



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

**Estudio de la dinámica de gran
escala del viento solar.
Mediciones de 5 naves: Helios,
Voyagers e IMP 8.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS
FÍSICO ESPACIAL**

PRESENTA:

ESMERALDA ROMERO HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. J. AMÉRICO GONZÁLEZ ESPARZA

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

- ❖ A mi tutor, el Dr. J. Américo González Esparza, por haberme motivado y apoyado hasta la culminación de este trabajo.
- ❖ A mis sinodales: el Dr. Román Pérez Enríquez, la Dra. Xochitl Blanco Cano, el Dr. Ernesto Aguilar Rodríguez y el Dr. Mario Rodríguez Martínez, por la pronta revisión de la tesis. Sus acertados comentarios contribuyeron a mejorar la estructura y redacción de la misma.
- ❖ De manera especial agradezco a CONACYT, por haberme proporcionado el apoyo económico durante los dos años de maestría. Al programa PAPIIT por la beca-proyecto otorgada durante este último semestre.
- ❖ A mis amigos del instituto de Geofísica por las gratas experiencias que compartimos.
- ❖ A Julio, por escucharme y apoyarme en la distancia. Tu compañía y afecto es algo que siempre agradeceré.
- ❖ Finalmente, quiero agradecer a mis padres y hermanos, por su amor y apoyo incondicional. ¡ Gracias !

Resumen

La mayoría de los estudios de la dinámica de gran escala del viento solar en la literatura se basan en observaciones *in situ* de una sola nave espacial. Estas mediciones son relevantes, ya que a partir de estos datos se identifican y caracterizan las estructuras de gran escala inmersas en el viento solar, tales como las ondas de choque, las Eyecciones de Masa Coronal Interplanetarias (EMCIs), y las Regiones de Interacción de Corrientes (RICs). Sin embargo, para conocer otros aspectos como la geometría y evolución de estas estructuras en el medio interplanetario, es necesario tener mediciones simultáneas de múltiples naves. Los estudios multi-naves son una herramienta para comprender la evolución y dinámica de los eventos de gran escala del viento solar. A lo largo de la historia espacial han habido pocas oportunidades de combinar diferentes misiones y conformar, durante determinados intervalos, ensambles de naves como los Pioneers, las Helios, los Voyagers, Ulysses y actualmente la misión STEREO. Esta tesis, presenta un estudio multi-naves que conjunta las mediciones de plasma y campo magnético de cinco sondas: Helios 1, Helios 2, IMP 8, Voyager 1 y Voyager 2, durante el periodo de noviembre de 1977 a febrero de 1978, correspondiente a la fase ascendente del ciclo solar 21. Las observaciones de este ensamble de naves fueron analizadas previamente por varios autores (p.e., Burlaga et al. (1980), Burlaga et al. (1981), Burlaga et al. (1984), González-Esparza y Smith (1996), González-Esparza (1999), Aline et al. (2008)). Dentro del intervalo de este estudio, Burlaga et al. (1980) analizaron y describieron las características físicas de una RIC y una onda de choque impulsada por una EMCI (nube magnética). Tal como señalan los autores, la alineación de este ensamble de naves nos brinda una oportunidad única para estudiar las estructuras de gran escala del viento solar, ya que esta configuración no se ha vuelto a repetir en toda la historia de la exploración espacial. Solamente durante el periodo de estudio que comprende la tesis se han podido conjuntar las mediciones de las cinco naves acotadas en un intervalo de longitud y distancia radial relativamente pequeño ($< 60^\circ$ y $0.4 \text{ UA} < r < 2.5 \text{ UA}$, respectivamente). Esta es la principal motivación para retomar el análisis de los datos

de plasma y campo magnético de las cinco naves en este intervalo de tiempo.

El objetivo de este trabajo es estudiar la evolución radial de las RICs y las EMCIs. Con la descripción y el análisis evento por evento se plantea contestar algunas preguntas: ¿cómo evoluciona el ancho radial de las RICs y las EMCIs de 0.4 a 2.5 UA en la fase ascendente del ciclo solar?, ¿cómo afectan las características (velocidad, presión dinámica, etc.) de las corrientes que generan las RICs la localización de la interfase de corriente (IC), y la presencia o ausencia de ondas de choque?, ¿cómo se relaciona la intensidad de los choques con la posición heliocéntrica?, con base en los perfiles de presión total ¿qué relación existe entre la posición longitudinal de las naves y las características de la estructura de la EMCI?, en relación a la evolución dinámica de una EMCI y su onda de choque, ¿cómo evoluciona el ancho radial de la funda en las EMCIs?, ¿cómo cambia el cociente de la presión dinámica entre la funda y la nariz de la EMCI conforme se incrementa la distancia heliocéntrica?. De este estudio esperamos observar una tendencia de crecimiento radial de las RICs y las EMCIs conforme aumenta la distancia heliocéntrica, un aumento de la intensidad de los choques (p. e., que los Voyagers registren los choques más intensos), etc. La fase ascendente del ciclo solar se caracteriza por una topología magnética compleja, en donde los enormes hoyos coronales en los polos desaparecen y aparecen hoyos coronales más pequeños a bajas latitudes, dando como resultado un incremento de la actividad solar. De acuerdo con estas características, durante este periodo esperamos observar patrones de corrientes rápidas de baja velocidad y poca duración (no mayor a 1 rotación solar) y sectores magnéticos que no siguen una periodicidad.

En trabajos como el de González-Esparza (1999), se analiza la evolución heliocéntrica del ancho radial de las RICs registradas por cinco naves: Pioneer 10 y 11 (fase descendente del ciclo solar 20), Voyager 1 y 2 (fase ascendente del ciclo solar 21) y Ulysses (fase posterior al máximo del ciclo 22). Él encontró que el ancho radial de estas estructuras aumenta con la distancia heliocéntrica, y que la velocidad de las corrientes de viento solar rápido registradas por las Voyagers fue menor que en los Pioneers, evidenciando así su relación con el ciclo solar. En otro trabajo, González-Esparza et al. (1998) analizan la evolución heliocéntrica del ancho radial de las EMCI registradas por Ulysses de 1 a 5 UA. Su análisis estadístico no mostró una clara tendencia de crecimiento radial con la distancia heliocéntrica, hecho que no concuerda con otros estudios como el de Bothmer y Schwenn (1994), quienes reportaron una expansión lineal de las EMCI con la distancia heliocéntrica.

En este trabajo se analizaron cuatro meses de datos de plasma y campo magnético de cada una de las naves, para determinar los patrones de velocidad y los perfiles de presión total de las corrientes del viento solar. Este primer análisis permitió identificar 12 eventos observados por las cinco naves: 5 RICs y 7 EMCI. Posteriormente se desarrolló un análisis evento por evento con datos de alta resolución para determinar diferentes características de las dos corrientes que generan las RIC, la IC, los choques y las fundas asociadas a cada evento según fueron detectadas por cada nave. Este análisis nos permitió vislumbrar aspectos de la evolución heliocéntrica de los mismos, encontrando que: las RIC y las EMCI tienden a crecer radialmente conforme avanzan en el medio interplanetario; el tamaño radial de la funda de las EMCI tiende a incrementarse con la distancia, sugiriendo el desacoplamiento del choque y la EMCI; la comparación entre la presión dinámica de las dos corrientes que generaron la RIC en la mayoría de los eventos fue mayor a 1, indicando que la presión dinámica de la corriente rápida era mayor más allá de 2 UA; la intensidad y el número de choques se incrementó con la distancia heliocéntrica. La principal contribución de este trabajo fue analizar la evolución heliocéntrica con mediciones simultáneas *in situ*.

La tesis está dividida en 5 capítulos:

- El Capítulo 1 expone las generalidades del viento solar, la estructura del campo magnético interplanetario y la teoría básica de las estructuras de gran escala en el viento solar (choques, regiones de interacción de corrientes y eyecciones de masa coronal interplanetarias).
- En el Capítulo 2 se habla acerca de la trayectoria que siguieron las naves durante el periodo de estudio y se da una breve descripción de las misiones espaciales.
- El Capítulo 3 corresponde a la metodología. Aquí se describirá el procedimiento seguido para la identificación de los eventos y el criterio que se usó para clasificarlos (firmas empleadas). A su vez se discuten algunos de los eventos para ejemplificar cómo se hizo la identificación.
- El Capítulo 4 engloba el análisis y la discusión de resultados. Aquí se presentan las características de los eventos en cada una de las naves, a partir de lo cual se hace la descripción de la evolución heliocéntrica de las RICs y las EMCI.

- Finalmente, en el Capítulo 5 se exponen las conclusiones generales derivadas del análisis y se plantea el trabajo a futuro para complementar este estudio.

Índice general

Resumen	IV
1 <u>Dinámica del Viento Solar</u>	1
1.1 Campo Magnético Interplanetario	3
1.1.1 La espiral de Parker	4
1.1.2 Los sectores magnéticos	4
1.1.3 La hoja neutra	5
1.2 Ciclo Solar	6
1.2.1 Ciclo de actividad solar	7
1.2.2 Ciclo magnético	8
1.2.2.1 Campo magnético potencial	10
1.2.3 Variación de las corrientes de viento solar con el ciclo solar . . .	11
1.3 Estructuras de gran escala del Viento Solar	13
1.3.1 Ondas de Choque MHD	14
1.3.1.1 Formación	14
1.3.1.2 Propiedades físicas	15
1.3.1.3 Observaciones	18
1.3.2 Regiones de Interacción de Corrientes	21
1.3.2.1 Evolución heliocéntrica	23
1.3.2.2 Observaciones <i>in situ</i>	25
1.3.3 Eyecciones de Masa Coronal	26
1.3.3.1 Observaciones	26
2 <u>Las Misiones Espaciales</u>	31
2.1 Trayectoria de las naves	32
2.2 Fase ascendente del ciclo solar 21	33
2.3 Descripción de las misiones espaciales	34
2.3.1 Helios 1 y 2	34
2.3.1.1 Experimento de Plasma	35
2.3.1.2 Experimento de campo magnético	35
2.3.2 IMP 8	36
2.3.2.1 Experimento de plasma	36
2.3.2.2 Experimento de campo magnético	36

2.3.3	Voyager 1 y 2	37
2.3.3.1	Experimento de Plasma	37
2.3.3.2	Experimento de Campo Magnético	38
3	<u>Metodología</u>	39
3.1	Identificación de eventos	40
3.1.1	Patrones de las corrientes de viento solar	40
3.1.2	Criterio de identificación para las RICs	42
3.1.2.1	Ejemplo de identificación de las RICs	44
3.1.3	Criterio de identificación para las EMCIs	50
3.1.3.1	Ejemplo de identificación de las EMCIs	51
3.2	Eventos	55
4	<u>Evolución heliocéntrica de las RICs y EMCIs</u>	58
4.1	Introducción	58
4.2	Mapas de gran escala	60
4.3	Análisis de las RICs	61
4.3.1	Discusión	80
4.4	Análisis de las EMCIs	84
4.4.1	Los perfiles de presión total	84
4.4.2	Discusión	96
5	<u>Conclusiones y trabajo a futuro</u>	102
A	La presión del viento solar	107
B	Discontinuidades MHD	109
C	Experimentos de las naves espaciales	111
	Bibliografía	116

Capítulo 1

Dinámica del Viento Solar

El viento solar es un flujo de partículas y campo magnético que permea el medio interplanetario. Se origina en la corona solar debido a la gran diferencia de presión que existe entre ésta y el medio interplanetario, fenómeno conocido como “expansión coronal” (Kivelson y Russell, 1995). El viento solar no atraviesa el medio interestelar, debido a que su presión dinámica conforme viaja en el medio interplanetario disminuye, llegando al punto en que es frenado por la presión dinámica del medio interestelar. Por lo tanto, el viento solar está confinado en una burbuja que se conoce como “heliósfera”.

De acuerdo con su velocidad y características físicas (densidad, temperatura y campo magnético) hay dos tipos de viento solar: rápido y lento. A la altura de la órbita de la Tierra, el viento lento se expande a una velocidad de aproximadamente 400 km/s con una densidad de 10 partículas/cm³ y temperatura de 4×10^4 K; el viento rápido viaja a velocidades de aproximadamente 700 km/s, su densidad promedio es de apenas 3 partículas/cm³ y su temperatura tiene valores alrededor de los 2×10^5 K (ver la Tabla 1.1). La gran diferencia entre sus características físicas se debe a su origen sobre la corona solar, ya que el viento rápido se genera en los hoyos coronales, que son regiones de campo magnético abierto de baja densidad; mientras que viento solar lento se relaciona con regiones de campo magnético cerrado (cascos coronales), sin embargo, este hecho aún no se ha confirmado (Alurkar, 1997, Feldman et al. (2005)).

En la Figura 1.1 se muestran las mediciones de velocidad y campo magnético del viento solar a diferentes latitudes durante la fase mínima y máxima del ciclo solar hechas por la nave espacial Ulysses. Las gráficas fueron adaptadas sobre una imagen de rayos X suaves del satélite Yohko (durante el mínimo y el máximo) superpuesta sobre una imagen del coronógrafo C1 de SOHO. Ulysses ha sido la única nave que ha tomado mediciones fuera del plano de la eclíptica, su órbita heliocéntrica iba desde la órbita

de Júpiter hasta 1.4 UA alrededor del Sol, con un periodo de 6.2 años. Esta órbita tan peculiar le permitió tomar mediciones durante el mínimo solar, escaneando 160 grados de latitud solar en casi un año, y regresando 5 años después a hacer mediciones durante la fase máxima del ciclo solar. Sus mediciones mostraron la estructura tridimensional del viento solar. La Figura 1.1 resalta la enorme diferencia entre los patrones de las corrientes de viento solar durante el ciclo de actividad. De acuerdo con las observaciones de Ulysses, durante la fase mínima, los hoyos coronales están a altas latitudes, por lo tanto, el viento solar rápido emana de las zonas polares, mientras que el viento lento se origina a latitudes medias; sin embargo, mediciones hechas por la sonda STEREO durante el mínimo de ciclo solar 23 mostraron que durante el mínimo también pueden presentarse pequeños hoyos coronales a bajas latitudes (Luhmann et al. (2009), Cranmer (2009), Abramenko et al. (2010)). En la fase máxima, los hoyos coronales migran hacia bajas latitudes, generando la compleja configuración de corrientes de viento solar que se observa del lado derecho. Las gráficas también exhiben la configuración del campo magnético, en color azul se resaltan las líneas de campo que entran en el Sol (negativo) y en rojo las líneas de campo que salen (positivo). Por lo tanto, la diferencia en el patrón de las corrientes de viento durante el ciclo solar está directamente relacionada con la configuración magnética del Sol. Este tema se discutirá más adelante.

Propiedades a 1 UA	Viento lento	Viento rápido
Velocidad	400±50 km/s	700±50 km/s
Densidad (part/cm ³)	~10	~3
Temperatura de protones (T _p)	~ 4 × 10 ⁴ K	~ 2 × 10 ⁵ K
Temperatura de electrones (T _e)	~1.3 × 10 ⁵ K	~ 1 × 10 ⁵ K
Campo magnético	~3 nT	~3 nT
Composición (He/H)	~1 - 30%	~5%

Tabla 1.1: Propiedades físicas del viento solar a 1 UA (González-Esparza, 2000a).

Debido a la alta conductividad eléctrica del plasma en la atmósfera solar, al ser expulsado de la corona arrastra consigo el campo magnético. Esto quiere decir que el campo magnético viaja congelado en el plasma y, por ende, permea el espacio interplanetario. Esta es una propiedad importante del viento solar, ya que los plasmas

de diferentes características físicas no se mezclan, lo que provoca que se generen discontinuidades magnetohidrodinámicas como resultado de la interacción entre diferentes corrientes (Meyer-Vernet, 2007).

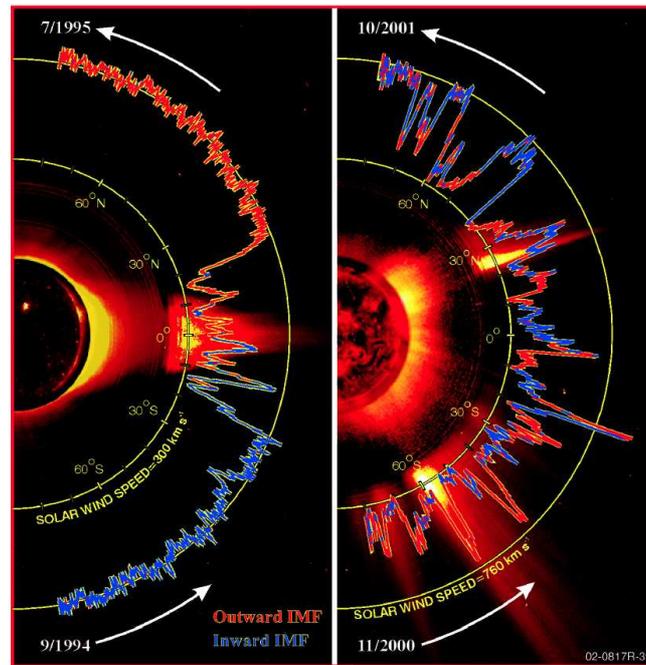


Figura 1.1: Gráficas polares de la velocidad de los patrones de viento solar registrada por Ulysses durante el máximo (lado derecho) y el mínimo (lado izquierdo) del ciclo solar. Los colores rojo y azul simbolizan la polaridad del campo magnético. Las líneas que entran en el Sol (polaridad negativa) se indican en color azul y las líneas que salen en color rojo (polaridad positiva). Tomada de: <http://rst.gsfc.nasa.gov/sect20/A5a.html>

1.1 Campo Magnético Interplanetario

La existencia del campo magnético solar se ha inferido en base al estudio de las manchas solares. Como ya se mencionó, la alta conductividad del plasma solar genera que el campo magnético sea arrastrado por el viento solar y se difunda permeando todo el medio interplanetario.

1.1.1 La espiral de Parker

El campo magnético que emana del Sol arrastrado por el viento solar permanece anclado a la superficie solar. La rotación solar provoca que las líneas de campo magnético en el medio interplanetario formen una espiral Arquimedea, denominada “espiral de Parker”. Las observaciones *in situ* del ángulo de la espiral de Parker son importantes, ya que proveen información cuantitativa de la velocidad angular del Sol y la posición de la fuente del campo magnético (Balogh et al. (2007)).

En general, de acuerdo con el modelo de Parker, el ángulo de la espiral del campo magnético interplanetario (ϕ) que forman el vector de velocidad radial del viento solar (\mathbf{V}_r) y el vector de campo magnético (\mathbf{B}), está dado por:

$$\tan \phi = \frac{\Omega r \sin \theta}{V_r}, \quad (1.1)$$

donde Ω es la velocidad angular del Sol, θ es la latitud y r es la distancia radial. Esto implica que no todas las líneas de campo magnético siguen el mismo patrón espiral, sino que éste depende de la latitud solar y la distancia a la fuente de campo magnético. En la Figura 1.2 se muestra un esquema de las líneas de campo magnético. El esquema del lado izquierdo muestra al Sol visto de frente. Se observa que las líneas de campo magnético provenientes del polo no se tuercen, debido a que el ángulo que forman la velocidad radial y el vector de campo magnético es cero, aunque estrictamente las líneas de campo no son radiales en los polos. El esquema del lado derecho muestra el patrón de deformación de las líneas de campo magnético que salen del ecuador solar visto desde el polo Norte.

1.1.2 Los sectores magnéticos

A gran escala, el campo magnético solar durante el mínimo de actividad se asemeja al campo que produce un imán. Bajo esta configuración dipolar, las líneas de campo magnético que salen son positivas y las que entran son negativas. Las regiones donde domina una polaridad de campo magnético (positiva o negativa) se les conoce como sectores magnéticos. La Figura 1.3 muestra un esquema del campo magnético interplanetario en el plano de la eclíptica, resaltando con diferente color el sector magnético positivo (rojo) y negativo (azul).

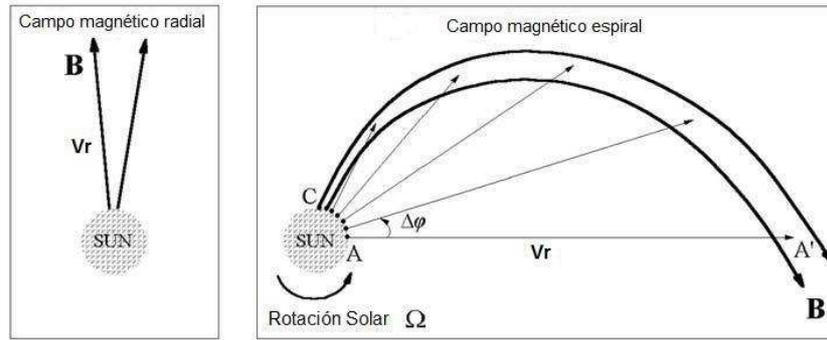


Figura 1.2: Configuración de las líneas de campo magnético interplanetario. El lado izquierdo asemeja el comportamiento de las líneas de campo saliendo de las zonas polares. El esquema del lado derecho muestra la deflexión de las líneas de campo en la zona ecuatorial (adaptada de Meyer-Vernet, 2007).

Observacionalmente, Ness y Wilcox (1964), fueron los primeros en demostrar la existencia de los sectores magnéticos. Modelos del campo magnético dipolar surgieron para explicar la configuración de los sectores magnéticos. Pero no fue sino hasta 1973, que Schulz propuso un modelo en donde por primera vez exponía la configuración de un dipolo magnético inclinado. Este modelo fue confirmado por las observaciones del Pioneer 11 durante el mínimo del ciclo solar 21 y del Voyager 1 en el inicio del ciclo solar 22 (Burlaga (1995)).

1.1.3 La hoja neutra

Los sectores magnéticos están conformados por corrientes de viento solar de diferentes características físicas, por lo cual no se pueden mezclar. Esto origina la formación de una discontinuidad tangencial entre ellos, denominada hoja neutra u hoja de corriente heliosférica (HCH), la cual tal como su nombre lo indica, es una zona donde el campo magnético es nulo.

Pensando en la configuración dipolar, la HCH es una frontera que separa los dos hemisferios magnéticos solares. Debido a que el eje de rotación solar no coincide con el eje magnético (forman un pequeño ángulo α de aproximadamente 5 a 10° durante el mínimo solar, Norton et al. (2008)), la posición de un punto fijo (θ_0) en el ecuador magnético varía latitudinalmente con el ángulo azimutal (φ_0) y la rotación solar:

$$\sin \theta_0 = \sin \alpha \sin (\varphi_0 - \Omega t). \quad (1.2)$$

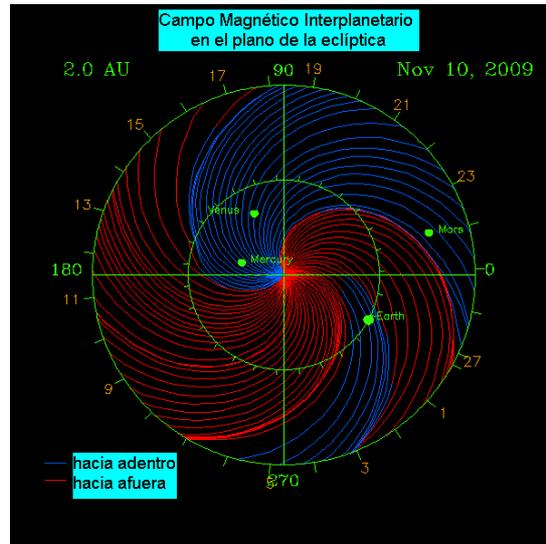


Figura 1.3: Configuración del campo magnético interplanetario a 2 UA. Las líneas rojas apuntan hacia afuera del Sol (polaridad positiva) y las líneas azules hacia adentro (polaridad negativa). Adaptada de: http://gse.gi.alaska.edu/recent/javascript_movie.html.

De acuerdo con esta expresión, la posición del punto fijo oscila con respecto al ecuador solar, pudiendo estar arriba o abajo de éste. Este hecho genera que la hoja neutra en el medio interplanetario esté ondeando (Meyer-Vernet, 2007). Su configuración en 3 dimensiones se asemeja a una falda ondeante, por ello es conocida como la “falda de bailarina”. En la siguiente figura se muestra un bosquejo de la configuración tridimensional de la HCH durante la fase mínima del ciclo solar.

1.2 Ciclo Solar

El ciclo solar tiene una duración de ~ 22 años. Su existencia es atribuida a tres propiedades fundamentales:

1. La rotación diferencial,
2. la generación del campo magnético y
3. la alta conductividad del plasma \Rightarrow el campo magnético está congelado en el plasma.

El ciclo solar está ligado con la intensidad de la actividad solar (frecuencia de eventos) y la configuración magnética, y dependiendo de los fines, su estudio puede dividirse en dos ciclos: el ciclo de actividad solar y el ciclo magnético. A continuación se describen las características de ambos.



Figura 1.4: Esquema de la configuración tridimensional de la hoja neutra durante el mínimo del ciclo solar. Tomada de: <http://wso.stanford.edu/>

1.2.1 Ciclo de actividad solar

La existencia del ciclo de actividad solar se ha inferido a partir del monitoreo de las manchas solares. H. Schwabe fue el primero en notar que la aparición de las manchas solares seguía un ciclo y le asoció una periodicidad de 10 años. Posteriormente, otros autores propusieron que el ciclo tenía una periodicidad de ~ 9 a ~ 11.5 años. Actualmente, se ha establecido que el ciclo de manchas tiene una duración promedio de 11 años (Schrijver y Zwaan, 2003).

Durante un ciclo, en promedio las manchas solares precedentes o principales (p-spot) dentro de las regiones activas sobre cada hemisferio poseen una sola polaridad (positiva o negativa). En el momento en que esta polaridad se invierte, se sabe que un nuevo ciclo de actividad ha iniciado. Es por eso que el ciclo magnético tiene un periodo de ~ 22 años.

La actividad solar no sólo se refiere al número de manchas, sino también a la ocurrencia de eventos transitorios, tales como las eyecciones de masa coronal y las fulguraciones

solares ¹. De acuerdo con la variación de la actividad solar, se han identificado cuatro fases representativas: el mínimo, la fase ascendente, el máximo y la fase descendente (Burlaga, 1995). La Figura 1.5 bosqueja la variación de la actividad solar. La gráfica central es la variación del número de manchas durante un ciclo y cada una de las imágenes muestra el nivel de actividad de la corona solar durante: el mínimo, la fase ascendente y el máximo solar. Se observa que durante el mínimo la corona solar está muy tranquila y su actividad es casi nula; en la fase ascendente la actividad comienza a incrementarse, hay un mayor número de regiones activas; y en el máximo, la corona solar está plagada de regiones activas. Obviamente, como se puede inferir de estas imágenes, la actividad solar relacionada con el número de eventos transitorios (fulguraciones y eyecciones de masa coronal) es mayor durante el máximo, en el mínimo se presentan ~ 0.2 eyecciones de masa coronal por día y en el máximo ~ 3.5 por día (Gosling (1990), Mitsakou et al. (2009)).

1.2.2 Ciclo magnético

Las manchas son una manifestación del campo magnético a nivel fotosférico, por lo cual la actividad solar está ligada con el campo magnético, de tal forma que el cambio en la configuración magnética del Sol repercute directamente sobre la configuración de las regiones activas y el número de eventos transitorios. A partir del estudio de la polaridad de las manchas solares, George Ellery Hale estableció la existencia del ciclo magnético, el cual sigue una periodicidad de ~ 22 años.

Como ya se mencionó en la sección anterior, la estructura del campo magnético solar es determinada a partir de la configuración de los hoyos coronales y la hoja neutra. De acuerdo a esta configuración se distinguen las cuatro fases representativas: el mínimo, la fase ascendente, el máximo y la fase descendente, las cuales son descritas en la Tabla 1.2. Durante el mínimo solar, el campo magnético tiene una configuración dipolar aproximadamente estable, con dos enormes hoyos coronales en los polos. Como ya se mencionó, mediciones en el mínimo del ciclo solar 23 han mostrado que también pueden presentarse pequeños hoyos coronales a bajas latitudes (Cranmer (2009), Abramenko et al. (2010)). En la fase ascendente hay una descompensación del campo magnético debido

¹ Las fulguraciones o ráfagas solares son eventos explosivos en la atmósfera solar, en los cuales hay una liberación rápida de energía (10^{30} a 10^{32} erg) y aceleración de partículas a velocidades relativistas.

a que los enormes hoyos coronales comienzan a desaparecer, y reaparecen a latitudes más bajas pero son de menor dimensión y poca duración. En el máximo del ciclo, los hoyos coronales son pequeños y se concentran en latitudes medias, lo que genera la compleja configuración magnética que la caracteriza. En esta fase, la emergencia de tubos de flujo y el aumento de la “helicidad magnética” (magnetic helicity”), incrementan la intensidad e inestabilidad del campo magnético (Berger y Field (1984), Aschwanden, 2006). En general, el flujo magnético total es mayor durante el máximo del ciclo solar y decrece conforme el ciclo llega al mínimo (Schrijver y Zwaan, 2003).

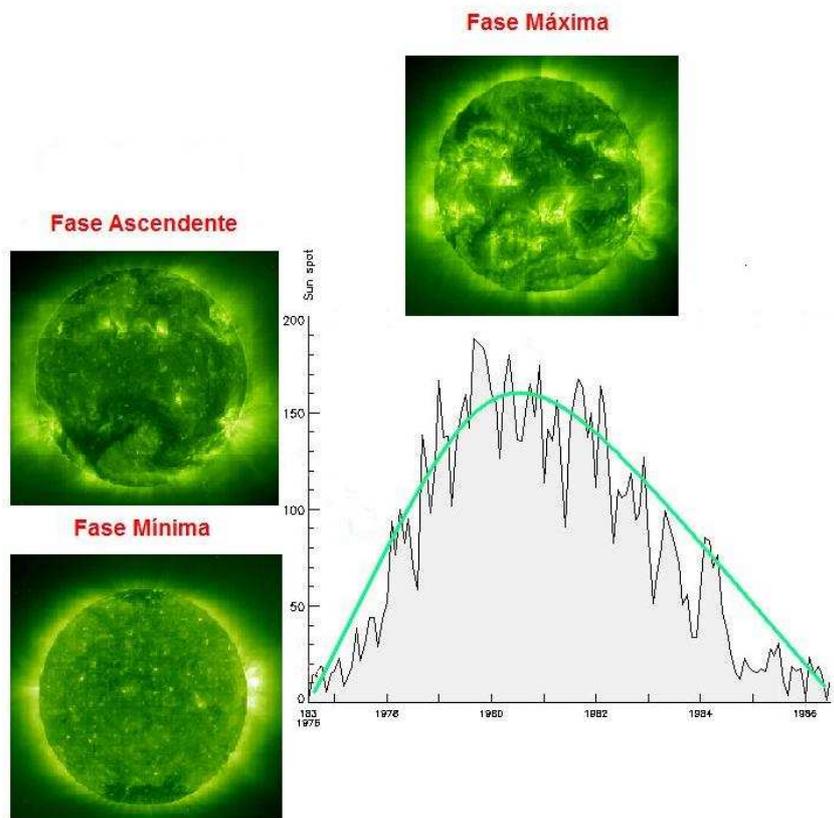


Figura 1.5: Fases del ciclo de actividad solar. La gráfica muestra el ciclo de manchas solares (la línea verde es el comportamiento global del ciclo) y las imágenes muestran la actividad sobre la corona solar durante el mínimo, la fase ascendente y el máximo. Las zonas más brillantes corresponden a las regiones de mayor actividad (regiones activas). Las imágenes en EUV fueron tomadas por la sonda espacial SOHO.

Tabla 1.2: Descripción de las fases del ciclo solar de acuerdo a las características de los hoyos coronales y la hoja neutra (adaptada de González-Esparza y Smith (1996)).

Ciclo Solar	Hoyos Coronales*	Hoja neutra†
Fase Ascendente	Los hoyos polares reducen su tamaño y desaparecen, pero evolucionan de una manera muy diferente desapareciendo y reapareciendo a diferentes tiempos	La extensión latitudinal de la hoja de corriente se incrementa, cambiando la simple configuración ecuatorial que se tenía previamente en el mínimo
Máximo	No hay hoyos polares, pero aparecen pequeños hoyos a latitudes medias	La estructura es muy compleja, la hoja de corriente principal se extiende casi de polo a polo, y a latitudes medias aparecen pequeñas hojas de corriente aisladas
Fase Descendente	Después de invertirse la polaridad, reaparecen los hoyos polares y aumentan de tamaño con grades extensiones hacia el ecuador	La estructura es más simple y la hoja de corriente tiene forma senoidal extendida sobre un gran rango latitudinal
Mínimo	Los hoyos polares alcanzan su máxima extensión y no hay hoyos ecuatoriales	La corriente es muy estable, yaciendo sobre el ecuador solar

* Basado en la descripción de Hundhausen et al., 1981.

† Basado en la descripción de Hoeksema, 1986.

Como resultado del cambio en la inclinación del eje magnético durante el ciclo solar, la configuración de la hoja neutra cambia. En el mínimo, el ecuador magnético está muy próximo al ecuador solar y la hoja neutra es casi plana; en el máximo, el eje magnético alcanza su máxima inclinación, por lo cual la hoja neutra se vuelve muy inestable.

1.2.2.1 Campo magnético potencial

La configuración de la hoja neutra se puede estudiar analizando los sectores magnéticos a partir de las mediciones *in situ* o mediante mapas sinópticos de campo fotosférico y campo superficial. Los mapas sinópticos muestran la configuración de la hoja neutra durante una rotación solar y se construyen a partir del campo magnético coronal, calculado extrapolando las observaciones del campo magnético fotosférico con un modelo de campo potencial (Alurkar, 1997). La Figura 1.6 muestra un modelo de campo magnético superficial del mínimo y el máximo del ciclo solar. En esta figura se aprecia claramente la diferencia entre la configuración magnética en ambas fases del ciclo. Aunadas a esta figura, se muestran dos mapas sinópticos de campo superficial obtenidos del observa-

torio Wilcox², correspondientes al mínimo y al máximo del ciclo solar 21 (Figura 1.7 y 1.8). Las regiones gris claro corresponden a sectores con polaridad positiva y las regiones gris oscuro son los sectores negativos; la hoja neutra es la línea negra de la región blanca. La comparación entre las tres figuras muestra cómo cambia la configuración de la hoja neutra durante el mínimo y el máximo del ciclo solar.

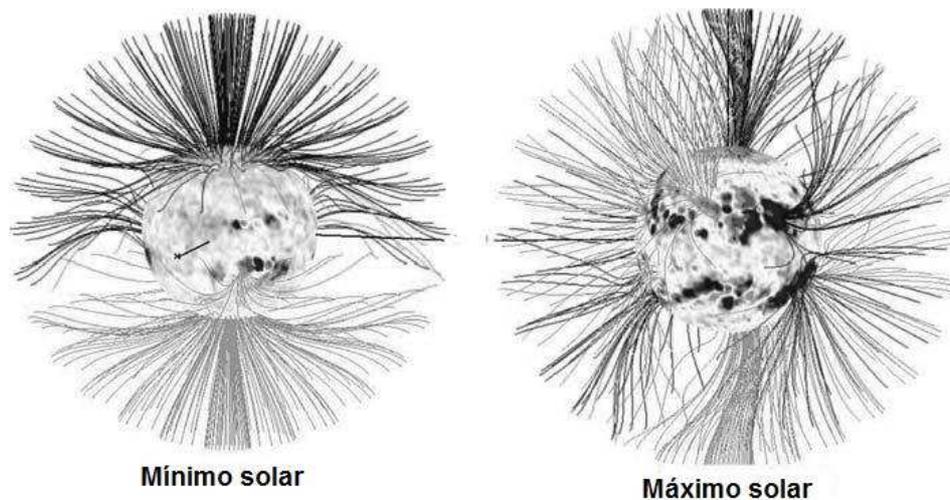


Figura 1.6: Modelo del campo magnético superficial durante el mínimo y el máximo del ciclo solar calculado en base al modelo de campo potencial. Las líneas grises tienen polaridad negativa (apuntan hacia el Sol) y las negras polaridad positiva (apuntan hacia afuera del Sol). Tomada de Meyer-Vernet, 2007.

1.2.3 Variación de las corrientes de viento solar con el ciclo solar

El ciclo magnético influye directamente sobre la dinámica del medio interplanetario. Como ya se mencionó, el tamaño y ubicación de los hoyos coronales y la configuración de la HCH cambian en las diferentes fases del ciclo solar (ver Tabla 1.2). Este cambio se ve reflejado en los patrones de las corrientes, y por consiguiente la evolución dinámica de los eventos es diferente en cada fase del ciclo (Balogh et al. (2008), Veselovsky et al. (2000) y González-Esparza y Smith (1996)).

