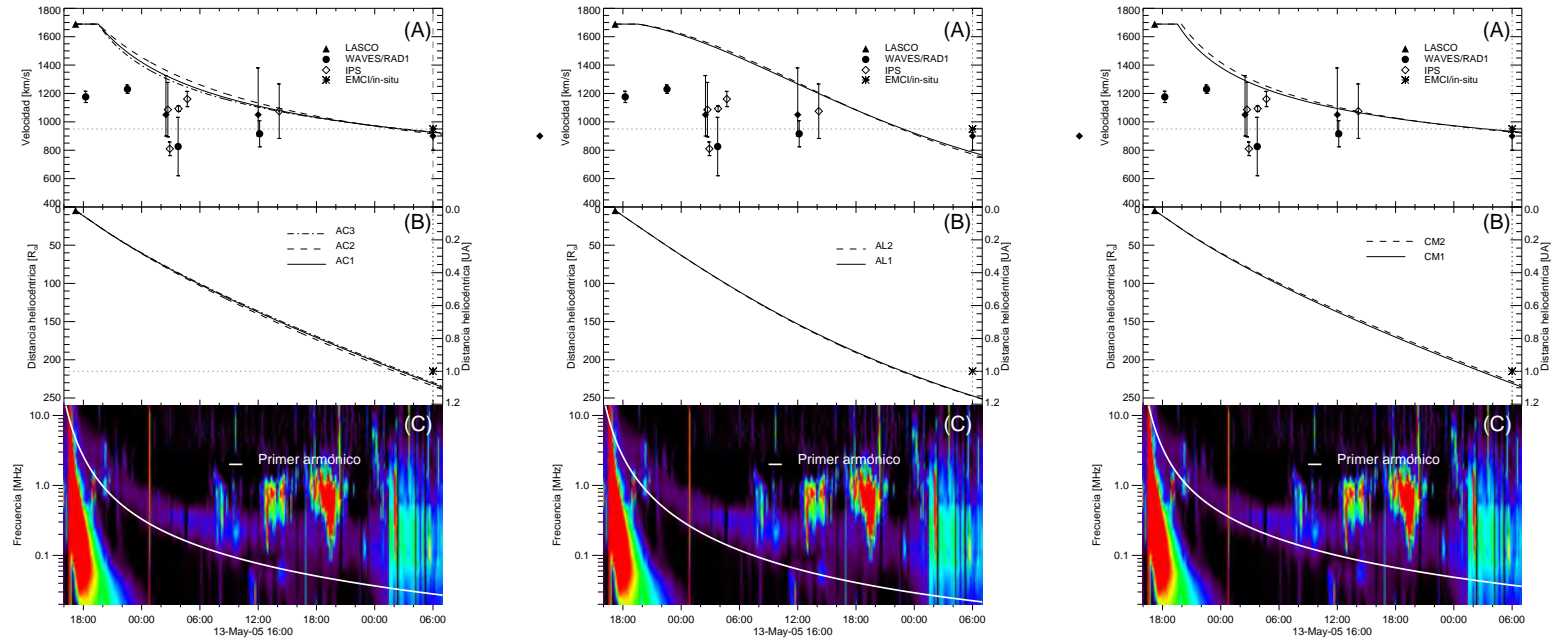
Evento del 13 de mayo de 2005

Este evento fue ampliamente estudiado por Bisi et al. (2010). Fue detectado por LASCO/C3 a las 17:12 UT del 13 de mayo. Usando datos de coronógrafo, se estimó que la parte frontal de la EMC, ubicada a $4.57 R_{\odot}$, se propagaba a una velocidad 1688.9 km s^{-1} . De acuerdo al catálogo de Richardson y Cane (2010), la región frontal de la EMC llegó a la Tierra el 15 de mayo de 2005 a las 06:00 UT, con una velocidad de 900 km s^{-1} y un tiempo de tránsito (TT_{cme}) de 36.8 h. En particular, en este evento, se tomaron las velocidades que reportan Bisi et al. (2010), determinadas por diferentes técnicas, como el análisis del choque asociado a la EMC (estallido de radio Tipo II), observaciones en luz blanca (coronógrafo), observaciones de centelleo interplanetario (IPS), y observaciones in-situ para estudiar la evolución heliocéntrica de la EMC/EMCI/choque en el MI.

La Figura 4.4 muestra la evolución heliocéntrica de la velocidad en función de la distancia de la EMC asociada a este evento para cada uno de los modelos, además de comparar el perfil de la velocidad con las velocidades determinadas por distintas técnicas. Notamos que las velocidades reportadas por Bisi et al. (2010) muestran bastante dispersión respecto al perfil de velocidades calculado por los modelos, sin embargo, debemos tomar en cuenta que cada una de las velocidades no corresponden a la misma estructura pero están relacionadas con el mismo fenómeno (EMC/EMCI/choque). En la Tabla 4.4 mostramos los principales resultados y datos correspondiente para este evento, y enseguida mostramos las trayectorias calculadas para cada uno de los distintos regímenes que mencionamos en el Capítulo 2. Los parámetros libres que se estimaron para este evento, fueron similares que los casos anteriores.

Modelo	Parámetro(s) libre(s)	Resultados			
		$v_{cme}[kms^{-1}]$	$TT_{cme}[h]$	$\Delta v_{cme}[kms^{-1}]$	$\Delta TT_{cme}[h]$
AC1	$C_c = 0.315$	828.7	33.4	71.3	3.4
AC2	$\alpha_2 = 1.64 \times 10^{-11}, \beta_2 = -0.11$	801.0	32.83	99.0	3.97
AC3	$C_t = 2.46$	841.6	33.7	58.4	3.1
AL1	$\alpha_1 = 1.181 \times 10^{-7}, \beta_1 = 0.89$	559.1	29.4	340.9	7.4
AL2	$\eta = 8.219 \times 10^{-5} kgs^{-1}m^{-1}$	572.5	29.6	327.5	7.2
CM1	$c = 14.95$	851.3	33.5	48.7	3.3
CM2	$M_{cme0} = 46.87 \times 10^{11} kg$	885.2	34.0	14.8	2.8

Tabla 4.4: Valores de los parámetros libres y resultados del análisis. De izquierda a derecha: Modelo usado, parámetro (s) libre (s) que mejor aproximó el arribo de la eyecta, velocidad de arribo y tiempo de tránsito calculados, y diferencia entre los resultados obtenidos con los valores in-situ.



