



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

FLUCTUACIONES CARACTERÍSTICAS EN REGIONES
DE COMPRESIÓN DEL VIENTO SOLAR A 1 UA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA (FÍSICA ESPACIAL)

PRESENTA

ROSA TATIANA NIEMBRO HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. ALEJANDRO LARA SÁNCHEZ



JUNIO 2012



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.

RESUMEN

El Sol pierde masa continuamente en forma de viento solar que es expulsado hacia el Medio Interplanetario (MIP). Esta pérdida es inhomogénea. El viento solar fluye en función de las líneas de campo magnético del Sol. Cualquier variación en la actividad del Sol provoca cambios en la manera en que fluye el viento solar. Por ejemplo, dependiendo de las estructuras magnéticas de gran escala, se producen vientos a diferentes velocidades que corrotan en forma de espiral alrededor del Sol.

En ocasiones flujos de baja velocidad son alcanzados por flujos de alta velocidad, tal que, estos flujos interactúan entre ellos. A estas regiones de interacción, se les conoce como Regiones de Interacción Corrotantes (RICs). Se ha notado que las RICs tienen un periodo de 27 días, relacionado con la rotación de nuestra estrella. Este tipo de interacciones pueden producir ondas de choque.

Otra forma de expulsión de material solar al MIP son las Eyecciones de Masa Coronal (EMCs). Las EMCs son un tipo de erupción solar. En general, las erupciones solares son resultado de cambios cuasi estáticos en el campo magnético fotosférico que aumenta la energía magnética en la corona y causa liberaciones esporádicas (Chen, 2001). Cuando las EMCs viajan en el MIP se les denomina Eyecciones de Masa Coronal en el medio Interplanetario (EMCIs). Estas estructuras que son casi del mismo material del viento solar, viajan con características muy diferentes debido a que están asociadas a estas liberaciones de energía magnética. Por ejemplo, tienen un campo magnético diferente al del viento solar. La interacción del viento solar con las EMCIs también puede producir ondas de choque.

Al igual que el viento solar, las RICs y las EMCIs son plasmas expulsados de diferente manera y por tanto, podemos definirlos como parcelas de viento solar que viajan con condiciones diferentes. Es decir, son el mismo material pero con velocidad \mathbf{v} , densidad N , campo magnético \mathbf{B} y temperatura T diferentes. Estas variables cambian dependiendo del tipo de interacción o proceso de liberación que haya ocurrido. Estos cambios son muy notorios y es por eso que podemos llamarlas estructuras de gran escala del viento solar (espacial y temporalmente).

En general, dependiendo de la velocidad, cualquier estructura (en este texto nos referimos a las RICs y las EMCIs) que viaja en el viento solar puede presentar una Región de Compresión, que no es más que una región que precede a estas estructuras donde el viento solar no es estable. Se les llama de compresión porque las estructuras empujan y comprimen al viento solar externo.

Cuando queremos estudiar las RICs y las EMCIs cerca de la Tierra, usamos mediciones *in situ*. Con diferentes instrumentos podemos medir diferentes variables del viento solar. A nosotros nos interesan \mathbf{v} , N , \mathbf{B} y T . Estas variables están directamente relacionadas con el tipo de estructuras que queremos estudiar. Cuando una Región de Compresión pasa por los instrumentos, las variables muestran variaciones desordenadas, puesto que las condiciones del viento solar no son estables. En este trabajo proponemos una definición de fluctuación (relacionada con estas variaciones) y a partir de su análisis, un método para determinar de manera automática (sin la necesidad de un observador) cuando los instrumentos detectan una Región de Compresión.

Estudiamos las fluctuaciones de \mathbf{v} , N , \mathbf{B} y T medidos *in situ* a 1 UA del Sol por los instrumentos a bordo de la nave WIND. Presentamos un análisis estadístico de las fluctuaciones. Usamos estas fluctuaciones para identificar *estructuras de interés*. Las *estructuras de interés* se definen donde al menos tres de los cuatro parámetros presentaron fluctuaciones en un intervalo de tiempo menor que 40 minutos. Para poder determinar cuando las fluctuaciones están relacionadas con las *estructuras de interés*, es necesario definir ciertos parámetros de análisis como el tamaño de la ventana del promedio móvil, el ancho de las barras de un histograma, así como el número de veces que las fluctuaciones tienen que exceder el nivel de ruido. Presentamos el análisis estadístico para obtener los valores de estos parámetros de análisis que aseguran que las *estructuras de interés* son Regiones de Compresión que preceden a estructuras de gran escala del viento solar.