²<http://wso.stanford.edu/synsourcel.html>

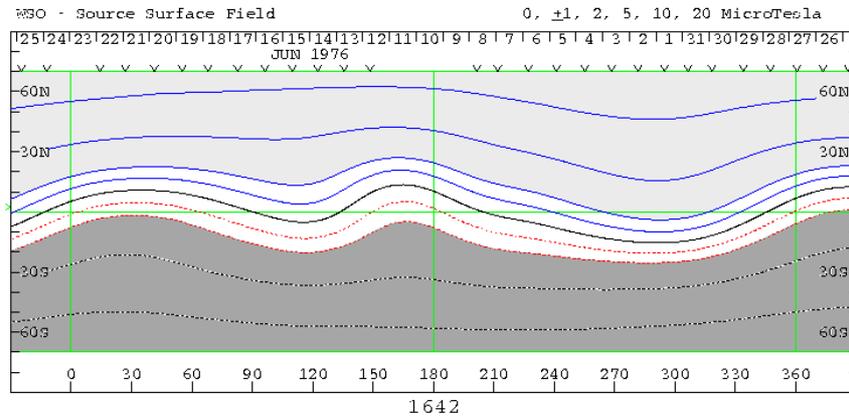


Figura 1.7: Mapa sinóptico de campo superficial correspondiente al mínimo del ciclo solar 21. La región gris clara con líneas de campo magnético azules corresponde a los sectores con polaridad positiva y la región gris oscuro son los sectores negativos. La hoja neutra es la línea negra en la región blanca. Tomado de: <http://wso.stanford.edu/synoptic/WSO-S.1642.gif>

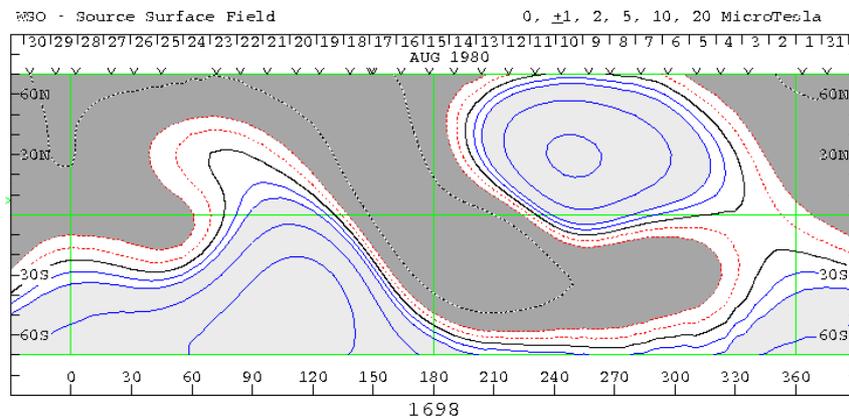


Figura 1.8: Mapa sinóptico de campo superficial correspondiente al máximo del ciclo solar 21. Mismo formato que la Figura 1.7. Tomado de: <http://wso.stanford.edu/synoptic/WSO-S.1698.gif>.

La Figura 1.9 muestra la variación de los patrones de velocidad de las corrientes de viento solar. Esta imagen fue construida con observaciones del radiotelescopio de centelleo interplanetario de Nagoya, Japón (STEL). El código de color simboliza una

escala de velocidades, el color azul corresponde a la velocidad más alta. En la Figura 1.9 se aprecia la configuración dipolar que prevalece durante el mínimo solar (disco central) y cómo va evolucionando conforme avanza el ciclo. Durante el mínimo se observan dos grandes fuentes de viento solar rápido en los polos que corresponden con los hoyos coronales polares, conforme avanza el ciclo estas fuentes de viento rápido se van haciendo más pequeñas hasta que desaparecen y aparecen hoyos coronales de menor tamaño a bajas latitudes. Esto corresponde a la fase ascendente y el máximo del ciclo solar, en donde se observan hoyos coronales más pequeños a bajas latitudes, y a consecuencia de esto, las corrientes de viento solar son más débiles y de poca duración.

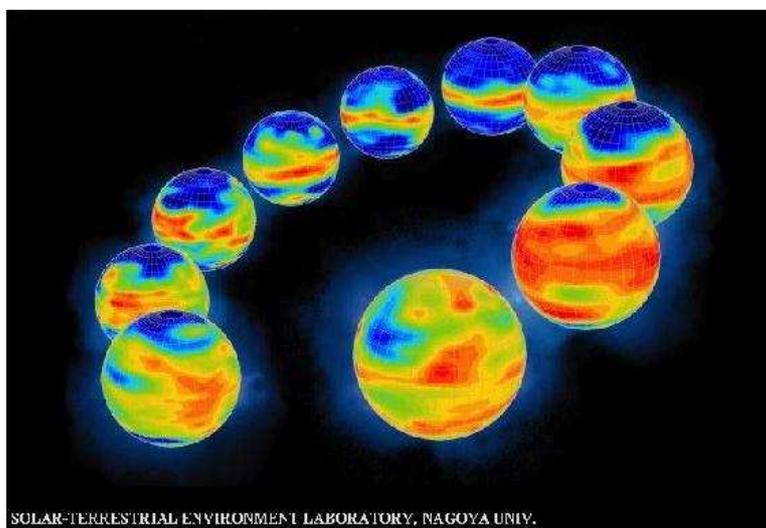


Figura 1.9: Variación de los patrones de velocidad del viento solar a través del ciclo solar. El código de color indica la velocidad de las corrientes, el azul corresponde a la velocidad más alta. Tomada de: http://stesun5.stelab.nagoya-u.ac.jp/jpg/solar_cycle_SW.jpg.

1.3 Estructuras de gran escala del Viento Solar

Dos tipos de flujos dominan la dinámica de gran escala en el medio interplanetario: los flujos corrotantes y los eventos transitorios. Los flujos corrotantes están asociados con las corrientes de viento solar rápido provenientes de los hoyos coronales y la rotación solar, y los transitorios se refieren a las eyecciones de masa coronal, en las que gran cantidad

de masa coronal es expulsada al medio interplanetario (Gosling (1996)). A continuación se hace una breve descripción de las estructuras que caracterizan la dinámica de gran escala del viento solar.

1.3.1 Ondas de Choque MHD

En general, las ondas de choque son perturbaciones compresivas que se forman cuando un objeto viaja a una velocidad supersónica con respecto al medio circundante. En terminos del número de Mach (M), que es el cociente entre la velocidad del objeto (u) y la velocidad del sonido (C_s), las ondas de choque se forman cuando $M > 1$.

En el medio interplanetario, las ondas de choque son discontinuidades que se forman cuando una corriente viento solar que sale despedida de la corona, viaja a una velocidad supermagnetosónica con respecto a la velocidad del viento solar ambiente.

1.3.1.1 Formación

Las ondas de sonido son perturbaciones que no cambian las propiedades físicas del fluido, la compresión que ejercen es adiabática, de tal forma que el fluido recobra su estado original una vez que pasa la perturbación. Su propagación depende únicamente de las propiedades físicas del fluido. Considerando al viento solar como un gas ideal, la velocidad del sonido es:

$$C_s^2 = \frac{\gamma k_B}{m_p} (T_p + T_e). \quad (1.3)$$

Esto significa que la velocidad de propagación de una onda de sonido en el caso ideal depende de la temperatura.

Cuando la perturbación es muy intensa, las propiedades físicas del fluido se ven afectadas. El frente de la perturbación comprime y calienta al fluido, por lo cual la parte trasera de la onda encuentra un medio más caliente en donde, de acuerdo con la ecuación 1.3 se propagará a una mayor velocidad. Si esta condición persiste, conforme la onda se mueva a través del fluido se empujará gradualmente hasta formar una onda de choque. A un tiempo t_1 se tiene el perfil característico de una onda compresiva; en un tiempo t_2 la parte trasera de la onda comienza a desplazarse más rápido como resultado del aumento de temperatura y la onda comienza a empujarse; posteriormente, a un tiempo

t_3 , la onda se ha empinado completamente y ha formado la discontinuidad (González-Esparza, 2000a).

1.3.1.2 Propiedades físicas

Cuando una onda de choque pasa a través del viento solar ambiente perturba el plasma, de tal forma que las características físicas del plasma antes (río arriba) y después (río abajo) del choque son diferentes. Esto quiere decir que la onda de choque es una perturbación que altera irreversiblemente las propiedades físicas del medio. Debido a que su espesor es muy pequeño comparado con la escala característica del medio se le considera una discontinuidad MHD.

Teóricamente, las propiedades físicas del fluido (velocidad, densidad, campo magnético y presión total) antes y después del choque cumplen las relaciones de salto o ecuaciones de Rankine-Hugoniot, que son las relaciones de conservación a partir de las cuales se describe el efecto que tiene esta perturbación sobre el medio. Estas ecuaciones son el punto de partida de la teoría MHD, y se derivan a partir de las ecuaciones generales de la conservación de la masa, la energía, el momento y la ecuación de inducción magnética (Burlaga, 1995).

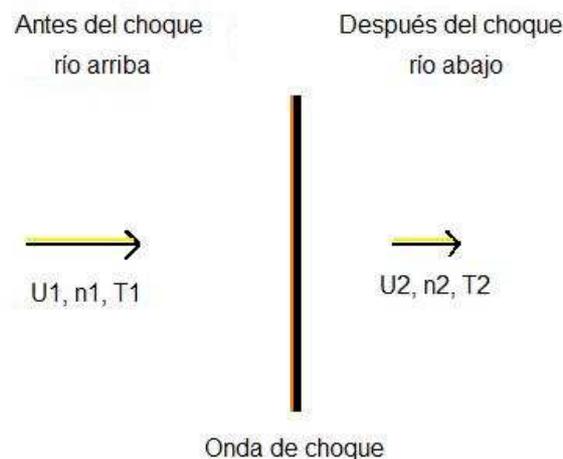


Figura 1.10: Esquema del sistema de referencia de la onda de choque. En este sistema el choque observa que el fluido se acerca y se aleja de él. U , n y T se refieren a la velocidad, la densidad y la temperatura del fluido antes de cruzar el choque (1) y después de cruzarlo (2).

Para un choque unidimensional, desde el sistema de referencia donde el choque está en reposo (Figura 1.10), las relaciones de conservación son:

$$[\rho u_n] = 0, \quad (1.4)$$

$$[\rho u_n^2 + P_{ter} + P_{mag}] = 0, \quad (1.5)$$

$$\rho u_n [\bar{u}_t] = B_n \frac{[\bar{B}_t]}{\mu_0}, \quad (1.6)$$

$$\left[\rho u_n \left(\frac{u^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P}{\rho} \right) + u_n P_{mag} - \bar{u} \cdot \bar{B} \frac{B_n}{\mu_0} \right], \quad (1.7)$$

los subíndices n y t se refieren a las componentes normal y tangencial con respecto a la superficie del choque. De las ecuaciones de Maxwell, se obtiene:

$$[B_n] = [\bar{E}_t] = 0, \quad (1.8)$$

$$[u_n \bar{B}_t] = B_n [\bar{u}_t]. \quad (1.9)$$

De la ecuación de continuidad (ecuación 1.4), tomando los parámetros a ambos lados de la discontinuidad como se indica en la Figura 1.10, se deriva:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{u_1}{u_2}. \quad (1.10)$$

El cociente de las densidades se conoce como el parámetro de compresión (η), que cuantifica que tanto se comprimió el plasma al pasar el choque. La ecuación 1.10 muestra que el parámetro de compresión es inverso al cociente de velocidades (u_2/u_1), es decir que entre mayor sea la compresión generada por el choque la velocidad del viento solar perturbado es menor, esto se esquematiza en la Figura 1.10, en donde las flechas están esquematizando la dirección y magnitud del flujo de viento solar a ambos lados de la discontinuidad. En el caso de los choques hidrodinámicos con números de Mach (choques intensos) grandes el parámetro de compresión tiene una cota. En términos del coeficiente adiabático ($\gamma \equiv \frac{C_p}{C_v}$) el parámetro de compresión se expresa como:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma + 1)}{(\gamma - 1)},$$

suponiendo que el gas es monoatómico ($\gamma = 5/3$) y $M \rightarrow \infty$, se obtiene que $\eta = 4$. Por lo tanto, para un choque hidrodinámico la máxima compresión que sufre el gas es 4.

Otro parámetro importante para la caracterización de la onda de choque es la intensidad del choque, definido a partir del cociente entre la presión total después (río abajo) y antes del choque (río arriba)

$$\varsigma = \frac{P_2}{P_1}. \quad (1.11)$$

Al resolver las ecuaciones de Rankine-Hugoniot se encuentran tres posibles soluciones que definen tres tipos de ondas (Burlaga, 1995, Cravens, 2004 y Parks, 2004):

- Onda de choque modo lento
- Onda intermedia (onda de Alfvén)
- Onda de choque modo rápido

La Figura 1.11 muestra las propiedades físicas de estos tres tipos de ondas. Las ondas de Alfvén son ondas transversales, por lo cual no producen compresión alguna sobre el medio y no generan una onda de choque. Las ondas de choque lentas disipan la energía magnética en forma de calor, de ahí que la intensidad del campo disminuya. Las ondas de choque rápidas se propagan perpendicularmente a las líneas de campo magnético, por lo tanto la compresión del plasma genera que la intensidad del campo magnético aumente.

Un parámetro importante para la descripción de las ondas de choque en el viento solar es el número de Mach magnetosónico, que es el cociente de la velocidad del fluido, en este caso el viento solar (u_{VS}), entre la velocidad de las ondas magnetosónicas (C_{ms}):

$$M_{ms} = \frac{u_{VS}}{C_{ms}}. \quad (1.12)$$

A la altura de la órbita de la Tierra la velocidad de las ondas magnetosónicas es $C_{ms} \approx 63$ km/s, suponiendo que $u_{VS} = 400$ km/s el número de Mach magnetosónico es aproximadamente 6.3 (González-Esparza, 2000).

Los choques pueden clasificarse de acuerdo a su ángulo de incidencia θ_{Bn} , que es aquél que se forma entre la normal al choque y el campo magnético interplanetario. En los choques paralelos $\theta_{Bn} = 0^\circ$, en los choques cuasi-paralelos $0^\circ < \theta_{Bn} < 45^\circ$, en los choques cuasi-perpendiculares $45^\circ < \theta_{Bn} < 90^\circ$ y en los choques perpendiculares $\theta_{Bn} = 90^\circ$.

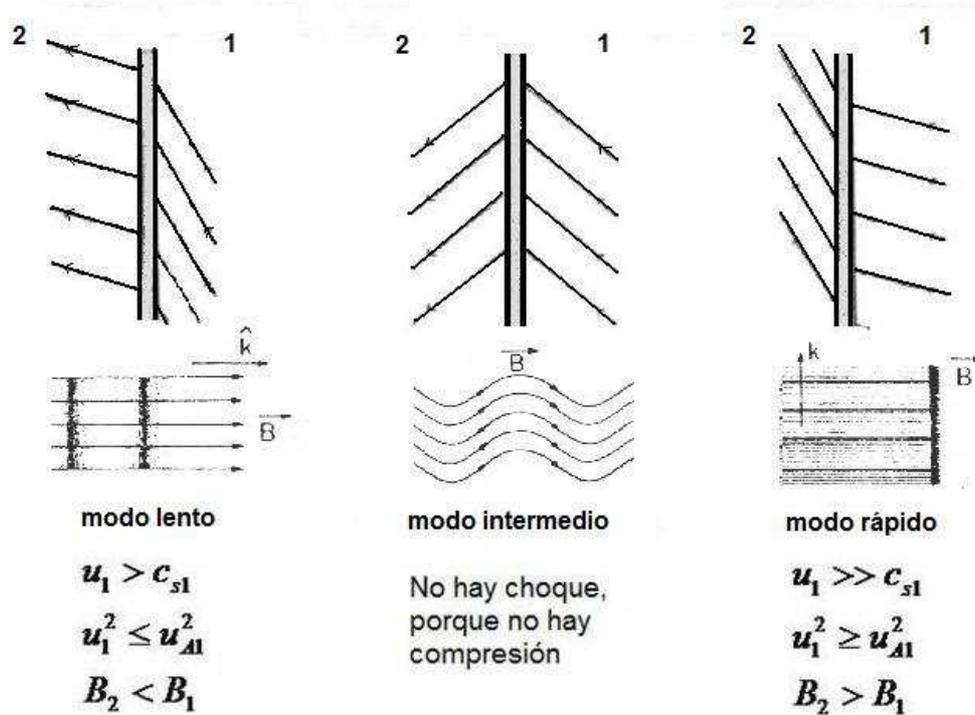


Figura 1.11: Características de las ondas de choque modo lento y rápido, y las ondas intermedias. Las primeras son ondas compresivas, llamadas magnetosónicas y las ondas intermedias son ondas transversales conocidas como ondas de Alfvén.

1.3.1.3 Observaciones

Las ondas de choque MHD se originan en diferentes lugares del medio interplanetario. Por ejemplo, la interacción del viento solar con la magnetosfera de los planetas genera una onda de choque conocida como “choque de proa”, éste es el ejemplo más representativo de una onda de choque de gran escala.

Se ha observado que los eventos transitorios en el Sol, como las eyecciones de masa coronal, generan ondas de choque denominados “choques transitorios”. Debido a su origen, este tipo de choques viaja radialmente y se ha estimado que su ancho longitudinal aproximado es de 100° (Aline et al. (2008)).

La rotación del Sol genera otro tipo de choques conocidos como choques corrotantes, los cuales se generan en zonas en donde dos corrientes de viento solar de diferente ve-

locidad interaccionan, en la siguiente sección se hablará con más detalle de las características de estas estructuras.

La frontera entre la heliosfera y el medio interplanetario también es una onda de choque, llamada “choque terminal”. Se forma por la interacción entre el viento solar y el viento interestelar.

En las mediciones *in situ*, este tipo de perturbaciones se identifican como un salto discontinuo de los parámetros físicos, tales como el campo magnético, la velocidad, la temperatura, la densidad y la presión total (la suma de la presión térmica y la presión magnética, ver apéndice A). La Figura 1.12 muestra una onda de choque registrada por la misión Voyager 1. Los paneles muestran las gráficas del campo magnético, la velocidad, las componentes de la velocidad, la densidad, la temperatura, la entropía y la presión total. Alrededor de las 18 horas de día 12 de noviembre cada panel muestra un salto discontinuo correspondiente con el paso de una onda de choque. Este evento corresponde a una RIC, que se describe en la siguiente sección.

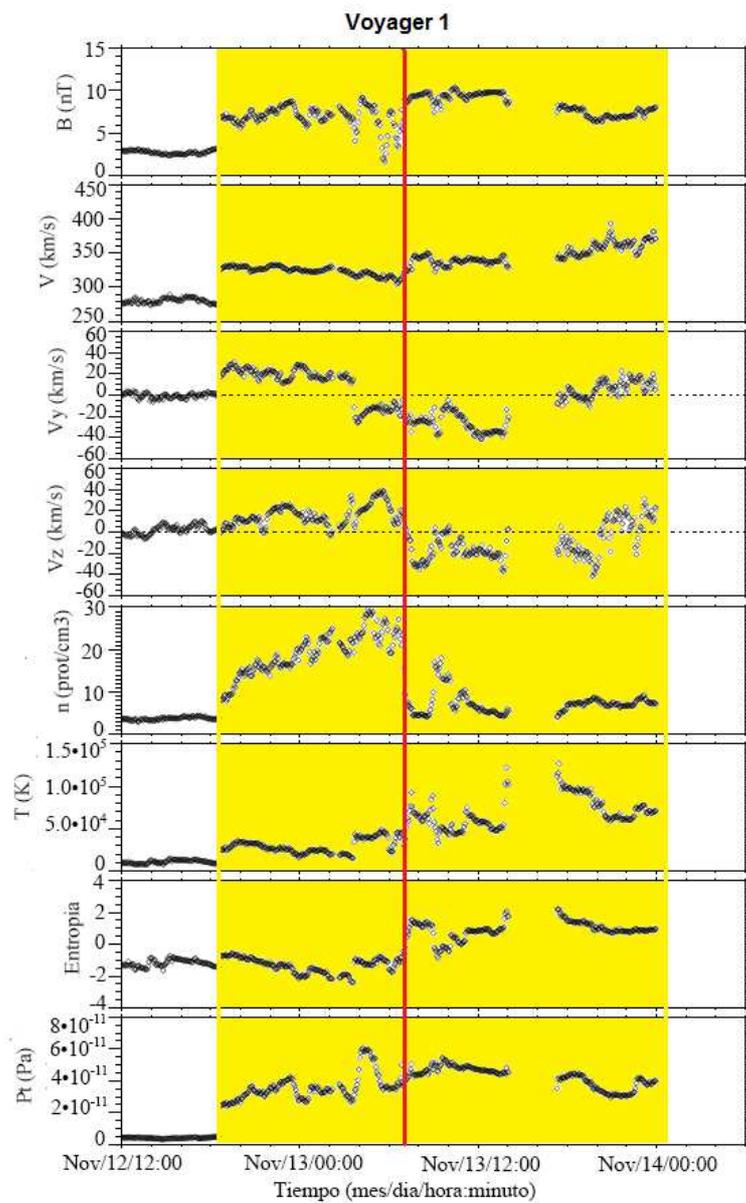


Figura 1.12: Registro *in situ* de una onda de choque asociada a una RIC. Los paneles de arriba hacia abajo corresponden al campo magnético, la velocidad, las componentes de la velocidad (V_y , V_z), la densidad, la temperatura, la entropía y la presión total. El rectángulo amarillo encierra la RIC y la línea roja marca el registro de la IC. Este evento corresponde a la RIC #1 que se discute más adelante en el Capítulo 4.

1.3.2 Regiones de Interacción de Corrientes

“...Una ligera diferencia en la temperatura coronal sobre hemisferios opuestos del Sol generará diferentes velocidades del viento solar en direcciones opuestas del Sol. Si tal condición se mantiene por más de media rotación solar, entonces habrá al menos una dirección en el espacio donde el viento solar más lento de 250 km/s es empujado ~ 14 días después por un viento más rápido, de 400 km/s...” esta idea fue expresada por Parker en su artículo de 1963 (Burlaga (1984)). En ella, expuso la esencia del proceso de formación de las Regiones de Interacción de Corrientes (RICs), que en un inicio se les llamó regiones corrotantes de interacción.

Las RICs son zonas de compresión en donde interactúan dos corrientes de viento solar de diferente velocidad. Siguiendo la idea de Parker, una corriente de viento solar lento es despedida de la corona, tiempo después el Sol rota, de tal forma que de esa misma dirección sale una corriente de viento rápido que en su trayecto por el medio interplanetario interactúa con la corriente lenta. Si la corriente rápida es lo suficientemente estable, se forma una región de compresión (Forsyth y Marsh (1999), Balogh et al. (1999), Heber et al. (1999)). De acuerdo con las propiedades MHD de los plasmas, cuando interactúan las dos corrientes de viento solar surge entre ellas una discontinuidad denominada “interfase de corriente” (IC), la cual es una discontinuidad tangencial en donde no hay flujos transversales (ver apéndice B). La Figura 1.13 muestra la formación de una RIC en dos dimensiones vista desde el polo Norte solar. En este esquema se observan corrientes de viento lento y rápido emergiendo de la superficie solar. En el medio interplanetario la corriente de viento rápido alcanza a la corriente de viento lento y se forma una región de compresión resaltada en color gris. La intensa compresión del plasma forma dos ondas de presión que se propagan en direcciones opuestas (flechas blancas) y genera que la RIC se expanda conforme avanzan en el medio interplanetario.

Desde un punto de vista tridimensional, la formación de las RICs son el resultado de: 1) la rotación solar; 2) la variabilidad espacial de las corrientes de viento solar, ligada con la configuración del campo magnético; y 3) la inclinación del eje magnético (Gosling (1996), Gosling y Pizzo (1999) y Riley (2007)). El esquema de la Figura 1.14 combina estas tres propiedades. Desde la perspectiva de esta figura, de un punto fijo sobre el borde superior derecho de la banda de viento lento está saliendo una corriente lenta. Posteriormente, cuando el Sol rota de ese mismo punto va a emanar una corriente de viento rápido. Una vez en el medio interplanetario, la corriente rápida alcanzará a la lenta formando la RIC.

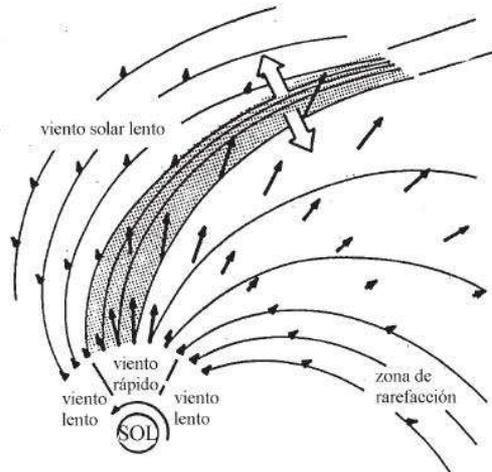


Figura 1.13: Geometría bidimensional de la formación de una RIC vista desde el polo Norte del Sol. La zona gris corresponde a la región de compresión, la parte central es una discontinuidad tangencial que separa las dos corrientes de viento solar conocida como interface de corriente. (adaptada de Pizzo (1978))

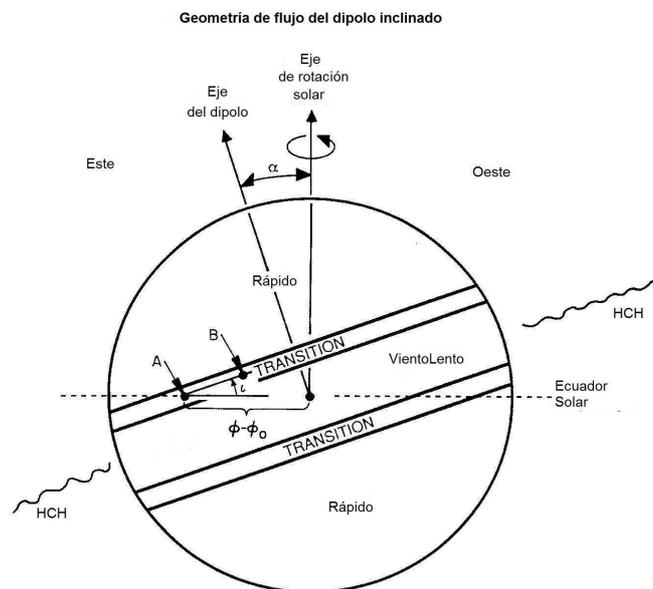


Figura 1.14: Esquema de las corrientes de viento solar en una configuración dipolar. El dipolo magnético está inclinado un ángulo α con respecto al eje de rotación (adaptada de Gosling (1996)).

1.3.2.1 Evolución heliocéntrica

En general, más allá de 1 UA, las ondas de presión de la RIC se empujan formando dos ondas de choque en los bordes. Desde el sistema de referencia de la IC, se observa que un choque se propaga hacia adelante, en dirección del flujo de viento solar (choque frontal), y otro en dirección opuesta, hacia el Sol (choque reverso).

En un inicio se pensaba que las RICs viajaban orientadas perpendicularmente al plano de la eclíptica; sin embargo, las observaciones de Ulysses en el hemisferio Sur, mostraron que las RICs están inclinadas en la dirección Norte-Sur. De tal forma que, conforme se incrementa la distancia heliocéntrica, los choques frontales tienden a propagarse hacia y a través del Ecuador solar, mientras que los choques reversos se propagan hacia los polos (Riley et al. (1996), González-Esparza (1999)). Este hecho ya había sido propuesto por Gosling, en su modelo tridimensional de las RICs (Gosling (1996), Gosling y Pizzo (1999)).

La inclinación de las RICs está relacionada con la inclinación del dipolo magnético. La Figura 1.15 es un esquema del modelo tridimensional de la inclinación de las RICs propuesto por Gosling (1996). Como se puede observar, las RICs (zonas grises) exhiben una inclinación opuesta en ambos hemisferios, que coincide con la inclinación de la HCH. La banda de viento solar lento está inclinada debido a la inclinación del dipolo magnético (ver Figura 1.14). Como la HCH está embebida en esta banda, ambas tienen la misma inclinación. De esta forma, el modelo muestra que las ondas de choque frontales se propagan hacia el Oeste y hacia el Ecuador, y los choques reversos hacia el Este y hacia los polos, conforme se incrementa la distancia heliocéntrica.

Para entender la evolución tridimensional de las RICs es necesario estudiar la geometría de la interacción sobre la IC. La Figura 1.16 muestra la estructura básica de la interacción de las corrientes en la IC. La IC es una región en donde hay fuertes flujos de cizalla por la deflexión que sufren las corrientes al no poder atravesar. De manera que para la configuración de la IC de esta figura, el plasma de la corriente rápida es empujado hacia el Este y hacia el Norte, mientras que el plasma de la corriente lenta es empujado hacia el Oeste y hacia el Sur. La dirección de la deflexión tiene que ver con los gradientes de presión en la compresión entre las corrientes y con el ángulo de inclinación del eje magnético.

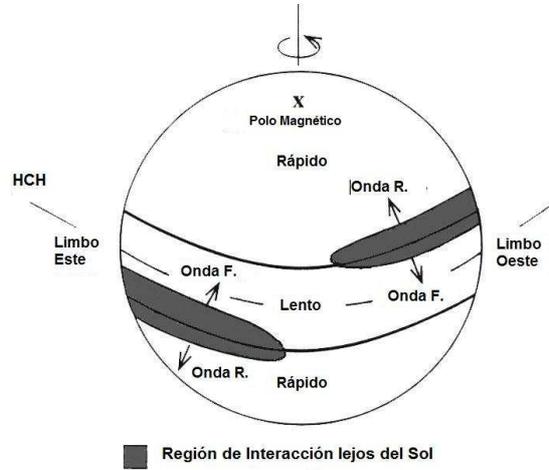


Figura 1.15: Esquema de la Inclinación de las Regiones de Interacción de Corrientes en el medio interplanetario en una configuración magnética dipolar. La zonas grises corresponde a la proyección de las RICs en los dos hemisferios. Se observa que los choques frontales se propagan hacia el Oeste y hacia el Ecuador, mientras que los choques reversos se propagan hacia el Este y hacia los Polos. La orientación de las RICs es opuesta en ambos hemisferios (tomada de Gosling y Pizzo (1999)).

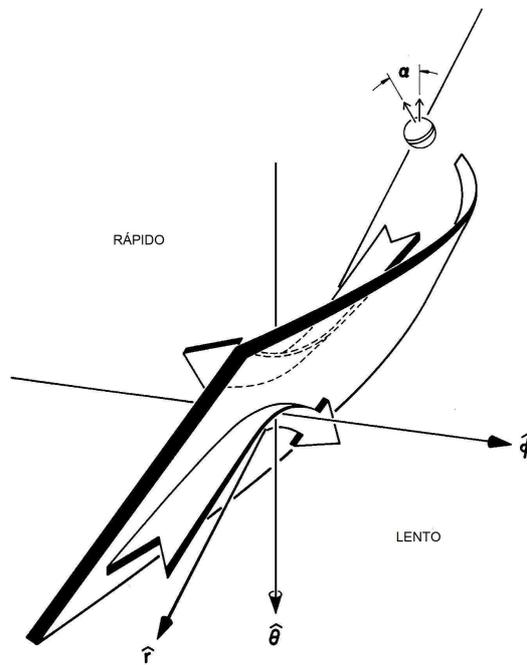


Figura 1.16: Esquema de la interacción entre las dos corrientes de viento solar vista desde el sistema de referencia de la IC (tomado de Gosling y Pizzo (1999)).

1.3.2.2 Observaciones *in situ*

En 1976 se reportaron las primeras observaciones *in situ* de las RICs, con los datos de plasma y campo magnético de las naves Pionero 10 y 11 (Smith y Wolfe (1976)). En las observaciones *in situ*, las RICs se identifican principalmente por su IC. Entre las firmas más comunes se encuentran:

- Incremento de la velocidad.
- Incremento y caída anormal de la densidad.
- Elevación de la temperatura.
- Un pico en la intensidad del campo magnético y la presión total.
- Aumento de la entropía.
- Firmas de un choque frontal y reverso.

Estas firmas son descritas con más detalle en el Capítulo 3 (ver Tablas 3.1 y 3.2). La Figura 1.12 muestra un ejemplo de una RIC registrada por Voyager 1. La gráfica tiene un periodo temporal de un día y 18 horas. En las primeras 6 horas se observa la corriente lenta asociada a la interacción, la cual llevaba una velocidad aproximada de 280 km/s. El día 12 de noviembre a las 18:15 horas se observa la firma de la onda de choque frontal (hay un salto discontinuo en campo magnético, velocidad, temperatura y densidad). Aproximadamente 15 horas después se identifica el cruce de la IC (línea roja), la densidad cae y la temperatura se eleva (salto antifase) debido a que la corriente rápida que viene detrás de la IC es menos densa y más caliente, se observa un aumento de la entropía porque la corriente rápida tiene mayor temperatura, y como la IC es la región de mayor compresión se observa que la presión total aumenta. El evento no presenta firma de choque reverso, por lo cual no está bien determinado su final. Este evento se discute con más detalle en el Capítulo 4.

1.3.3 Eyecciones de Masa Coronal

El Sol pierde constantemente masa a través de la emisión de viento solar y en las eyecciones de plasma de gran escala, conocidas como eyecciones de masa coronal (EMCs).

Las EMCs son eventos explosivos en los que una gran cantidad de masa coronal (10^{14} a 10^{16} g) es expulsada al medio interplanetario (Vourlidas et al. (2002), Gopalswamy (2004)). De acuerdo con las observaciones estas EMCs se originan en regiones de configuración magnética cerrada (regiones activas). El ciclo de vida de una EMC engloba una gran cantidad de procesos físicos como la reconexión magnética³ y la aceleración de partículas, en los cuales el campo magnético juega un papel predominante (Gosling (2000), Gopalswamy (2004)).

Las primeras observaciones del disco solar asociaron a las EMCs directamente con la ocurrencia de ráfagas solares. Pero en general, hay una amplia discusión en torno a este tema como lo plasma el artículo de Gosling (1993), en donde el autor con base en una serie de hechos físicos propone que las ráfagas solares no son el punto de partida para la generación de EMCs. En la actualidad, se ha acordado que la ocurrencia de ráfagas indica el estado de actividad solar, y por lo general sólo las más intensas están relacionadas con EMCs.

1.3.3.1 Observaciones

Las EMCs se observan en luz blanca mediante los coronógrafos situados en Tierra y en naves espaciales. Misiones espaciales tales como el Skylab (1973-1974, 1979-1985), Solar Maximum Mision (1984-1989) llevaron a bordo coronógrafos que permitieron una mayor resolución de observación para el estudio de las EMCs. Sus observaciones han mostrado algunas de las propiedades físicas y morfológicas de estas estructuras, aunque aún se desconoce cuál es el mecanismo que las origina. Muchos modelos recientes han propuesto que su origen tiene que ver con procesos de reconexión magnética (Forbes (2000), Lin et al. (2004), Gopalswamy et al. (2006), Hudson et al. (2006)).

Actualmente, hay tres misiones monitoreando el Sol: SOHO, STEREO y SDO. SOHO tiene un sistema de coronógrafos conocido como LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph). STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory) es una misión que emplea dos naves idénticas para proporcionar imágenes tridimensionales del Sol y

³Proceso en el cual las líneas de campo magnético de distinta polaridad se reconectan, liberando gran cantidad de energía electromagnética y dinámica (aceleración de partículas).

estudiar el origen de las EMCs. Con este constante monitoreo se espera conocer a fondo la naturaleza de estos eventos. SDO (Solar Dynamic Observatory) es la nave espacial más actual, lanzada con el objetivo de estudiar los procesos físicos detrás de la dinámica solar, mediante mediciones del interior del Sol, el campo magnético, el plasma coronal, etc.

En las proyecciones bidimensionales de los coronógrafos las EMCs tienen la forma de un “cuernito” o semi-cavidad. Cuando viajan a través del medio interplanetario se les denomina eyecciones de masa coronal interplanetarias (EMCIs). La Figura 1.17 muestra el esquema de una EMCi rápida que impulsa una onda de choque. Dentro de la eyección (eyecta) hay una estructura de campo magnético intenso conocida como “cuerda de flujo” (flux rope). Como se observa en este esquema (Figura 1.17), se cree que la eyecta permanece anclada al Sol mediante su campo magnético, aunque no es un hecho comprobado. Esta característica particular puede estar asociada con los flujos bidireccionales de electrones que se observan en las mediciones *in situ*.

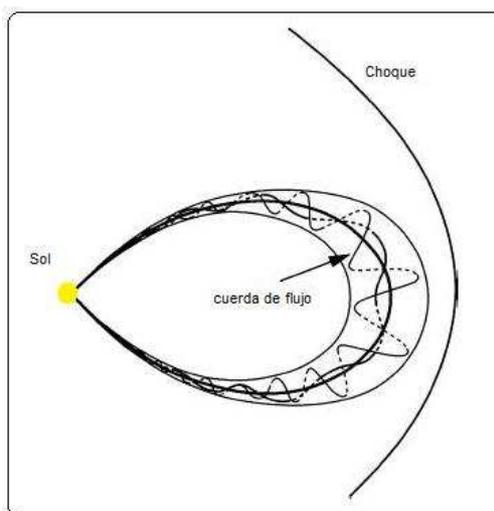


Figura 1.17: Estructura de una eyección de masa coronal interplanetaria (adaptada de Jian et al. (2006b)).

En las mediciones *in situ*, las firmas más comunes que denotan el paso de una EMCi son:

- Alta concentración de partículas alfa.

- Temperatura de protones baja.
- Bajas densidades.
- Aumento en la intensidad del campo magnético con respecto al del viento solar ambiente.
- Rotaciones de \mathbf{B} relativamente suaves.
- Beta del plasma baja ($\beta < 1$).
- Velocidad declinante.
- Incremento en la presión total del plasma.
- Flujos bidireccionales de electrones.