(a) Arrastre cuadrático

(b) Arrastre lineal

(c) Conservación de momento

Figura 4.4: Resultados de los modelos analíticos. En el panel (A) se muestra el perfil de la velocidad de la EMC en función del tiempo, en el panel (B) la posición heliocéntrica de la EMC mientras transcurre el tiempo y en el panel (C) el espectro dinámico correspondiente a la fecha que ocurre el evento. La línea continua se muestra la deriva de frecuencia simulada. Los triángulos, círculos y rombos corresponden a datos de coronógrafos (LASCO), deriva de frecuencia (WAVES/RAD1) y centelleo interplanetario (STEL, EISCAT-MERLIN y Ooty). Los valores de arriba in-situ se identifican por medio de un asterisco.

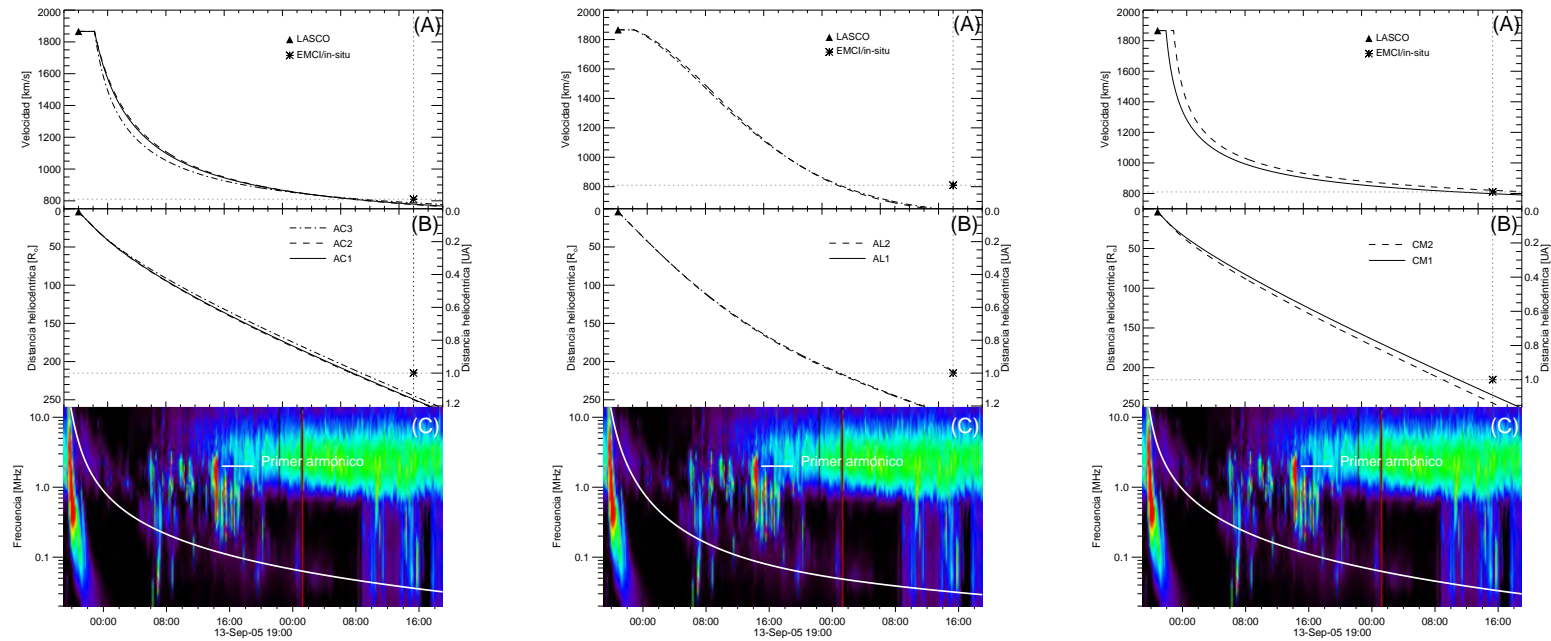
Evento del 13 de septiembre de 2005

El último evento fue detectado por LASCO/C2 el 13 de septiembre a las 20:00 UT. El coronógrafo detectó la EMC a $3.87 R_{\odot}$ con una velocidad de 1866 km s^{-1} . Las observaciones in-situ mostraron que la EMC llegó al entorno terrestre el día 15 septiembre a las 18:00 UT con una velocidad aproximada de 810 km s^{-1} y un tiempo de tránsito (TT_{cme}) de 46 h.

En la Figura 4.5 se encuentran los resultados obtenidos por los distintos modelos para este evento, así como el espectro dinámico asociado a la fecha en el que ocurrió este evento y la deriva de frecuencia sintética. En la Tabla 4.5 se muestran los resultados y los datos correspondientes para este evento. Para este evento, los parámetros libres que se ajustaron fueron similares que los casos anteriores, con la diferencia del coeficiente de arrastre turbulento (C_t). que estuvo muy por arriba que los ajustados para los eventos anteriores, además de que la masa que se ajustó para el modelo de Tappin (2006), fue un orden de magnitud menor a las masas estimadas de una EMC.

Modelo	Parámetro(s) libre(s)	Resultados			
		$v_{cme}[kms^{-1}]$	$TT_{cme}[h]$	$\Delta v_{cme}[kms^{-1}]$	$\Delta TT_{cme}[h]$
AC1	$C_c = 3.83$	686.5	37.66	123.5	8.34
AC2	$\alpha_2 = 5.13 \times 10^{-11}, \beta_2 = -0.11$	683.7	37.45	126.3	8.55
AC3	$C_t = 39.9$	701.2	38.83	108.8	7.17
AL1	$\alpha_1 = 2.28 \times 10^{-7}, \beta_1 = 0.89$	595.0	30.11	215.0	15.89
AL2	$\eta = 6.36 \times 10^{-4} kgs^{-1}m^{-1}$	595.2	30.41	214.8	15.59
CM1	$c = 1.12$	747.5	41.30	62.5	4.7
CM2	$M_{cme0} = 1.2 \times 10^{10} kg$	839.3	39.11	-29.3	6.89

Tabla 4.5: Valores de los parámetros libres y resultados del análisis. De izquierda a derecha: Modelo usado, parámetro (s) libre (s) que mejor aproximó el arribo de la eyecta, velocidad de arribo y tiempo de tránsito calculados, y diferencia entre los resultados obtenidos con los valores in-situ.