Si suponemos que todas las *estructuras de interés* son Regiones de Compresión y comparamos los tiempos de arribo con los correspondientes de EMCIs y RICs, obtenidos de manera subjetiva (inspección visual directa) por diferentes autores, nuestro método encuentra más del 60% de los eventos listados, sin la interpretación subjetiva de ningún observador.

Presentamos una primera caracterización de las Regiones de Compresión, exigiendo que la diferencia de velocidad entre la Región de Compresión y el viento solar sea dos veces más grande que la velocidad de Alfvén (velocidad característica de perturbaciones magnéticas en el viento solar), es decir, aseguramos que a las Regiones de Compresión las anteceden choques.

Analizamos el comportamiento de los parámetros y las fluctuaciones de 40 EMCIs (registradas en la literatura y que fueron detectadas por nuestro método) que han sido centro de atención para el análisis de las características de este tipo de eventos en el viento solar y encontramos que la mayoría de estos eventos no tienen estructuras simples. Las fluctuaciones ayudan a elegir los tiempos de arribo, duración de la funda y tiempo final de las EMCIs con mayor precisión. Notamos

que como las fluctuaciones indican el arribo de *estructuras de interés*, pueden ayudar al análisis de estructuras de gran escala que van viajando dentro de las EMCIs. Estimamos automáticamente la duración de las Regiones de Compresión y comparamos con la duración de las Regiones de Compresión de las EMCIs listadas en CDAW2010.

En algunos casos las EMCIs viajan junto con RICs, dificultando la selección sobre las condiciones necesarias para identificar qué tipo de estructura sigue a una Región de Compresión: RICs o EMCIs. Este análisis se hará en trabajos posteriores.

Índice general

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. EL VIENTO SOLAR	3
1.1.1. Viento Solar Rápido y Lento	4
1.1.2. RICs	4
1.1.3. EMCIs	6
1.2. PLASMAS NO COLISIONALES	10
1.2.1. Ecuación de Vlasov	10
1.2.2. Choques Hidrodinámicos	11
1.2.3. Campos Magnéticos Congelados	14
1.3. INSTRUMENTOS	15
1.3.1. WIND	15
2. FLUCTUACIONES	19
2.1. ANÁLISIS DE LAS FLUCTUACIONES	21
3. CORRELACIONES	27
4. BASES DE DATOS	31
4.1. RICHARDSON & CANE (2011)	31
4.2. JIAN (2006)	32
4.3. CDAW2010	32
4.4. EVENTOS EN COMÚN ENTRE LAS LISTAS	38
4.5. LOS PARÁMETROS	39
5. ESTRUCTURAS DE INTERÉS	43
5.1. ESTRUCTURAS DE INTERÉS	44
5.2. $d\mu$, k Y dm	44

5.3. VELOCIDAD DE ALFVÉN	50
5.4. DIFERENTES k Y $d\tau$	53
5.5. ESTRUCTURAS DE INTERÉS, EMCIs Y RICs	58
6. REGIONES DE COMPRESIÓN	61
CONCLUSIONES	69
Bibliografía	75
RUTINAS EN IDL	77

INTRODUCCIÓN

El flujo del viento solar varía dependiendo de la actividad del Sol, la cual también determina el tipo de estructuras que viajan en el Medio Interplanetario (MIP).

Durante un mínimo de actividad solar, se observan flujos de viento rápido que alcanzan a flujos de menor velocidad. Entonces se produce una región de interacción entre estos dos flujos que se le conoce como Región de Interacción Corrotante (RIC). Estas regiones corrotan con el Sol y en promedio ocurren cada 27 días (Krieger et al., 1973; Pudovkin, 1996). Durante un máximo, también existen flujos esporádicos que se les llama Eyecciones de Masa Coronal (EMCs) (Wang & Sheeley, 1994; Webb & Howard, 1994).