Es importante enfatizar el hecho de que en las EMCIIs no se registran simultáneamente todas estas firmas, por lo cual no hay un criterio de identificación establecido (Russell y Shinde (2005), Jian et al. (2006b), Zurbuchen y Richardson (2006), Wimmer-Schweingruber et al. (2006)). Cuando las componentes del campo magnético presentan rotaciones (cruce de la cuerda de flujo) el evento se asocia con un tipo particular de eyección denominada “nube magnética”. La Figura 1.18 muestra el registro *in situ* de una EMCI detectada por Helios 1. Los paneles corresponden a las gráficas de los cosenos directores del campo magnético (B_x/B , B_y/B , B_z/B), el campo magnético, la velocidad, la densidad, la temperatura, la razón entre la temperatura de protones y la temperatura esperada (ver sección 3.1.3 del Capítulo 3), la β del plasma y la presión total. La línea naranja está señalando 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, por lo cual la temperatura, la densidad y el campo magnético son más intensos y fluctúan. El paso de la funda dura alrededor de 3 horas. El paso de la eyección (rectángulo azul) se identifica como una caída de la temperatura y densidad a consecuencia de la expansión que sufre la EMCI, el campo magnético es intenso y la β del plasma es menor a 1 (domina la presión magnética), y la velocidad decrece conforme la nave atraviesa la eyección (desde su marco de referencia, la nave observa que la parte trasera de la eyección se aleja de ella a consecuencia de la expansión, por lo que resta velocidades y causa este efecto de decrecimiento). Las rotaciones de los cosenos directores del campo sugieren que esta eyección es una nube magnética. Este evento se analiza en detalle en el Capítulo 4.

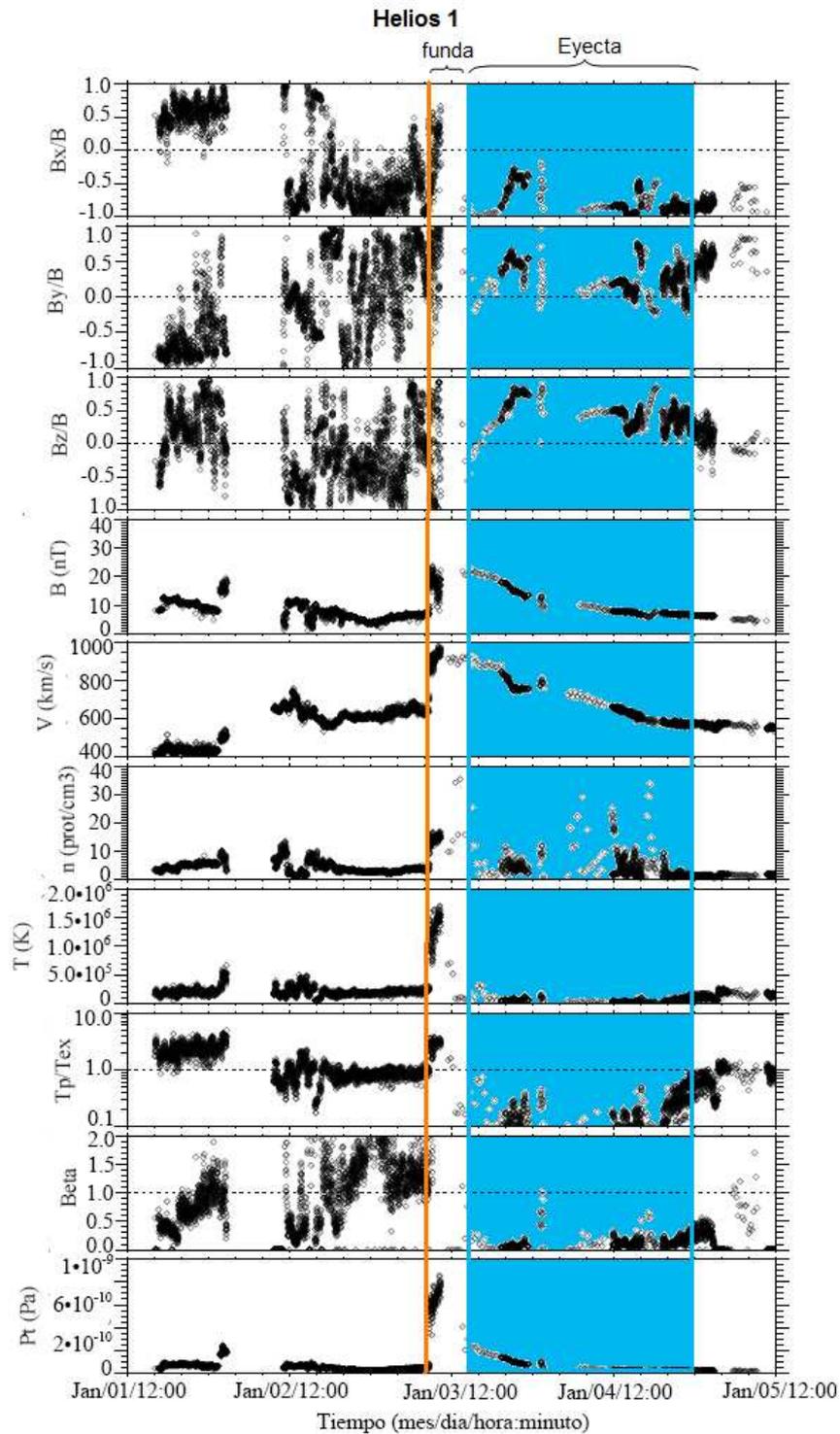


Figura 1.18: Eyección de masa coronal interplanetaria registrada por Helios 1. Los paneles de arriba a abajo corresponde a los cosenos directores del campo magnético (B_x/B , B_y/B y B_z/B), la magnitud del campo magnético, la velocidad, la densidad, la temperatura, la razón entre la temperatura de protones y la temperatura esperada (ver Capítulo 3, sección 3.1.3), la β del plasma y la presión total. La línea naranja marca el inicio del evento y el rectángulo azul encierra el paso de la eyecta. Este evento corresponde a la EMCI #5 que se discutirá en el Capítulo 4.

Capítulo 2

Las Misiones Espaciales

Durante la década de los 70 una serie de naves espaciales fueron lanzadas con el objetivo de estudiar diferentes aspectos de la heliósfera, de éstas, la más conocida fue la misión Voyager, con dos naves espaciales que obtuvieron detalladas fotografías de los planetas exteriores. Otra misión muy importante fue Helios, la cual consistió de dos sondas (Helios 1 y 2) que estaban dedicadas a la medición del flujo de viento solar en la heliósfera interna (0.3 a 1 UA). IMP 8 (Interplanetary Monitoring Plataform) fue otra misión importante, estuvo en funcionamiento por más de 30 años mandando, día con día, datos de las mediciones *in situ* del viento solar a la altura de la órbita de la Tierra, además de la cola magnética terrestre.

El lanzamiento de Voyager 1 y 2 en 1977 coincidió con la travesía de Helios 1 y 2 e IMP 8. De esta forma, por primera y única vez se conjuntó un ensamble de cinco naves que obtuvieron mediciones simultáneas de eventos de gran escala. El viento solar se midió por primera vez desde cinco posiciones distintas relativamente cercanas, permitiendo analizar la estructura de los eventos de gran escala durante la fase ascendente del ciclo solar 21.

Actualmente, la misión STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory) emplea dos naves espaciales para observar los eventos solares. Su objetivo es estudiar el origen y evolución de las EMC a través de imágenes estereoscópicas. Con el lanzamiento de la misión STEREO se ha reafirmado la importancia de realizar observaciones multi naves para estudiar la naturaleza y dinámica de los eventos solares.

2.1 Trayectoria de las naves

El periodo de estudio contemplado en esta tesis abarca de noviembre de 1977 a febrero de 1978, durante la fase ascendente del ciclo solar 21. Este intervalo de estudio fue el mejor, ya que las cinco naves tenían una separación angular menor a 60° y las Voyagers no se encontraban muy lejos de la Tierra. La Figura 2.1 muestra la trayectoria que siguieron las 5 naves durante el periodo de estudio. Las trayectorias se graficaron en el sistema de referencia de la línea Sol-Tierra, en donde el IMP 8 mantiene la misma posición al frente de la Tierra.

En un estudio multi-naves, al comparar el registro de un evento (RIC o EMCI) se observa que las firmas son distintas en cada una de las naves, lo cual se asocia directamente con la posición que sostenían durante el registro, es decir, el lugar por donde atravesaron el evento. Físicamente, las naves están observando diferentes puntos de la estructura del evento. Por lo tanto, al conjuntar las múltiples observaciones es posible describir aspectos acerca de su propagación, características físicas generales y evolución heliocéntrica (cómo se desarrolla). De aquí se deriva el interés y la importancia de hacer estudios multi-naves. Sin embargo, con las mediciones *in situ* no es posible determinar la forma y el tamaño del evento, ya que se necesitarían muchas naves. Para ello, se recurre a otras técnicas que complementen las observaciones *in situ*, tales como las observaciones de coronógrafos y el Centelleo Interplanetario (Hewish et al. (1964), Manoharan (2002)).

Mediante el análisis de los datos de este ensamble de naves se pretende estudiar la evolución heliocéntrica de las RICs y las EMCI. Las Helios monitoreando la heliósfera interna, el IMP monitoreando los eventos a 1 UA y las Voyagers más allá de la órbita de la Tierra mostrarán el desarrollo de los eventos desde su fase inicial (de 0.4 a 2.5 UA).

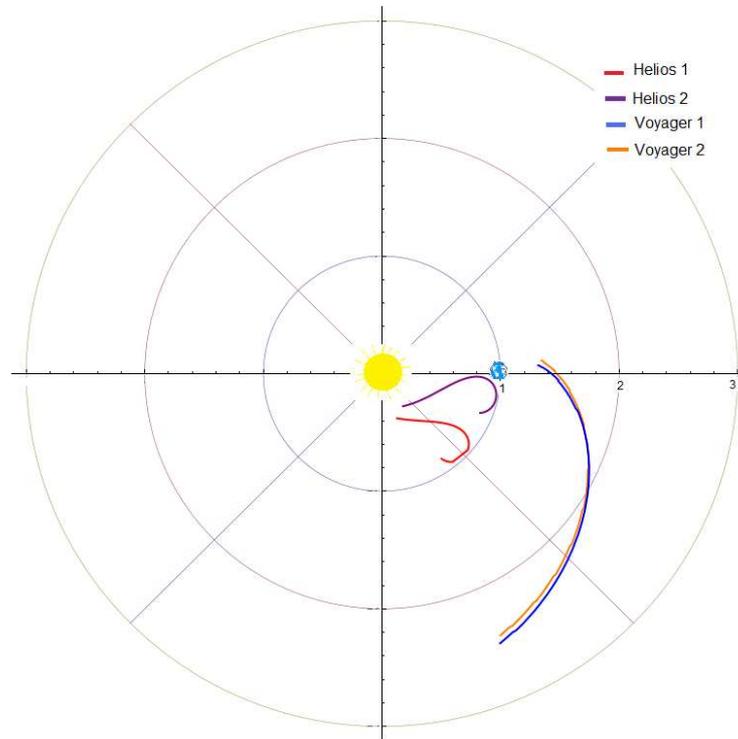


Figura 2.1: Trayectorias de las naves Helios 1 y 2, Voyager 1 y 2, en el marco de referencia de la línea Sol-Tierra durante el periodo de noviembre de 1977 a febrero de 1978. En este marco, IMP 8 siempre está al frente de la Tierra. Cada trayectoria es representada con un color diferente.

2.2 Fase ascendente del ciclo solar 21

Como se ha discutido en el Capítulo 1, la configuración magnética del Sol influye directamente en la dinámica que siguen las corrientes de viento solar. Durante la fase ascendente del ciclo solar los hoyos coronales se encuentran migrando hacia latitudes medias, y aunque estos son de menor dimensión, el cambio en la configuración magnética genera una dinámica interplanetaria más compleja.

En la Figura 2.2 se muestra el diagrama del ciclo de manchas solares 20, 21 y 22. La franja gris resalta el periodo de estudio contemplado en la tesis. De acuerdo con el número de manchas, comparado con el ciclo solar 20, la fase ascendente del ciclo solar 21 fue mucho más activa, caracterizándose por una pendiente más pronunciada hacia el máximo (Gaizauskas et al.(1983)).

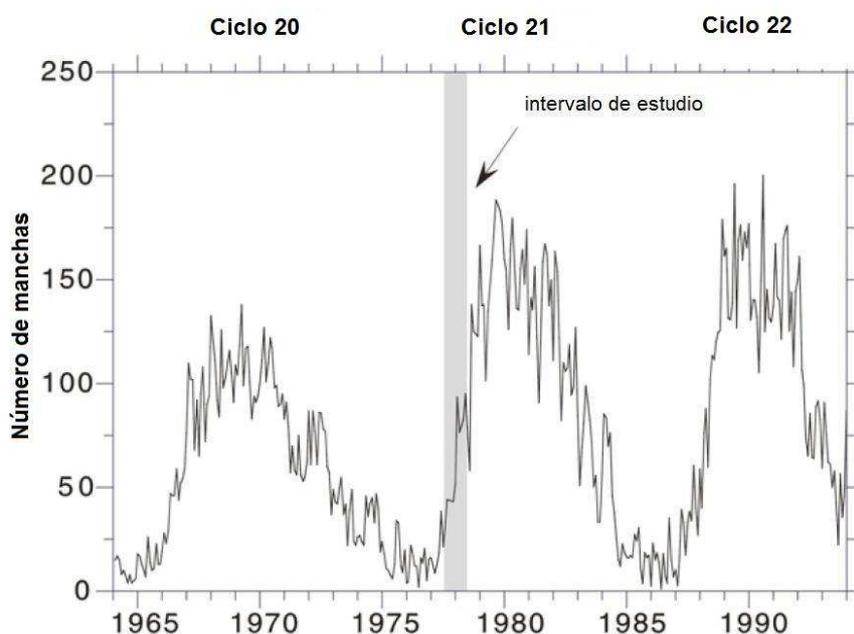


Figura 2.2: Ciclo de manchas solares 20, 21 y 22. La franja gris resalta el periodo de estudio.

2.3 Descripción de las misiones espaciales

2.3.1 Helios 1 y 2

La misión Helios estuvo conformada por dos naves gemelas enviadas al espacio con el propósito de hacer mediciones *in situ* del viento solar en una región cercana a la Tierra (0.3 a 1 U.A). Las naves fueron desarrolladas por la República Federal de Alemania en colaboración con la NASA y lanzadas en órbitas heliocéntricas con el propósito de hacer las primeras mediciones del viento solar en la heliosfera interna¹.

Helios 1 fue lanzada el 10 de diciembre de 1974. El lanzamiento de Helios 2 fue un año más tarde, el 15 de enero de 1976. Ambas naves fueron equipadas con dos antenas y un dipolo eléctrico de 32 m. Los experimentos abordo y sus respectivos investigadores principales (IP) son listados en la Tabla C.2 del apéndice C.

¹Información sobre Helios 1: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?=&1974-097A>; información sobre Helios 2: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?=&1976-003A>

Este conjunto de naves generó importantes mediciones para estudiar las relaciones Sol-Tierra. Sus datos siguen contribuyendo en estudios actuales, como esta tesis.

2.3.1.1 Experimento de Plasma

El experimento de plasma estuvo a cargo del Dr. Helmut R. Rosenbauer del Instituto Max-Planck de Física y Astrofísica. Consistió de cuatro analizadores de plasma, 3 de ellos estaban dedicados a investigar los protones con valores de energía entre 0.155 y 15.32 kV y el otro para electrones (en el rango de energía de 0.5 los 1660 eV) con una resolución angular unidimensional. Cada uno medía la velocidad, la densidad y la temperatura de las partículas. Ajustando la función de distribución de velocidad de los diferentes tipos de partículas, todos los parámetros hidrodinámicos importantes del plasma del viento solar pueden ser derivados. La resolución temporal de estos instrumentos normalmente fue de 1 minuto, pero contaban con una alarma especial que se activaba ante la detección de un choque para tomar mediciones de alta resolución antes y después del evento.

2.3.1.2 Experimento de campo magnético

Las Helios llevaban a bordo dos experimentos para mediciones de campo magnético: uno para campos promediados y otro para fluctuaciones del campo. El primero estaba a cargo del Dr. Norman F. Ness del NASA Goddard Space Flight Center, el cual constaba de un magnetómetro fluxgate triaxial que medía la intensidad y dirección del campo magnético a baja frecuencia (16 Hz). El segundo experimento estuvo a cargo del Prof. Fritz M. Neubauer y consistía también de un magnetómetro fluxgate triaxial que realizaba mediciones con una frecuencia de 4 Hz. Como en el caso del instrumento de plasma, bajo la identificación de un choque se activaba el almacenamiento rápido de datos en la memoria de la nave. Este experimento empleó dos intervalos de medición: ± 100 nT y ± 400 nT con resoluciones de 0.2 nT y 0.8 nT, respectivamente.

Los datos de plasma y campo magnético obtenidos por este conjunto de naves se han conjuntado en archivos de datos combinados (archivos de datos promediados) que vienen en dos formatos, los archivos de baja resolución (1 hora) y los archivos de alta resolución (40 segundos). En esta tesis se utilizaron los archivos de alta resolución.

2.3.2 IMP 8

El IMP 8 fue lanzado por la NASA el 26 de octubre de 1973. Su objetivo fue monitorear el campo magnético y las partículas cargadas de alta energía en la región circundante a la Tierra (viento solar, cola y la funda magnética). Su órbita variaba de los $45 R_E$ en el apoapsis y $22 R_E$ en el periapsis, y su inclinación fue de 0 a 55° .

Su órbita tenía un periodo de aproximadamente 12.5 días, de los cuales 7 u 8 días los invertía en el monitoreo del viento solar y el resto en la funda y la cola magnética. Los días que la nave pasaba en la cola magnética son gaps en los datos de plasma y campo magnético del viento solar, por esta razón varios de los eventos no están completos. Esta nave llevaba a bordo 11 experimentos que se describen en la Tabla C.3 del apéndice C. La razón de adquisición de datos fue de 1.6 Kbps².

2.3.2.1 Experimento de plasma

Dos experimentos se encargaron de hacer las mediciones del plasma: el analizador electrostático de plasma solar y el Faraday Cup de plasma solar. El primero estaba a cargo del Dr. John T. Gosling, constaba de un analizador electrostático hemisférico que medía la intensidad y dirección de los iones positivos y electrones del viento solar, la magnetofunda y la cola magnética. En el viento solar se analizaron los iones positivos de 200 eV a 5 keV y los electrones de 5 eV a 1 keV. El segundo experimento estuvo a cargo del Dr. Alan Lazarus, empleaba un colector Faraday Cup para estudiar la dirección y la intensidad de los iones positivos y electrones en el viento solar, la región de transición y la cola magnética. La resolución temporal de los datos de plasma fue de 2 minutos.

2.3.2.2 Experimento de campo magnético

El experimento de campo magnético estuvo a cargo del Dr. Ronald P. Lepping del NASA Goddard Space Flight Center. Constaba de un magnetómetro triaxial encargado de medir el campo magnético interplanetario cuando se encontraba de frente al Sol y el de la cola geomagnética cuando se encontraba detrás de la Tierra. Tenía un rango dinámico de ± 12 , ± 36 y ± 108 nT. El experimento operó de manera normal hasta el 11 de Julio de 1975, ya que tuvo un problema con el indicador del rango que fijó la

²Información sobre IMP 8: <http://spdf.gsfc.nasa.gov/imp8/project.html>

medición del magnetómetro en 36 nT. La máxima resolución temporal de los datos de campo magnético fue 15 segundos. Para los fines de la tesis, empleamos los archivos de datos combinados (plasma y campo magnético) con resolución de 1 minuto.

2.3.3 Voyager 1 y 2

La misión Voyager, consistió de dos naves construidas con las mismas características previendo la posibilidad de que alguna fallara durante el viaje. Fueron lanzadas en 1977 aprovechando una alineación planetaria poco común que habría de proporcionarles el impulso gravitacional. Su objetivo principal fue explorar Júpiter y Saturno, pero fueron capaces de llegar a Urano, Neptuno y más, por ello su objetivo final fue tratar de determinar la geometría y la frontera de la heliósfera.

La Voyager 2 fue lanzada el 20 de agosto de 1977, unas semanas antes que la Voyager 1 que fue lanzada el 5 de septiembre. Sin embargo, debido a la diferencia de las órbitas calculadas, Voyager 1 fue la primera en llegar a Júpiter en el año de 1979, seguida por la Voyager 2. En la Tabla C.1 del apéndice C se listan los experimentos que llevaban a bordo, los investigadores principales (IP) y sus respectivos objetivos³.

Las observaciones de las Voyagers, han contribuido al estudio de la heliósfera y han mostrado a través de sus fotografías una visión detallada de nuestro sistema solar. Entre sus contribuciones más recientes están el ser las primeras naves que cruzan y toman mediciones del choque terminal de la heliósfera (Richardson y Stone (2008)).

2.3.3.1 Experimento de Plasma

El experimento de plasma estuvo a cargo del Dr. John D. Richardson del Instituto de Tecnología de Massachusetts. El objetivo de este experimento fue medir las propiedades y la evolución radial del viento solar (iones de 10 eV - 6keV, electrones de 4 eV - 6 keV). Las mediciones de plasma se hicieron mediante dos detectores Faraday Cup, uno apuntaba hacia la Tierra y el otro en ángulos perpendiculares. La máxima resolución temporal de los datos de plasma fue de 12 segundos.

³Información sobre Voyager 1: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/mmc/spacecraftDisplay.do?id=1977-076A>; información sobre Voyager 2: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/mmc/spacecraftDisplay.do?id=1977-084A>

2.3.3.2 Experimento de Campo Magnético

El experimento de campo magnético estuvo a cargo del Dr. Norman F. Ness del NASA Goddard Space Flight Center. Constaba de dos magnetómetros fluxgate triaxiales con el propósito de investigar el campo magnético de Júpiter y Saturno, y la interacción del viento solar con sus magnetosferas. Su rango de medición era de 0.001 nT a 0.002 T. La máxima resolución temporal de los archivos de datos fue de 48 segundos.

Las comunicaciones fueron establecidas a través de una antena de alta ganancia (HGA) y una antena de baja ganancia (LGA) casi isotrópica, esta última sólo se utilizaba cuando la primera se desajustaba, ya que es muy directiva. La LGA estaba montada sobre el subreflector de la HGA, que es de tipo Cassegrain. El reflector principal de la HGA tiene 3.7 metros de diámetro y soporta las bandas X y S. El enlace en la banda X, a 8.4 GHz, fue usado para bajar los datos especializados a una velocidad máxima de 7.2 kbps, y el enlace en la banda S, a 2.3 GHz, se usó para bajar los datos de monitoreo y control a una velocidad de 40 bps.

Es importante tomar en cuenta que una vez afuera de la atmósfera terrestre, las naves están expuestas a condiciones adversas que muchas veces provocan que el registro de datos presente gaps, lo cual recae directamente sobre el análisis de los eventos, dificultando su interpretación.

Capítulo 3

Metodología

Como se mencionó en el Capítulo 1, la identificación de las estructuras de gran escala en el viento solar (RICs y EMCIs) requiere de varias firmas, las cuales, como se indica en algunos trabajos no son únicas (Richardson y Cane (1993), Russell y Shinde (2005), Zurbuchen y Richardson (2006), Wimmer-Schweingruber et al. (2006)). A raíz de los primeros registros *in situ*, los autores han ido incorporando firmas y optando por diferentes criterios para identificarlas. Por lo tanto, en ocasiones el criterio de identificación de los eventos puede ser arbitrario y propio de cada autor, en particular para la identificación de las EMCIs.

En este capítulo se expone la metodología general usada para la identificación *in situ* y la clasificación de las RICs y EMCIs. Se utilizaron los datos de plasma y campo magnético recopilados por el detector de plasma y el magnetómetro de cada nave, mismos que fueron descritos en el Capítulo 2.

Debido a que existe una gran diferencia entre la resolución temporal de los archivos de datos de plasma y campo magnético, para facilitar el cálculo de parámetros, como la presión total, se optó por usar los archivos de datos combinados que conjuntan las mediciones de plasma y campo magnético igualando sus resoluciones mediante promedios de datos. En el caso de Helios 1 (H1) y Helios 2 (H2) se usaron los archivos de datos combinados de alta resolución (40 segundos) obtenidos de la página de la OMNI WEB¹. La resolución de los datos combinados del IMP 8 fue de 1 minuto y se obtuvieron de la página del COHO Web². Los datos combinados de las Voyagers 1 y 2 (V1 y V2) tenían una resolución de 4 minutos. A pesar de que las sondas Voyager fueron lanzadas mucho después que las Helios y el IMP 8, sus datos no cuentan con tanta resolución debido a

¹<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omni/>

²<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/cohoweb/cw.html>

que fueron diseñadas para estudiar la atmósfera de los planetas exteriores.

3.1 Identificación de eventos

3.1.1 Patrones de las corrientes de viento solar

Para hacer la identificación de las RICs y las EMCIIs se construyeron gráficas con los datos de plasma y campo magnético, para visualizar los parámetros del viento solar (campo magnético, velocidad, densidad, temperatura y presión total). Para ello, se usó el lenguaje de programación IDL (Interactive Data Language).

Primero, se graficaron los datos de velocidad de las corrientes de viento solar a gran escala, esto es, en lapsos de tiempo mayores a una rotación solar (~ 27 días), para observar los patrones que siguieron las corrientes de viento solar. En este caso, las gráficas de gran escala cubren un intervalo temporal de cuatro meses, correspondiente al periodo de estudio. La Figura 3.1 muestra la gráfica de los patrones de velocidad de las corrientes de viento solar registrados por las cinco naves durante los cuatro meses de estudio. Como resultado de la corrotación solar, en las cinco naves se observan patrones semejantes de las corrientes de viento solar, desfasados temporalmente de acuerdo a su distancia heliocéntrica. Esta semejanza nos permite saber qué naves registraron el mismo evento. En esta gráfica de gran escala se buscaron incrementos significativos de la velocidad (principalmente choques) que nos indiquen el paso de una perturbación (RIC o EMCI). Es difícil identificar los eventos con base en un sólo parámetro, por lo cual, para corroborar la identificación también se construyeron gráficas de gran escala de la presión total, la densidad y el campo magnético. La gráfica de presión total se muestra en la Figura 3.2. Como mencionamos en el Capítulo 1, los eventos de gran escala en el viento solar están caracterizados por regiones de alta compresión, como la funda asociada a los choques y la IC. Por esta razón en la gráfica de presión total es más sencillo identificar los eventos (el salto en presión total es muy marcado). Las líneas de colores en ambas gráficas corresponden a los eventos identificados, cada color está asociado a un evento diferente. En total se identificaron 12 eventos de gran escala. Como se observa en las Figuras 3.1 y 3.2, la mayoría de estos eventos no fueron observados por las cinco naves. Este hecho tiene que ver con la propagación del evento a través del medio interplanetario, ya que dependiendo de su origen y dirección de propagación pudo o no cruzar las naves; en el caso de H1, esto está relacionado con el gap de 31 días

que presentó.

Es importante señalar que durante este periodo, la velocidad de las corrientes de viento solar rápido en promedio fue de 600 km/s y no se mantuvieron por más de una rotación solar. De acuerdo con lo expuesto en el Capítulo 1, este comportamiento es propio de la fase ascendente, en donde los hoyos coronales son pequeños y de poca duración.

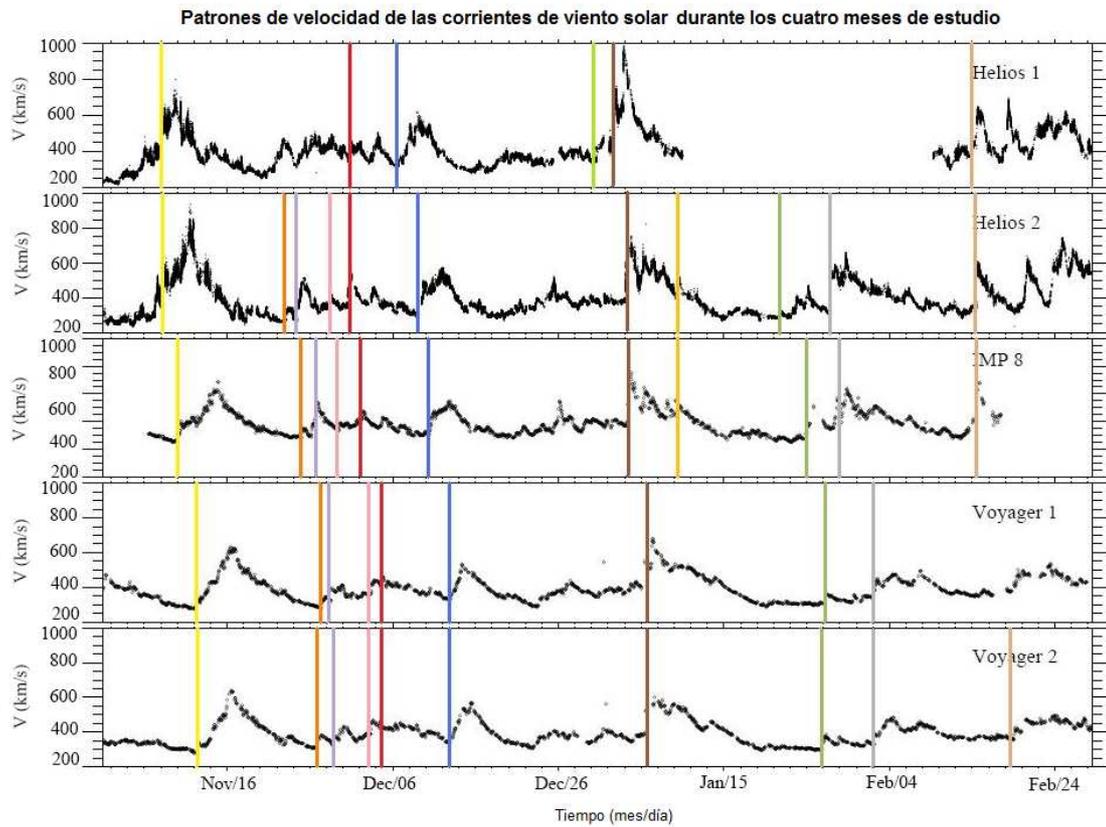


Figura 3.1: Patrones de velocidad de las corrientes de viento solar registrados durante el período de noviembre de 1977 a febrero de 1978. Las líneas de colores marcan la ubicación de los eventos (RIC o EMCI) y cada color está asociado a un evento diferente.

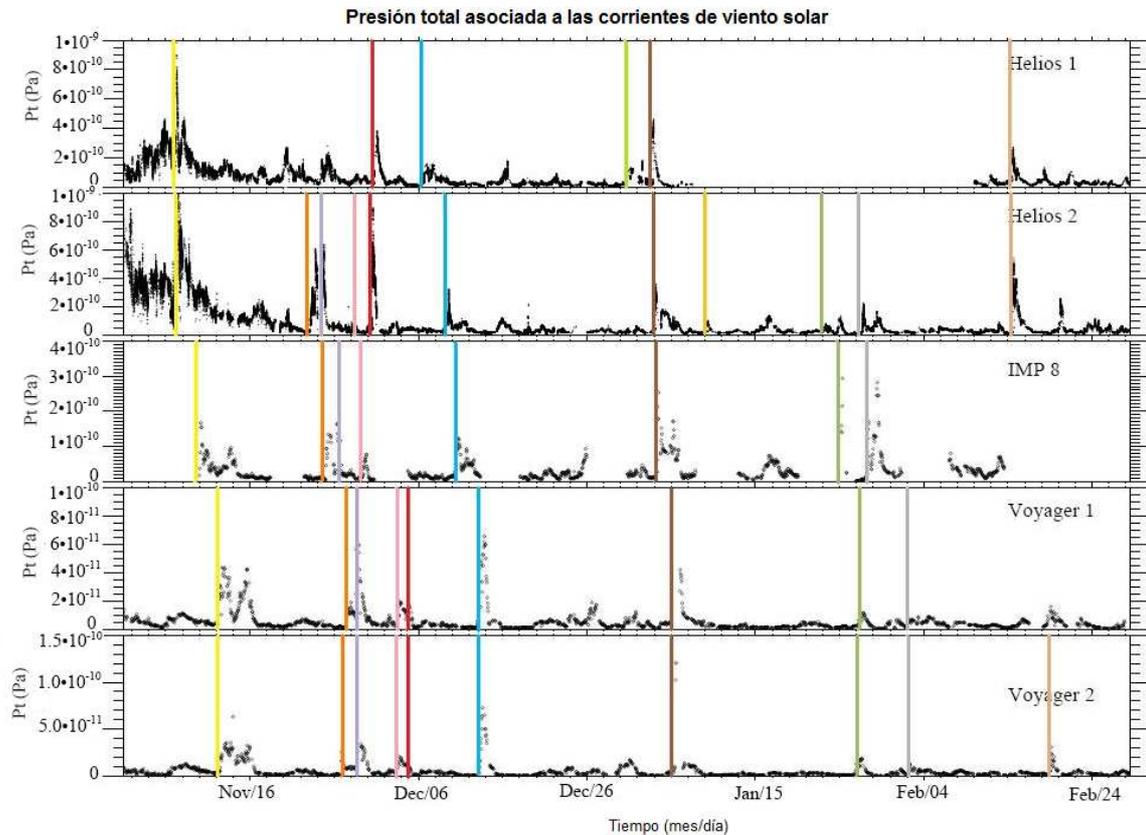


Figura 3.2: Presión total de las corrientes de viento solar durante los cuatro meses de estudio.

Una vez asociadas las fechas de los posibles eventos, se hicieron gráficas locales de velocidad, densidad, temperatura, campo magnético y presión total, para determinar el tipo de evento: RIC o EMCI. El cálculo de parámetros más específicos, tales como la entropía y la beta del plasma fueron requeridos para la clasificación y descripción de los eventos. A continuación se describen las firmas empleadas en la clasificación de las RICs y las EMCIs.

3.1.2 Criterio de identificación para las RICs

Las RICs son zonas de compresión en donde dos corrientes de viento solar con diferentes características físicas interaccionan. Su estructura consta de dos zonas de compresión que pueden estar delimitadas por ondas de choque (delantero y reverso) y una región central que separa las dos corrientes por una interfase de corrientes (IC),

(ver Capítulo 1). Esta estructura se caracteriza con base en una serie de firmas que se han identificado en los registros de datos *in situ*. La Tabla 3.1, describe las firmas que caracterizan las RICs, mismas que se emplearon en la clasificación de los eventos de este trabajo. La primer columna corresponde a las estructuras que componen la RIC (ondas de choque, zonas de compresión, IC), la segunda columna lista las firmas asociadas a cada estructura y la tercer columna explica los procesos físicos detrás de las firmas.

La firma más importante de una RIC, con la cual se diferencia de una EMCI, es la IC. De acuerdo con la Tabla 3.1, el cruce de la IC esta asociado con una caída de la densidad y un aumento de la temperatura, la entropía y la presión total (Pt). Debido a su naturaleza, la IC es una discontinuidad tangencial a través de la cual no hay flujo de partículas, esto implica que cuando las corrientes de viento solar llegan a la IC, son defletadas. Por lo tanto, cuando la nave cruza la IC debe registrar un cambio de dirección en las componentes de velocidad de las corrientes.

Tomando en cuenta que la IC es la zona de máxima compresión, el perfil de presión total de una RIC se caracteriza por tener un máximo central que corresponde con el paso de la IC y dos ondas de choque en las fronteras (Jian et al. (2006a)). Es importante aclarar que la firma de las ondas de choque no siempre aparece. Como ya se ha discutido en el Capítulo 1, sobre el plano eclíptico, la formación de las ondas de choque es gradual y depende de la evolución heliocéntrica de la RIC. Por lo general, las ondas de choque se presentan más allá de 1 UA. Como se verá en el siguiente Capítulo, la mayoría de las RIC registradas por las naves Helios no exhiben ambos choques, debido a que las naves se encontraban a menos de 1 UA y las RICs no estaban completamente desarrolladas.

En la siguiente sección se muestran algunas RICs identificadas en este estudio, con el fin de ejemplificar el criterio de identificación seguido.

Tabla 3.1: Firmas empleadas para la identificación de las Regiones de Interacción de Corrientes en este estudio.

	Firmas características	Descripción física
Fronteras de la RIC: ondas compresivas (o choques delantero y reverso)	Aumento en velocidad, temperatura, densidad, campo magnético y presión total	La fuerte interacción entre las corrientes genera a dos ondas compresivas en los bordes de la RIC, por lo que se observa el aumento de los parámetros físicos. Si la compresión es lo suficientemente intensa, las ondas compresivas se empujan y forman dos ondas de choque y en el registro <i>in situ</i> se observan saltos discontinuos de los parámetros.
Dentro de la RIC (viento lento y rápido perturbados)	Aumenta en la intensidad del campo magnético, la densidad, temperatura, la presión total	Las ondas compresivas (o posible onda de choque) en la RIC perturban el plasma de tal manera que todos los parámetros se incrementan; sin embargo, debido a que las corrientes de viento solar que están interactuando tienen distintas características, este incremento es diferente a ambos lados de la IC.
Interfase de Corriente (IC)	Brinco antifase de la temperatura y la densidad (aumenta la temperatura y disminuye la densidad), un pico en la presión total y en la entropía ($\ln(\frac{T^p}{N_p^{1.5}})$), cambio de dirección de las componentes de la velocidad (V_y, V_z)	La corriente rápida perturbada que viene detrás de la IC es menos densa por lo tanto se observa un decrecimiento de la densidad, pero su temperatura es mayor por lo que se observa al mismo tiempo un incremento de temperatura. La intensa compresión aumenta la intensidad del campo magnético. La presión total y la entropía alcanzan su valor máximo en esta zona. Por ser una discontinuidad tangencial, en esta zona las corrientes de viento solar son deflectadas, de manera que las componentes de la velocidad exhiben un cambio de dirección.