(a) Arrastre cuadrático

(b) Arrastre lineal

(c) Conservación de momento

Figura 4.5: Resultados de los modelos analíticos. En el panel (A) se muestra el perfil de la velocidad de la EMC en función del tiempo, en el panel (B) la posición heliocéntrica de la EMC mientras transcurre el tiempo y en el panel (C) el espectro dinámico correspondiente a la fecha que ocurre el evento. En línea continua se muestra la deriva de frecuencia simulada. Los valores de arriba in-situ se identifican por medio de asterisco.

En la Tabla 4.6, se muestra los resultados de los parámetros libres de los 5 eventos mostrados anteriormente. Por ultimo, se muestra en la Tabla 4.7, los valores de Δr_{cme}

Modelo	Parámetro(s) libre(s)	Eventos					Valor promedio
		1	2	3	4	5	
AC1	C_c	0.435	0.6	0.17	0.315	3.83	1.07
AC2	$\alpha_2[\times 10^{-11}], \beta_2 = -0.11$	2.78	1.75	1.46	1.64	5.13	2.55
AC3	C_t	3.06	5.6	0.98	2.46	39.9	10.4
AL1	$\alpha_1[\times 10^{-7}], \beta_1 = 0.89$	0.89	0.6	1.56	1.181	2.28	1.30
AL2	$\eta[\times 10^{-5} kgs^{-1}m^{-1}]$	4.7	5.61	10.25	8.219	6.36×10^{-4}	18.47
CM1	c	13.51	30.29	11.3	14.95	1.12	14.23
CM2	$M_{cme0} [\times 10^{12}kg]$	3.17	3.38	12.8	46.87	1.2×10^{10}	13.2

Tabla 4.6: Resultados de los valores de los parámetros libres correspondientes a los 5 eventos descritos anteriormente.

de cada evento, descritos en el Capítulo 4, que aproximo la deriva de frecuencia obtenida por los modelos con la deriva de frecuencia observada in-situ.

Modelo	Eventos					Promedio
	1	2	3	4	5	$\overline{\Delta r_{cme}}$
cuadráticos	1.2	1.8	1.7	1.5	1.5	1.54
lineales	1.4	1.8	1.5	1.5	1.4	1.52
conservación	1.3	1.9	1.6	1.7	1.8	1.66

Tabla 4.7: Resultados de la constante (Δr_{cme}) que se uso para aproximar ambas derivas, la deriva de frecuencia calculada con los modelos y la deriva de frecuencia asociada al choque.

4.2. Parámetros libres

En el Capítulo 2 se hizo una descripción de cada uno de los modelos de propagación de EMCs, mostrando que cada uno de los modelos cuentan con uno o más parámetros libres que se deben de ajustar para que muestren resultados consistentes con las observaciones in-situ de cada evento. Sin embargo, estos parámetros libres no son del todo “libres”, ya que cada modelo está construido con diferentes suposiciones físicas y cada uno de estos parámetros deben de ser físicamente consistentes.

En la Tabla 4.8 se muestran los resultados para cada uno de los parámetros libres que mejor aproximó el arribo de la eyecta en promedio: velocidad de arribo y tiempo de tránsito. Se muestra un valor promedio de los parámetros de los 43 eventos que se analizaron en este trabajo.

Modelo	Parámetro(s)	Valor promedio	Dispersión	Valor mediano
AC1	C_c	3.96	7.94	1.8
AC2	$\alpha_2[m^{-1}], \beta_2 = -0.11$	4.36×10^{-11}	3.69×10^{-11}	3.58×10^{-11}
AC3	C_t	17.40	16.87	12.86
AL1	$\alpha_1[m^{-1}], \beta_1 = 0.89$	1.64×10^{-7}	2.10×10^{-7}	1.21×10^{-7}
AL2	$\eta[kgs^{-1}m^{-1}]$	41.54×10^{-5}	67.0×10^{-5}	23.62×10^{-5}
CM1	c	17.13	23.30	7.42
CM2	$M_{cme0}[kg]$	4.32×10^{12}	6.70×10^{12}	1.8×10^{12}

Tabla 4.8: Resultados de los valores promedios de los parámetros libres.

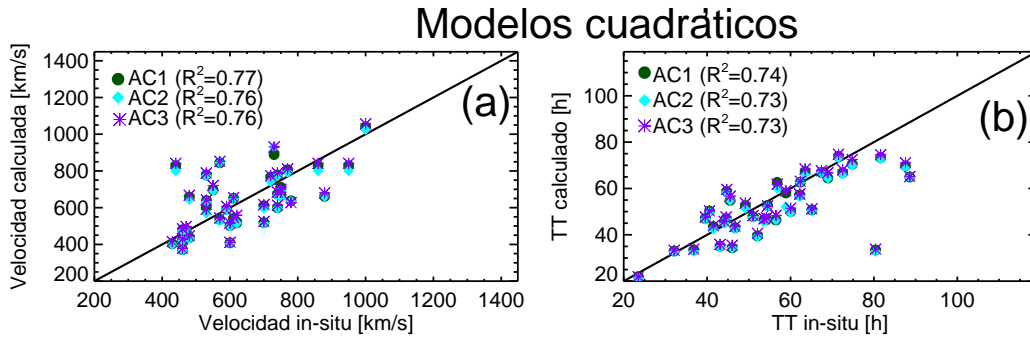


Figura 4.6: Comparación entre los valores in-situ versus los valores arrojados por los modelos cuadráticos. En el panel (a) tenemos la velocidad in-situ vs velocidad calculada, y el panel (b) tenemos el tiempo de tránsito in-situ vs el tiempo de tránsito calculado.