Una EMC se puede definir como una concentración de material de la corona que se mueve hacia afuera del Sol, pero que tiene diferentes condiciones que el viento solar y que se expanden hacia el MIP. Cuando una nave detecta una EMC viajando en el MIP se le refiere como Eyección de Masa Coronal en el medio Interplanetario (EMCI).

Dependiendo de la velocidad de estas estructuras de gran escala (las RICs o las EMCI) las antecederán "Regiones de Compresión" que son regiones de interfase entre las estructuras y el viento solar. En estas regiones el gas actúa desordenadamente. Las Regiones de Compresión se caracterizan por tener alta densidad, alta presión y fuertes variaciones del campo magnético. Si las estructuras viajan mucho más rápido que la velocidad característica del viento solar ambiente, entonces pueden impulsar ondas de choque. Un choque se puede definir como una transición no lineal entre dos estados diferentes de plasma.

Hasta ahora no existe un método aceptado por la comunidad que determine sin ambigüedad la presencia de una estructura de gran escala en el viento solar. Por ejemplo, en la literatura podemos encontrar listas de RICs y EMCI reportadas, estructuras de gran escala a las que se les ha asociado una duración y otros parámetros de manera subjetiva (por inspección visual directa) por los diferentes observadores. Las listas más conocidas y que usamos para nuestro análisis son: Jian et al. (2006) para RICs y Richardson & Cane (2011) y CDAW2010 (<http://cdaw.gsfc.nasa.gov/>) para EMCI. Creemos que estas listas son las más completas y además contienen eventos desde 1997 hasta la fecha, periodo que nos interesa.

Dado que las Regiones de Compresión asociadas con RICs y EMCIs se caracterizan por cambios muy notorios en la velocidad \mathbf{v} , densidad N , campo magnético \mathbf{B} y temperatura T del viento solar, en este trabajo proponemos identificar dichos cambios sistemáticamente y exploramos las posibilidades de definir y detectar automáticamente estas estructuras de gran escala en el viento solar. De manera particular, nos interesa encontrar las fluctuaciones características de cada una de ellas y un método que pueda ser usado en datos provenientes de diferentes instrumentos.

Capítulo 1

MARCO TEÓRICO

1.1. EL VIENTO SOLAR

Eugene Parker definió el viento solar como un plasma que arrastra campo magnético y se aleja del Sol (Hundhausen et al., 1995). Todo lo embebido en este viento se considera que se encuentra dentro del Sistema Solar, y al medio entre el Sol y sus confines se le denomina Medio Interplanetario (MIP) o Heliosfera.

El flujo del Viento Solar varía dependiendo de la actividad del Sol. Lo que determina el tipo de estructuras que viajan en el Medio Interplanetario (MIP). Generalmente, durante un mínimo solar, se observan corrientes de flujo originadas en los hoyos coronales y caracterizadas por un periodo de 27 días (Krieger et al., 1973; Pudovkin, 1996). Durante un máximo, existen otros flujos esporádicos denominados Eyecciones de Masa Coronal (EMCs) (Wang et al., 1994; Webb et al., 1994).

Una EMC se puede definir como una concentración de material de la corona que se mueve hacia afuera del Sol, pero que tiene diferentes condiciones que el Viento Solar (Gopalswamy, 2010). Cuando una nave detecta una EMC viajando en el MIP se le refiere como Eyecciones de Masa Coronal en el medio Interplanetario (EMCI). Si una EMCI viaja mucho más rápido que la velocidad característica del MIP entonces puede impulsar una onda de choque.

Se puede explicar la interacción de un EMCI con el MIP como dos sistemas y en medio de ellos existe una región donde el gas actúa desordenadamente. A esta región se le conoce como funda. La funda se caracteriza por tener alta densidad, alta presión y fuertes variaciones del campo magnético (Despirak, 2009). Las EMCIs no son las únicas estructuras que viajan en el MIP y que pueden tener asociados choques. Las Regiones Corrotantes (RICs) también pueden presentar choques.

1.1.1. Viento Solar Rápido y Lento

Las líneas de campo magnético de la atmósfera solar determinan el comportamiento del material. Cerca de los polos las líneas de campo son abiertas, mientras que en el ecuador son cerradas.

Se piensa que en el mínimo del ciclo solar, el origen de estos vientos son los hoyos coronales polares mientras que en el máximo son los hoyos coronales de mucho menor latitud (Luhmann, 2002), lo que quiere decir que la configuración del viento solar cambia significativamente a medida que pasa el ciclo solar.