3.1.2.1 Ejemplo de identificación de las RICs

Las Figuras 3.3, 3.4 y 3.5 muestran tres ejemplos de RICs registradas por H2 y V1. Las primeras dos figuras corresponden al mismo evento observado por dos naves diferentes. Como mencionamos en la sección 3.1.1, debido a la corrotación solar se observan patrones semejantes de las corrientes de viento solar en las 5 naves (ver Figura 3.1), esta semejanza nos permite saber qué naves registraron el mismo evento. De acuerdo a la ubicación temporal, este evento corresponde a la RIC #2 y el evento de la Figura 3.5 es la RIC #5. Los paneles, de arriba a abajo muestran las gráficas de: campo magnético, velocidad, las componentes de la velocidad (V_y y V_z), la densidad, la temperatura, la

entropía y la presión total. Las RICs están resaltadas en un rectángulo amarillo y el cruce de la IC está indicado por la línea roja. Las características y las diferencias entre los registros *in situ* son discutidos en el Capítulo 4.

La Figura 3.3 muestra el registro *in situ* de la RIC #2 observada por H2. Las gráficas cubren un periodo de dos días y medio. En las primeras 14 horas se observa una corriente de viento solar estable, de baja velocidad (280 km/s) y temperatura, comparada con los patrones de las corrientes durante este periodo de estudio (ver Figura 3.1), sus características se asocian al paso de la corriente lenta. Como especificamos en la Tabla 3.1, lo primero que buscamos para identificar una RIC es un incremento de la velocidad, el campo magnético, la densidad, la temperatura y la presión total; aunque este evento presenta un gap, el día 25 de noviembre a las 02 horas se observa un incremento de estos parámetros, que indican el inicio de una región de compresión. Aproximadamente 5 horas después de que inicia el evento ($\sim 7:25$ horas) se observa una caída prominente de la densidad, la temperatura se eleva, la entropía aumenta y la presión total alcanza su máximo valor; las componentes de la velocidad muestran una rotación, todas estas firmas, de acuerdo con la Tabla 3.1, corresponden con el paso de la IC, por lo cual sabemos que este evento es una RIC. Posteriormente, la intensidad del campo magnético disminuye, la velocidad sigue incrementándose, la densidad se mantiene casi constante, la temperatura y la presión total disminuyen. No hay firma de un choque reverso, por lo que no hay una clara distinción de dónde termina la RIC, pero el 26 de noviembre a las ~ 2 horas se observa un ligero cambio en la temperatura y la entropía, que hemos asociado con el fin del evento y el inicio de la corriente rápida. El 26 de noviembre a las 14 horas se observa una caída general de los parámetros, que podría confundirse con el fin del evento, pero nosotros proponemos que se trata de una zona de rarefacción debido a las bajas temperaturas que presenta, mismas que no concuerdan con las características de la corriente rápida.

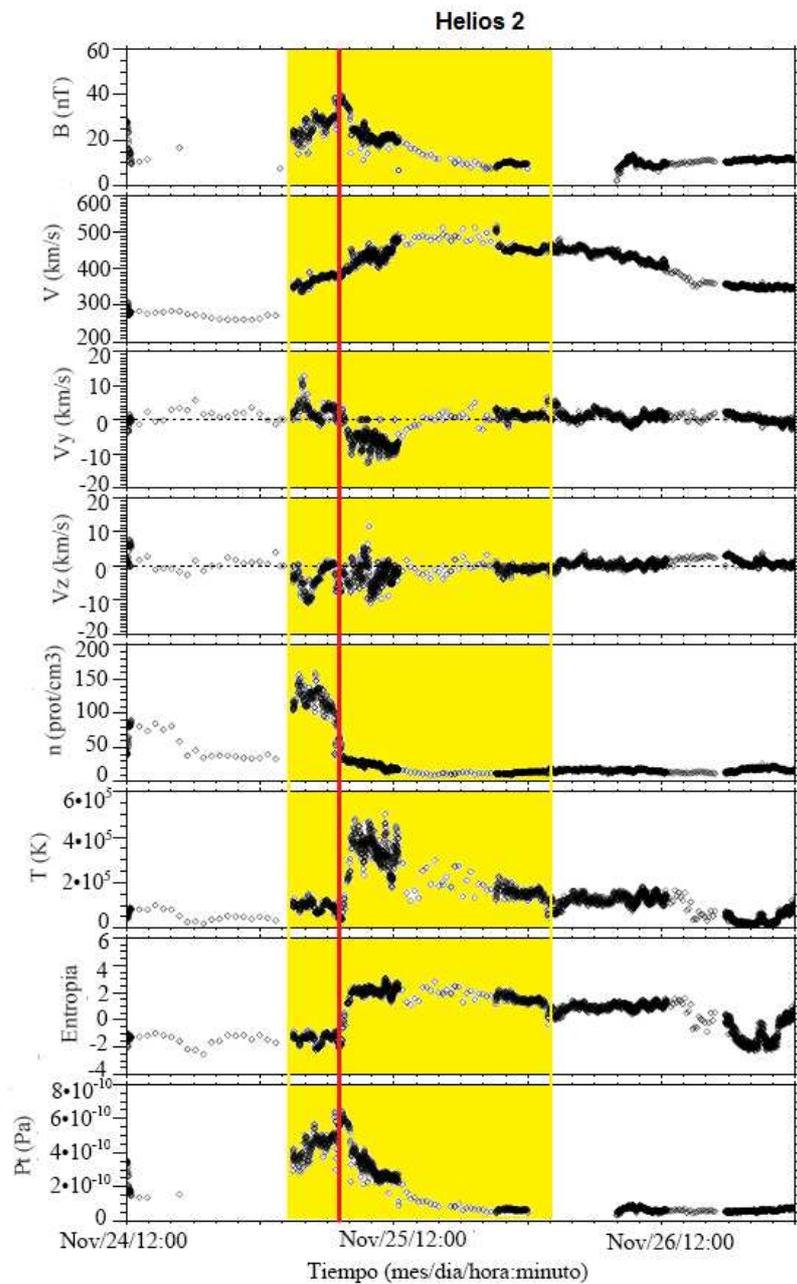


Figura 3.3: Registro *in situ* de una RIC #2 detectada por Helios 2. Los paneles corresponden a la intensidad del campo magnético, la velocidad, las componentes Y y Z de la velocidad, la densidad, la temperatura, la entropía y la presión total, respectivamente. El rectángulo amarillo encierra la RIC y la línea roja señala el cruce de la IC.

La Figura 3.4 muestra la misma RIC, pero ahora observada por Voyager 1. Las

gráficas muestran dos días y medio de observaciones. En las primeras 14 horas, identificamos el paso de la corriente lenta, debido a que presenta un patrón estable, tiene baja velocidad y temperatura, y una mayor densidad comparada con la corriente que viene detrás de la zona perturbada. El día 29 de noviembre a las 02:00 horas observamos la firma de una onda de choque. Los valores del campo magnético, la velocidad, la densidad y la presión total aumentan súbitamente, lo que nos indica el inicio de un evento de gran escala (choque frontal). Alrededor de las 16:00 horas se observa el brinco antifase (la densidad disminuye y la temperatura aumenta) característico de la IC; además la entropía aumenta y la presión total alcanzan su máximo, con lo cual corroboramos el tránsito de la IC (línea roja) y sabemos que este evento corresponde a una RIC. El final de la RIC no está bien definido, no hay firma de choque reverso; sin embargo, el 30 de noviembre a las 12:00 horas, la velocidad se incrementa alcanzando un valor de 400 km/s, la densidad se mantiene muy baja y aunque la temperatura es menor que al inicio del evento, hemos establecido que ahí termina el evento por no haber otro patrón de corriente más estable.

En la Figura 3.5 se muestra el registro *in situ* de la RIC #5 observada por Helios 2. Las gráficas tienen un periodo temporal de dos días. Igual que en los casos anteriores, en las primeras horas observamos el registro de la corriente lenta (baja velocidad y temperatura). Posteriormente el día 28 de enero a las 5 horas se observa un incremento en el campo magnético, la velocidad, la densidad y la presión total, los cuales marcan el comienzo de una región de compresión, aunque no hay choque. Aproximadamente cuatro horas después de que inicia el evento, la nave registró un aumento en la intensidad del campo magnético, la densidad decreció y la temperatura aumentó (brinco antifase), la entropía y la presión total alcanzan su máximo (máxima compresión), hay un incremento en la velocidad y sus componentes (V_y y V_z) presentan una rotación (flujos tangenciales), porque detrás viene una corriente rápida. Tampoco se observa firma de choque reverso, pero aproximadamente a las 22 horas, hay un ligero incremento de la velocidad que sugiere la entrada de la corriente rápida, cuya velocidad era de aproximadamente 580 km/s.

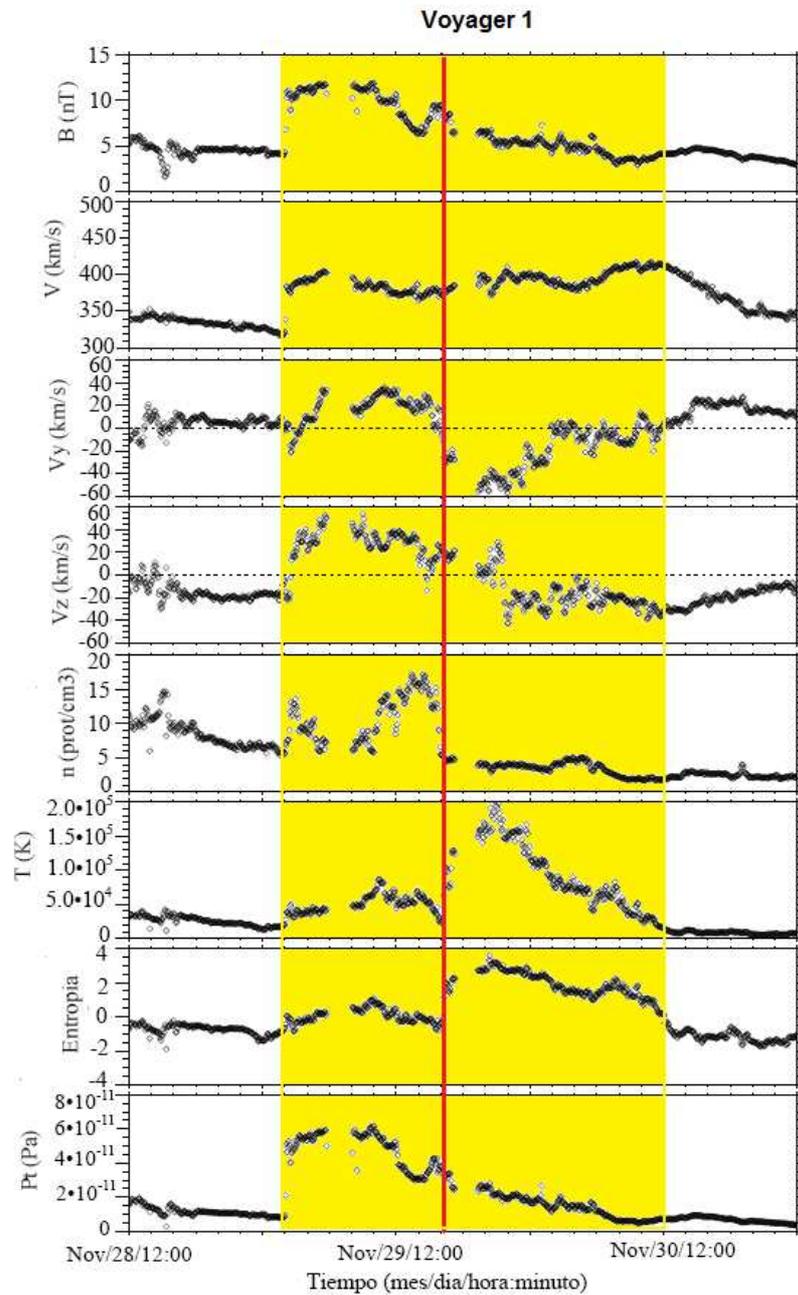


Figura 3.4: Registro *in situ* de la RIC #2 observada por Voyager 1. De acuerdo a la sección 3.1.1, podemos saber que es el mismo evento que observó Helios 2, con base a la semejanza que presentan los patrones de las corrientes de viento solar en las 5 naves como resultado de la corrotación solar (ver Figura 3.1). Mismo formato que la Figura 3.3.

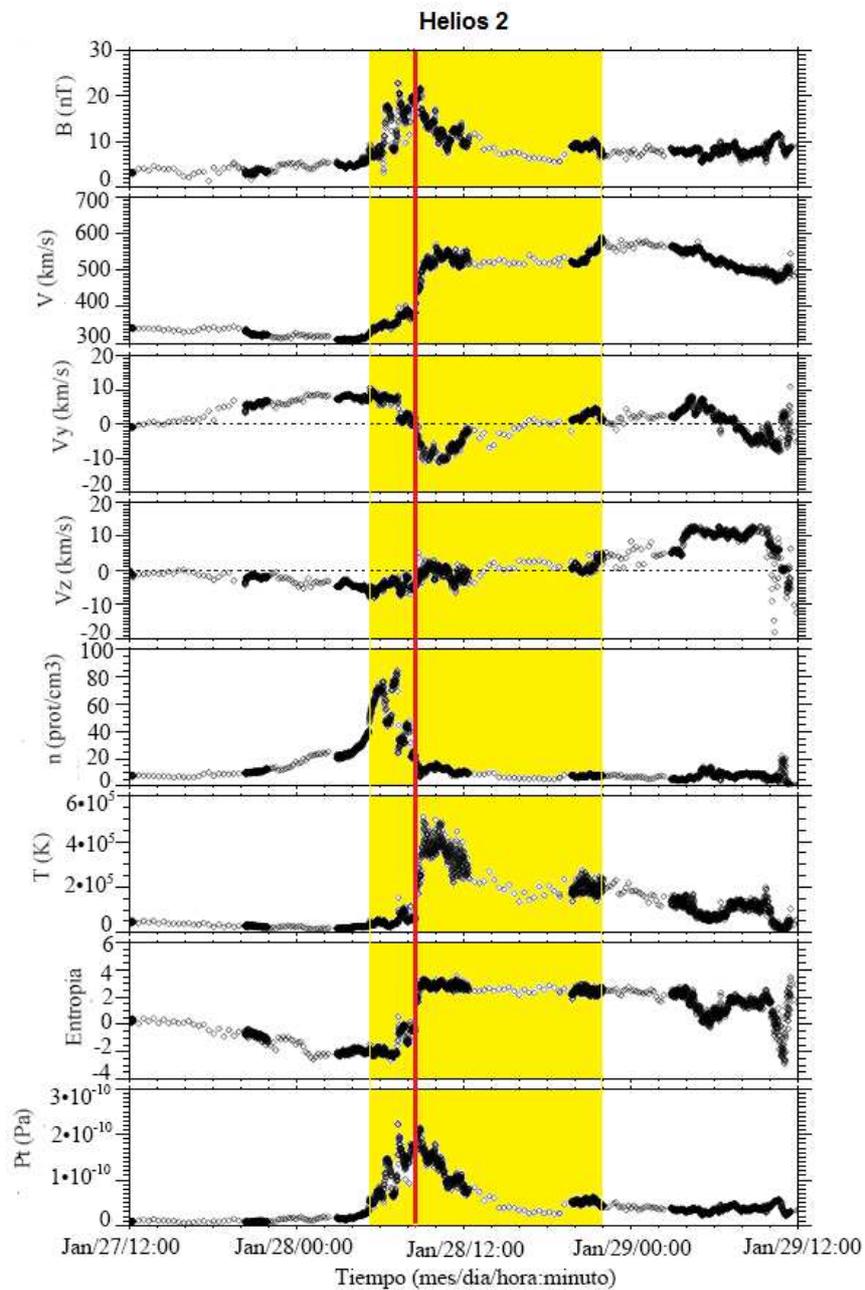


Figura 3.5: Registro *in situ* de la RIC #5 observada por Helios 2. Mismo formato que la Figura 3.3.

En los dos eventos presentados, observamos que la velocidad de las corrientes, comparadas con los valores de la Tabla 1.1 del Capítulo 1, es muy pequeña. Los eventos

no duran más de un día y medio. Este comportamiento concuerda con los patrones de corrientes esperados durante la fase ascendente, como discutimos en la sección 3.1.1.

3.1.3 Criterio de identificación para las EMCIs

Las EMCIs son nubes de plasma asociadas con EMC que viajan en el medio interplanetario. En el caso de las EMCIs rápidas (ver Capítulo 1), su estructura está conformada por una funda turbulenta de alta densidad de viento solar comprimido, seguida por la eyecta (o nube magnética) de densidad y temperatura bajas, y campo magnético intenso. En la Tabla 3.2 se listan las firmas usadas para la identificación de las EMCIs en este estudio. En la primer columna se encuentran las estructuras que componen a las EMCIs (choque, funda y eyecta), en la segunda columna están las firmas asociadas a cada estructura y en la tercer columna se describen brevemente los procesos físicos que definen cada firma.

La mayoría de las EMCIs identificadas en este estudio presentaron un choque frontal. Por lo general sólo las EMCIs rápidas impulsan ondas de choque, por esta razón esta firma es un indicador de la velocidad de la eyecta con respecto al medio circundante.

La eyecta se expande, conforme avanza en el medio interplanetario, por la diferencia de presión con el plasma solar ambiente ($P_{eyecta} > P_{ambiente}$). Por ello, en los registros *in situ* se observa una disminución de densidad y temperatura. La intensidad del campo magnético aumenta y la presión magnética domina en la eyecta, por lo cual $\beta < 1$. Otra firma que resulta de esta expansión es la velocidad declinante. La nave, desde su sistema de referencia observa que la parte frontal de la eyecta se acerca y la parte trasera se aleja, por lo tanto en el registro se observa este decrecimiento en la velocidad.

La razón entre la temperatura de protones (T_p) y la temperatura esperada (T_{ex}), es una firma que algunos autores han usado para determinar el tránsito de la eyecta (López y Freeman (1986)). La temperatura esperada es una relación establecida mediante la correlación entre la velocidad del viento solar y la temperatura de protones en una expansión normal del viento solar. Cuando la razón T_p/T_{ex} es menor a 0.5, se dice que hay una estructura aislada de menor temperatura atravesando el viento ambiente. Trabajos como los de Richardson y Cane (1995), sustentan la hipótesis de que la caída de T_p/T_{ex} está relacionada con el tránsito de la eyecta. Siguiendo esta hipótesis en las gráficas de H1, H2 e IMP 8 anexamos un panel de T_p/T_{ex} , para apoyar la identificación de la eyecta.

Los instrumentos que llevaban las naves durante la década de los 70 no se comparan a los que portan hoy en día (resolución y tipo). En la actualidad, las naves portan detectores de partículas más sofisticados que permiten determinar por ejemplo, el flujo bidireccional de electrones, que es un firma muy útil en la identificación de las EMCIs. Ésta es una de las limitantes de nuestro trabajo, sin embargo, los parámetros medidos por las cinco naves son suficientes para cubrir los objetivos de estudio.

Tabla 3.2: Firmas de las eyecciones de masa coronal interplanetarias consideradas para la identificación de los eventos en este estudio.

	Firmas características	Descripción física
Choque	Salto discontinuo en velocidad, temperatura, densidad, campo magnético y presión total	El rápido desplazamiento de la EMCI algunas veces genera una onda de choque.
Funda	Aumento en la intensidad del campo magnético, incremento de la velocidad, aumento de la densidad y temperatura, aumento de la presión total	El choque comprime y perturba el viento solar ambiente de manera que la intensidad del campo magnético, la velocidad, la densidad y la temperatura aumentan. El aumento de temperatura y campo magnético generan que la presión total se incremente.
Eyecta o nube magnética	Campo magnético intenso	Las eyectas se componen de una cuerda de flujo magnético que está siendo comprimido por la expansión, por lo cual su campo magnético es intenso.
	Baja densidad y temperatura	La expansión de la eyecta provoca que la densidad y la temperatura disminuyan.
	$\beta < 1$	Debido a que la temperatura decrece y el campo magnético aumenta, la presión magnética domina sobre la térmica.
	Suaves rotaciones del campo magnético	Presentes sólo en las nubes magnéticas. La causa de las rotaciones tiene que ver con la helicidad del campo magnético en el Sol y la rotación diferencial.

3.1.3.1 Ejemplo de identificación de las EMCIs

Las Figuras 3.6 y 3.7 muestran dos EMCIs detectadas por H2. Las figuras constan de diez paneles, de arriba hacia abajo el primer panel corresponde al campo magnético, los siguientes tres paneles muestran los cosenos directores del campo magnético (B_x/B , B_y/B , B_z/B), posteriormente está la velocidad, la densidad, la temperatura, la razón

T_p/T_{ex} graficada en escala logarítmica, la β del plasma, y la presión total. La línea naranja señala el comienzo del evento y el rectángulo azul muestra el tránsito de la eyecta.

La Figura 3.6 corresponde a la EMCI #3 registrada por Helios 2. Las gráficas muestran un periodo de datos de dos días. Como podemos observar en el panel de la velocidad, las primeras 12 horas, atraviesa una corriente de viento estable de 340 km/s, posteriormente poco antes de las 0 horas del 1 de diciembre la velocidad, la densidad y la temperatura comienzan a aumentar, indicando que una perturbación viene detrás. Aproximadamente a la 1:29 del 1 de diciembre, la velocidad, la densidad, la temperatura y la presión total aumentan súbitamente. Como ya hemos ejemplificado en las RICs, estas firmas nos indican el arribo de un choque. Detrás del choque se observa la funda de plasma comprimido, en donde los parámetros del viento solar fluctúan. Alrededor de las 4 horas, vemos que el valor de β decrece (es menor a 1), la densidad disminuye y el campo magnético se intensifica. De acuerdo con las firmas de la Tabla 3.2 esto corresponde al cruce de la eyecta (rectángulo azul). Dentro de la eyecta los cosenos directores del campo magnético presentan rotaciones, por lo cual este evento es clasificado como nube magnética. Desafortunadamente hay un gap de 10 horas al final del tránsito de la eyecta por lo que no podemos determinar con certeza el final del evento, pero como β aumenta después del gap se ha tomado esa fecha como el fin del evento.

La Figura 3.7 muestra el registro de la EMCI #7 en Helios 2. Las gráficas tienen una escala temporal de tres días y medio. Las primeras 14 horas muestran un patrón de viento estable. Posteriormente, el día 15 de febrero alrededor de las 2 horas la nave atraviesa un choque intenso (línea naranja), hay un brinco en campo magnético, velocidad, densidad, temperatura y presión total. Detrás del choque viene una funda de plasma perturbado que dura aproximadamente 8 horas. A las 10 horas el campo magnético se incrementa, la densidad y la temperatura disminuyen y β se hace menor a 1. Como ya mencionamos en el caso anterior, estas firmas nos indican el cruce de la eyecta (rectángulo azul). Dentro de esta región podemos observar que los cosenos directores rotan (también es una nube magnética), la velocidad decrece a consecuencia de la expansión y la razón T_p/T_{ex} es menor a 1.

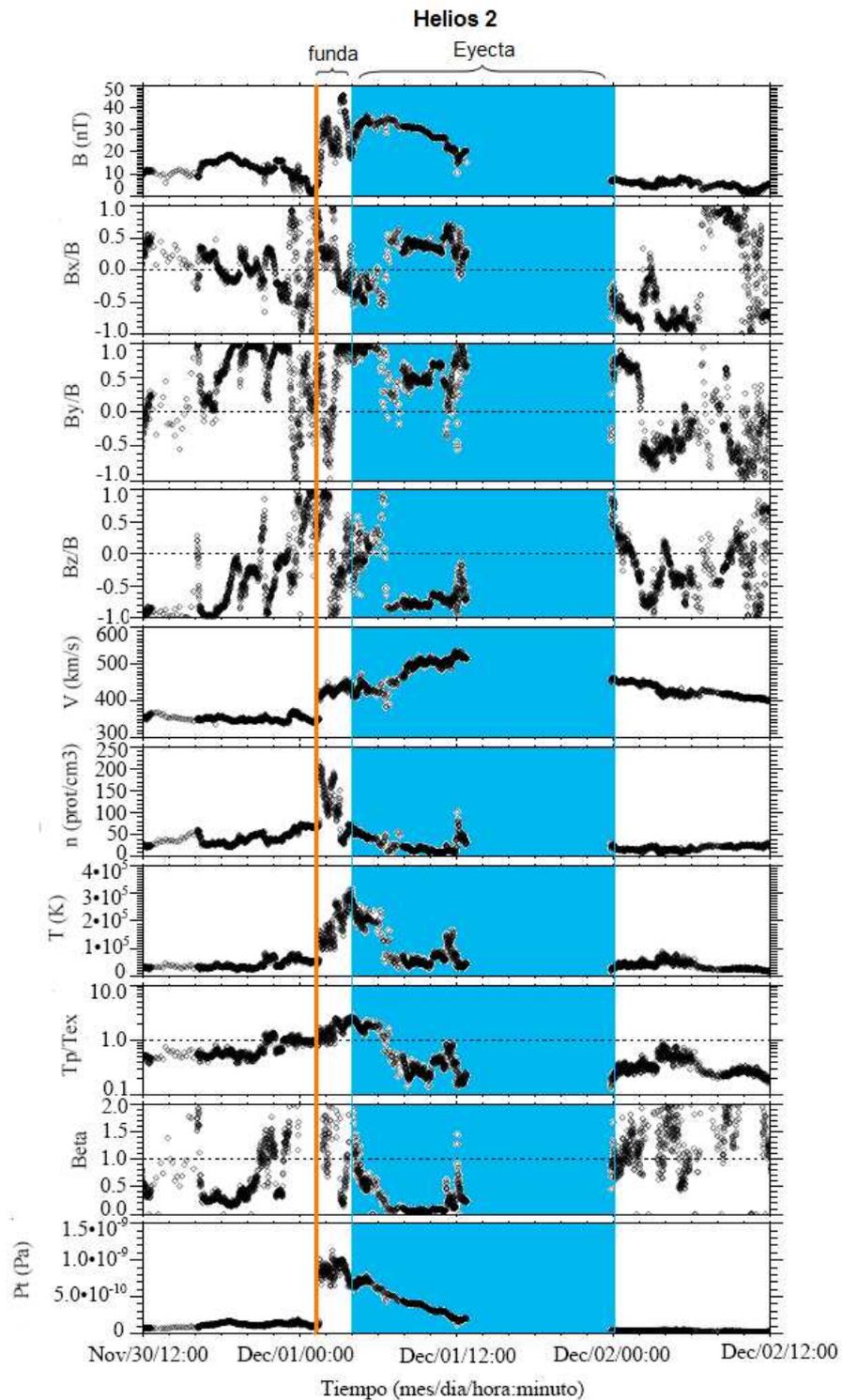


Figura 3.6: EMCI #3 registrada por Helios 2. Los paneles corresponden a: el campo magnético, los cosenos directores del campo magnético (B_x/B , B_y/B , B_z/B), la velocidad, la densidad, la temperatura, la razón T_p/T_{ex} en escala logarítmica, la β del plasma y la presión total. La línea naranja indica el comienzo del evento, y el rectángulo azul encierra el tránsito de la eyecta.

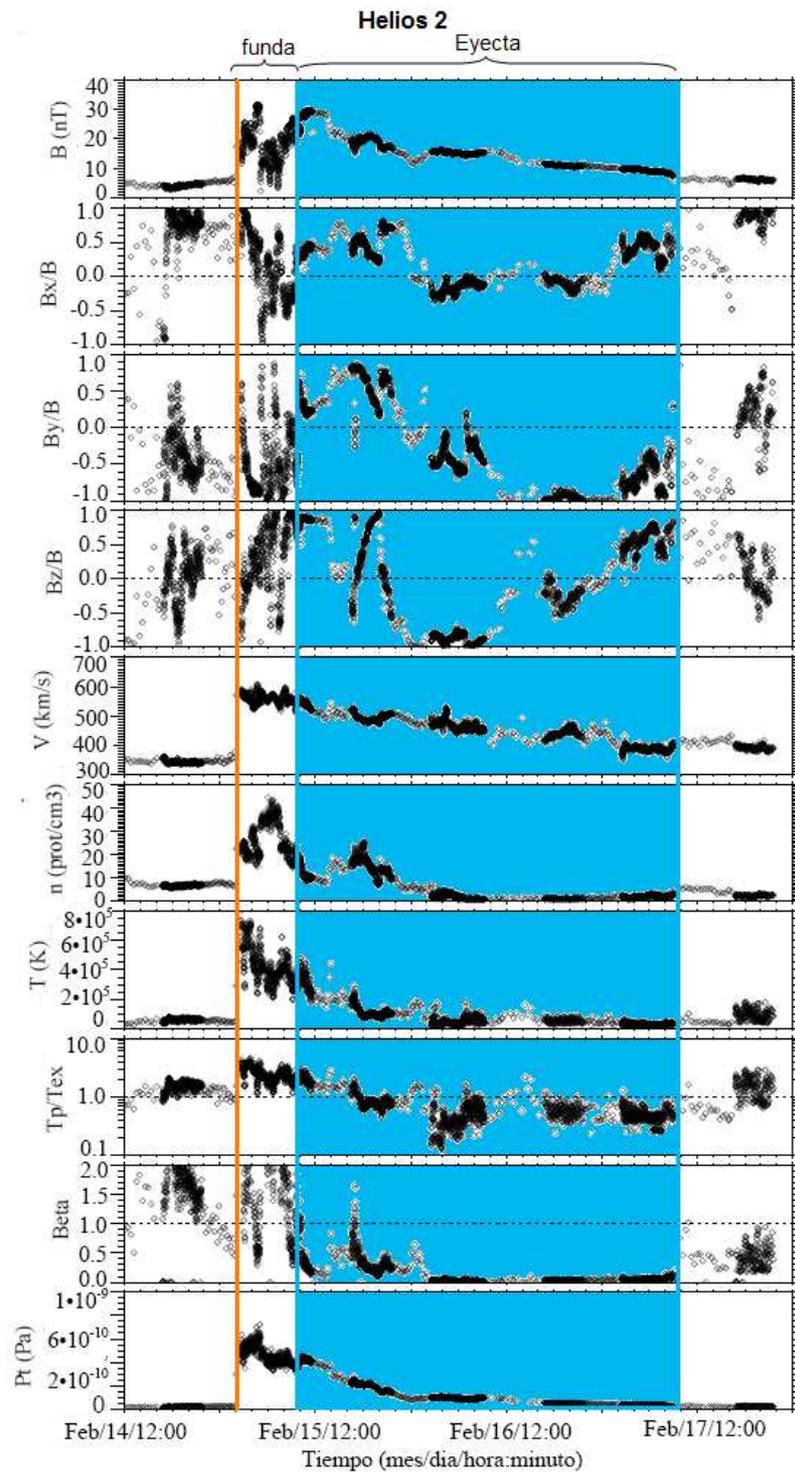


Figura 3.7: Eyección de masa coronal interplanetaria registrada por Helios 2. Mismo formato que la Figura 3.6.

3.2 Eventos

Aplicando los criterios anteriores a los 12 eventos identificados en las gráficas de gran escala (Figura 3.1 y 3.2), encontramos que 5 corresponden a RICs y 7 a EMCIs. Estos eventos son listados en las Tablas 3.3 y 3.4, respectivamente. En la Tabla 3.3 la primera columna es el número de evento, la segunda columna se refiere a las posición de las naves, la tercera y cuarta columna son las fechas de inicio y término de los eventos, la quinta columna es la ubicación temporal (fecha) de la interfase de corrientes y la última columna corresponde a los choques registrados, si son frontales o reversos. La Tabla 3.4 muestra las EMCIs registradas, las columnas se refieren al número de evento, la posición que tenían las naves durante el registro, las fechas de inicio y fin del evento, el grupo al que pertenece el perfil de presión total, y el número de choques registrados.

Tabla 3.3: Regiones de interacción de corriente registradas durante el periodo de noviembre de 1977 a febrero de 1978.

Evento	Nave	Posición	Inicio (mes-día-hora)	Fin (mes-día-hora)	Interfase de Corrientes (mes-día-hora)	Choque (F / R)
RIC #1	Helios 1	0.47 AU ; 303°	Nov-07-18:15	Nov-08-22:00	Nov-08-12:17	F
	Helios 2	0.40 AU ; 326°	Nov-07-18:53	Nov-08-20:00	Nov-08-00:11	F
	IMP 8	1.0 AU ; 0°	Nov-10-13:15	Nov-11-15:00	Nov-10-18:30	N/O
	Voyager 1	1.43 AU ; 0°	Nov-12-18:39	Nov-14-16:00	Nov-13-07:00	F
	Voyager 2	1.45 AU ; 2°	Nov-12-23:42	Nov-14-20:00	Nov-13-15:00	F
RIC #2	Helios 1	0.69 AU ; 322°	N/O			
	Helios 2	0.63 AU ; 354°	Nov-25-02:53*	Nov-26-02:00	Nov-25-07:25	*
	IMP 8	1.0 AU ; 0°	Nov-26-18:00*	Nov-27-14:00	Nov-27-01:00	*
	Voyager 1	1.58 AU ; 354°	Nov-29-02:07	Nov-30-08:00	Nov-29-16:00	F
	Voyager 2	1.59 AU ; 354°	Nov-29-07:22	Nov-30-14:00	Nov-29-21:40	F
RIC #3	Helios 1	0.79 AU ; 324°	N/O			N/O
	Helios 2	0.77 AU ; 358°	N/O			N/O
	IMP 8	1.0 AU ; 0°	N/O			N/O
	Voyager 1	1.73 AU ; 346°	Dic-13-12:19	Dic-14-19:47	Dic-14-08:00	R
	Voyager 2	1.74 AU ; 347°	Dic-13-15:59*	Dic-14-16:00*	Dic-14-00:00	*
RIC #4	Helios 1	*	*	*	*	N/O
	Helios 2	0.98 AU ; 349°	Ene-23-16:19	Ene-24-14:00	Ene-24-04:40	N/O
	IMP 8	1.0 AU ; 0°	*	*	*	N/O
	Voyager 1	2.19 AU ; 317°	Ene-27-18:00	Ene-29-02:00	Ene-27-07:47	N/O
	Voyager 2	2.15 AU ; 318°	Ene-27-10:23	Ene-28-14:10	Ene-27-22:00	F
RIC #5	Helios 1	*	*	*	*	*
	Helios 2	0.98 AU ; 347°	Ene-28-05:00	Ene-28-22:00	Ene-28-08:11	N/O
	IMP 8	1.0 AU ; 0°	Ene-28-18:55	Ene-29-06:00	Ene-28-22:18	N/O
	Voyager 1	2.25 AU ; 314°	Feb-02-16:55	Feb-05-16:44	Feb-03-01:34	F
	Voyager 2	2.21 AU ; 314°	Feb-02-16:59	Feb-05-12:00	Feb-03-07:05	F

* gap

N/O evento no observado

Tabla 3.4: Eyecciones de masa coronal interplanetarias registradas durante el periodo de estudio.