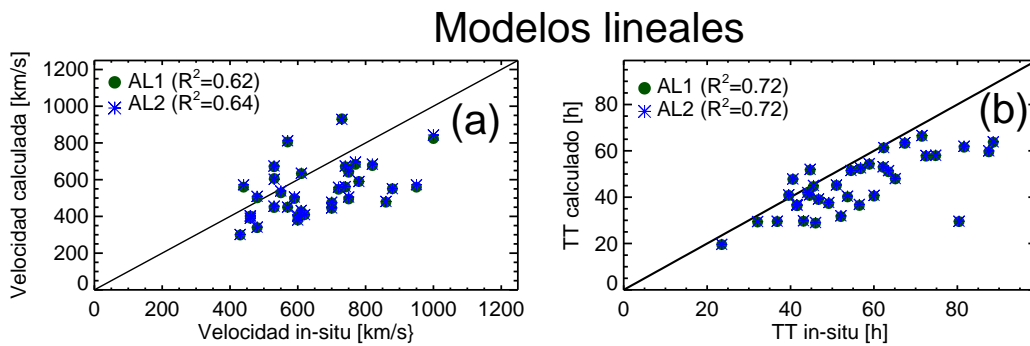


Figura 4.7: Comparación entre los valores in-situ versus los valores calculados por los modelos lineales. En el panel (a) tenemos la velocidad in-situ vs velocidad calculada, y el panel (b) tenemos el tiempo de tránsito in-situ vs el tiempo de tránsito calculado.

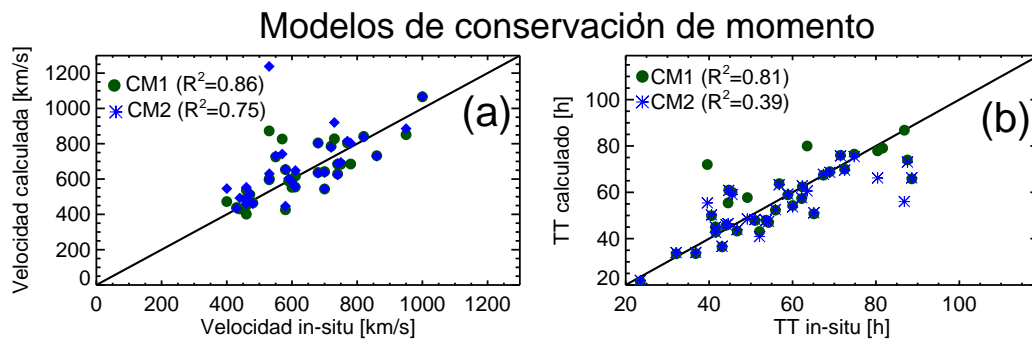


Figura 4.8: Comparación entre los valores in-situ versus los valores calculados por los modelos de conservación de momento. En el panel (a) tenemos la velocidad in-situ vs velocidad calculada, y el panel (b) tenemos el tiempo de tránsito in-situ vs el tiempo de tránsito calculado.

Capítulo 5

Discusión

En este capítulo discutiremos los resultados que encontramos en el capítulo anterior, enfocándonos en diferencias y similitudes que notamos en cada estudio de caso, además de detallar como se comportó cada uno de los modelos con los distintos eventos que aquí mostramos.

Evento del 6 de junio de 2000

Arrastre cuadrático

En la Figura 4.1a se muestran los resultados de los modelos cuadráticos (AC1, AC2 y AC3). En el panel (A) se muestra la evolución de la velocidad mientras transcurre el tiempo, para este caso, los modelos AC1 y AC3 calculan velocidades y tiempos de tránsito muy similares y, por otro lado, el modelo AC2 fue el que mejor se ajustó para aproximar la velocidad y TT_{cme} , con una diferencia de 22.4 km s^{-1} y 0.87 h respectivamente. La evolución heliocéntrica de esta EMC, panel (B), se mostró idéntica para los tres modelos. Finalmente en el panel (C), el espectro dinámico mostró bastante ruido a partir de las 8:00 h del día 7 de junio, lo que produjo que la deriva de frecuencia asociada al Tipo II no fuera posible percibirla en el espectro dinámico. Sin embargo, la deriva de frecuencia, calculada a partir de los modelos, se mostró consistente con los datos. Por otro lado, el coeficiente de arrastre cuadrático (C_c) fue mucho menor al coeficiente de arrastre turbulento (C_t), esto indica que no cumplió la condición $C_t < C_c$, y

además los parámetros que se ajustaron para el modelo AC2 (α_2 y β_2) estuvieron muy por debajo de los calculados en Vrsnak y Gopalswamy (2005).

Modelos lineales

En la Figura 4.1b se muestran los resultados que calcularon los modelos de arrastre lineal (AL1 y AL2). En el panel (A), el comportamiento de la desaceleración es más lento que el mostrado por parte de los modelos cuadráticos. En el panel (B), ambos modelos mostraron resultados idénticos, y en el espectro dinámico (panel C), la deriva de frecuencia sinttica resultó idntica para todos los modelos. Para este evento, los modelos lineales fueron los que tuvieron una mayor diferencia entre los valores calculados con los valores medidos in-situ, de aproximadamente 80-90 $km s^{-1}$ para la velocidad de arribo y alrededor de 2 h de diferencia para el TT_{cme} . Al igual que el modelo AC2, los parámetros α_1 y β_1 fueron mayores que los que calcularon Vrsnak y Gopalswamy (2005), pero el coeficiente de viscosidad (η), que fue estimado para el modelo AL2, fue mucho mayor que los calculados por Pérez de Tejada (2005).