Una hoja de corriente heliosférica se produce cuando la polaridad del campo magnético se invierte.

En regiones de líneas de campo abiertas, el movimiento radial del plasma ya no está limitado por las líneas de campo, provocando que la pérdida de material sea mayor. A estas regiones de baja densidad se les conoce como *hoyos coronales*. El viento solar proveniente de los hoyos coronales, es diluido y lleva consigo un campo magnético unipolar (Krieger, 1973).

Además de esto, el Sol está rotando. La configuración magnética obliga a las líneas a torcerse de tal forma que forman una espiral alrededor de nuestra estrella. Si los vientos son rápidos, se oponen frecuentemente a cambiar de dirección y tratarán de conservar su dirección de expansión.

Constantemente, el Sol produce flujos hacia afuera, a distintos tiempos, a diferentes velocidades y provenientes de diferentes regiones sobre la superficie solar. Dependiendo de las diferencias de velocidad entre ellas, las rápidas alcanzarán a las más lentas y en ocasiones formarán choques.

1.1.2. RICs

Durante el mínimo solar, los hoyos coronales y los cinturones de cascos varían lentamente. Por lo tanto, las regiones coronales de corrientes rápidas y lentas también varían lentamente. Podemos considerar que el flujo es estacionario temporalmente, tal que, las interacciones de corrientes son cuasi estacionarias en el marco de referencia que gira con el Sol y pueden durar hasta varias rotaciones solares. A estas Regiones de Interacción Corrotantes se les denomina RICs (Belcher et al., 1971).

Cuando estamos en el máximo solar, las regiones de corrientes rápidas y lentas cambian drásticamente. De esta forma, cuando el Sol está activo, la morfología de una RICs se complica. Las RICs afectan la actividad geomagnética (Borbov, 1983).