Evento	Nave	Posición	Inicio (mes-día-hora)	Fin (mes-día-hora)	Choque
EMCI #1	Helios 1	0.66 AU ; 320°	N/O		
	Helios 2	0.61 AU ; 352°	Nov-23-16:18	Nov-24-12:03	1
	IMP 8	1.0 AU ; 0°	Nov-25-12:12	Nov-26-12:23	1
	Voyager 1	1.57 AU ; 354°	Nov-27-22:27	Nov-29-00:00	1
	Voyager 2	1.58 AU ; 355°	Nov-27-08:50*	Nov-28-03:00	*
EMCI #2	Helios 1	0.71 AU ; 323°	N/O		
	Helios 2	0.67 AU ; 355°	Nov-28-12:50	Nov-29-07:00	1
	IMP 8	1.0 AU ; 0°	Nov-29-22:40	Dic-01-00:00	N/O
	Voyager 1	1.62 AU ; 353°	Dic-02-21:10	Dic-03-22:00	1
	Voyager 2	1.63 AU ; 353°	N/O		
EMCI #3	Helios 1	0.74 AU ; 323°	Dic-01-05:14	Dic-02-16:00	1
	Helios 2	0.70 AU ; 356°	Dic-01-01:29	Dic-02-00:00*	1
	IMP 8	1.0 AU ; 0°	Dic-02-02:20	*	*
	Voyager 1	1.63 AU ; 352°	Dic-03-23:16	Dic-05-12:00	1
	Voyager 2	1.64 AU ; 352°	Dic-03-21:41	Dic-05-12:00	1
EMCI #4	Helios 1	0.94 AU ; 320°	Dic-31-03:02	Ene-01-18:00	N/O
	Helios 2	0.93 AU ; 355°	N/O		
	IMP 8	1.0 AU ; 0°	N/O		
	Voyager 1	1.95 AU ; 333°	Ene-04-05:27	Ene-05-14:00	1
	Voyager 2	1.94 AU ; 333°	*	*	
EMCI #5	Helios 1	0.95 AU ; 320°	Ene-03-08:34	Ene-05-00:00	2
	Helios 2	0.93 AU ; 355°	Ene-03-14:50	Ene-05-14:00	1
	IMP 8	1.0 AU ; 0°	Ene-03-20:35	Ene-05-20:10	1
	Voyager 1	1.97 AU ; 333°	Ene-05-22:00*	Ene-07-06:00	1
	Voyager 2	1.95 AU ; 333°	Ene-06-00:00	Ene-07-02:00*	1
EMCI #6	Helios 1	0.95 AU ; 320°	N/O		
	Helios 2	0.96 AU ; 353°	Ene-09-20:00	Ene-11-02:00	1
	IMP 8	1.0 AU ; 0°	*	*	*
	Voyager 1	2.06 AU ; 327°	N/O		
	Voyager 2	2.04 AU ; 327°	N/O		
EMCI #7	Helios 1	0.95 AU ; 307°	Feb-15-01:11	Feb-17-00:00	1
	Helios 2	0.95 AU ; 341°	Feb-15-02:01	Feb-17-09:50	1
	IMP 8	1.0 AU ; 0°	*	*	*
	Voyager 1	2.42 AU ; 302°	*	*	*
	Voyager 2	2.36 AU ; 302°	Feb-19-14:43	Feb-21-22:00	1

* gap

N/O evento no observado

Capítulo 4

Evolución heliocéntrica de las RICs y EMCIs

4.1 Introducción

El análisis que se presenta en este capítulo tiene como objetivo describir la evolución heliocéntrica de las 5 RICs y las 7 EMCIs identificadas en el Capítulo 3 usando las mediciones simultáneas de cinco naves (Helios 1 y 2, Voyager 1 y 2 e IMP 8), con el fin de entender cómo varían algunas de sus propiedades con la distancia heliocéntrica. En un trabajo previo, Burlaga et al. (1980), analizaron los datos de plasma y campo magnético de este ensamble de naves incorporando también datos del IMP 7. Ellos hicieron una descripción de los eventos más importantes relacionados con tres tipos de flujos interplanetarios: una corriente corrotante, una onda de choque asociada a una ráfaga, y una onda de choque impulsada por una eyecta, en el periodo del 22 de noviembre al 6 de diciembre de 1977. Cabe mencionar que actualmente los choques ya no se asocian con las ráfagas, como mencionamos en el Capítulo 1, los choques son impulsados por EMC, y se ha observado que generalmente las EMC más rápidas están relacionadas con ráfagas. Su trabajo describe algunas características físicas de los eventos y resalta la importancia de realizar estudios con múltiples naves para entender la dinámica de los flujos corrotantes y transitorios.

En un trabajo posterior, Burlaga et al. (1981), analizan el flujo detrás de un choque interplanetario con las mediciones *in situ* de las Voyagers 1 y 2. De este análisis concluyen que el choque es impulsado por una nube magnética que viene detrás. Este resultado ha sido algo fundamental para los estudios observacionales y modelos actuales. En su artículo de 1984, Burlaga et al. analizaron la estructura de gran escala del campo magnético estudiando la variación de la intensidad del campo magnético con la

distancia radial y la identificación de los sectores magnéticos. Su criterio para identificar los sectores magnéticos fue empleado en este estudio.

Otro trabajo relevante para el desarrollo de esta investigación es el de Jian et al. (2006b), en donde se estudia la relación entre el perfil de presión total de las EMCIs y el cruce de la nave a través de la eyecta. De aquí se concluye que hay tres perfiles de presión total característicos de las EMCIs que pueden relacionarse con la región por donde la nave cruza la eyecta. Los tres perfiles de presión total son descritos más adelante en la sección 4.4.1. Con base en este criterio hemos clasificado los perfiles de presión total de las 7 EMCIs, con el fin de estudiar su relación con la evolución heliocéntrica de las EMCIs, es decir, cómo cambian los parámetros físicos (ancho radial de la EMCI y la funda, intensidad del choque (ΔP)) si la nave cruza el centro o los costados de la eyecta.

En torno a la evolución heliocéntrica de las estructuras de gran escala, existen trabajos como el de González-Esparza (1999) en donde se analiza el ancho radial de las RICs registradas por cinco naves: Pioneer 10 y 11 (fase descendente del ciclo solar 20), Voyager 1 y 2 (fase ascendente del ciclo solar 21) y Ulysses (fase posterior al máximo del ciclo 22). Él encontró que el ancho radial de estas estructuras aumenta con la distancia heliocéntrica, y que la velocidad de las corrientes de viento solar rápido registradas por las Voyagers fue menor que en los Pioneers, evidenciando así su dependencia del ciclo solar. En otro trabajo, González-Esparza et al. (1998) analizan el ancho radial de las EMCI registradas por Ulysses de 1 a 5 UA. Ellos separaron a las EMCI en dos: las que impulsan choque y las que no. El comportamiento estadístico de ambas no mostró una clara tendencia de crecimiento con la distancia heliocéntrica. Este resultado fue contradictorio, ya que otros estudios como el de Bothmer y Schwenn (1994), reportan una expansión de las EMCI.

Como lo plantea Burlaga et al. (1980), la alineación de este ensamble de naves nos proporciona una oportunidad única para estudiar la dinámica de las estructuras de gran escala del viento solar. Con este propósito hemos analizado las mediciones de plasma y campo magnético de estas cinco naves, enfocándonos en conocer aspectos de la evolución heliocéntrica de las RICs y las EMCIs, tales como la variación del ancho radial de los eventos, la interacción entre las corrientes que generan las RICs, la intensidad de los choques, etc. Con base en los trabajos que hemos citado. De acuerdo con los procesos físicos descritos en el Capítulo 1 y Capítulo 3 (ver Tablas 3.1 y 3.2), por ejemplo, esperamos observar que el ancho radial de los eventos crezca conforme aumenta la distancia heliocéntrica, que las Voyagers registren el mayor número de choques por estar

a una mayor distancia, etc. Algunos de los resultados de nuestro análisis se cotejaron con los artículos citados anteriormente.

4.2 Mapas de gran escala

Para estudiar la estructura del campo magnético interplanetario hicimos un análisis de los sectores magnéticos registrados por las naves durante las 4 rotaciones Carrington que abarca este estudio. Siguiendo el criterio de Burlaga et al. (1984), se identificaron los sectores magnéticos tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- A cada día se le asocia la polaridad dominante. Si en un día se cuenta con menos de 8 horas de datos, ese día se descarta y se reporta como un gap.
- Para reportar un cruce con la hoja neutra el cambio de polaridad debe mantenerse al menos por 2 días.

Con los resultados de este análisis se construyeron mapas de gran escala en donde se muestran de manera gráfica los sectores magnéticos registrados por cada una de las naves durante los cuatro meses de estudio. Las Figuras 4.1 y 4.2, muestran los cinco mapas de gran escala, cada uno de los cuales consta de cuatro periodos de 27 días enumerados en la parte inferior, correspondientes a una rotación Carrington. Usamos un código de color para diferenciar los sectores magnéticos, los de polaridad positiva son las regiones de color rosa y los negativos son de color gris claro, los gaps son las franjas de color gris oscuro, las regiones blancas corresponden a los días en donde predominaban ambas polaridades y las de color beige están asociadas con polaridades neutras. Podemos observar que la estructura de los sectores magnéticos no siguió un patrón regular que se repitiera cada 27 días. Predominaron los sectores negativos, las regiones con polaridad positiva se presentaron esporádicamente y hubo varios periodos en donde se mantenían ambas polaridades. Si tomamos en cuenta que el periodo de estudio corresponde a la fase ascendente del ciclo solar, en donde la configuración magnética de la atmósfera solar está cambiando, los hoyos coronales son más pequeños, de poca duración y aparecen a bajas latitudes (ver Tabla 1.2 del Capítulo 1), entonces entendemos el comportamiento tan inestable de los sectores magnéticos durante este periodo. A final de cuentas, los sectores

magnéticos son una extensión del campo magnético en la atmósfera solar, por lo cual su comportamiento está directamente ligado con el ciclo solar. Los mapas sinópticos de campo superficial muestran claramente la diferencia de los sectores magnéticos durante el mínimo y el máximo del ciclo solar (ver Figura 1.7 y 1.8 del Capítulo 1).

Estos mapas permiten identificar la polaridad magnética asociada con las corrientes de viento solar que generan las RICS y las EMCIS identificadas en este estudio. En los mapas se indica la ubicación de todos los eventos presentados en la Tabla 3.3 y 3.4, y se señala claramente aquellos que venían o no acompañados por choques en las observaciones de cada nave. Las RICS y las EMCIS están representadas por rectángulos de color amarillo y verde, respectivamente, y las líneas rojas son los choques.

4.3 Análisis de las RICS

Para cuantificar las características físicas de las cinco RICS listadas en la Tabla 3.3, se promediaron intervalos de datos de diferente duración dependiendo de la parte de la estructura que se iba a analizar (choque, corrientes lenta y rápida o IC). En el caso de los choques, lo más indicado es tomar un intervalo de datos pequeño, dado que esta perturbación atraviesa la nave instantáneamente y para poder inferir los parámetros del choque ($\Delta V, \Delta n, \Delta T, \Delta B$ y ΔP_t) se necesitan conocer las características físicas del plasma justo antes y después de que atravesase el choque. En este caso, se optó por promediar 1 hora de datos antes y después del choque. Las corrientes de viento solar que generan la RIC son estructuras de mayor dimensión, por lo cual se tomaron promedios de 3 hrs de datos justo antes de que comenzara la RIC (corriente lenta) y al término de ésta (corriente rápida). La manera en que se tomaron los intervalos de datos es ejemplificada en la Figura 4.3, en donde se muestra el registro *in situ* de la RIC #3 en V1. Las gráficas tienen un periodo temporal de 60 horas (2 días y medio). La RIC se ha delimitado en el rectángulo amarillo, comenzó el día 13 de diciembre alrededor de las 12 horas y terminó el 14 de diciembre a las 20 horas. Antes y después del paso de la RIC se han resaltado con franjas grises los intervalos de datos tomados para calcular las características de las corrientes lenta y rápida. Este evento presentó un choque reverso.

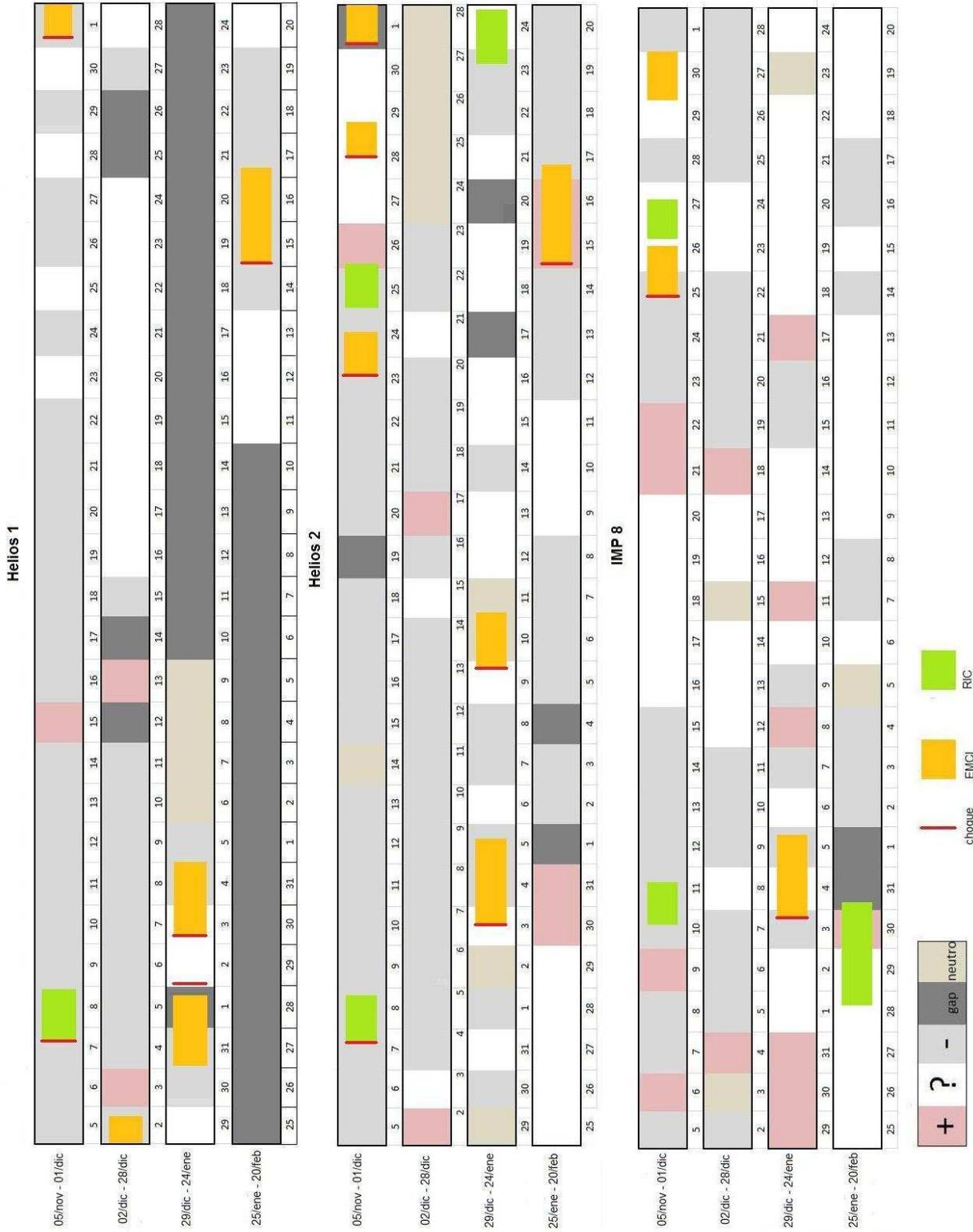


Figura 4.1: Mapas de gran escala de Helios 1, Helios 2 e IMP 8. Las regiones color gris claro y rosa simbolizan los sectores magnéticos negativos y positivos. Los rectángulos de color verde y amarillo representan las RICS y las EMCIs, y las líneas rojas son los choques.

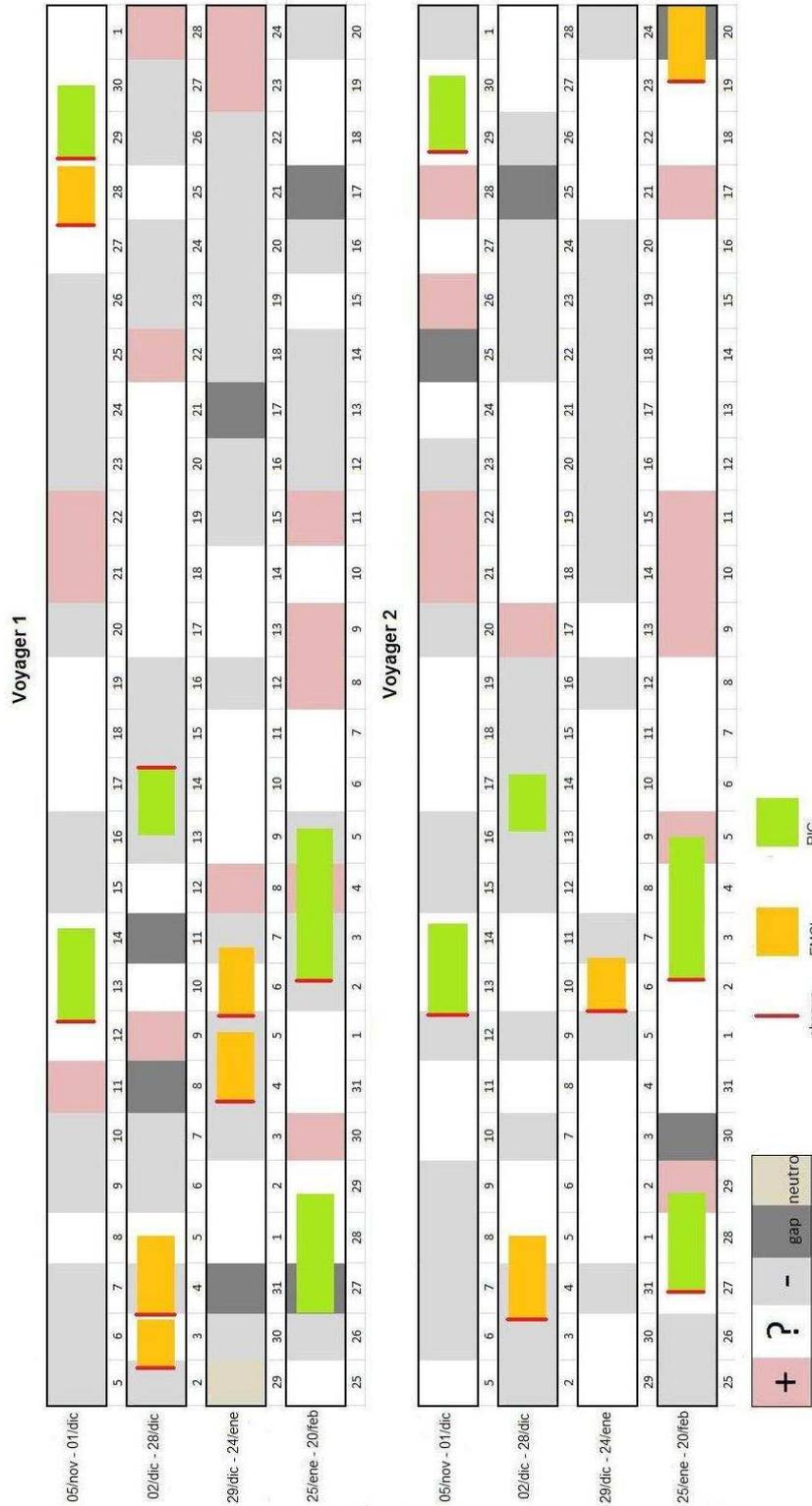


Figura 4.2: Mapas de gran escala de Voyager 1 y Voyager 2. Mismo formato que la Figura 4.1.

La franja verde es el intervalo de datos usado para reportar los parámetros del choque, comprendiendo 1 hora de datos antes y después de su registro. La línea roja identifica el paso de la IC. Este evento se discute más adelante.

También se calculó la presión dinámica de las corrientes de viento solar lenta (P_{Dl}) y rápida (P_{Dr}) que generaron la RIC, para estudiar cómo evoluciona la interacción entre las dos corrientes conforme aumenta la distancia heliocéntrica, si es la corriente rápida la que impulsa a la corriente lenta o si la corriente lenta es la que frena a la corriente rápida por tener una mayor inercia. Esto es importante porque repercute en la intensidad y propagación de los dos choques que bordean la RIC. Se usaron los subíndices l y r para referirse a la corriente lenta y rápida, respectivamente.

A fin de conocer otras características de la evolución heliocéntrica se calculó el tamaño radial de los eventos siguiendo el criterio de González-Esparza et al. (1998). Suponiendo que en un tiempo Δt la velocidad radial se mantiene constante, las partículas del plasma en ese intervalo de tiempo recorren una distancia $\Delta A = v(\Delta t)$. Al hacer la suma de todos los desplazamientos a través del evento obtenemos una aproximación de su ancho radial. Usando este mismo método también calculamos la posición relativa de la IC dentro de la RIC, determinando el ancho radial al frente de la IC (corriente lenta comprimida) y normalizando al ancho radial de la RIC. De esta forma, si la posición de la IC es igual a 0.5 podemos decir que la IC se ubica en el centro de la RIC que sería el caso esperado si la interacción entre las dos corrientes fuera simétrica, pero cuando la posición de la IC es menor o mayor a 0.5 nos indica que una porción de la corriente (lenta o rápida) está más comprimida que la otra, asimetría que debe tener repercusiones en la evolución del evento.

Las Tablas 4.1 a 4.5 muestran las propiedades físicas de las RICS. Están divididas en 3 secciones, la primera corresponde a las propiedades generales de la RIC en cada una de las naves, en donde se muestra la fecha de inicio del evento (día, mes y hora correspondiente), la posición que tenían las naves el día del evento (separación angular con respecto a la línea Sol-Tierra y distancia radial), el ancho radial de la RIC y la posición relativa de la IC (cociente entre ancho radial del evento antes de la IC y el ancho radial de la RIC). La segunda sección corresponde a las propiedades de las corrientes lenta y rápida (velocidad, densidad, temperatura, campo magnético) y el cociente de la presión dinámica de las corrientes (P_{Dr}/P_{Dl}). En la tercera sección están las propiedades del choque delantero y reverso, el salto en: velocidad (V_d/V_a), densidad (ρ_d/ρ_a), temperatura (T_d/T_a), campo magnético (B_d/B_a) y presión total (P_d/P_a). Los subíndices a y d se refieren al valor promedio antes (río arriba) y después (río abajo)

del choque. En los choques reversos la toma de los valores promedio se invierte, ya que río arriba siempre corresponde a la corriente de viento solar no perturbada que en este caso corresponde a la corriente rápida que viene detrás del choque. En base a estos parámetros a continuación se presenta una descripción general de las RIC. Además, para aunar la descripción general con la evolución heliocéntrica de las RIC construimos gráficas del ancho radial de la RIC, la posición de la IC, el cociente de las presiones dinámicas de las corrientes rápida y lenta, el brinco en presión total de los choques en función de la distancia heliocéntrica, mostradas en las Figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8. A las gráficas del ancho radial y la posición de la IC se les hizo un ajuste lineal para ver si su comportamiento depende directamente de la distancia heliocéntrica como esperaríamos. Cabe aclarar que en todos los ajustes lineales se descartaron aquellos valores de las naves que presentaban gaps.

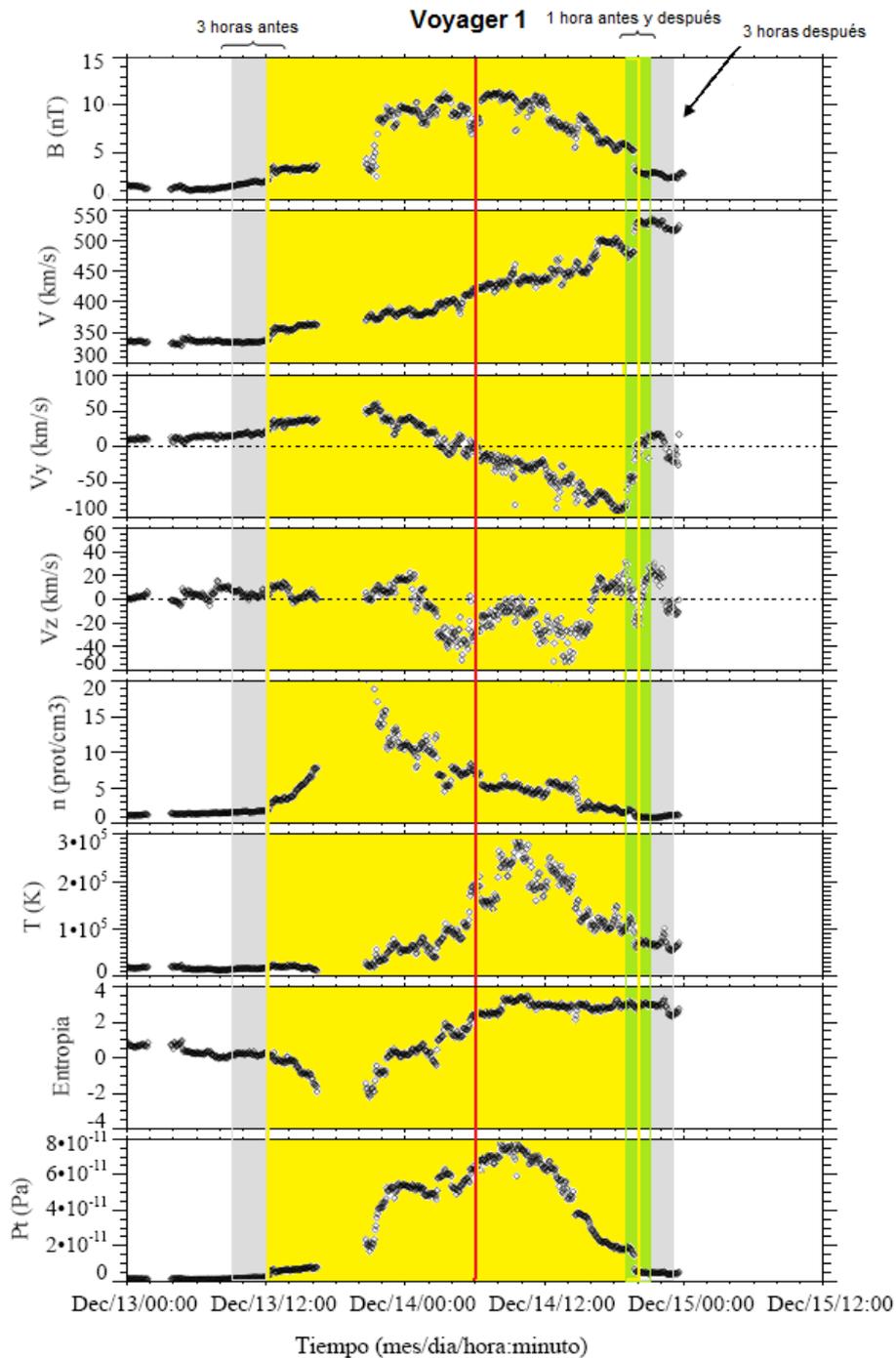


Figura 4.3: Intervalos de datos usados para calcular las características promedio de las RICS. Las franjas grises corresponden al intervalo de datos promediado para las corrientes de viento rápido y lento (3 horas de datos); la franja verde es un intervalo de dos horas de datos, 1 hora antes y 1 hora después del choque. Este evento es la RIC # 3 registrada por Voyager 1

RIC #1

Este evento fue registrado por las cinco naves. H1 y H2 se encontraban a ~ 0.4 UA y registraron el evento muy poco desarrollado. En las gráficas de los datos de H1 no se aprecia claramente una IC. Los choques en H1 y H2 no son tan intensos ($P_d/P_a = 3.6$ y $P_d/P_a = 2.6$) como los que presentan las Voyagers ($P_d/P_a = 5.2$ y $P_d/P_a = 5.6$), esto concuerda con la evolución heliocéntrica esperada del evento, ya que las Helios estaban más cerca del Sol y la RIC estaba en proceso de formación, en cambio a 1.4 UA, distancia a la que se encontraban las Voyagers, la RIC estaba prácticamente desarrollada, de manera que la compresión era más intensa y la estructura del evento más definida. Lo único que llama la atención es que IMP no presenta choque frontal siendo que estaba a 1 UA.

La posición relativa de la IC en las cinco naves fue < 0.5 , lo que indica que la RIC estaba más comprimida al frente de la IC. Esto puede estar relacionado con el hecho de que el evento no presente choque reverso, ya que probablemente la onda compresiva detrás de la IC (en la corriente rápida) no era lo suficientemente intensa para empujarse y formar una onda de choque.

En el caso de H1 y H2, la presión dinámica de la corriente lenta (P_{Dl}) fue mayor que la presión dinámica de la corriente rápida (P_{Dr}); sin embargo, las otras tres naves presentan el comportamiento inverso que concuerda con la suposición de que la corriente rápida empuja a la corriente lenta. Esto podría indicar deformaciones locales de la RIC que implicaría variaciones longitudinales.

La Figura 4.4 muestra la evolución radial de la RIC #1. En el panel superior observamos que el ancho radial del evento tiende a aumentar con la distancia heliocéntrica, de tal forma que el ajuste lineal muestra una buena correlación ($R^2 = 0.9$). Como ya habíamos mencionado, en los ajustes lineales no se tomaron en cuenta los eventos que presentaron gaps al principio o al final, en este caso no se consideró el valor de IMP 8. La posición de la IC presenta una tendencia a desplazarse al centro de la RIC, aunque no hay una buena correlación lineal ($R^2 = 0.54$). Esto podemos interpretarlo como un aumento del ancho radial de la corriente lenta comprimida (funda lenta). La intensidad de los choques aumentó con la distancia heliocéntrica, que era justo lo que esperábamos debido a la expansión del evento, aunque no se presentaron choques reversos.

Tabla 4.1: Valores promedio de los parámetros físicos de la RIC #1. La Tabla está dividida en 3 secciones, la primera corresponde a las propiedades generales de la RIC en cada una de las naves, en donde se muestra la fecha de inicio del evento (día, mes y hora correspondiente), la posición que tenían las naves el día del evento (separación angular con respecto a la línea Sol-Tierra y distancia radial), el ancho radial total de la RIC, y la posición relativa de la IC. La segunda sección corresponde a las propiedades de las corrientes lenta y rápida (velocidad, densidad, temperatura, campo magnético y presión dinámica); para diferenciar los parámetros de ambas corrientes se usan los subíndices l y r que corresponden a lenta y rápida, respectivamente. En la tercera sección están las propiedades del choque delantero y reverso, salto en: velocidad (V_d/V_a), densidad (ρ_d/ρ_a), temperatura (T_d/T_a), campo magnético (B_d/B_a) y presión total (P_d/P_a). Los subíndices a y d se refieren al valor promedio antes (río arriba) y después (río abajo) del choque.

RIC #1											
Naves	Inicio (día-mes-hora)	Posición		Ancho radial de la RIC (UA)				Posición relativa de la IC			
H1	07-nov-18:15	0.47 UA ; 303°		0.30				N/O			
H2	07-nov-18:53	0.40 UA ; 326°		0.26				0.19			
IMP 8	10-nov-13:15	1 UA ; 0°		0.21*				0.19*			
V1	12-nov-18:39	1.43 UA ; 0°		0.39				0.21			
V2	12-nov-23:42	1.45 UA ; 2°		0.36				0.26			
Propiedades de la corriente lenta											
Propiedades de la corriente lenta			T_l (K)	B_l (nT)	V_r (km/s)	ρ_r ($prot/cm^3$)	T_r (K)	B_r (nT)	P_{Dr}/P_{Dl}		
H1	390±28.4	41.6±3.8	1.9E05±5.6E04	19.9±6.3	563±55.1	10.4±1.8	2.6E05±8.1E04	24.3±1.3	0.5		
H2	296±8.2	78.3±6.2	1.4E05±2.2E04	24.8±2.7	480±9.4	24.7±2.1	3.3E05±5.7E04	22.8±1.1	0.67		
IMP 8	262±8.2	24.3±6.5	1.5E04±1.0E03	6.3±2.0	396±11.3	11.4±1.7	6.3E04±1.6E04	7.4±0.3	1.07		
V1	281±3.8	4.0±0.3	1.2E04±1.5E03	2.7±0.2	575±17.1	2.8±0.2	5.8E04±5.8E03	5.2±0.4	2.83		
V2	288±5.4	4.1±0.7	1.1E04±1.9E03	3.5±0.4	577±27.9	2.3±0.4	6.9E04±4.1E03	9.5±1.3	2.28		
Propiedades del choque delantero											
Propiedades del choque delantero			T_d/T_a	B_d/B_a	P_d/P_a	V_d/V_a	ρ_d/ρ_a	Propiedades del choque reverso			
H1	1.1	1.5	1.7	1.8	3.6	N/O	N/O	T_d/T_a			
H2	1.1	1.5	1.5	1.4	2.6	N/O	N/O	B_d/B_a			
IMP 8	N/O					N/O	N/O	P_d/P_a			
V1	1.2	2.4	2.8	2.3	5.2	N/O	N/O	V_d/V_a			
V2	1.2	2.5	2.3	2.2	5.6	N/O	N/O	ρ_d/ρ_a			

* gap

N/O evento no observado

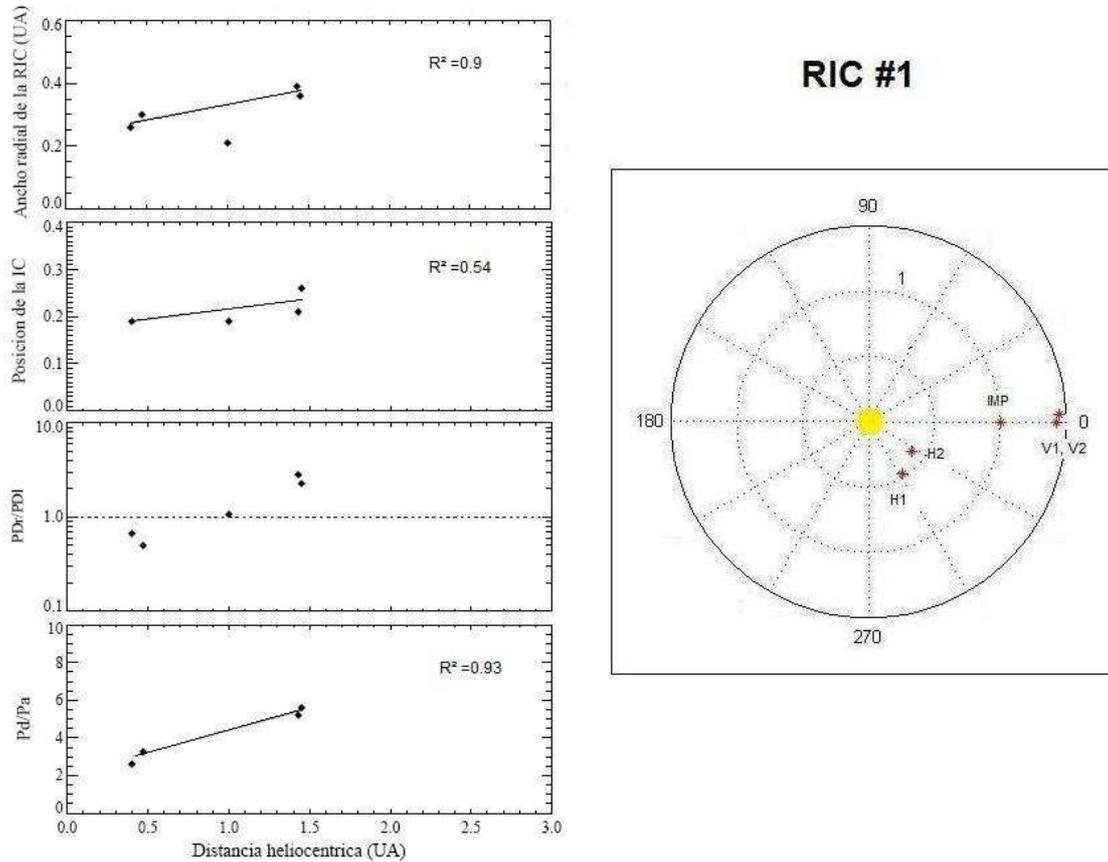


Figura 4.4: Evolución heliocéntrica de la RIC #1. Los paneles del lado izquierdo de arriba hacia abajo corresponden a las gráficas del ancho radial, la posición relativa de la interfase, el cociente de las presiones dinámicas de las dos corrientes y el brinco en presión total del choque con respecto a la distancia heliocéntrica. En el ajuste lineal que exhiben estas gráficas no se incluyeron los valores que presentaron gaps (marcados con asteriscos). La gráfica del lado derecho muestra la posición de las naves durante el evento en un sistema de coordenadas Sol-Tierra. En los ajustes lineales del ancho radial de la RIC y la posición de la IC no se tomó en cuenta el valor del IMP 8 por presentar un gap.

RIC #2

El evento no se registró en H1. En V1 y V2 se identificó un choque frontal con una compresión de $\rho_d/\rho_a=1.8$ y $\rho_d/\rho_a=2.7$, respectivamente. H2 e IMP presentaron un gap

al inicio del evento, por lo que no se pudo determinar si hubo choque frontal. El cociente de la presión dinámica de las corrientes rápida y lenta fue en promedio $P_{Dr}/P_{Dl} = 1$, salvo en el caso del IMP, lo que sugiere que las corrientes de viento solar de la RIC estaban en equilibrio dinámico.

En H2, IMP y V1 la posición relativa de la IC fue menor a 0.5, lo que indica que la región de mayor compresión estaba en la parte frontal de la RIC. En el caso de V2, la posición relativa de la IC fue de 0.5, sugiriendo que la IC se ubicaba justo en el centro de la RIC. Al comparar las posiciones de la IC con la posición radial de las naves notamos que la IC fue moviéndose hacia el centro de la RIC conforme la distancia radial aumentó.

Para la RIC #2 (Figura 4.5), observamos que el ancho radial del evento aumenta linealmente con la distancia ($R^2 = 0.99$). La IC se movió hacia el centro de la RIC conforme aumentó la distancia heliocéntrica, mostrando un comportamiento lineal con una correlación de $R^2 = 0.98$. En ambos ajustes no consideramos el valor del IMP 8 por presentar gaps. El cociente de las presiones dinámicas fue mayor a 1, lo que indica que la corriente rápida empujaba a la corriente lenta. El valor en IMP es un caso aislado que puede estar relacionado con el gap al inicio del evento. En este evento sólo hubo dos choques en V1 y V2, por lo cual no podemos establecer una relación de su comportamiento heliocéntrico.

Tabla 4.2: Valores promedio de los parámetros físicos de la RIC #2. Mismo formato que la Tabla 4.1.