Modelos de conservación de momento

Finalmente, en la Figura 4.1c se muestran los resultados producidos por los modelos de conservación de momento (CM1 y CM2). En los paneles, A y B, se obtuvieron resultados idénticos, además de obtener una buena aproximación con los valores in-situ, la diferencia entre los valores medidos con los valores calculados (Δv_{cme} y ΔTT_{cme}) fueron similares a los modelos cuadráticos. Sin embargo, los tiempos de tránsito (ΔTT_{emc}) fueron mayores. La deriva sintética resultó idéntica a los modelos anteriores. La masa que estimó el modelo de Tappin 2006 se encuentra entre los valores promedio de la masa de una EMC.

Evento del 26 de abril de 2001

Arrastre cuadrático

En la Figura 4.2a se muestran los perfiles de velocidad (panel A) y posición (panel B) calculados a través de los modelos de arrastre cuadrático (AC1, AC2 y AC3). Además de la emisión de radio asociada al Tipo II (panel C). Los tres modelos (AC1, AC2 y AC3) mostraron resultados idénticos para calcular la posición heliocéntrica y la velocidad de la EMC. Los tiempo de tránsito calculados por los modelos fueron similares, con una diferencia de 3 horas (ΔTT_{cme}), en promedio. Para las velocidades de arribo obtenidas por los modelos, éstas tuvieron diferencias del orden de 10 horas $km s^{-1}$, aproximadamente. Por otro lado, el espectro dinámico asociado a este evento (panel C), mostró un gap un poco antes de las 08:00 UT hasta las 18:00 UT, sin embargo la deriva de frecuencia sintética coincidió con la deriva de frecuencia asociada al Tipo II.

Arrastre lineal

En la Figura 4.2b mostramos los resultados de este evento para el caso del régimen lineal (modelos AL1 y AL2). En los paneles de la figura (A y B) se puede notar que los resultados de ambos modelos son semejantes. Los resultados calculados por ambos modelos a 1 UA se encontraron por debajo de los valores in-situ, en el caso del tiempo de tránsito (TT_{cme}), los resultados mostraron una diferencia casi de 6 h. Por otro lado, la deriva de frecuencia sintética es idéntica que el caso del régimen cuadrático.

Modelos de conservación de momento

Finalmente, en la Figura 4.2c se muestran los resultados obtenidos por los modelos de conservación de momento (CM1 y CM2). Los resultados de los modelos de conservación calcularon resultados similares para obtener la velocidad de arribo como el tiempo de tránsito de la eyecta. La deriva de frecuencia calculada usando los modelos se comporta idénticamente que los modelos anteriores. Al igual que los modelos cuadráticos, los modelos de conservación de momento calcularon los mejores resultados para deter-

minar la velocidad de arribo y el tiempo de tránsito de la EMC, en promedio 60 km s^{-1} y 3 h respectivamente (Δv_{cme} y ΔTT_{cme}).

Evento del 28 de octubre de 2003

Modelos de arrastre cuadrático

En la Figura 4.3a mostramos los resultados para el caso del régimen cuadrático (modelos AC1, AC2 y AC3), y el espectro dinámico asociado a la fecha en que ocurrió el evento. El perfil de desaceleración (panel A) muestra una tendencia gradual, permitiendo que los modelos de arrastre cuadrático obtuvieran resultados similares para los tres modelos (AC1, AC2 y AC3). El perfil de la posición heliocéntrica mostró buenos resultados al arribo a 1 UA. Los tres modelos calculan buenos resultados para el tiempo de tránsito de la EMC, con una diferencia de alrededor de 2 h (ΔTT_{cme}), en promedio, para los tres modelos (AC1, AC2 y AC3). Por otro lado, el espectro dinámico mostró demasiado ruido, permitiendo que no fuera posible distinguir el estallido de radio Tipo II. Sin embargo, alrededor de las 8:00 UT del día 29 de octubre, la deriva de frecuencia comienza a ser visible, permitiendo hacer una comparación con la deriva de frecuencia sintética, encontrando que reproduce de manera idéntica la deriva de frecuencia asociada al Tipo II. Para este evento, el espectro dinámico no mostró ruido al momento en que el choque arriba a 1 UA, a diferencia de los eventos anteriores donde mostraban lo contrario.

Modelos de arrastre lineal

En la Figura 4.3b se muestran los resultados correspondientes a los modelos lineales (AL1 y AL2). En los paneles (A y B) ambos modelos se comportan de forma idéntica, mostrando valores por debajo de los datos in-situ. Con una diferencia en el tiempo de tránsito (ΔTT_{cme}) de casi 4 h y una diferencia de velocidad de arribo (Δv_{cme}) 500 km s^{-1} en promedio, resultados muy por arriba que los calculados por parte de los modelos cuadráticos. Evidenciando, una vez más, que los modelos de arrastre lineal no son buenos candidatos para reproducir la propagación de una EMC a través del medio

interplanetario. La deriva de frecuencia simulada se mostró idéntica del caso anterior.

Modelos de conservación de momento

En la Figura 4.3c se muestran los resultados calculados por los modelos de conservación de momento. En el panel (A) de la desaceleración, los resultados de ambos modelos tienden a igualarse mientras se propaga la eyecta. En el panel (B), ambos modelos se comportan igual mientras transcurre el tiempo. Los modelos de conservación de momento mostraron resultados consistentes con los datos in-situ para este evento. La deriva de frecuencia sintética no presentó ninguna diferencia respecto a los casos anteriores.

Evento del 13 de mayo de 2005

Modelos de arrastre cuadrático

En la Figura 4.4a se muestran los perfiles de velocidad (panel A) y posición (panel B) calculados a través de los modelos de arrastre cuadrático, AC1, AC2 y AC3. Además de la emisión de radio asociada al Tipo II (panel C). Observamos que los perfiles de velocidad son afectados por una fuerte desaceleración que gradualmente aumenta con la distancia. El desarrollo de la desaceleración permite que la velocidad sea consistente con los datos in-situ de arribo de la eyecta al entorno terrestre, con una diferencia, (Δv_{cme}) menor a los 100 km s^{-1} en promedio para los tres modelos (AC1, AC2 y AC3), así como, un $\Delta TT_{cme} = 3h$ en promedio. Esto sugiere que, para este evento, los modelos cuadráticos calculan buenos resultados para aproximar la velocidad de arribo y tiempo de tránsito de una EMC a 1 UA. Por otro lado la deriva de frecuencia sintética calculada mediante los modelos, coincide bastante bien de la deriva de frecuencia asociada al Tipo II, permitiendo hacer una comparación de ambas derivas.