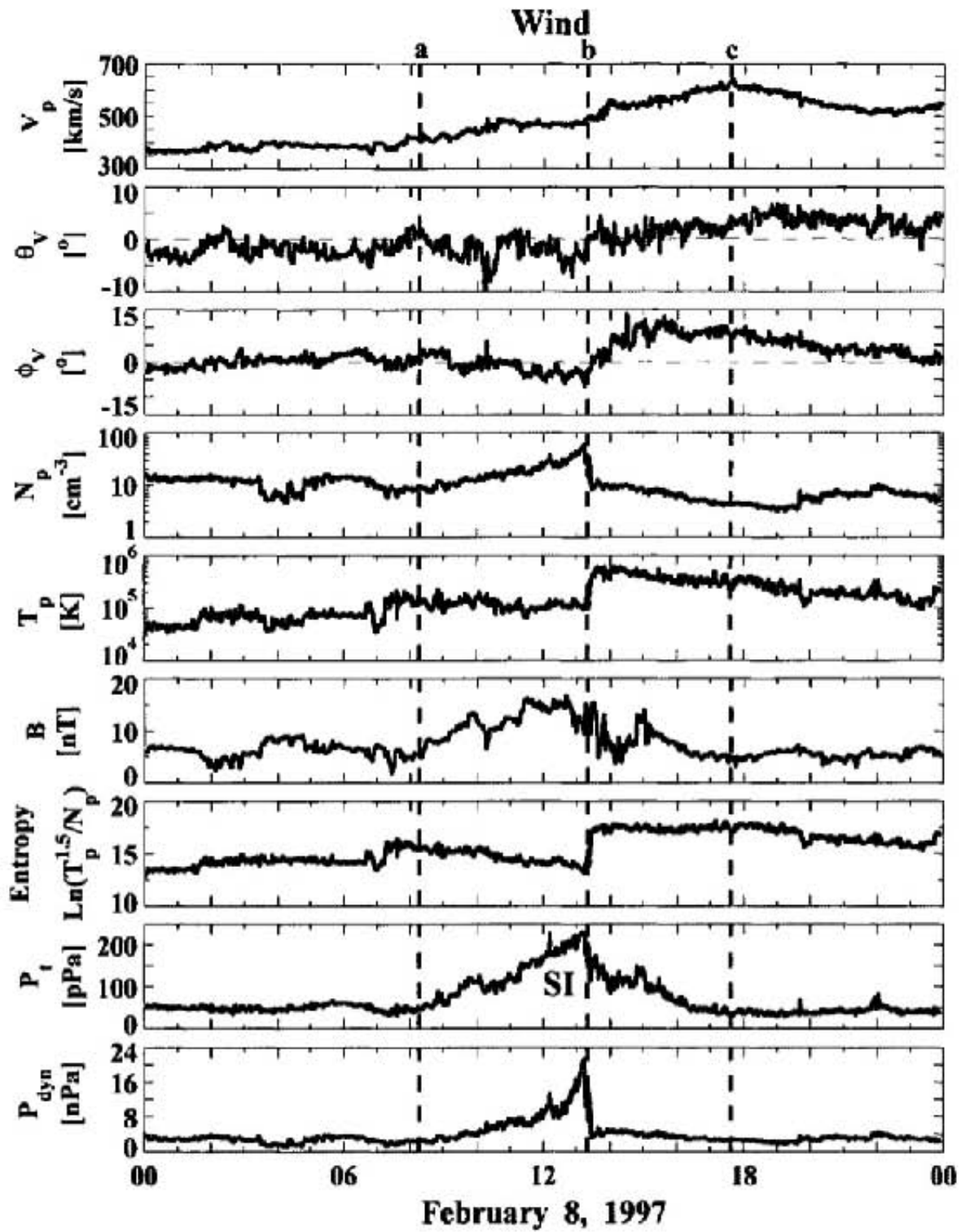


Figura 1.1: Una región de interacción entre corrientes observada por WIND, las gráficas muestran la magnitud de la velocidad v , los ángulos azimutal y meridional, la densidad N , la temperatura T , la magnitud del campo magnético B , la entropía, la presión total P_t y la presión dinámica P_{dyn} . Las líneas punteadas *a* y *c* delimitan a la RIC. *b* indica la interfase entre las dos corrientes de viento solar (Figura tomada de Jian et al (2006)).

Las RICs pueden identificarse ya que cumplen los siguientes criterios (Jian et al., 2005, 2006):

- Un aumento en la velocidad de los protones v_p .
- Un incremento rápido en la presión térmica P_t con declinaciones graduales en los extremos.
- Un incremento que después decaerá de la densidad de protones N_p .
- Un aumento en la magnitud del campo magnético \mathbf{B} .
- Un incremento en la temperatura de los protones T_p .
- Un flujo cizallado.
- Un cambio en la entropía.

Estas son las firmas de las RICs, sin embargo, no en todos los casos estas firmas se presentan claras, lo que dificulta su identificación.

Si las RICs presentan choques reversos y delanteros, resulta que para el choque hacia adelante todos los parámetros v_p , N_p , T_p y B incrementan su magnitud mientras que para el reverso v_p aumenta y todos los demás disminuyen. Es poco probable que veamos choques reversos a 1 UA, pero no imposible (Hundhausen, 1995; Hu, 1993). Entre más activo está el Sol, mayor es el número de RICs por rotación.

Las observaciones revelan que algunos RICs presentan choque a 1 UA (Gosling, 1972; Ogilvie, 1972). Aún no está determinada claramente la relación que existe entre choques, RICs y su dependencia con el ciclo solar (Russell et al., 2009).

En la Figura 1.1 mostramos un ejemplo de una RIC. Se observan la magnitud de la velocidad \mathbf{v} , los ángulos azimutal y meridional, la densidad N , la temperatura T , la magnitud del campo magnético \mathbf{B} , la entropía, la presión total P_t y la presión dinámica P_{dyn} . Este ejemplo permite ver claramente el aumento en la velocidad de los protones v_p , un incremento rápido en la presión térmica P_t con declinaciones graduales en los extremos, un incremento que después decaerá de la densidad de protones N_p , un aumento en la magnitud del campo magnético \mathbf{B} , un incremento en la temperatura de los protones T_p , que son las firmas características de las RICs.

1.1.3. EMCIIs

Una EMC es un cambio observable en la estructura de la corona que ocurre en escalas de tiempo de algunos minutos hasta horas. En imágenes de coronógrafos se ven como abrigantamientos alrededor del disco solar. Si este abrigantamiento ocurre alrededor de todo el disco se le denomina

tipo *halo* (Howard, 1982), en este caso las EMCs salen en dirección a la Tierra y pueden ser geoeffectivas, es decir, pueden causar tormentas geomagnéticas (Zhang et al., 2003).