Naves	Inicio (día-mes-hora)	RIC #2		Ancho radial de la RIC (UA)	Posición relativa de la IC				
		Posición							
H1	N/O	0.69 UA ; 322°							
H2	25-nov-02:00*	0.63 UA ; 354°		0.24	0.17				
IMP 8	26-nov-18:00*	1 UA ; 0°		0.19*	0.21*				
V1	29-nov-02:07	1.58 UA ; 354°		0.28	0.41				
V2	29-nov-07:22	1.59 UA ; 354°		0.28	0.45				
Propiedades de la corriente lenta									
	V_l (km/s)	ρ_l (<i>prot/cm</i> ³)	T_l (K)	B_l (nT)	V_r (km/s)	ρ_r (<i>prot/cm</i> ³)	T_r (K)	B_r (nT)	P_{Dr}/P_{Dt}
H1	N/O								
H2	266±5.5	36.5±3.5	4.1E 04±1.0E 04	*	460±16.6	12.5±1.2	1.6E 05±2.1E 04	9.7±0.7	1.02
IMP 8	303±4.5	5.5±1.9	4.5E 04±1.2E 04	5.5±1.9	488±51.3	4.5±0.6	7.4E 04±1.6E 04	5.3±0.3	0.5
V1	324±4.2	6.4±0.5	1.6E 04±2.4E 03	4.4±0.4	327±2.8	6.7±0.3	1.7E 04±2.7E 03	4.4±0.2	1.09
V2	323±3.5	3.7±0.3	2.5E 04±5.8E 03	3.5±0.2	425±5.9	2.8±0.4	3.6E 04±3.9E 03	3.5±0.2	1.34
Propiedades del choque delantero						Propiedades del choque reverso			
	V_d/V_a	ρ_d/ρ_a	T_d/T_a	B_d/B_a	P_d/P_a	V_d/V_a	ρ_d/ρ_a	T_d/T_a	P_d/P_a
H1	N/O					N/O			
H2	*	*	*	*	*	N/O			
IMP 8	*					N/O			
V1	1.19	1.8	2.0	2.4	5.1	N/O			
V2	1.19	2.7	3.7	2.2	7.8	N/O			

* gap

N/O evento no observado

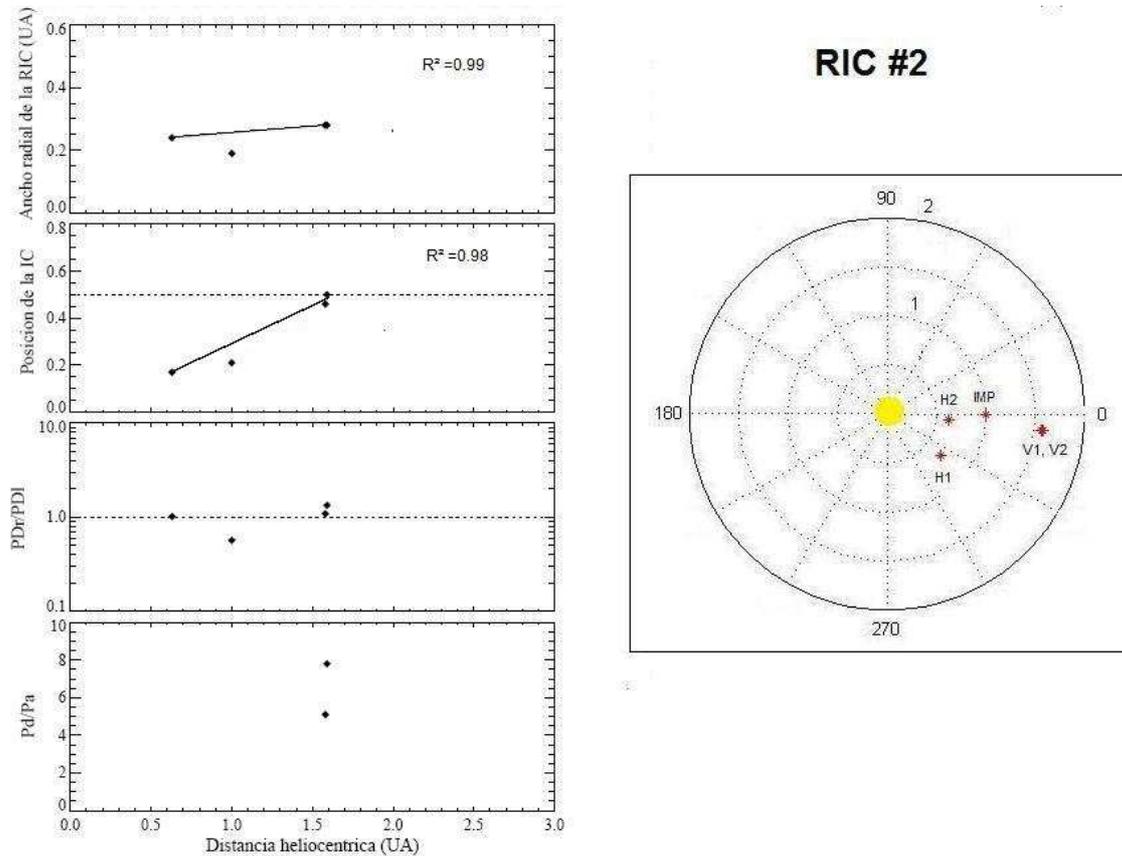


Figura 4.5: Evolución heliocéntrica de la RIC #2. Mismo formato que la Figura 4.4. En el ajuste del ancho radial de la RIC no se tomó en cuenta el valor de IMP 8 por presentar un gap.

RIC #3

Este evento solamente fue detectado por V1 y V2. Las naves no registraron choque frontal, sin embargo V1 presentó un choque reverso (ver Figura 4.3), que no se identificó en V2 debido a un gap de 7 horas al final del evento. En el caso V1, la posición relativa de la IC fue de 0.58 lo que nos indica que la RIC venía más comprimida en la parte trasera, correspondiente a la corriente rápida comprimida. Esto puede estar relacionado con el hecho de que la RIC presentara sólo choque reverso.

El cociente de la presión dinámica de las corrientes fue mayor a 1 en ambas naves ($P_{Dr}/P_{Dl}=1.44$, $P_{Dr}/P_{Dl}=1.8$), este hecho sugiere que la corriente rápida empujaba a la corriente lenta.

Si observamos la posición de las naves (lado derecho de la Figura 4.6), el hecho de que H1 y H2 que se encontraban angularmente cerca de las Voyagers ($\sim 22^\circ$ y $\sim 12^\circ$ respectivamente) no detectaran el evento indica que la interacción entre las dos corrientes se dio más allá de 0.77 UA.

En el caso de la RIC #3, como sólo tuvimos registro de las Voyagers no fue posible hacer el ajuste lineal para determinar el comportamiento heliocéntrico del evento, aunque este evento es particularmente interesante ya que es el único que presenta un choque reverso. La posición de la IC puede estar relacionada con la intensidad de la compresión a ambos lados de la IC, en este caso la posición de la IC es mayor a 0.5 lo cual implicaría que la corriente rápida esta sufriendo una mayor compresión y por lo tanto se genera el choque reverso; sin embargo, esta hipótesis no se puede corroborar con las otras RICS y se requiere de un análisis tridimensional para determinar la geometría de la IC y los patrones de las corrientes de viento solar.

Tabla 4.3: Valores promedio de los parámetros físicos de la RIC #3. Mismo formato que la Tabla 4.1

RIC #3									
Naves	Inicio (día-mes-hora)	Posición	Ancho radial de la RIC (UA)		Posición relativa de la IC				
H1	N/O	0.79 UA ; 324°							
H2	N/O	0.77 UA ; 358°							
IMP 8	N/O	1 UA ; 0°							
V1	13-dic-12:19	1.73 UA ; 346°	0.31		0.58				
V2	13-dic-15:59*	1.74 UA ; 347°	0.24*		0.29*				
Propiedades de la corriente lenta									
	V_l (km/s)	ρ_l (<i>prot/cm</i> ³)	T_l (K)	B_l (nT)	V_r (km/s)	ρ_r (<i>prot/cm</i> ³)	T_r (K)	B_r (nT)	P_{Dr}/P_{Dt}
H1	N/O								
H2	N/O								
IMP 8	N/O								
V1	334±1.1	1.7±0.1	1.6E04±814.3	1.8±0.2	528±5.1	0.97±0.09	7.0E04±8.0E03	2.8±0.2	1.4
V2	349±4.9	4.9±2.1	1.1E04±1.3E03	0.9±0.2	515±11.2	1.07±0.16	4.2E04±4.1E03	1.7±0.2	1.8
Propiedades del choque delantero									
	V_d/V_a	ρ_d/ρ_a	T_d/T_a	B_d/B_a	P_d/P_a	V_d/V_a	ρ_d/ρ_a	T_d/T_a	P_d/P_a
H1	N/O					N/O			
H2	N/O					N/O			
IMP 8	N/O					N/O			
V1	N/O					1.1	1.8	1.5	1.9
V2	N/O					*			3.3

* gap

N/O evento no observado

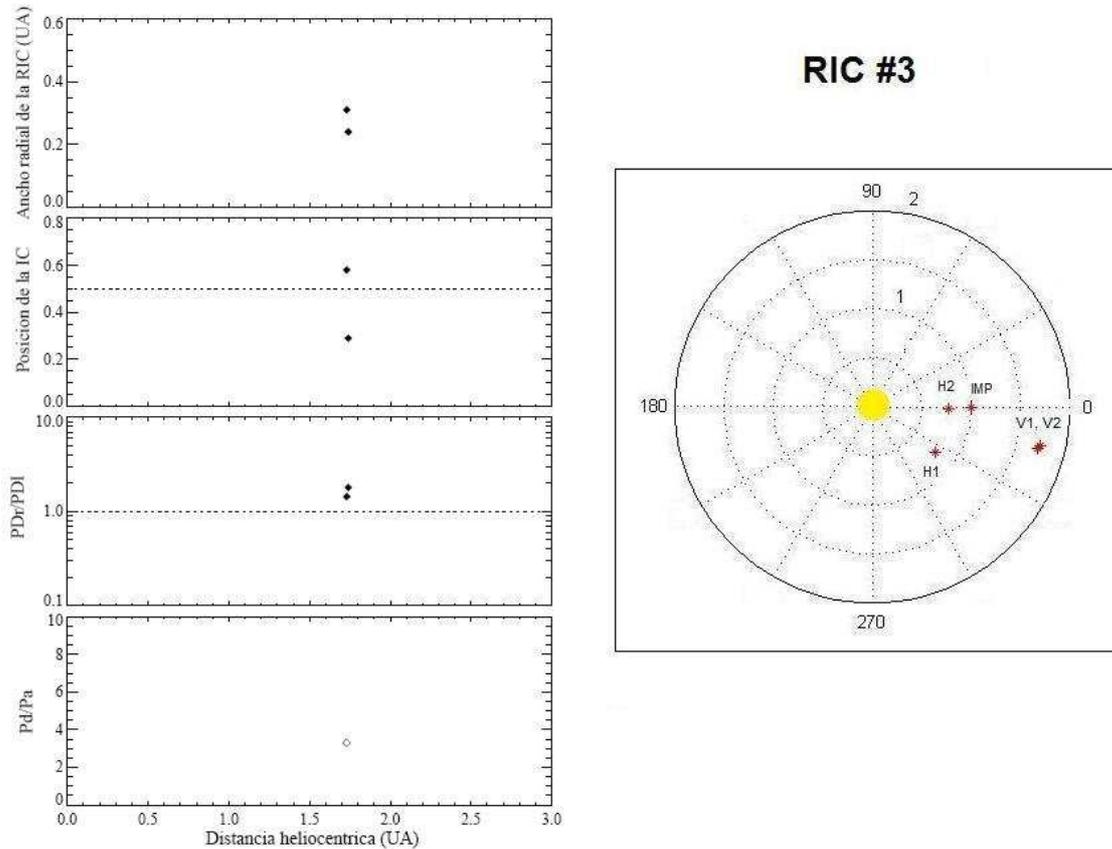


Figura 4.6: Evolución heliocéntrica de la RIC #3. Mismo formato que la Figura 4.4.

RIC #4

El evento fue detectado solamente por H2, V2 y V1, aunque en este último no se aprecia con claridad ya que hay un gap. H2 no registró un choque frontal y el inicio del evento no es muy claro, esto debe estar relacionado con la cercanía de la nave (~ 1 UA) y el hecho de que la corriente “rápida” que dio origen a este evento era en realidad lenta (~ 366 km/s), por lo que la interacción entre las corrientes fue débil y la RIC tuvo que haber tardado más tiempo en desarrollarse.

La posición relativa de la IC mostró una tendencia a desplazarse hacia la parte frontal de la RIC, con valores de 0.6 a 0.98 UA hasta un valor de 0.23 a 2.19 UA. Este comportamiento es completamente opuesto al observado en la RIC #2.

Tabla 4.4: Valores promedio de los parámetros físicos de la RIC #4. Mismo formato que la Tabla 4.1.

		RIC #4																				
Naves	Inicio (día-mes-hora)	Posición	Ancho radial de la RIC (UA)		Propiedades de la corriente rápida		Propiedades de la corriente lenta			Propiedades del choque reverso												
			V_r (km/s)	ρ_r (prot/cm ³)	T_r (K)	B_r (nT)	P_{Dr}/P_{Di}	V_l (km/s)	ρ_l (prot/cm ³)	T_l (K)	B_l (nT)	V_d/V_a	ρ_d/ρ_a	T_d/T_a	B_d/B_a	P_d/P_a	V_a/V_a	ρ_a/ρ_a	T_d/T_a	B_d/B_a	P_d/P_a	
H1	*																					
H2	23-ene-16:00	0.98 UA ; 349°																				0.60
IMP 8	*	1 UA ; 0°																				
V1	27-ene-18:00	2.19 UA ; 317°																				0.23
V2	27-ene-10:23	2.15 UA ; 318°																				0.40
Propiedades de la corriente rápida																						
H1	*																					
H2	292±4.9	9.4±0.6	2.9E05±5.6E03	7.3±0.3	366±7.7	9.1±0.5	3.5E04±5.3E03															1.54
IMP 8	*																					
V1	358±2.0	7.9±0.3	2.0E04±5.6E03	2.9±1.0	329±3.4	2.5±0.2	1.6E04±646															0.25
V2	302±4.4	4.0±0.3	1.1E05±2.0E03	1.8±0.3	370±2.3	0.4±0.02	1.2E04±513															0.16
Propiedades del choque delantero																						
H1	*																					
H2	N/O																					
IMP 8	*																					
V1	N/O																					
V2	1.1	1.7	2.6	2.3	4.9																	

* gap

N/O evento no observado

En el caso de H2, P_{Dr}/P_{Dl} fue mayor a 1, o sea que a 0.98 UA la corriente rápida impulsaba a la corriente lenta, sin embargo, para las Voyagers (~ 2.19 y 2.15 UA) ocurre lo contrario. Este cociente es un indicador de la transferencia de momento entre las corrientes. La velocidad de la corriente lenta aumentó y la velocidad de la corriente rápida disminuyó al pasar de 0.98 a 2.15 UA, lo que indica variaciones longitudinales que deben deformar la forma local de la RIC.

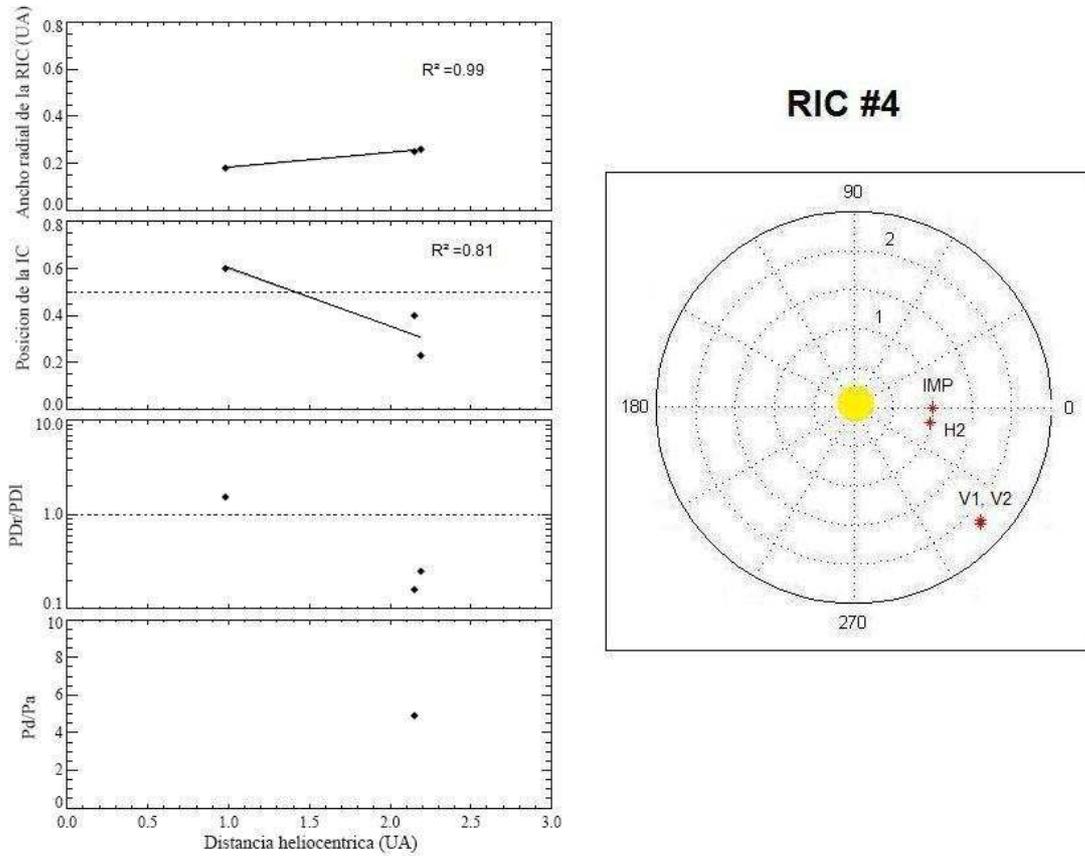


Figura 4.7: Evolución heliocéntrica de la RIC #4.

La Figura 4.7 muestra las gráficas de la evolución heliocéntrica de la RIC #4. Igual que en las tres RIC anteriores, el ancho radial de este evento muestra un incremento lineal conforme aumenta la distancia heliocéntrica. En el caso de la posición de la IC sólo tenemos los valores de las Voyagers, por lo que no podemos discutir acerca

de su evolución. La posición de la IC fue menor a 0.5, entonces la RIC venía más comprimida al frente por lo que solamente se registraron choques frontales. En este evento el cociente de presión dinámica a 2.15 UA fue menor a 1, por lo que la presión dinámica de la corriente lenta era mayor. Este comportamiento debe estar relacionado con los valores promedio de la velocidad de la corriente rápida (ver Tabla 4.4) que son excepcionalmente bajos, por lo que como ya se ha discutido en los párrafos anteriores la interacción entre las corrientes fue muy débil.

RIC #5

Este evento fue registrado por H2, IMP, V1 y V2. Sólo las naves V1 y V2 que se encontraban a ~ 2.2 UA presentaron choque frontal. El registro de H2 mostró una IC bien definida en las firmas de los perfiles de densidad, temperatura, presión total y entropía (ver Figura 3.5 del Capítulo 3). La interacción entre las corrientes a esta distancia heliocéntrica (0.98 UA) fue intensa, de manera que tan sólo 4 horas después de que inicia el evento se registra la IC. En el caso del IMP, el registro del evento fue confuso debido a que presenta varios gaps. El cruce de la IC no se pudo establecer con precisión.

La magnitud de los parámetros físicos medidos por V1 fueron menores que los de V2, a pesar de que se encontraba a una menor distancia heliocéntrica. La comparación del evento en ambas naves muestra firmas muy diferentes, en V2 se aprecia bien definida la IC, pero en V1 apenas es perceptible. Dado que la separación entre las naves era mínima (0.04 UA) y registraron el evento con una diferencia de 4 minutos, este hecho nos recalca que hay fluctuaciones locales muy marcadas a lo largo de la RIC.

Las cuatro naves detectaron un cociente de la presión dinámica P_{Dr}/P_{Dl} mayor a 1, por lo tanto podemos decir que la corriente rápida a 2.25 UA aún sigue impulsando a la corriente lenta.

La RIC #5 (Figura 4.8), también muestra que el ancho radial de la RIC aumentó conforme la distancia heliocéntrica. La gráfica de la posición de la IC muestra una tendencia a desplazarse hacia la parte frontal con la distancia, comportamiento completamente opuesto al que presentaron las RIC #1 y RIC #2. Los valores de la posición relativa de la IC en las cuatro naves fueron menores a 0.5, pero su ajuste lineal no muestra una buena correlación ($R^2 = 0.47$). Al comparar las gráficas de la posición relativa de la IC

Tabla 4.5: Valores promedio de los parámetros físicos de la RIC #5. Mismo formato que la Tabla 4.1.

RIC #5									
Naves	Inicio (día-mes-hora)	Posición	Ancho radial de la RIC (UA)	Posición relativa de la IC					
H1	*								
H2	28-ene-05:00	0.98 UA ; 347°	0.20					0.15	
IMP 8	28-ene-18:55	1.0 UA ; 0°	0.13					0.23	
V1	02-feb-16:55	2.25 UA ; 314°	0.76					0.11	
V2	02-feb-16:59	2.21 UA ; 314°	0.67					0.15	
Propiedades de la corriente lenta									
	V_l (km/s)	ρ_l (prot/cm ³)	T_l (K)	B_l (nT)	V_r (km/s)	ρ_r (prot/cm ³)	T_r (K)	B_r (nT)	P_{Dr}/P_{Di}
H1	*								
H2	312±2.4	25.9±4.4	2.3E04±4.1E03	5.0±0.5	613±12.5	7.9±0.9	2.6E05±4.7E04	14.2±1.0	1.19
IMP 8	353±3.9	26.5±3.9	2.2E04±5.9E03	5.5±0.8	513±69.9	4.1±0.9	4.2E04±1.5E04	7.6±0.9	3.52
V1	348±4.1	1.1±0.1	9.9E03±2.0E03	1.8±0.2	441±9.3	2.2±0.3	3.4E04±3.0E03	1.8±0.4	3.42
V2	331±7.23	1.5±0.3	1.1E04±2.6E03	2.1±0.5	435±3.9	2.6±0.7	2.4E04±2.4E03	2.1±0.5	3.11
Propiedades del choque delantero									
	V_d/V_a	ρ_d/ρ_a	T_d/T_a	B_d/B_a	P_d/P_a	V_d/V_a	ρ_d/ρ_a	T_d/T_a	P_d/P_a
H1	*					N/O			
H2	N/O					N/O			
IMP 8	N/O					N/O			
V1	1.1	1.9	2.8	1.5	2.3	N/O			
V2	1.2	2.4	3.6	2.2	5.5	N/O			

* gap

N/O evento no observado

y el cociente de las presiones dinámicas (P_{Dr}/P_{Dl}), observamos que entre más grande es la presión dinámica de la corriente rápida, la compresión en la parte frontal de la RIC es mayor (los valores de la posición relativa de la IC son más pequeños).

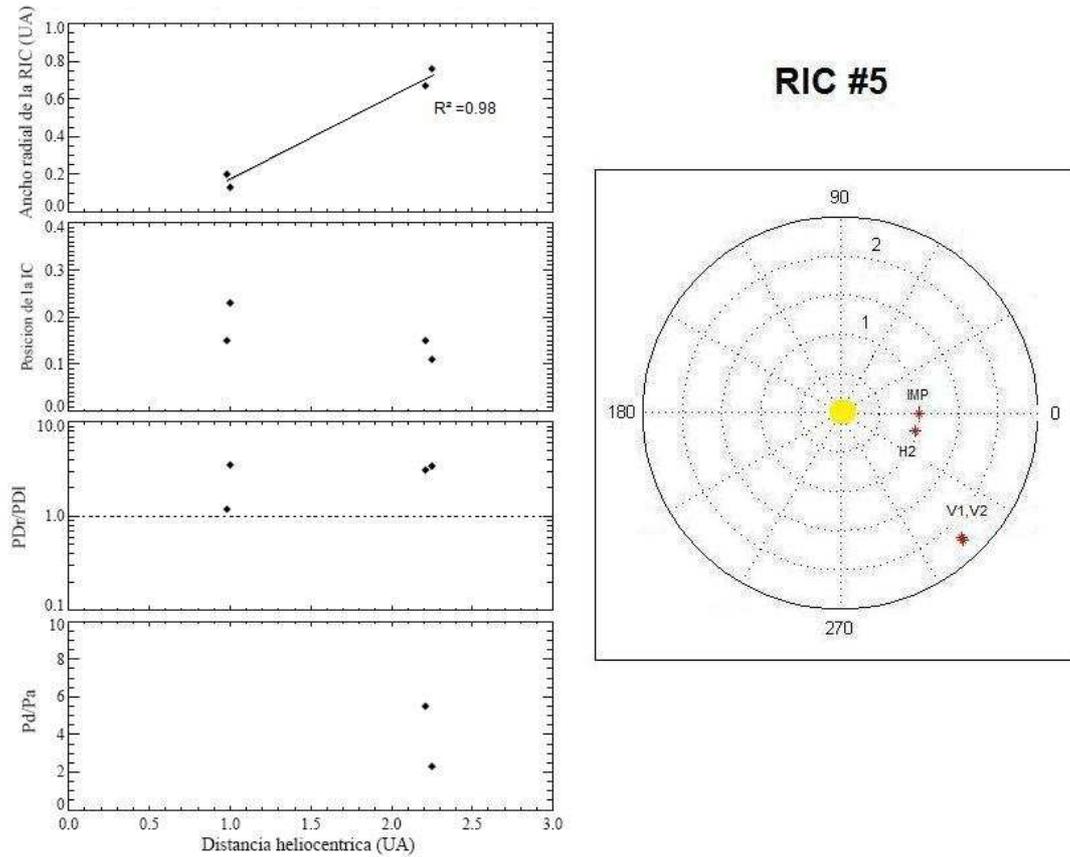


Figura 4.8: Evolución heliocéntrica de la RIC #5.

4.3.1 Discusión

Algo que llama la atención es que en ninguna de las RICS se registraron ambos choques (frontal y reverso), sólo hay un caso en el que se presentó un choque reverso (RIC #3), todos los demás son frontales. Una de las razones debe ser el hecho de que las naves, a excepción de las Voyagers, no estaban más allá de la órbita de la Tierra, por lo que las RIC no estaban completamente desarrolladas (Balogh et al. (1999)). Esto también

debe estar relacionado con la interacción entre las corrientes, entre más intensa haya sido, la onda compresiva se empina más rápido y forma el choque. La intensidad de la interacción puede depender entre otras cosas de la diferencia de velocidad de las corrientes, entre mayor sea esta diferencia más intensa debe ser. En las cinco RICS, la velocidad promedio de la corrientes de viento lento fue de 317 ± 34.4 km/s y la de viento rápido fue de 466.7 ± 87.4 km/s ($\Delta V = 149.7 \pm 121.8$). Comparadas con los valores promedio de las corrientes de viento solar medidos por Ulysses (ver Tabla 1.1 del Capítulo 1), las corrientes rápidas en este periodo de estudio fueron lentas, por lo que generaron una débil interacción. Lo que es típico en la fase ascendente del ciclo solar.

En el caso de las Voyagers, hubo algunas incongruencias en las fechas de registro de los eventos, ya que en ciertas ocasiones alguna de las naves (V1 o V2) a pesar de estar a una mayor distancia registró el evento antes que la otra. Esto nos habla de un frente de propagación no uniforme, que podría deberse a inhomogeneidades locales en el medio interplanetario. Por lo que la transferencia de momento entre las dos corrientes va a tender a variar radial y longitudinalmente.

Las gráficas de la Figura 4.9 muestran la evolución heliocéntrica global de las RICS tomando en cuenta todos los eventos observados por las cinco naves. Los paneles superiores corresponden al ancho radial de las RIC y la posición de la IC, los paneles inferiores muestran las gráficas del cociente de la presión dinámica de las corrientes y la intensidad en presión total de los choques. En esta figura observamos que:

- El ancho radial de la RIC tiende a incrementarse con la distancia heliocéntrica. En las cinco RIC el ancho radial mostró una tendencia a crecer conforme aumentaba la distancia heliocéntrica con una buena correlación lineal ($R^2 > 0.9$); sin embargo, globalmente no se observa una tendencia lineal de crecimiento. Esto debe ser porque la interacción entre las dos corrientes en cada evento fue diferente (distintas características y orígenes de las corrientes) e influyó directamente sobre su evolución heliocéntrica. Además no tenemos un número suficiente de eventos para observar una clara tendencia estadística.
- La posición de la IC en la mayoría de los casos fue menor a 0.5, por lo que las RICS venían más comprimidas al frente de la IC. Su comportamiento no muestra un claro patrón de evolución, ya que en las RIC #1 y #2 la posición de la IC

tiende a aumentar con la distancia heliocéntrica, pero en las RIC #4 y #5 se observó un comportamiento opuesto.

- El cociente de la presión dinámica de las dos corrientes muestra una tendencia a aumentar respecto a la distancia heliocéntrica. Más allá de 1 UA, en la mayoría de los eventos la presión dinámica de la corriente rápida es mayor, por lo que podemos decir que entre 1 y 2 UA la corriente rápida sigue empujando (transfiriendo momento) a la corriente lenta. Sólo dos valores registrados por las Voyagers no siguieron este comportamiento, ambos corresponden a la RIC #4, que como describimos anteriormente fue un evento particularmente débil, en donde la velocidad de la corriente rápida era menor a 400 km/s, por lo que la inercia de la corriente lenta debió frenar a la corriente rápida.
- La intensidad de los choques muestra una tendencia a aumentar con la distancia heliocéntrica, al igual que el número de choques. La mayoría de los choques se registraron más allá de 1 UA, hecho que concuerda con la evolución heliocéntrica que se esperaría en una RIC. Recordemos que al formarse una RIC se generan ondas compresivas. Si la corriente rápida sigue siendo alimentada por el hoyo coronal, aumentará la interacción entre las dos corrientes mientras la RIC avanza en el medio interplanetario. Por lo tanto, las ondas compresivas evolucionarán formando una onda de choque. Este proceso es gradual, por lo que las ondas de choque menos intensas se presentan en la heliosfera interna como se observa en este estudio.

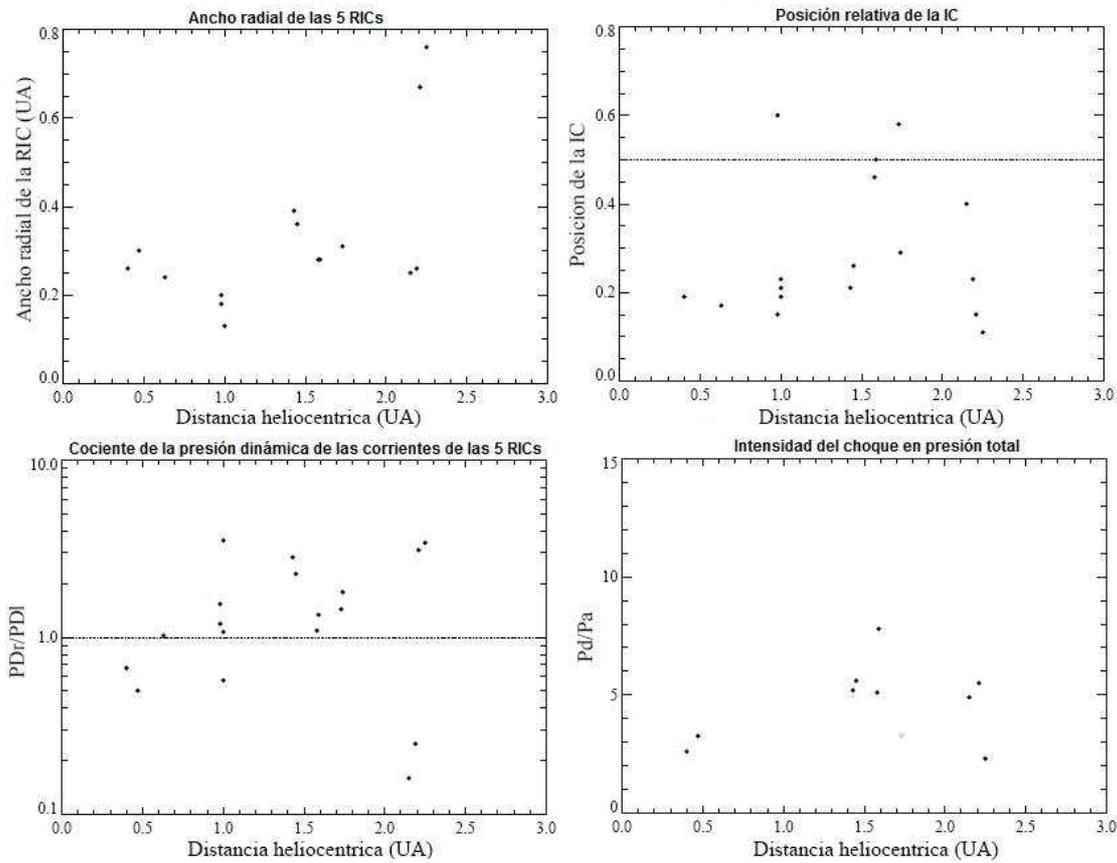


Figura 4.9: Evolución heliocéntrica de las 5 RICS.

Como ya mencionamos en la introducción, González-Esparza (1999), analizó la evolución del ancho radial de 98 RICS con observaciones de Pioneer 10 y 11 (fase descendente del ciclo solar 20), Voyager 1 y 2 (fase ascendente del ciclo solar 21) y Ulysses (fase posterior al máximo del ciclo 22). Su estadística mostró que el ancho radial (W_r) de estas estructuras tiende a aumentar linealmente con la distancia heliocéntrica ($W_r = 0.02 + 0.2R$), con una correlación lineal de 0.7 (esta relación también se cita en el artículo de González-Esparza (2000b)). En este trabajo, tomando los datos de todas las RICS se obtiene que el ancho radial de estas estructuras tiende a aumentar con la distancia heliocéntrica ($W_r = 0.11 + 0.15R$), pero con una correlación lineal muy baja (0.32). Esta discrepancia puede deberse a que el número de eventos que analizamos (18 RICS) es menor comparado con el que analizó González-Esparza (1999) y que este estudio comprende un rango heliocéntrico más cercano al Sol (0.4 UA - 2.5 UA), donde a

penas se están formando estos eventos comparado con el rango heliocéntrico analizado en el otro trabajo (1 UA - 5 UA). Sin embargo, evento por evento se observan tendencias de crecimiento lineal, lo que evidencia la expansión de la RIC con la distancia heliocéntrica.

En estudios como el de Jian et al. (2008), muestran que el número de choques en las RICS se incrementa con la distancia heliocéntrica, tal como se observó en este estudio. Ellos analizaron la evolución de los choques de las RICS de 0.72 a 1 UA y encontraron que el número de choques se incrementa de 3.4 % a 24.1 %. En este intervalo espacial la mayoría de los choques registrados fueron frontales (70 %). Esto también fue observado en las 5 RICS que analizamos. El análisis de la posición relativa de la IC sugiere que este hecho debe estar relacionado con la intensidad de la compresión de las corrientes de viento solar, aunque se requiere de un mayor número de eventos para corroborarlo.

4.4 Análisis de las EMCIs

Igual que en las RICS, las características físicas de las EMCIs se cuantificaron promediando intervalos de datos, en los casos en que la EMCi generó un choque también se cuantificaron los parámetros del choque y el ancho radial de la funda asociada. Los parámetros físicos de los choques (ΔV , Δn , ΔT , ΔB y ΔP_t) se obtuvieron promediando 1 hora de datos antes y después. El ancho radial de la EMCi y la funda se calcularon siguiendo el mismo método de integración numérica que se utilizó para estimar los anchos radiales de las RIC (ver sección 4.3). Se calculó la presión dinámica en la nariz de la eyecta para estudiar la interacción del sistema choque-funda-eyecta.

Como se mencionó en la introducción del capítulo, también analizamos los perfiles de presión total de las EMCIs para discutir su relación con la evolución heliocéntrica. A diferencia del perfil de presión total que caracteriza las RICS, las EMCIs presentan tres tipos de perfiles de presión total que dependen del corte transversal de la nave (Russell et al. (2005), Jian et al. (2006b)) . A continuación describimos estos tres perfiles.

4.4.1 Los perfiles de presión total

1. Perfil del Grupo 1 (G1): El choque y la funda son seguidos por la eyecta, la presión total se incrementa rápidamente en la funda y llega a su máximo en el centro de la eyecta. En los eventos asociados a este grupo se visualiza muy bien la eyecta. La Figura 4.10 a) muestra un ejemplo de EMCi clasificada en el

- grupo 1. Como se puede observar, en los primeros tres paneles se han graficado los cosenos directores del campo magnético, entre las líneas punteadas b y c se observa una clara rotación del campo magnético, en esta región está delimitada la nube magnética. Esta EMCI impulsó un choque observado claramente en el perfil de presión total, aunque no es requisito no necesariamente tiene que ser un choque. Al mismo tiempo se observó el salto en campo magnético, velocidad, densidad y la temperatura. Posteriormente la caída de la beta del plasma, la densidad, la temperatura y la velocidad declinante marcan el comienzo de la nube magnética.
2. Perfil del Grupo 2 (G2): Tienen un rápido incremento en la presión total, aunque igual que en el grupo anterior no necesariamente es un choque. La presión se mantiene constante después de la funda y luego de cierto tiempo retorna nuevamente a la presión que tenía antes del evento. Algunas veces es posible observar la eyecta como en el ejemplo de la Figura 4.10 b), en donde las líneas punteadas la delimitan.
 3. Perfil del Grupo 3 (G3): La presión se eleva rápidamente y posteriormente decrece gradualmente. En la mayoría de los eventos clasificados en este grupo no es posible visualizar la eyecta, aunque la Figura 4.10 c) muestra el registro *in situ* de una EMCI con perfil de presión total G3 en el que se distingue la eyecta, de acuerdo con las firmas descritas en la sección anterior.