Modelos de arrastre lineal

En la Figura 4.4b se muestran los perfiles de velocidad y posición de la EMC calculados a partir de los modelos de fuerza de arrastre lineal, además del espectro

dinámico durante el periodo de tiempo cuando este evento ocurrió. En los dos paneles de la figura (A y B) se puede apreciar que los modelos AL1 y AL2 son semejantes. En el panel (A) se observa que los valores de la velocidad se encuentran muy por arriba por los valores de las velocidades calculadas con distintos instrumentos. En particular, los valores de arribo predichos por ambos modelos están por debajo del valor esperado (líneas segmentadas mostradas en ambos paneles, señalando con un asterisco el momento de arribo de la eyecta a 1 UA), con una diferencia arriba de los 300 km s^{-1} (Δv_{cme}) y de 7 h (ΔTT_{cme}) en promedio para los modelos de arrastre lineal. La deriva de frecuencia sintética asociada al Tipo II se muestra idéntica al caso anterior.

Modelos de conservación de momento

En la Figura 4.4c se muestran los resultados obtenidos a través de los modelos de conservación de momento (CM1 y CM2). Similares a los modelos cuadráticos, el perfil de velocidad sufrió una desaceleración conforme la EMC se propagaba en el tiempo (panel A). Además de presentar la misma tendencia de la deriva de frecuencia sintética para los dos casos anteriores. La adecuada selección de parámetros libres permitió aproximar los valores de arribo predichos por los modelos con los valores medidos in-situ. En particular el modelo CM1 fue el que mejor resultado calculó para este evento, con $\Delta v_{cme}=14.8 \text{ km s}^{-1}$ y $\Delta TT_{cme}=2.8$.

Evento del 13 de septiembre de 2005

Modelos de arrastre cuadrático

En la Figura 4.5a se muestran los resultados para el caso del régimen cuadrático (modelos AC1, AC2 y AC3). Observamos que para este evento, el régimen cuadrático calculó resultados por debajo de los valores in-situ, aproximadamente 8 h de diferencia entre el tiempo de llegada estimado y el tiempo de llegada in-situ. Diferencia notable, ya que en los anteriores eventos los modelos cuadráticos calculaban con una menor diferencia el tiempo de tránsito. Por otro lado, los modelos cuadráticos calcularon

resultados similares para determinar la posición heliocéntrica en función del tiempo de la EMC. La deriva en frecuencia calculada mediante los modelos, fue cualitativamente consistente con la deriva en frecuencia asociada al estallido de radio Tipo II.

Modelos de arrastre lineal

En la Figura 4.5b se muestran los perfiles de velocidad y posición (paneles A y B) de la EMC calculados a través de los modelos de fuerza de arrastre lineal (AL1 y AL2), además del espectro dinámico asociado a este evento junto con la deriva de frecuencia sintética (panel C). El perfil de velocidades que calcularon los modelos AL1 y AL2 fueron inconsistentes con los datos in-situ de arribo a la eyecta a 1 UA. Los resultados calculados por los modelos mostraron una gran diferencia con respecto a los datos in-situ, con $\Delta v_{cme} = 215 \text{ km s}^{-1}$ y $\Delta TT_{cme} = 15 \text{ h}$ en promedio de ambos modelos. La frecuencia de deriva calculada mediante los modelos, fue idéntica que la de los modelos cuadráticos.

Modelos de conservación de momento

En la Figura 4.5c se muestran los resultados arrojados por los modelos de conservación de momento (CM1 y CM2). El perfil de velocidad (panel A) mostró una rápida desaceleración a diferencia de los modelos anteriores, permitiendo que la velocidad sea consistente con las observaciones in-situ. El perfil de la posición heliocéntrica (panel B) tuvo una diferencia de un par de horas con los datos in-situ, con $\Delta TT_{cme} = 5 \text{ h}$ en promedio de ambos modelos. Sin embargo, para aproximar la velocidad de arribo de la EMC a 1 UA, los modelos CM1 y CM2 tuvieron una diferencia notable en sus resultados, mientras que en los eventos anteriores ambos modelos se mostraban idénticos. Cabe resaltar que para este caso, el modelo de Tappin (CM2) no se pudo ajustar con los datos in-situ, estimando una masa de la EMC de $1.2 \times 10^{10} \text{ kg}$, un orden de magnitud menos a los valores estimados para las EMCs, además de calcular una velocidad superior que la medida in-situ. Por lo tanto, el modelo de Tappin, para este evento, no es un candidato para reproducir la propagación de una EMC a través del medio

interplanetario.

Los resultados calculados por los modelos mostraron ciertas diferencias entre cada uno de los modelos. Por una parte, los modelos de arrastre cuadrático y los modelos de conservación de momento mostraron perfiles de velocidad similares, la fase impulsiva, que se caracteriza por una velocidad constante durante las primeras horas de inicio del evento, se muestra clara durante las primeras horas del tránsito de la eyecta. En cambio, los modelos lineales muestran una etapa impulsiva, muy pobre durante el inicio del evento. En la etapa del desacoplamiento, que se caracteriza por una intensa desaceleración de la EMC, los modelos cuadráticos y de conservación mostraron esta tendencia en la aceleración. Eventualmente, este comportamiento, produjo que fueran consistentes los resultados con las observaciones in-situ. Por otro lado, los modelos de arrastre lineal, mostraron una lenta desaceleración mientras se propagaba la eyecta, lo que condujo que la eyecta no lograra equipararse a las observaciones in-situ. Las etapas de impulsión y decaimiento características de la evolución heliocéntrica de la eyecta mencionadas anteriormente, son descritas en diversos trabajos (Canto, 2000; Canto et al., 2005; Corona-Romero y Gonzalez-Esparza, 2011). Sin embargo, en los modelos de conservación de momento el modelo de acreción de masa de Tappin (2006), en diversos eventos arrojaban valores donde la masa inicial estimada de la EMC se encontraba muy por debajo de valores típicos de una EMC (desde un orden de magnitud, hasta 3 o 4 ordenes de magnitud abajo). Esto impidió empatar los valores teóricos de la masa. Por lo tanto, este modelo no es consistente con los valores empíricos de las EMCs. Esto inválida la acreción de masa como mecanismo para reproducir la propagación de una EMC.