Dependiendo de su velocidad, las EMCs pueden estar asociadas con los eventos de partículas energéticas solares (SEPs).

Modelos recientes del estudio de la evolución de las EMCs, sugieren que una EMC se origina en la corona como resultado de un flujo emergente que interactúa con los flujos sobre la superficie y que evolucionan a un estado donde el equilibrio ya no es posible (Forbes et al., 2006). Una vez que ocurre esto, el campo sale. Si esta salida es suficientemente fuerte, las líneas de campo no pueden mantenerse y el plasma es eyectado hacia afuera.

Las EMCs tienen estructura espacial comúnmente referida a la estructura de tres partes: una región muy brillante seguida por una cavidad oscura que termina en una prominencia brillante de plasma. En la Figura 1.3 se muestra una imagen de una EMC.

No todas las EMCs presentan las tres partes. Parece ser que hay una dependencia con los factores geométricos o con la naturaleza de la región fuente de las EMCs. No es claro como evolucionan a medida que se alejan o cuales son las firmas que podrían tener en observaciones *in situ*. Se asume que la región brillante de enfrente es la funda, que es una región de compresión del viento solar. La cavidad oscura es la estructura magnética que puede ser una nube magnética.

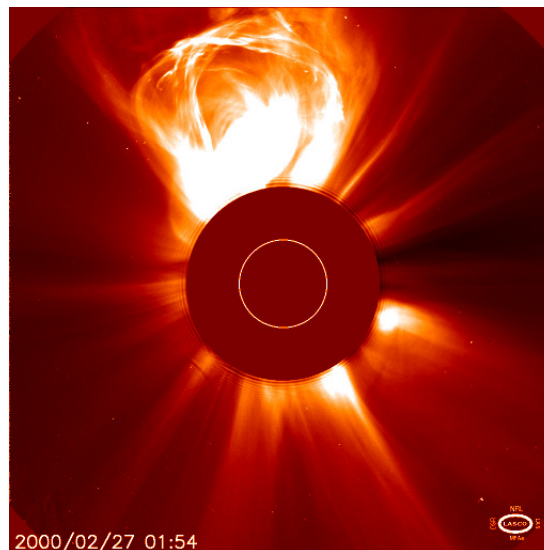


Figura 1.2: Imagen de una EMC tomada por el coronógrafo LASCO C2. Esta imagen muestra las tres partes de la estructura de una EMC cuando se observa en la corona solar. Se puede apreciar claramente su abrillantamiento. Esta EMC ocurrió el 27 de febrero del 2000.

A la estructura de una EMC en el MIP se le denomina EMCI. En la Figura 1.3 se muestra un esquema de una EMCI (en amarillo) mientras que la línea negra representa el choque asociado.

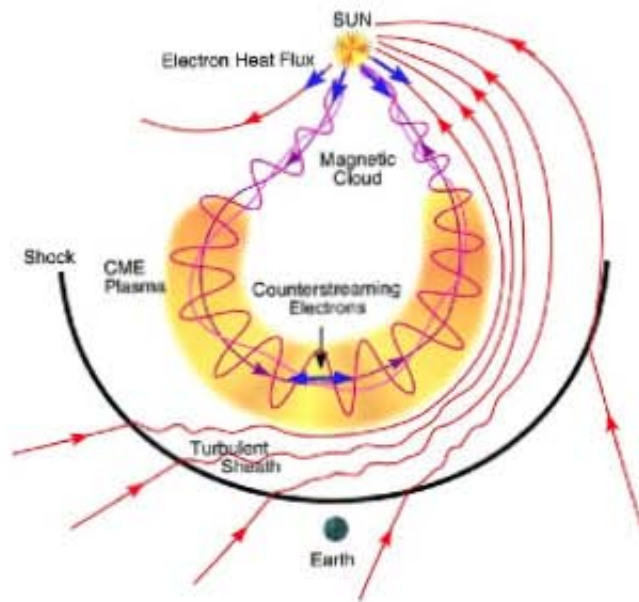


Figura 1.3: Diagrama esquemático de una EMCI. La línea negra gruesa representa el choque, la región turbulenta es la funda y en amarillo se encuentra la EMCI (Zurbuchen et al., 2006).