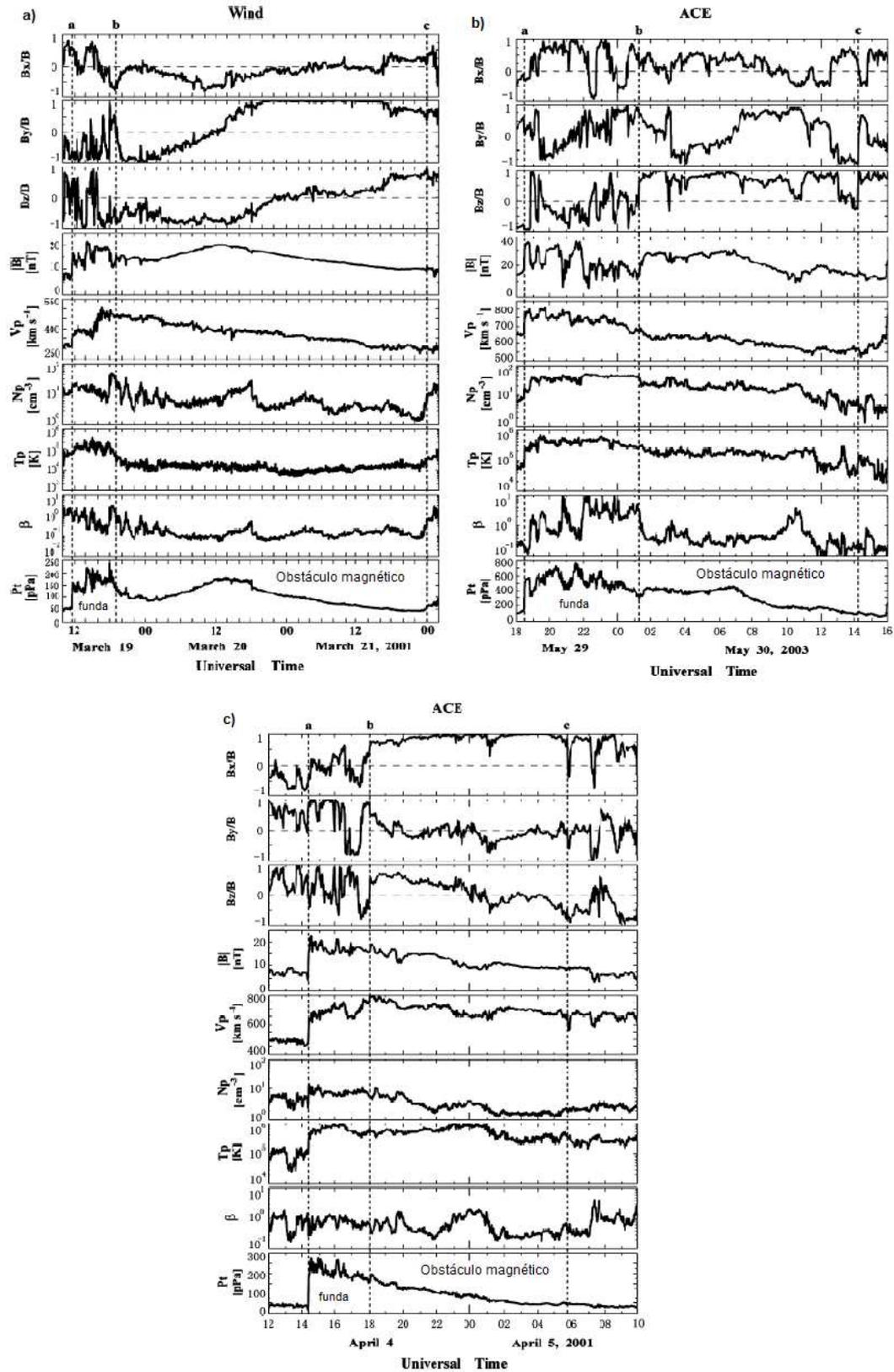


Figura 4.10: Ejemplos de los tres perfiles de presión total de las EMCIs. Las líneas punteadas a, b y c muestran el inicio del evento, el final de la funda y el final de la eyecta, respectivamente. Adaptada de Jian et al. (2006b).

De acuerdo con el artículo de Jian et al. (2006b), el perfil de presión total de cada grupo depende del lugar por donde cruza la nave, es decir, si atraviesa el centro, a un lado o en los bordes de la EMCI. En el caso del G1, la nave está cruzando por el centro de la EMCI, por eso se aprecia muy bien la funda y eyecta. En los eventos del G2 la nave no cruza exactamente por el centro por eso no siempre es posible ver la eyecta. Como ya se mencionó, para la mayoría de los eventos del G3 no es posible ver la eyecta, esto es porque la nave está pasando lejos del centro de la EMCI. La Figura 4.11 muestra un bosquejo de la eyecta, la funda, la onda de choque y las tres regiones de corte asociadas con los perfiles de presión total.

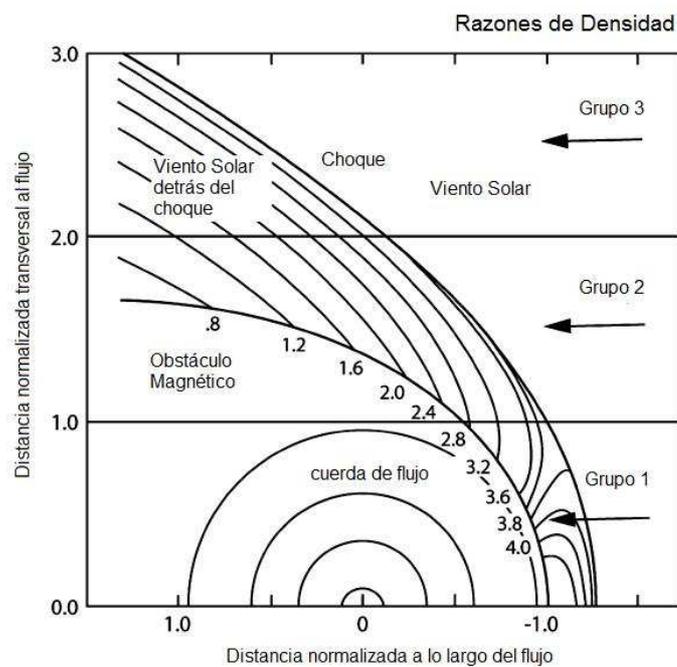


Figura 4.11: Bosquejo de las sección transversal de una EMCI. La figura está dividida en tres secciones que corresponden al área comprendida por cada uno de perfiles de presión total (tomada de Jian et al. (2006b)).

Las Tablas 4.6 y 4.7 muestran los valores promedio de las características físicas de las 7 EMCIs. Las columnas corresponden a: la nave, la fecha de inicio del evento, el ancho

radial del evento, el ancho radial de la funda, el cociente de la presión dinámica en la nariz de la eyecta, esto es, el cociente de la presión dinámica promedio registrada después (P_{D_d}) y antes (P_{D_a}) del paso de la eyecta, y los parámetros del choque, la intensidad del salto en: velocidad (V_d/V_a), densidad (ρ_d/ρ_a), temperatura (T_d/T_a), campo magnético (B_d/B_a) y presión total (P_d/P_a). Con base en este conjunto de tablas a continuación se describen las características de las EMCIs.

Para estudiar la evolución heliocéntrica de las EMCIs hemos analizado la variación del ancho radial de la EMCI y la funda, la presión dinámica en la nariz de la eyecta y la intensidad de los choques respecto a la distancia heliocéntrica. Con este fin, se graficaron estos cuatro parámetros para cada evento y se muestran en las Figuras 4.10 a 4.13. Sólo analizamos cuatro eventos: la EMCI #1, la EMCI #3, la EMCI #5 y la EMCI #7, debido a que en los otros eventos no se visualizó la eyecta debido principalmente a los gaps. Igual que en el caso de las RICs para el ajuste lineal no contemplamos los valores asociados a eventos que presentaron gaps.

EMCI #1

El evento fue detectado por H2, IMP, V1 y V2. H1, que se encontraba 30° hacia el Este de H2 no registró el evento, por lo que proponemos que dicho evento debió originarse en una región hacia el Oeste de la línea Sol-Tierra. Esta EMCI impulsó un choque transitorio registrado por las cuatro naves, a excepción de la V2 que presentó un gap al inicio del evento.

En H2, el evento principió con un choque poco intenso ($P_d/P_a = 3.2$), de baja compresión ($\rho_d/\rho_a=1.8$). Las gráficas de densidad y temperatura variaron mucho, por lo cual no identificamos firma de eyecta, aunque guiándonos por las rotaciones en las componentes del campo magnético ubicamos el comienzo de la nube magnética el 24 de noviembre a las 0 horas. De acuerdo con la clasificación de los perfiles de presión total mostrada en la sección anterior, este evento entra dentro del G1, aunque es un poco confuso ya que el comportamiento fluctuante de la densidad y la temperatura no precisan el paso de la eyecta.

La V1 muestra un choque transitorio bien definido con una intensidad de 4.2, V2 no registró este choque a causa de un gap. No es claro donde comienza la eyecta en el registro de V1, pero la firma de β y las rotaciones de campo magnético sugieren que sí atravesó, su perfil de P_t se ha clasificado en el G2. En el caso de V2, el evento presenta

múltiples gaps a lo largo de su estructura por lo que no podemos establecer con certeza el perfil de P_t , sin embargo lo hemos clasificado en el G3.

La Figura 4.12 muestra la evolución heliocéntrica de la EMCI #1. Podemos observar que el ancho radial de la EMCI muestra una tendencia a aumentar con la distancia heliocéntrica, mostrando una buena correlación lineal. En este ajuste no se consideró el valor de V2 por presentar gaps. En el caso del ancho radial de la funda y la presión dinámica en la nariz de la eyecta sólo tenemos dos valores y no podemos indagar nada acerca de su evolución heliocéntrica.

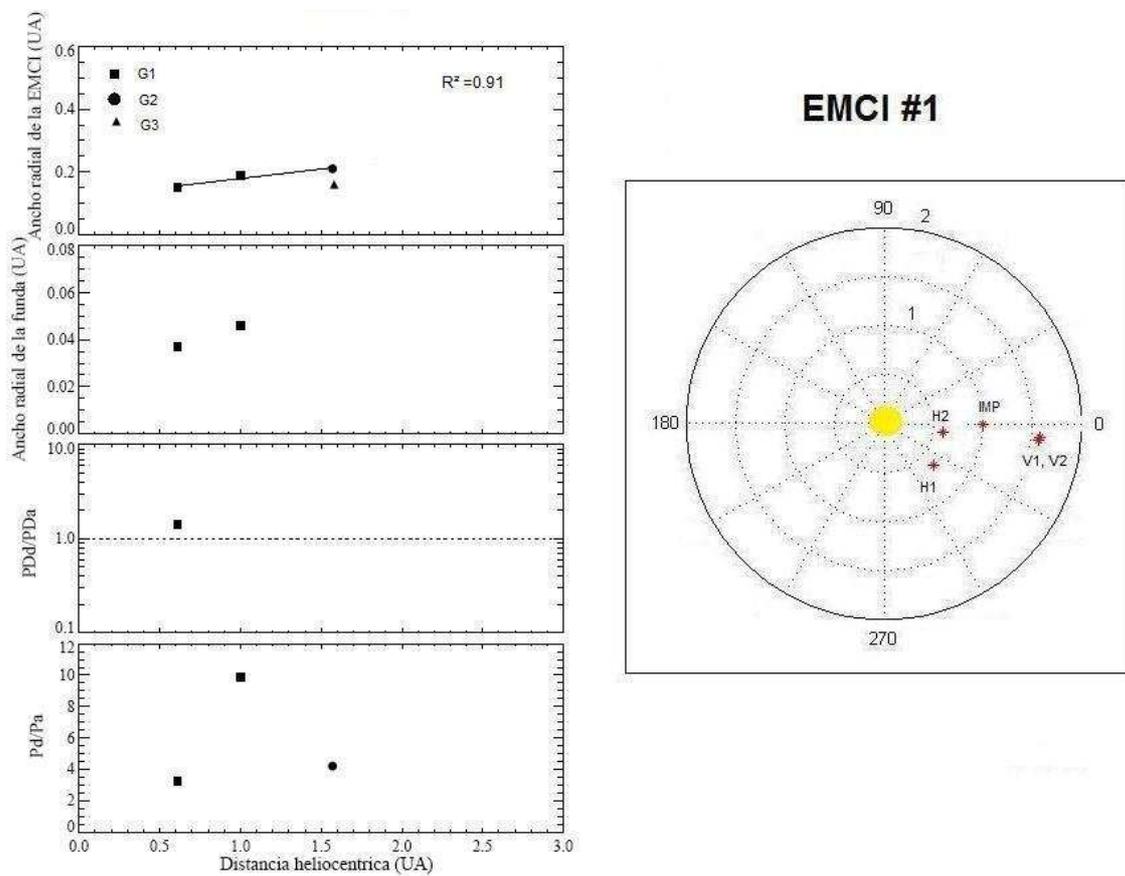


Figura 4.12: Evolución heliocéntrica del ancho radial de la EMCI #1. Las gráficas del lado izquierdo corresponden a el ancho radial de la EMCI, el ancho radial de la funda, el cociente de las presiones dinámicas en la nariz de la eyecta y la intensidad en presión total del choque. En el ajuste del ancho radial de la EMCI no se tomó en cuenta el valor de V2 por presentar un gap. El esquema del lado derecho muestra la posición de las naves durante el registro del evento.

EMCI #2

El evento fue registrado por 3 naves: H2, IMP 8 y V1. A pesar de que las tres naves tenían separaciones angulares semejantes, sólo H2 y V1 observaron el choque transitorio.

La estructura de este evento es confusa, las fronteras no se delimitan bien, ni el paso de la eyecta, por lo que no se pudo determinar el ancho radial de la funda y la presión dinámica en la nariz de la eyecta. Por esta razón decidimos no considerar este evento del análisis.

EMCI #3

El evento fue registrado por las 5 naves, aunque IMP 8 presentó un gran gap en los datos de plasma y no fue posible identificar la estructura del evento.

En H1 el evento comienza con un choque transitorio de intensidad $P_d/P_a = 2.9$, posteriormente atraviesa la funda con una duración aproximada de 8 horas. Se observa un claro cruce de la eyecta, en donde la beta es muy baja, la densidad y la temperatura decrecen y el factor de temperatura (T_p/T_{ex}) es menor a 1. Su perfil de P_t pertenece al G3.

H2 observó un choque más intenso que H1 ($P_d/P_a = 3.2$), generado por una mayor compresión del viento solar ($\rho_d/\rho_a=2.1$), esto se observa claramente en la gráfica de presión total (ver Figura 3.6 del Capítulo 3). Como resultado de esta compresión, la funda fue más pequeña con una duración aproximada de 5 horas. Las firmas indican el paso de la eyecta, pero debido a un gap de 12 horas no es posible determinar el fin de la eyecta. Después del evento la temperatura no aumenta y la densidad se mantiene baja, esto implica que detrás venía una zona de rarefacción. El perfil de P_t de este evento se ha clasificado dentro del grupo G3, debido a su decrecimiento gradual a partir de que la nave cruza la eyecta, sugiriendo que atravesó por uno de los costados.

V1 registró un choque similar a H2. Alrededor de las 6 horas del 4 de diciembre las componentes del campo magnético presentan rotaciones, lo que indica el paso de la cuerda de flujo de la eyecta (nube magnética).

En V2 el evento comienza con un choque intenso ($P_d/P_a = 8.3$). No se observa el paso de la eyecta y su perfil de P_t entra dentro del G3. Hay una discrepancia en la hora de registro del evento, ya que V2 registró el evento 2 horas antes que V1, a pesar de estar más alejada del Sol. Esto nuevamente nos sugiere que hay inhomogeneidades locales en el frente de propagación.

En la EMCI #3 (Figura 4.13) se observa que el ancho radial tiende a incrementarse

con la distancia heliocéntrica aunque no de manera lineal, ya que su correlación no es buena ($R^2 = 0.32$). El tamaño de la funda también se incrementó con la distancia heliocéntrica, este efecto podría implicar que el choque se está separando de la eyecta o que la eyecta está acumulando más material en la funda. En el ajuste lineal del ancho radial de la funda no se tomó en cuenta el valor de H2 por presentar un gap.

Las características de las EMCIs van a depender fuertemente de la posición longitudinal de las naves, en este caso podemos pensar que H2, V1 y V2 al tener posiciones angulares semejantes (lado derecho de la Figura 4.13) y el mismo perfil de P_t (G3) atravesaron la EMCI aproximadamente por el mismo lugar, por lo tanto si podemos hablar de un incremento radial de la funda. El cociente de las presiones dinámicas en la nariz de la eyecta fue menor a 1, esto implica que la presión dinámica era mayor en la funda, lo que apoya a la teoría de que el choque se estaba separando de la eyecta. La intensidad del choque transitorio aumentó al pasar de 0.7 a 1.6 UA.

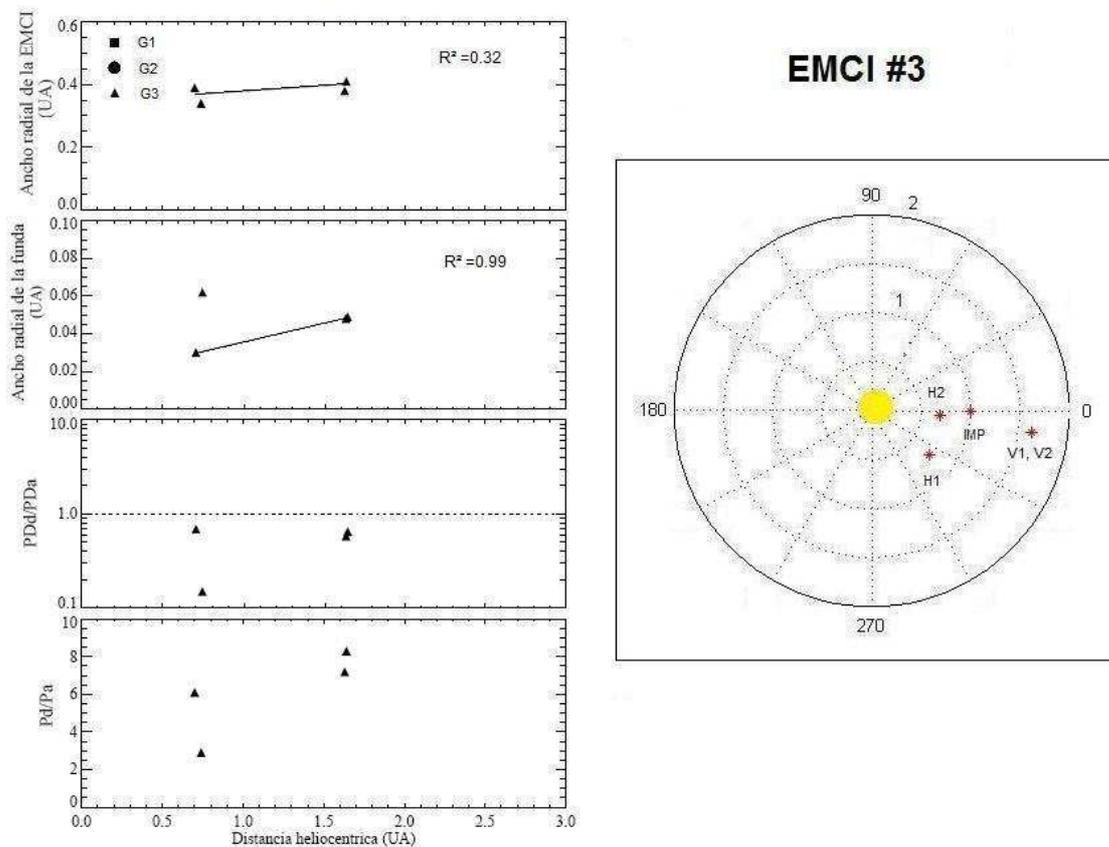


Figura 4.13: Evolución heliocéntrica del ancho radial de la EMCI #3. En el ajuste lineal de la posición de la IC no se tomó en cuenta el valor de H1 por presentar un gap.

EMCI #4

Este evento sólo fue registrado por 2 naves, H1 y V1. A pesar de que V2 estaba muy cerca de V1, no se pudo identificar el evento debido a un gap. El registro de H1 presentó un gap de 12 horas justo a la mitad del evento, por lo que no fue posible distinguir con claridad el comienzo de la eyecta y no fue posible clasificar su perfil de presión total. Este evento es seguido por otro, por lo que el viento solar sigue perturbado y no se ve exactamente donde acaba. V1 presentó un choque transitorio poco intenso ($P_d/P_a = 2.3$), pero no se observa firma de eyecta. Su perfil de presión total corresponde al G3.

De acuerdo a las posiciones que tenían las naves, podemos proponer que el evento

se originó en una región del lado Este con respecto a la línea Sol-Tierra, ya que el IMP 8 y la H2 que se encontraban cerca de los 0° no lo registraron.

El evento en H1 y V1 presentó varios gaps y no pudimos calcular la presión dinámica en la nariz de la eyecta, por lo tanto este evento no se incorporó en el análisis.

EMCI #5

Este evento fue registrado por las 5 naves. H1 registró dos choques, pero la razón no es muy clara debido a que las otras naves sólo presentaron uno. El primer choque es mucho menos intenso que el segundo ($P_d/P_a = 2.0 < P_d/P_a = 6.8$). Una posible explicación es que el primer choque por ser más débil se fusionó con el segundo (superposición de choques), por lo cual no fue registrado por las otras naves. Evidencia de esto, es presentada en el artículo de Russell et al. (2009), en donde analizan la fusión de los choques interplanetarios de las RIC registrados por STEREO a 1 UA. De las gráficas de temperatura, densidad, beta y el factor de temperatura (T_p/T_{ex}), se identifica el paso de la eyecta el 3 enero a las 13 horas, pero dado que su firma de P_t está clasificada dentro del G3, puede ser que la nave no cruzó por el centro de la eyecta.

El evento en H2 es confuso debido a un gap en los datos de campo magnético, justo antes finalizar la funda. Las gráficas de densidad y temperatura en las primeras 12 horas del evento muestran la firma de una IC, por lo cual podemos sugerir que la nave cruzó dos eventos, una RIC seguida por una EMCI.

El registro del evento en el IMP 8 tiene muchos gaps, pero su inicio se identifica claramente por un choque muy marcado en las gráficas de presión total, velocidad y campo magnético, cuya intensidad fue de $P_d/P_a=5.7$. Debido a los gaps, no es posible establecer donde termina la funda o si la eyecta atraviesa el evento. Por su cercanía angular y radial a H2, sugerimos que esta nave también debió observar la RIC, pero desafortunadamente los gaps no nos permitieron corroborar este hecho.

En las gráficas del V1 hay un gap al inicio del evento y no observó un choque, aunque como V2 si lo registró acordamos que si hubo choque. De acuerdo con la gráfica de la densidad, temperatura y beta, la funda termina el 6 de enero a las 14:00 horas, teniendo así una duración de aproximadamente 16 horas, lo que es un poco desconcertante dado que el tamaño total del evento se redujo $\sim 20\%$ al moverse de 1 UA a 1.97 UA. Su perfil de P_t entra dentro del G3.

El evento en V2 presentó un choque intenso ($P_d/P_a=3.7$). Las gráficas del evento no muestran firmas de eyecta y su perfil de presión total se clasificó dentro del G3.

La evolución heliocéntrica de la EMCI #5 es mostrada en la Figura 4.14. El ancho radial de evento, a diferencia de los casos anteriores, exhibe un comportamiento decreciente con la distancia heliocéntrica. En el ajuste lineal no tomamos en cuenta el valor de V1 por presentar un gap al inicio del evento. El tamaño de la funda aumenta al pasar de 0.95 a 1.97 UA, apoyando nuevamente la hipótesis del desacoplamiento del choque, aunque en este caso sólo H1 y V1 tienen el mismo perfil de presión total (G3). Debemos aclarar que H2 registró una pequeña RIC al frente de la eyecta, por lo cual no pudimos determinar donde estaba la funda, pero el perfil de P_t de la eyecta lo clasificamos en el G2.

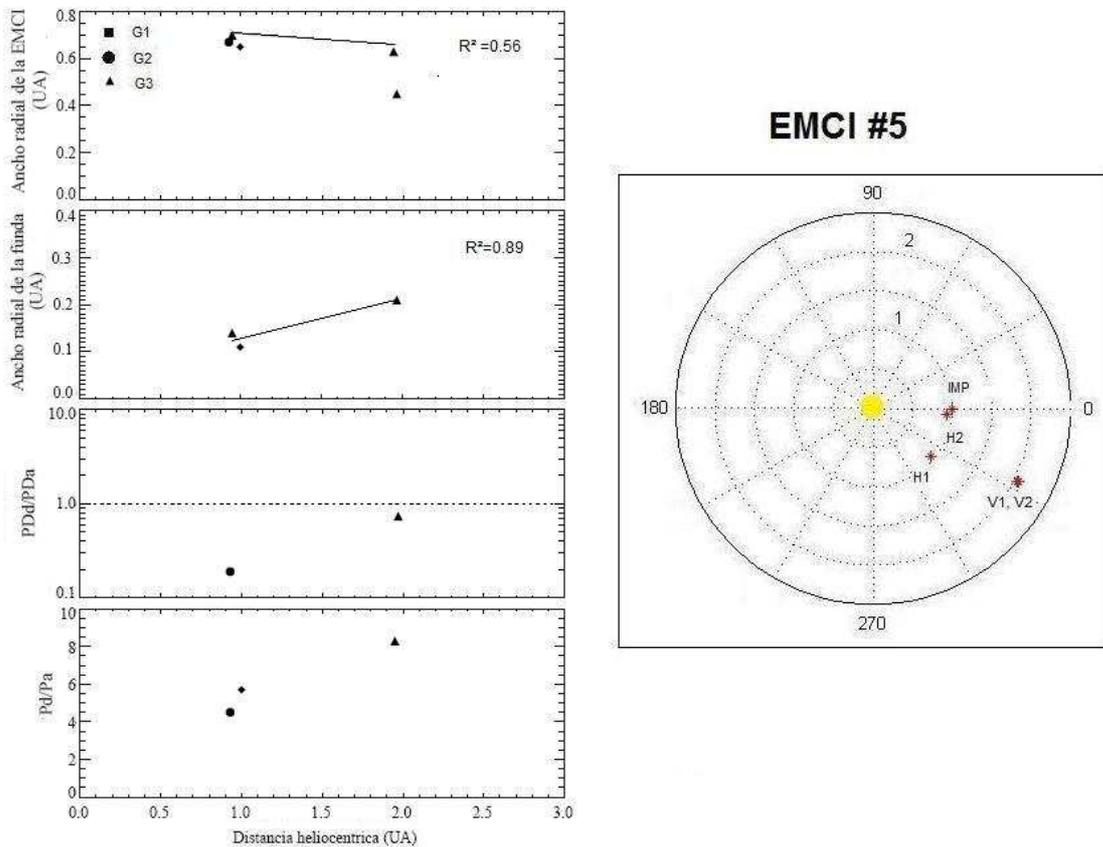


Figura 4.14: Evolución heliocéntrica del ancho radial de la EMCI #5. En el ajuste lineal del ancho radial de la EMCI no se tomó en cuenta el valor de V1 por presentar gaps.

EMCI #6

Este evento fue registrado sólo por H2. Las naves H1 e IMP 8 no registraron el evento debido a gaps. Al inicio del evento se presentó un choque intenso ($P_d/P_a=3.6$). En las gráficas de densidad y temperatura no se observa firma de eyecta y de acuerdo con la estructura del perfil de presión total se ha clasificado en el G3.

Las Voyagers se encontraban a 30° hacia el Este de H2, esto significa que la EMCI provino de una región central, ya que H2, que se encontraba a 353° , no cruzó la eyecta.

Como sólo tenemos el registro del evento en una nave, este evento tampoco fue tomado en cuenta en el análisis.

EMCI #7

La EMCI 7 fue registrada por tres naves, H1, H2 y V2. La EMCI impulsó una onda choque registrada por las tres naves. En H1, el choque tuvo una compresión de $\rho_d/\rho_a=2.6$ y una intensidad de $P_d/P_a=4.3$. El perfil de presión total entra dentro del G2. La funda duró aproximadamente 12 horas.

El evento en H2 (ver Figura 3.7 del Capítulo 3), comienza con un choque transitorio muy intenso ($P_d/P_a=8.3$). La funda que registró esta nave duró aproximadamente 7 horas, posteriormente se registró una pequeña eyecta. Su perfil de presión total entra dentro del G2. La nave cruzó parte de la eyecta y la cuerda de flujo, pero pasó por uno de los costados de la eyecta.

V2 registró un choque transitorio de intensidad $P_d/P_a=3.7$. El evento en esta nave presentó varios gaps, por lo que no se observa la eyecta y el perfil de presión total no se puede clasificar.

En la Figura 4.15, se observa que el ancho radial tiende a aumentar con la distancia heliocéntrica, el ajuste lineal fue perfecto debido a que H1 y H2 que se encontraban a la misma distancia registraron el mismo ancho radial, esto concuerda con el hecho de que en ambas el perfil de presión total es G2. Nuevamente observamos un crecimiento del ancho radial de la funda conforme aumenta la distancia heliocéntrica, dado que los perfiles de presión total de las tres naves pertenecen al mismo grupo (G2) proponemos como hipótesis que este efecto es resultado de una separación del choque y la eyecta.

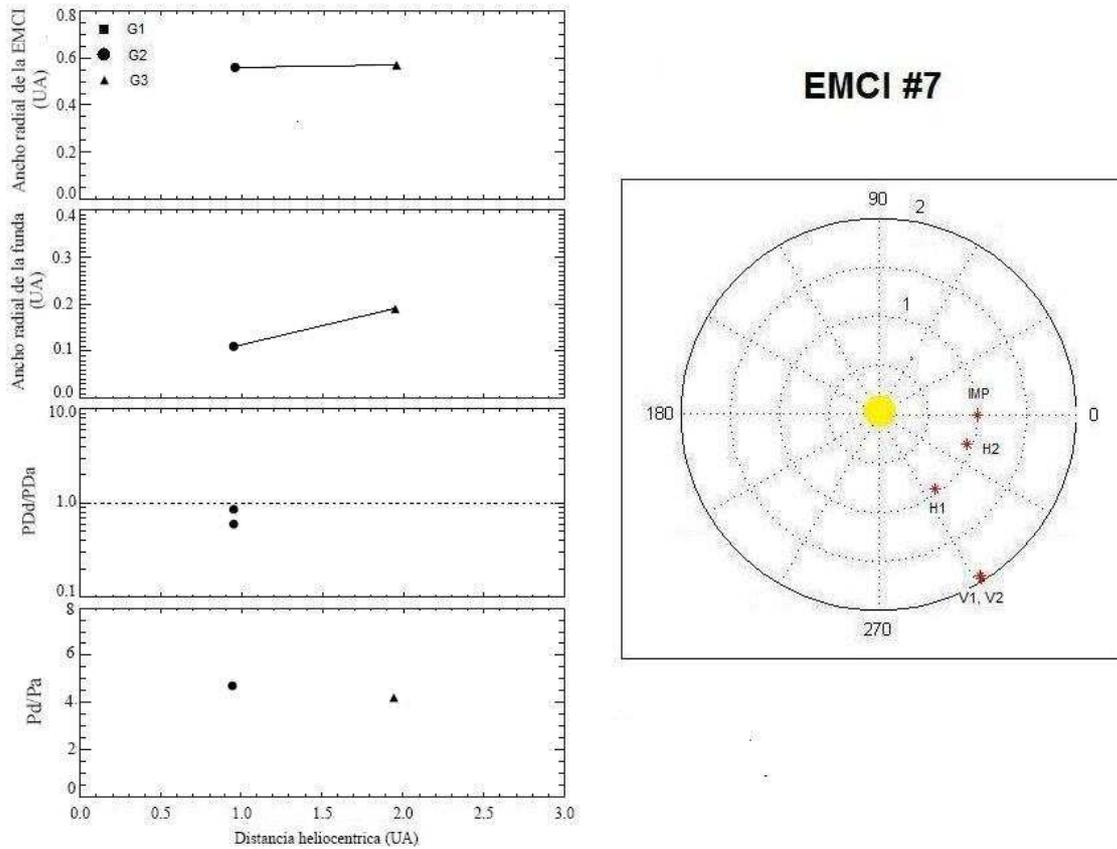


Figura 4.15: Evolución heliocéntrica del ancho radial de la EMCI #7.

4.4.2 Discusión

La Figura 4.16 muestra las gráficas globales de las EMCIs combinando los datos de las 4 EMCIs analizadas en la sección anterior. Los paneles superiores corresponden a las gráficas del ancho radial de la EMCI (izquierdo) y la funda (derecho), los paneles inferiores muestran las gráficas del cociente de las presiones dinámicas en la nariz de la eyecta (izquierdo) y la intensidad en presión total del choque (derecho). De estas gráficas observamos que:

Tabla 4.7: Valores promedio de las características físicas de la EMC #5, EMCI #6 y EMCI #7.

Naves	Inicio (día/mes/hora)	Posición	Ancho de la EMCI (UA)	Tamaño de la funda	P_D en la nariz de la eyecta (P_{D_d}/P_{D_a})	Grupo	Propiedades del choque				
							V_d/V_a	ρ_d/ρ_a	T_d/T_a	B_d/B_a	P_d/P_a
EMCI #5											
H1	2/ene/01:41 3/ene/08:34	0.95 UA ; 320°	0.70	0.14	*	3	1.2 3.1	1.4 1.4	2.1 4.9	1.9 2.6	3.3 10.7
H2	3/ene/14:50	0.93 UA ; 355°	0.67	*	0.19	2	1.2	2.4	1.9	2.3	4.5
IMP 8	3/ene/20:35	1.0 UA ; 0°	0.65	0.11*	*	*	1.2	1.4	1.4	2.7	5.7
V1	5/ene/22:00*	1.97 UA ; 333°	0.45*	0.21*	0.74	3	*	*	*	*	*
V2	6/ene/00:00	1.95 UA ; 333°	0.63		N/O	3	1.3	2.2	5.4	2.8	8.3
EMCI #6											
H1	*	0.95 UA ; 320°									
H2	9/ene/20:00	0.96 UA ; 353°	0.36	0.072	N/O	3	1.2	2.0	2.2	1.8	3.5
IMP 8	*	1.0 UA ; 0°									
V1	N/O	2.06 UA ; 327°									
V2	N/O	2.04 UA ; 327°									
EMCI #7											
H1	15/feb/01:11	0.95 UA ; 307°	0.56	0.11	0.86	2	1.3	2.6	1.91	2.0	4.7
H2	15/feb/02:01	0.95 UA ; 341°	0.56	0.11	0.60	2	1.6	3.2	13.3	2.6	14
IMP 8	*	1.0 UA ; 0°									
V1	*	1.97 UA ; 302°									
V2	19/feb/14:43	1.95 UA ; 302°	0.57	0.19	*	3*	1.1	1.9	2.1	1.9	4.2

- El ancho radial de los eventos muestra una tendencia a aumentar conforme la distancia heliocéntrica, aunque no se observa una tendencia lineal de crecimiento. Individualmente, tres de los cuatro eventos analizados sustentan este comportamiento.
- No hay una clara dependencia entre los perfiles de presión total y la evolución heliocéntrica de los eventos. Esperábamos observar que los perfiles de presión total del G1 y G2 presentaran los mayores anchos radiales por el cruce que hacen las naves (ver Figura 4.11), sin embargo vemos una mezcla entre los perfiles G2 y G3. Probablemente este análisis requiere de un mayor número de mediciones (más eventos) hechas a diferentes posiciones angulares, para tener los 3 tipos de perfiles a diferentes distancias heliocéntricas y de esta forma comparar los anchos radiales registrados.
- El ancho radial de la funda se incrementa con la distancia heliocéntrica. Proponemos que este comportamiento está relacionado con el desacoplamiento del choque y la eyecta, ya que sabemos que la eyecta es el motor que impulsa el choque. Por lo tanto, cuando a este motor se le acaba la energía, la eyecta comienza a frenarse despegándose del choque por lo que la funda aumenta de tamaño. En este caso los perfiles del G3 están asociados con los mayores anchos radiales, lo cual concuerda con el cruce de las naves, ya que el G3 debe cruzar por uno de los costados de la EMCIS donde la funda es más ancha que en la nariz de la eyecta (ver Figura 1.17 del Capítulo 1).
- El cociente de la presión dinámica en la nariz de la eyecta en la mayoría de los casos fue menor a 1, indicando que la presión dinámica de la funda era mayor que en la eyecta. Sin embargo, con esta relación no podemos indagar mucho acerca de cómo es la transferencia de momento en el sistema eyecta-funda-choque para corroborar el desacoplamiento del choque, ya que el valor de la presión dinámica no sólo depende de la velocidad, sino también de la densidad. En la eyecta la densidad es muy baja a consecuencia de la expansión que está sufriendo, y en la funda la densidad es muy alta por la compresión del choque, por lo tanto la comparación entre las presiones dinámicas en la nariz de la eyecta puede ser ambigua y no podemos concluir mucho de su comportamiento heliocéntrico.