5.1. Parámetros libres

En la Figura 4.6 se muestra el gráfico comparando los valores in-situ con los resultados calculados por los modelos de arrastre cuadrático (AC1, AC2 y AC3). En ambos paneles (a y b) se muestra la comparación entre los valores in-situ y los teóricos. En

caso de una buena correlación entre los valores in-situ con los resultados predichos por los modelos, los valores se encontrarían cerca de la recta diagonal. Los resultados que calcularon los modelos cuadráticos tuvieron una buena correlación con las observaciones in-situ. Los tres modelos calcularon valores similares, sus coeficientes de correlación para estimar el (TT_{eme}) fueron: 0.74 (modelo AC1), 0.73 (modelo AC2) y 0.73 (modelo AC3). Para estimar la velocidad de arribo fueron: 0.77 (modelo AC1), 0.76 (modelo AC2) y 0.76 (modelo AC3). Para el caso de los modelos cuadráticos, los resultados fueron similares tanto para estimar la velocidad de arribo como para estimar el (TT_{eme}). En la Figura 4.7 se muestra la comparación entre los valores in-situ y los valores calculados por los modelos de arrastre lineal (AL1 y AL2), se puede notar que los resultados mostraron bastante dispersión. Los coeficientes de correlación para ajustar el (TT_{eme}) fueron: 0.72 (modelo AL1) y 0.72 (modelo AL2). Y para estimar la velocidad de arribo los coeficientes de correlación fueron: 0.62 (modelo AL1) y 0.64 (modelo AL2). Para este caso, los modelos lineales estimaron mejores resultados para el (TT_{eme}) de las EMCs que para la velocidad de arribo.

Finalmente en la Figura 4.8 se muestran las comparaciones entre los valores calculados por los modelos de conservación de momento (CM1 y CM2) y las observaciones in-situ, velocidad y tiempo de tránsito. Se puede apreciar que la correlación entre los resultados no fueron muy buenos. En algunos eventos los modelos de conservación obtenían buenos resultados pero en algunos otros, los resultados no fueron consistentes con las observaciones in-situ. Los coeficientes de correlación para ajustar el (TT_{eme}) fueron: 0.89 (modelo CM1) y 0.39 (modelo CM2). Y por otro lado, para ajustar la velocidad de arribo fueron: 0.86 (modelo CM1) y 0.75 (modelo CM2). Por lo tanto, vemos que los modelos de conservación estiman con mayor grado de confianza la velocidad de arribo que el tiempo de tránsito de las EMCs a 1 UA.

Capítulo 6

Conclusiones

El objetivo de esta tesis es describir la propagación de las EMCs rápidas en el medio interplanetario a partir de diferentes modelos analíticos de propagación presentes en la literatura. Dicha descripción fue validada a través de cada uno de los modelos usando estallidos de radio Tipo II. Esto con el fin de identificar los mecanismos físicos que mejor reproducen la propagación de EMCs a través del medio interplanetario. Los resultados del análisis dan las siguientes conclusiones:

1. Del análisis realizado podemos concluir que los mecanismos de arrastre cuadrático y el intercambio de momento lineal entre la EMC y el VS, son los principales mecanismos que gobiernan la interacción entre el sistema EMC-VS. En particular el modelo de Cargill (2004) (AC1) y Corona-Romero et al. (2011) (CM1) fueron los que mostraron los mejores resultados tanto para estimar la velocidad de arribo y el (TT_{emc}) de las EMCs.
2. El análisis de la validación de los modelos analíticos usando estallidos de radio Tipo II, podemos concluir que a pesar de que cada modelo tiene diferentes suposiciones físicas y ofrece diferentes resultados, son capaces de reproducir de manera confiable la deriva de frecuencia asociada al estallido de radio Tipo II.
3. A pesar de que todos los eventos analizados tenían asociados estallidos de radio Tipo II, la identificación de éstos en los espectros dinámicos fue difícil, lo que

originó que no fuera posible validar todos los eventos con los modelos. Por lo tanto, concluir que todos los modelos reproducen la deriva de frecuencia asociada al Tipo II se remite solamente a los eventos favorables.

4. Del análisis realizado, se pudo ver que para aquellos eventos donde las firmas in-situ del tránsito de una EMC estuvieron muy perturbadas, los modelos estimaban valores muy por arriba de los valores in-situ. Esto nos puede indicar que solamente para aquellos eventos donde el viento solar ambiente no se encuentre muy perturbado, los modelos analíticos de propagación de EMCs estimarán valores más confiables para predecir velocidades y tiempos de llegada a 1 UA.
5. En general, entre más completa sea la aproximación que hace el modelo para reproducir la propagación de la EMC, éste requerirá valores de entrada más precisos, tales como las condiciones iniciales de la EMC y los valores típicos del VS. Por lo tanto, una descripción más profunda de la dinámica de las EMCs y resultados más confiables acerca del momento de arribo de la EMC al ambiente terrestre está en función de elegir adecuadamente estos valores de entrada para los modelos. Estos valores se eligieron arbitrariamente teniendo en cuenta las distintas características que debían de cumplir cada una de las firmas in-situ (intensidad del campo magnético, temperatura, velocidad, densidad). Por lo tanto, esta selección de valores dota a los resultados de los modelos de una importante carga de subjetividad y un error asociado.
6. Para finalizar, es importante señalar que el estudio de las características y evolución de las EMCs es una tarea compleja que requiere de mucho trabajo, tanto a nivel teórico como observacional. Sin embargo, en este trabajo de tesis se pretendió obtener una mejor comprensión y entendimiento en la dinámica y propagación de EMCs a través del medio interplanetario. Además de contribuir a estudios enfocados al monitoreo del clima espacial, en particular en la predicción y pronósticos de arribo de EMCs al ambiente terrestre.