La región turbulenta es la Región de Compresión, y es la que proponemos encontrar con nuestro método estadístico basado en cuatro parámetros básicos del viento solar: la magnitud de la velocidad \mathbf{v} , la magnitud del campo magnético \mathbf{B} , la densidad N y la temperatura T .

Una EMCI cumple las siguientes características (Gosling et al., 1991; Cane et al., 2003; Zurbuchen et al., 2006; Richardson, 2011):

- Un cambio drástico en el campo magnético ($> 10 nT$, Hishberg & Colburn (1969)).
- Un campo magnético rotante (si es nube, $>> 30^\circ$ Klein & Burlaga (1982)).
- β muy bajo.
- T baja ($T_p < 0.5 T_{exp}$, Gosling et al (1973)).
- La razón entre la densidad numérica de partículas alfa entre la de los protones N_α/N_p es alta ($\frac{He^{2+}}{H^+} > 8\%$, Hishberg et al (1972)).
- Electrones supratérmicos bidireccionales.
- v_p cae lentamente.
- Estados inusuales de la carga de iones.

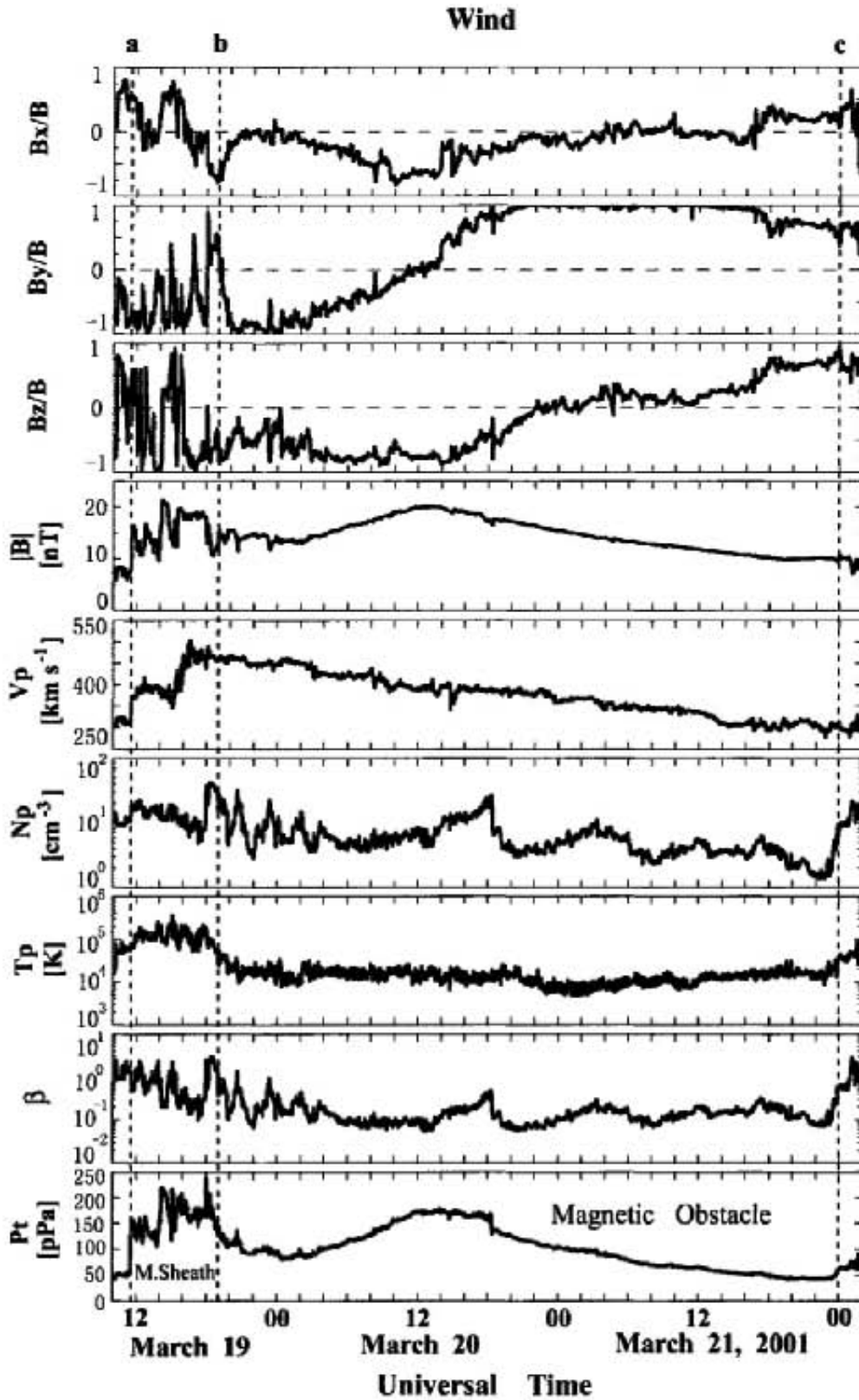


Figura 1.4: Ejemplo de una Nube Magnética (NM). En esta gráfica se muestran las componentes del campo magnético normalizadas, la magnitud del campo magnético \mathbf{B} , la magnitud de la velocidad \mathbf{v} , la densidad N , la temperatura T , el parámetro β y la presión total P_t . La rotación del campo magnético es muy clara en la dirección y , entre las líneas discontinuas a y b se marca la Región de Compresión y de b a c la NM (tomada de Jian et al., 2008).

Así como en el caso de las RICs, hay EMCIs que no presentan todas estas firmas. La identificación no es sencilla ya que no se puede elegir solo una de ellas. Se requiere el análisis de varias y en general la identificación se ha hecho de manera subjetiva.

Nubes Magnéticas

Cuando las EMCIs tienen un β muy bajo y presentan una rotación coherente del campo magnético interno (Klein & Burlaga, 1982) se les denomina Nubes Magnéticas (NMs). Las NMs son un subconjunto de las EMCIs (ver la Figura 1.4).

1.2. PLASMAS NO COLISIONALES

A 1 UA, el viento solar es un plasma no colisional. En este capítulo mencionaremos algunas propiedades físicas de los plasmas no colisionales.