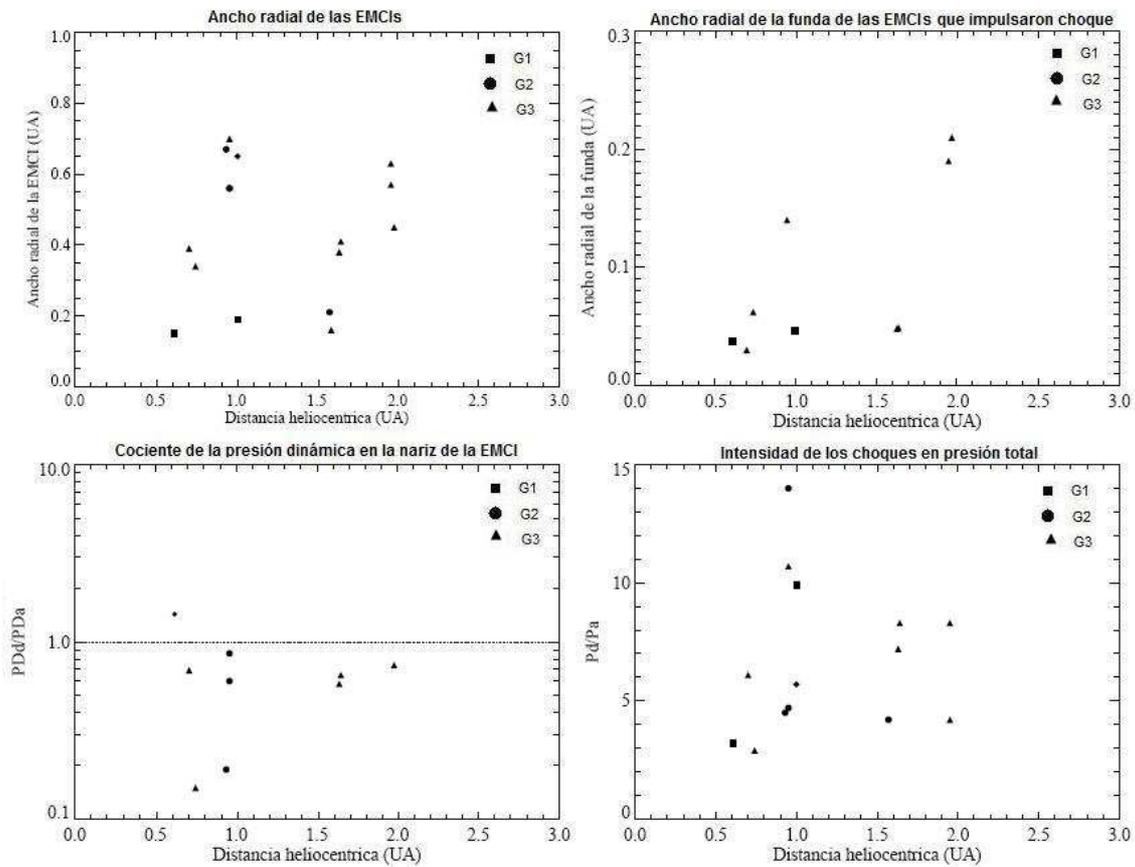


Figura 4.16: Evolución heliocéntrica de las EMCIs.

Tomando todos los eventos de EMCIs de este estudio, no se encuentra una clara tendencia de crecimiento del ancho radial de estos eventos, la gráfica presenta una dispersión muy grande. Esto concuerda con los resultados de González-Esparza et al. (1998), quienes encontraron que el ancho radial de las EMCIs observadas por Ulysses de 1 a 5 UA, no muestran una clara tendencia de crecimiento con la distancia heliocéntrica. Este resultado no es sorprendente ya que, como se vio en la descripción de los perfiles de presión (ver Figura 4.10), el ancho radial de una EMCI depende de la posición relativa del corte radial de la nave a través del evento. Por otro lado, la forma y el tamaño de una EMCI se modifica localmente por las inhomogeneidades del viento solar a través de las cuales se está propagando. El mayor ancho radial de una EMCI reportada por González-Esparza et al. (1998) fue de ~ 1.55 UA a 2.5 UA. En este estudio, el mayor

ancho radial de una EMCI fue detectada por Helios 2 a 0.93 UA midiendo 0.67 UA. El hecho de que los anchos radiales de las EMCIS de este trabajo sean menores no es de sorprender ya que el otro trabajo abarcó un mayor rango de distancias heliocéntricas.

Desafortunadamente no encontramos un número suficiente de perfiles de P_t de los tres grupos (G1, G2, G3), de hecho sólo hay un evento con perfil G1, como para hacer un análisis estadístico que nos diga cómo se relaciona el cruce de la nave a través de la EMCI con la forma del perfil de presión total, y corroborar estudios similares como los de Jian et al. (2006b, 2008) y Jian, 2008.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo a futuro

El análisis de eventos de gran escala presentado en esta tesis tuvo como objetivo estudiar la evolución heliocéntrica de las RICs y las EMCIs usando las mediciones simultáneas de cinco naves: Helios 1, Helios 2, IMP 8, Voyager 1 y Voyager 2. El periodo de estudio está comprendido dentro de la fase ascendente del ciclo solar 21 (noviembre de 1977 a febrero de 1978). En este periodo identificamos un conjunto de 12 eventos de gran escala: 5 RICs y 7 EMCIs.

La identificación de los eventos presentada en el Capítulo 3, partió de la construcción de gráficas de la velocidad y la presión total de las corrientes de viento solar que registraron las naves durante los 4 meses de estudio (Figura 3.1 y 3.2). Los perfiles de presión total permiten identificar las ondas de choque y RICs. La gráfica de los patrones de velocidad de las corrientes de viento solar fue muy importante para la identificación de los eventos, ya que la estabilidad de este parámetro nos permite identificar las mismas estructuras en las 5 naves. Los patrones de velocidad de las corrientes de viento solar durante este periodo muestran que las corrientes rápidas en realidad tuvieron bajas velocidades ($< 600\text{km/s}$) y poca duración. Esto concuerda con lo que esperábamos observar en la fase ascente del ciclo solar, ya que es un periodo en donde los hoyos coronales son más pequeños y de menor duración comparados con el mínimo. Este hecho también se corrobora en los mapas de gran escala del Capítulo 4 (Figura 4.1 y 4.2), en donde se observa que los sectores magnéticos fueron muy irregulares y no presentan periodicidad como en el mínimo solar.

Para estudiar la evolución heliocéntrica de las RICs, analizamos cómo varía: el ancho radial, la posición relativa de la IC dentro de la RIC, el cociente de la presión dinámica entre la corriente rápida y la corriente lenta, y la intensidad del salto en presión total de los choques, de cada evento con la distancia heliocéntrica (Figuras 4.4 a 4.8). Con el

análisis de las 5 RICs determinamos las siguientes características:

1. El ancho radial de las RICs mostró una tendencia a aumentar con la distancia heliocéntrica. Tal como lo sugieren la teoría y los modelos (Capítulo 1), estas estructuras de gran escala se expanden conforme se alejan del Sol debido a la evolución de la interacción entre las dos corrientes. Sin embargo, el análisis global de los eventos (Figura 4.9) muestra una gran dispersión y esto se explica porque la interacción entre las dos corrientes que producen la RIC es diferente en cada nave y no tenemos el suficiente número de eventos como para que aparezca una clara tendencia estadística.
2. La posición relativa de la IC mostró una tendencia a desplazarse hacia el centro de la RIC. Cerca del Sol el frente de la RIC venía más comprimido y conforme la distancia heliocéntrica aumentó la IC se desplazó hacia el centro. Sólo hubo dos casos en donde la posición relativa de la IC fue mayor a 0.5 (sugiriendo que la corriente rápida sufría una mayor compresión), uno de ellos corresponde a la RIC #3 que fue el único evento que presentó choque reverso. Esto concuerda con el hecho físico de que al estar la corriente rápida más comprimida, la onda de presión se empujó más rápidamente para formar la onda de choque.
3. La comparación entre la presión dinámica de las dos corrientes que generaron la RIC mostró una tendencia clara en la que la mayoría de los casos fue mayor a 1, indicando que la presión dinámica de la corriente rápida fue mayor. Este parámetro es importante para determinar el origen y la evolución del evento; sin embargo, en un par de eventos, las naves registraron cocientes menores a 1 (\Rightarrow la presión dinámica de la corriente lenta es mayor). Este resultado requiere de un estudio a futuro en donde se analice la estructura tridimensional de la IC.
4. Tal como esperábamos, las Voyagers registraron un mayor número de choques y fueron más intensos que en las Helios, debido a que se encontraban más allá de la órbita de la Tierra. En el Capítulo 1 mencionamos que por lo general las ondas de choque que delimitan las RIC se forman más allá de 1 UA, debido a que su desarrollo es progresivo conforme avanzan en el medio interplanetario.

En el caso de las EMCIs, analizamos la variación del ancho radial de la EMCI y la funda, el cociente de la presión dinámica en la nariz de la eyecta, y la intensidad del

brinco en presión total de los choques. El análisis de los cuatro eventos presentados en el Capítulo 4 arrojó los siguientes resultados:

1. El tamaño radial de las EMCIs tiende a aumentar con la distancia heliocéntrica. Esto es a consecuencia de la expansión que sufre la EMCI cuando viaja en el medio interplanetario. Sin embargo, la interpretación de este resultado está ligado a la perspectiva de observación de la nave (posición longitudinal), ya que no es lo mismo que la nave cruce la EMCI por el centro a que la cruce por un costado. Esto en principio debe relacionarse con el grupo del perfil de presión total (sección 4.4.1 del Capítulo 4); sin embargo, sólo identificamos dos eventos con perfil G1 y no se pudo establecer una relación clara entre los perfiles de presión total y la evolución del ancho radial del evento.
2. El ancho radial de la funda tiende a crecer conforme aumenta la distancia heliocéntrica. Sin embargo, tenemos un problema similar al resultado anterior donde no tenemos un número suficiente de eventos con todos los perfiles de presión total para conocer las diferencias de la evolución del ancho radial en cada perfil. En los eventos donde las naves estaban alineadas y detectaron el mismo tipo de perfil, también se observó el crecimiento de la funda, hecho que está relacionado con el desacoplamiento del choque. Pero para corroborar este resultado necesitamos analizar en un trabajo a futuro la transferencia del flujo de momento del sistema eyecta-funda-choque.

El estudio de los 12 eventos detectados por las cinco naves proporcionó una base de datos para desarrollar un trabajo a futuro en donde se van a investigar los siguientes aspectos:

- Propiedades físicas de la IC, a partir del análisis de las características de las corrientes rápida y lenta comprimidas.
- Estructura tridimensional de las RICs, en base al análisis de la inclinación de la IC y la configuración de la HCH. Aplicando el análisis de mínima varianza a las componentes de la velocidad en ambos lados de la IC es posible determinar su geometría (González-Esparza (1999)).

- Comparar las RICs de este estudio con otros eventos detectados en otras fases del ciclo solar (González-Esparza y Smith (1996))
- Estructura tridimensional de las EMCIs.
- Propiedades de los ondas de choque empleando las ecuaciones de Rankine - Hugoniot. Comparación con simulaciones numéricas.
- Transferencia del flujo de momento del sistema eyecta-funda-choque, analizando el tensor de esfuerzos.
- Origen solar de los eventos, buscando en las listas de fulguraciones y EMC posibles coincidencias con las fechas de los eventos. En este punto se requiere el análisis de mapas sinópticos para cotejar la polaridad de la región activa donde se generó la fulguración o EMC con las que se presentan en los mapas de gran escala de las Figuras 4.1 y 4.2 del Capítulo 4.

Apéndice A

La presión del viento solar

Sobre la atmósfera solar actúan tres fuerzas: la gravitacional, la magnética y la térmica. Debido a las altas temperaturas sobre la corona solar ($>1 \times 10^6 K$), la fuerza gravitacional que trata de contener el plasma coronal se ve opacada por la presión térmica del plasma, por lo cual se genera el viento solar. Localmente hay dos presiones actuando sobre el plasma, la presión térmica y la presión magnética. La presión térmica que ejerce un plasma que posee igual número de electrones y protones se define como:

$$P_{\text{ter}} = nk_B(T_p + T_e), \quad (\text{A.1})$$

donde T_e es la temperatura de electrones y T_p la temperatura de protones. La presión que ejerce el campo magnético es:

$$P_{\text{mag}} = \frac{B^2}{2\mu_0}. \quad (\text{A.2})$$

Estas dos fuerzas rigen la dinámica en la atmósfera solar. La presión total (P_t) que se ejerce sobre el plasma es la suma de la presión térmica y la presión magnética:

$$P_t = nk_B(T_p + T_e) + \frac{B^2}{2\mu_0}. \quad (\text{A.3})$$

El parámetro que relaciona ambas presiones y define su interacción, es la β del plasma:

$$\beta = \frac{nk_B(T_p + T_e)}{B^2/2\mu_0} = \frac{P_{\text{ter}}}{P_{\text{mag}}}. \quad (\text{A.4})$$

- Si $\beta \ll 1 \Rightarrow$ el campo magnético arrastra o confina al plasma. La presión magnética domina sobre la presión térmica del plasma, $P_{\text{ter}} \ll P_{\text{mag}}$.
- Si $\beta \gg 1 \Rightarrow$ el plasma arrastra al campo magnético. La presión térmica del plasma domina la presión magnética, $P_{\text{ter}} \gg P_{\text{mag}}$

En el medio interplanetario, cuando el plasma sale despedido de la atmósfera solar, ejerce una presión dinámica (P_D) sobre el medio como resultado de la energía cinética que adquiere. Esta se expresa como:

$$P_D = \rho_{\text{partículas}} v^2 \quad (\text{A.5})$$

Apéndice B

Discontinuidades MHD

Una discontinuidad MHD es una estructura a través de la cual las características físicas del plasma cambian discontinuamente. Su espesor es muy pequeño comparado con la escala de longitud del sistema. A partir de la ecuación de continuidad (suponiendo que no hay flujos tangenciales de partículas):

$$\rho_1 \bar{U}_1 \cdot \hat{n} = \rho_2 \bar{U}_2 \cdot \hat{n} \quad (\text{B.1})$$

en base a esta ecuación y las componentes del campo magnético ($B_n = (\hat{n} \cdot \bar{B})$; $B_t = (\hat{t} \cdot \bar{B})$), a continuación se hace una descripción de las discontinuidades MHD que existen (con $\rho_2 \bar{U}_2 \cdot \hat{n} = G$):

Discontinuidad tangencial ($G = 0$; $B_n = 0$). Es una frontera a través de la cual no hay flujo de masa y el campo magnético no tiene componente normal a la discontinuidad, esto implica que el campo es tangencial a la frontera. Existe un balance entre la presión del plasma y el campo magnético ($p + \frac{B_t^2}{2\mu_0} = cte$) (Cravens, 2004).

Discontinuidad de contacto ($G = 0$; $B_n \neq 0$). Todas las cantidades físicas dentro de esta frontera son continuas excepto la densidad y la temperatura que brincan súbitamente (Cravens, 2004). De acuerdo con las relaciones físicas que las describen, a través de una discontinuidad de contacto no hay flujo de masa, pero el campo magnético no es tangencial a la superficie.

Discontinuidad rotacional ($G \neq 0$; $B_n \neq 0$). Esta discontinuidad es muy distinta a las anteriores, ya que a través de ella si puede haber flujo de masa y la componente normal del campo magnético es diferente de cero.

Choque paralelo ($G \neq 0$; $B_t = 0$). En esta discontinuidad, no hay componente transversal del campo magnético. El paso del choque no incrementa la intensidad del campo magnético.

Choque perpendicular ($G \neq 0$; $B_n = 0$). La presión del plasma y la intensidad del

campo magnético se incrementan en el choque.

Apéndice C

Experimentos de las naves espaciales

Tabla C.1: Experimentos a bordo de las naves Voyager 1 y 2. Las columnas se refieren al nombre del experimento, investigador a cargo (IP) y los objetivos, respectivamente. Información obtenida de: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1977-084A>.

Experimento	IP	Objetivo
Imaging Science Subsystem	Dr. Bradford A. Smith	Constaba de dos cámaras que se encargaron de fotografiar los movimientos globales y la distribución de las nubes sobre Júpiter y Saturno, así como las características generales de su superficie. También se enfocaron a fotografiar los anillos de Saturno.
Photo-polarimeter Subsystem	Dr. Arthur Lonnen Lane	Se utilizó para medir la composición y textura de las masas observadas en los planetas externos, detectando cómo cambia la luz cuando es reflejada por ellas.
Infrared Interferometer Spectrometer and Radiometer	Dr. Rufold A. Hanel	Usado para medir la temperatura de las masas observadas, la composición elemental de las atmósferas y la energía IR reflejada en los cuerpos sólidos.
Ultraviolet Spectrometer	Dr. A. Lyle Broadfoot	Medía la composición elemental atmosférica de los planetas visitados e identificaba la presencia de ciertos procesos físicos que desprende radiación UV. El espectrómetro funcionaba en un rango de 0.04 a 0.16 micrometros.
Radio Science Subsystem	Prof. G. Leonard Tayler	Usaba las ondas de radio que porta la telemetría de la nave para medir densidades, temperaturas y presiones atmosféricas, y para estimar la composición de los anillos planetarios.
Planetary Radio Astronomy	Dr. James W. Warwick	Medía las señales de radio emitidas por el Sol y los planetas gaseosos.
Plasma Wave Subsystem	Dr. Donald A. Gurnett	Similar al Planetary Radio Astronomy, pero en distintas frecuencias.
Triaxial Fluxgate Magnetometer	Dr. Norman F. Ness	Designado para medir los campos magnéticos de los planetas visitados, así como la interacción del viento solar con sus magnetosferas. El rango de medición fue de 0.01 nT - 0.002 T con una precisión de 0.1 nT.
Plasma Spectrometer, Low Energy Charged Particle, Cosmic Ray Subsystem	Dr. John Richardson, Dr. Stamatios Krimigis, Dr. Edward Stone	Fueron tres instrumentos independientes usados para detectar partículas cargadas en diferentes escalas de energía.

Tabla C.2: Experimentos a bordo de las naves espaciales Helios 1 y 2. Mismo formato que la Tabla C.1. La información de los experimentos se obtuvo de: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?=&1974-097A>.

Experimento	IP	Objetivo
Fluxgate magnetometer for field fluctuations	Dr. Fritz Neubauer	Consistió de un magnetómetro fluxgate tri-axial montado sobre una antena de 2.75m para medir el campo magnético por arriba de 4 Hz. Los rangos de medición estaban entre los $\pm 100nT$ y $\pm 400nT$ con sus resoluciones respectivas de $\pm 0.2nT$ y $\pm 0.8nT$. Este magnetómetro se usó para detectar choques, a partir de la detección de fluctuaciones en el campo magnético ambiente.
Fluxgate magnetometer for average fields	Dr. Ness Norman	También utilizó un magnetómetro fluxgate tri-axial, pero implementó un sistema de switches automáticos que se encargaban de seleccionar uno de 4 intervalos de medición: 16 nT, 48 nT, 144 nT o 432 nT, con resoluciones de ± 0.03 nT, ± 0.09 nT, ± 0.28 nT y ± 0.84 nT. Recopilaba datos en intervalos de 1 o 16 s cuando de la razón de telemetría era mayor a 256 bps, si la razón de telemetría era menor los promedios se hacían durante la transmisión a la Tierra.
Search Coil Magnetometer	Dr. Fritz Neubauer	Investigó la componente magnética de las ondas electromagnéticas en el viento solar. Las mediciones se realizaron en un intervalo de $\pm 8.75nT$ a $\pm 275nT$ en las tres direcciones ortogonales de 4 a 128 Hz.
Solar Wind Plasma Wave	Dr. Donald Gurnett	Monitoreó las ondas en el plasma mediante una antena eléctrica de 32 m. Su razón de muestreo fue de 1.125 s, pero cuando una señal intensa (choque) era recibida, la razón de muestreo aumentaba a 14.2 datos por segundo.
Radio Waves de 26.5 kHz a 3 MHz	Dr. Donald Gurnett	Se usó para detectar emisiones de radio tipo III asociadas a ráfagas solares en el rango de 26.5kHz a 3MHz. Tomaba datos aproximadamente cada 0.03 s.
Cosmic Ray Experiment	Dr. Horst Kunow	Su objetivo fue medir los rayos cósmicos de alta energía que atravesaban el medio interplanetario. Tenía un campo de visión de 55° , y estaba compuesto de cinco detectores semiconductores, un contador Cerenkov y un contador de centelleo. Detectaba protones y partículas alfa con energías > 1.3 MeV/nucleón y electrones > 0.3 MeV.
Rayos Cósmicos Solares y Galácticos	Dr. James Trainor	Se enfocó a la detección de rayos cósmicos de origen solar y galáctico.
Plasma Detectors	Dr. Helmut Rosenbauer	Detectaba iones y electrones mediante un conjunto de cuatro analizadores de plasma. Su resolución normalmente fue de 1 minuto, pero cuando se disparaba la alarma de choque los tiempos de resolución eran mucho mejores.
Energetic Electron and Proton Detector	Dr. Ehrhard Kepler	Se empleo para estudiar el origen y la distribución de los electrones y los protones de baja energía.
Micrometeoroids Detector and Analyzer	Dr. Hugo Fechtig	El propósito de este experimento fue investigar algunas hipótesis sobre el polvo interplanetario, tales como la variación de la densidad de partículas conforme la distancia al Sol y alrededor de las órbitas de los planetas.
Mecánica Celeste	Dr. Wolfgang Kundt	Su objetivo era determinar la órbita detallada de la nave espacial así, como contribuir con los estudios orbitales de la Tierra y la Luna y parámetros de relatividad general.
Zodiacal Light Photometer	Dr. Christoph Leinert	Investigó la distribución, tamaño y naturaleza de las partículas de polvo en el medio interplanetario, mediante tres fotómetros que estaban mirando a 15° , 30° y 90° .

Tabla C.3: Experimentos a bordo del IMP 8. Mismo formato que la Tabla C.1. La información de este experimento fue tomada de: <http://spdf.gsfc.nasa.gov/imp8/project.html>

Experimento	IP	Objetivo
Magnetic Field Experiment	Dr. Ronald Lepping	Estaba compuesto de un magnetómetro fluxgate tri-axial que medía el campo magnético interplanetario, de la cola y la magnetofunda terrestre. Cada sensor registraba campos magnéticos en tres rangos $\pm 12\text{nT}$, $\pm 36\text{nT}$ y $\pm 108\text{nT}$
DC Electric Fields Investigation	Dr. Thomas L. Aggson	Se encargó de medir los campos eléctricos en el viento solar y la magnetofunda.
AC Electric and Magnetic Fields Experiments	Dr. Donald A. Gurnett	Se usó para observar las características de las ondas en el plasma.
Electrostatic Energy-Charged Analyzer	Dr. John T. Gosling	Midió la dirección de los iones y electrones en el viento solar, la funda magnética y la cola terrestre (resolución < 2 min).
Low Energy Particles Investigation	Prof. Louis A. Frank	Fue diseñado para el estudio de protones y electrones de bajas energías en la región de 30 a 40 radios solares con el fin de proporcionar datos de las tormentas geomagnéticas, las auroras, así como monitorear la cola magnética y la hoja neutra. Tenía un campo de visión de 9° por 25° y operaba de dos formas distintas: 1) dando una buena resolución angular cada 272 s, 2) dando una buena resolución temporal midiendo la energía en 4 direcciones cada 68 s.
Plasma Faraday Cup Assembly	Dr. Alan Lazarus	Estudió la dirección de los iones y electrones en el viento solar, la región de transición y la cola magnética. Tomaba datos aproximadamente cada 30 s.
Enegetic Particle Experiment	Dr. Donald Williams	Su objetivo fue estudiar las características de la propagación de los rayos cósmicos a través del medio interplanetario, los flujos de protones y electrones en la cola magnética terrestre, así como la entrada de los rayos cósmicos a la magnetosfera.
Solid-State Detectors	Dr. Fred M. Ipavich	Se encargó de determinar la composición y el espectro de las partículas de baja energía originadas en las ráfagas solares.
Charged Particle Measurement Experiment	Dr. Robert B. Decker	Detectaba las partículas cargadas tales como: electrones en un rango de energía entre 0.2 y 2.5 MeV, protones entre 0.3 y 500 MeV, partículas alfa entre 2.0 y 200 MeV, partículas pesadas con Z en el intervalo de 2 a 5 y energías mayores a 8 MeV, partículas pesadas con Z entre 6 y 8 y energías mayores a 32 MeV, y protones y alfas con energías mayores a 50 MeV/nucleón.
Goddard Medium Energy	Dr. Clifford Lopate	Midió la composición y el espectro de energía de partículas solares con energías mayores de 0.5 MeV/nucleón, usando dos telescopios.
Electron Isotopes Investigation	Dr. Edward C. Stone	Se encargó de medir el espectro de energía diferencial de los isótopos del Hidrógeno a través del oxígeno de 2 a 10 MeV/nucleón, y del los electrones de 0.2 a 5 MeV/nucleón.
Solar and Cosmic Ray Particles	Dr. Robert E. McGuire	Midió el espectro de energía, la composición y distribución angular de los protones, electrones y núcleos pesados de origen solar y galáctico.

Bibliografía

- Abramenko, V.; Yurchyshyn, V.; Linker, J.; Mikić, Z.; Luhmann, J.; Lee, C. O.: “Low-latitude Coronal Holes at the minimum of the 23rd solar cycle”, *The Astrophysical Journal*, **712**, 2, 2010.
- Aline, L. et al.: “Multi-spacecraft observations to study the shock extension in the inner heliosphere”, *Proceedings of the international Astronomical Union*, **4**, 2008, p. 481-487.
- Alurkar, S. K. Solar and interplanetary disturbances, World Scientific, Singapore, 1997.
- Aschwanden, M. J. Physics of the solar corona. Springer-Praxis books in Astronomy and Planetary Sciences, Alemania, 2006.
- Balogh A. et al.: “The solar origin of corotating interaction regions and their formation in the inner heliosphere”, *Space Science Reviews*, **89**, 1999, p. 141-178.
- Balogh, A.; Lanzerotti, Louis; Suess, Steven. The heliosphere through the solar activity cycle, Springer-Praxis, Alemania, 2007.
- Berger, M. A.; Field, G. B.: “The topological properties of magnetic helicity”, *Journal of Fluid Mechanics*, **147**, 1984, p. 133-148.
- Burlaga L. et al.: “Interplanetary and Fields, November 22 to December 6, 1977: Helios, Voyager and IMP observations between 0.6 and 1.6 AU”, *Journal of Geophysical Research*, **85**, A5, 1980, p. 2227-2242.
- Burlaga, L.; Sittler, E.; Mariani, F.; Schwenn, R.: “Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations”, *Journal of Geophysical Research*, **86**, A8, 1981, p. 6673-6684.
- Burlaga, L. F.: “MHD Process in the outer Heliosphere”, *Space Science Reviews*, **39**, 1984, p. 255-316.
- Burlaga, L. F. et al.: “Large-scale interplanetary magnetic fields: Voyager 1 and 2 observations between 1 AU and 9.5 AU”, *Journal of Geophysical Research*, **89**, A12, 1984, p. 10,659-10,668.

- Burlaga, L. F. Interplanetary Magnetohydrodynamics, Oxford University Press, New York, USA, 1995.
- Cravens, Thomas E. Physics of Solar System Plasmas, Cambridge University Press, 2004.
- Cranmer, S. R.: "Coronal Holes", *Living Rev. Solar Phys.*, **6**, 2009.
- Feldman, U.; Londi, E.; Schwadron, N. A.: "On the sources of fast and slow solar wind", *Journal of Geophysical Research*, **110**, 2005, A07109.1-A07109.12.
- Forbes, T. G.: "A review on the genesis of the coronal mass ejections", *Journal of Geophysical Research*, **105**, A10, 2000, p. 153-165.
- Forsyth, R. J. y Marsh, E.: "Solar origin and interplanetary evolution of stream interfaces", *Space Science Reviews*, **89**, 1999, p. 7-20.
- Gaizauskas, V.; Harvey, K.; Havey, J.; Zwaan, C.: "Large-scale patterns formed by solar active regions during the ascending phase of cycle 21", *the astrophysical Journal*, **265**, 1983, p. 1056-1065.
- González Esparza, J. A. y Smith, E.: "Solar cycle dependence of the solar wind dynamics: Pioneer, Voyager, and Ulysses from 1 to 5 AU", *Journal of Geophysical Research*, **101**, 1996, p. 24359-24371.
- González-Esparza, A.; Neugebauer, M.; Smith, E. J.; Phillips, J. L.: "Radial evolution of ejecta characteristics and transient shocks: Ulysses in-ecliptic observations", *Journal of Geophysical Research*, **103**, A3, 1998, p. 4767-4773.
- González-Esparza, J. A.: "Geometry and radial width of interaction regions", *Solar Wind Nine*, 1999, p. 593-596.
- González-Esparza, J. A.: "Introducción al medio interplanetario", *Comunicación Técnica - serie Docencia*, Instituto de Geofísica, UNAM, 2000a.
- González-Esparza, J. A.: "Solar-cycle variations of interaction regions: in-ecliptic observations from 1 to 5 AU", *Geofísica Internacional*, **39**, 1, 2000b, p. 41-46.
- Gopalswamy, N. A Global Picture of CMEs in the Inner Heliosphere, *Astrophysics and Space Science Library*, **317**, Kluwer Academic Publishers (201), 2004.
- Gopalswamy, N; Mikić, Z., Maia, D.; Cremades, H.; Alexander, D.; Kaufmann, P.; Tripathi, D.; Wang, Y. M.: "The pre-CME Sun", *Space Science Reviews*, **123**, 2006, p. 303-339.
- Goslin, J. T.: "Coronal mass ejections and magnetic flux ropes in interplanetary space, in: *Physics of Magnetic Flux Ropes*. American Geophysical Union, 1990, p. 343-364.

- Gosling, J. T.: "The Solar Flare Myth", *Journal of Geophysical Research*, **98**, A11, 1993, p. 18937-18950.
- Gosling, J. T.: "Corotating and transient solar wind flows in three dimensions", *Annu. Rev. Astrophys.*, **34**, 1996, p. 35-73.
- Gosling, J.T. y Pizzo, V. J.: "Formation and evolution of corotating interaction regions and their three dimensional structure", *Space Science Reviews*, **89**, 1999, p. 21-52.
- Gosling, J. T.: "Coronal Mass Ejections", 26 yh International Cosmic Ray Conference, ICRXXVI Salt Lake City Utah, agosto de 1999. AIP Conference Proceeding **516**, New York American Institute of Physics Press, 2000.
- Heber, B.; Sanderson T. R.; Zhang M.: "Corotating Interaction Regions", *Adv. Space Res.*, **23**, 3, 1999, p. 567-579.
- Hewish, A.; Scott, P. F.; Willis, D.: "Interplanetary Scintillation of Small Diameter", *Nature*, **203**, 1964, p. 1214-1217.
- Hoeksema, J. T.: "The relationship of the large-scale solar field to the interplanetary magnetic field: what will Ulysses find?, in *The Sun and the Heliosphere in three-dimensions*, edited by R. G. Marsden, 1986, p. 241-254.
- Hundhausen, A. J.; Hansen, R. T.; Hansen, S. F.: "Coronal evolution during the sunspot cycle: Coronal holes observed with the Mauna Loa k-coronameters, *J. Geophysics. Res.*, **86**, 1981, p. 2079-2094.
- Hudson, H. S.; Bougeret, J. L.; Burkepile, J.: "Coronal mass ejections: overview of observations", *Space Science Reviews*, **123**, 2006, p. 13-30.
- Jian L. et al.: "Properties of stream interactions at one AU during 1995-2004", *Solar Physics*, **239**, 2006a, p. 337-392.
- Jian L. et al.: "Properties of interplanetary coronal mass ejections at one AU during 1995-2004", *Solar Physics*, **239**, 2006b, p. 393-436.
- Jian, L.; Russell, C. T.; Luhmann, J. G.; Skoug, R. M.: "Evolution of solar wind structures from 0.72 to 1 AU", *Advances in Space Research*, **41**, 2008, p. 259-266.
- Jian, L.: "Radial evolution of large-scale solar wind structures", Tesis de PhD, 2008.
- Kivelson, Margaret G. y Russell, Christopher T. *Introduction to space physics*, Cambridge University Press, E.U., 1995.
- Lin, J.; Raymond, J. C.; Van Ballegooijen, A. A.: "The role of magnetic reconnection in the observable features of solar eruptions", *The Astrophysical Journal*, **602**, 2004, p. 422-435.

- López, Ramón y Freeman, John W.: "Solar wind proton temperature-velocity relationship", *Journal of Geophysical Research*, **91**, A2, 1986, p. 1701-1705.
- Luhmann, J. G.; Lee, C. O.; Li, Y.; Arge, C. N.; Galvin, A. B.; Simunac, K.; Russell, C. T.; Howard, R. A.; Petrie, G.: "Solar wind sources in the late declining phase of solar cycle 23: effects of the weak solar polar field on high speed streams", *Solar Physics*, **256**, 2009, p. 285-305.
- Manoharan, P. K. y Pick M.: "Radio Astronomical Scintillation in the solar wind plasma: imaging interplanetary disturbances", *IAU Symposium*, **199**, 2002, p. 426-429.
- Meyer-Vernet, Nicole. *Basics of the Solar Wind*, Cambridge University Press, USA, 2007.
- Mitsakou, E.; Babasidis, G.; Moussas, X.: "Interplanetary coronal mass ejections during the descending cycle 23: Sheath an ejecta properties comparison", *Advances in Space Research*, **43**, 2009, p. 495-498.
- Ness, N. F. y Wilcox, J. M.: "Solar Origin of the Interplanetary Magnetic Field", *Phys. Rev. Lett.*, **13**, 1964 p. 461-464.
- Norton, A. A.; Raouafi, N. E.; Petrie G. J. D.: "The tilted solar dipole as observed and modeled during the 1996 solar minimum", *The Astrophysical Journal*, **682**, 2008, p. 1306-1314.
- Parks, George K. *Physics of Space Plasmas an Introduction*, 2a edición, Westview Press, E.U., 2004.
- Pizzo, V. J.: "A three-dimensional model of corotating streams in the solar wind", 1. Theoretical foundations. *Journal of Geophysical Research*, **83**, A12, 1978, p. 5563-5572.
- Richardson, I.G. y Cane, H. V.: "Signatures of shock drivers in the solar wind and their dependence on the solar source location", *Journal of Geophysical Research*, **98**, 1993, p. 15, 295-15,304.
- Richardson, I. G y Cane, H. V.: "Regions of abnormally low proton temperature in the solar wind (1965-1991) and their association with ejecta", *Journal of Geophysical Research*, **100**, A12, 1995, p. 397-412.
- Richardson, J. D. y Stone, E. C.: "The solar wind in the outer heliosphere", *Spice Sci Rev*, **143**, 2008, p. 7-20.
- Riley, P.; Gosling, J. T.; Weiss, L. A.; Pizzo, V. J.: "The tilts of corotating interaction regions at midheliographic latitudes", *Journal of Geophysical Research*, **101**, A11, 1996 p. 24349-24357.

- Riley, P.: “Modelin corotating interaction regions: from the Sun to 1 AU”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **69**, 2007, p. 32-42.
- Russell, C.T.; Shinde, A. A., Jian L.: “A new parameter to define interplanetary coronal mass ejections”, *Advances in Space Research*, **35**, 2005, p. 2178-2184.
- Russell, C. T. y Shinde, A. A.: “On defining interplanetary coronal mass ejections from fluid parameters”, *Solar Physics*, **229**, 2005, p. 323-344.
- Russell, C. T.; Jian, L.; Blanco Cano, X.; Luhmann, J. G.; Zhang, T. L.: “STEREO observations of shock formation in the solar wind” *Geophysical Research Letters*, **36**, 2009, L02103, 3 p.
- Schrijver, C. J. y Zwaan, C. *Solar an Stellar Magnetic Activity*, Cambridge University Press, 2003.
- Smith, Edward J. y Wolfe, John H.: “Observations of interaction regions and corotating shocks between one and five AU: Pioneers 10 and 11”, *Geophysical Research Letters*, **3**, 3, 1976, p. 137-140.
- Veselovsky, I. et al.: “Solar wind variation with the cycle”, *J. Astrophys. Astr.*, **21**, 2000, p. 423-429.
- Vourlidas, A. et al.: “Mass and energy properties of LASCO CMEs”, in: *Proceedings of 10th European Solar Physics Meeting*, 2002, p. 91-94.
- Wimmer-Schweingruber, R. F. et al.: “Understand interplanetary coronal mass ejections signatures”, *Space Science Reviews*, **123**, 2006, p. 177-216.
- Zurbuchen, T.; Richardson, I. G.: “In-situ solar wind and magnetic field signatures of interplanetary coronal mass ejections”, *Space Science Reviews*, **123**, 2006, p. 31-43.