Bibliografía

- [1] Aguilar-Rodriguez, E: Variaciones con el ciclo solar de las diversas manifestaciones de actividad solar. Tesis de Maestria, Instituto de Geofisica, UNAM, 2001.
- [2] Aguilar-Rodriguez, E.; Gopalswamy, N.; MacDowall, R.; Yashiro, S. and Kaiser, M.L.: A universal characteristic of type II radio bursts, *J. Geophys. Res.*, 110, A12S08, 2005. doi:10.1029/2005JA011171.
- [3] Bisi, M.M.; Breen, A.R.; Jackson, B.V.; Fallows, R.A.; Walsh, A.P.; Milkic, Z.; Riley, P.; Owen, C.J.; Gonzalez-Esparza, A.; Aguilar-Rodriguez, E.; Morgan, H.; Jensen, E.A.; Wood, A.G.; Owens, M.J.; Tokumaro. M.; Manoharan, P.K.; Chashei, I.V.; Giunta, A.S.; Linker, J.A.; Shishov, V.I.; Tyulbashev, S.A.; Agalya, G.; Glubokova, S.K.; Hamilton, M.S.; Fujiki, K.; Hick, P.P.; Clover, J.M.; Pinter, B.: From the sun to the Earth: The 13 may 2005 coronal mass ejection, *Solar Phys* (2010) 265: 49?127.
- [4] Borgazzi, A.; Lara, A.; Echer, E. and Alves, M.V.: Dynamics of coronal mass ejections in the interplanetary medium, *Astronomy and Astrophysics*, 2009.
- [5] Cargill, P.J: On the aerodynamic drag force acting on interplanetary coronal mass ejections, *Solar Physics*, Vol. 221, Issue 1, pp 135-149, 2004.
- [6] Carrington, R.C: Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 20, p.13-15, 1859.
- [7] Cantó, J.; Raga, A.C. and Alessio, P.D.: Analytic solutions to the problem of jets with time-dependent injection velocities, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 313, 656-662, 2000.
- [8] Cantó, J.; González, R.F.; Raga, A.C.; de Gouveia Dal Pino, E.M.; Lara, A. and González-Esparza, A.: The dynamics of velocity fluctuations in the solar wind-I. Coronal mass ejections, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 357, 2005.

- [9] Chen, J.: Theory of prominence eruption and propagation: Interplanetary consequences, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, 1996.
- [10] Chen, P.F.: Coronal mass ejections: models and their observational basis, *Living Rev. Solar Phys.*, 8, 2011.
- [11] Corona-Romero, P. and Gonzalez-Esparza, J.A.: Numeric and Analytic Study of Interplanetary Coronal Mass Ejection and Shock Evolution: Driving, Decoupling, and Decaying, *J. Geophys. Res.*, 116, A05104, 2011.
- [12] Corona-Romero P., et al.: Propagation of Fast Coronal Mass Ejections and Shock Waves Associated with Type II Radio-Burst Emission: An Analytic Study. *Solar Physics*, 2012.
- [13] Corona-Romero, P.: Propagación de eyecciones de masa coronal rápidas y sus ondas de choque en el medio interplanetario. Tesis de Doctorado, Instituto de Geofísica, UNAM, 2013.
- [14] Ebert, R.W.; McComas, D.J.; Elliott, H.A.; Forsyth, R.J. and Gosling, J.T: Bulk properties of the slow and fast solar wind and interplanetary coronal mass ejections measured by Ulysses: Three polar orbits of observations, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 114, 2009.
- [15] Gonzalez, W.D.; Tsurutani, B.T. and Clúa de Gonzalez, A.L.: Interplanetary origin of geomagnetic storms, *Space Science Reviews* 88: 529-562, 1999.
- [16] Gosling, J.T: The Solar Flare Myth, *journal of geophysical research*, vol.98, no.A11, pages 18, 937-18,949, november 1, 1993.
- [17] Giovanelli, R.G.: A Theory of Chromospheric Flares, *Nature* No.4003 July 20, 1946.
- [18] G.Stone, R.; W.Weiler, K.; L.Goldstein, Melvyn and Bougeret, J.L.: Radio Astronomy at Long Wavelengths, American Geophysical Union, *Geophysical Monograph* 119, 2000.
- [19] Harra, L.; Milligan, R.; Fleck, B.: "Hinode: source of the slow solar wind and superhot flares". ESA 2008-05-07, April 2, 2008.
- [20] Lang, K.R: *The Sun from Space*. Springer. ISBN 3-540-66944-2. 2000.
- [21] Landau, L.D.; Lifshitz, E.M.: *Mecanica de Fluidos*, Curso de Física Teorica, Vol.6, 2001. Reverte, Barcelona.
- [22] Marsch, E.; Tu, C.: *Solar Wind Origin in Coronal Funnels*. ESA. 2008-05-06.
- [23] Priest, E: *Magnetohydrodynamics of the Sun*, Cambridge University Press, 2014.

- [24] Shibata, K.; Magara, T.: Solar Flares: Magnetohydrodynamic Processes, *Living Rev. Solar Phys.*, 8, 2011.
- [25] Shibata, K.; Masuda, S.; Shimojo, M.; Hara, H.; Yokoyama, T.; Tsuneta, S.; Kosugi, T. and Ogawara, Y.: Hot-Plasma Ejections Associated with Compact-Loop Solar Flares, *Astrophys. J. Lett.*, 451, 1995.
- [26] Tappin, S.J.: The deceleration of an interplanetary transient from the sun to 5AU, *Solar Physics*, 233: 233?248, 2006.
- [27] Sheeley, N.R.; Wang, Jr.; Hawley, S.H., et al. Measurements of flow speeds in the corona between 2 and $30R_{\odot}$, *The Astrophysical Journal*, 1997.
- [28] Vršnak, B.; Gopalswamy, N.: Influence of the aerodynamic drag on the motion of interplanetary ejecta, *Journal of Geophysical Research*, vol. 107, NO. A2, 2002.
- [29] Zheleznyakov, V.V.: Radio emission of the Sun and planets, Pergamon Press, New York, 1969.