1.2.1. Ecuación de Vlasov

Para describir completamente el comportamiento de un plasma a cualquier tiempo t se requiere conocer la posición y la velocidad de cada una de las partículas (iones y electrones). Cada partícula cambia su posición y velocidad bajo la influencia de campos electromagnéticos, tal que nos es necesario conocer estos campos en cada punto. Entonces los campos electromagnéticos cambian de acuerdo a las ecuaciones de Maxwell en donde la corriente es obtenida a través de la información de la posición y velocidad de las partículas.

Para simplificar el problema, debemos renunciar a tanta precisión y hablar de distribuciones estadísticas de las posiciones y las velocidades, de tal forma que podemos obtener un valor razonable de las densidades de carga y corriente que producen los campos \mathbf{E} y \mathbf{B} que mueven a las partículas. De la misma forma, las distribuciones estadísticas de las densidades de corriente y carga son influenciadas por los campos \mathbf{E} y \mathbf{B} .

Nos conviene entonces definir la función de distribución f_j donde

$$f_j(r, v, t) d^3r d^3v \quad (1.1)$$

nos permite obtener el número promedio de partículas del tipo j que hay en un volumen pequeño del espacio fase $d^3\mathbf{r} d^3\mathbf{v}$:

$$d^6 N_j = f_j(\mathbf{r}_j, \mathbf{v}, \mathbf{t}) d^3\mathbf{r} d^3\mathbf{v}. \quad (1.2)$$

Con la función de distribución podemos obtener la densidad de cada especie:

$$\rho(r, t) = N(r, t)m, \quad (1.3)$$

donde m es la masa y $N(r, t)$ es el número total de partículas definido como:

$$N(r, t) = \int f_k(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) \mathbf{v} d^3\mathbf{v}. \quad (1.4)$$

También la densidad de corriente:

$$\mathbf{j}(r, t) = \sum_k \frac{e_k}{c} \int f_k(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) \mathbf{v} d^3\mathbf{v} \quad (1.5)$$

y la densidad de carga promedio:

$$\rho_c(r, t) = \sum_k e_k \int f_k(\mathbf{v}, \mathbf{r}, t) d^3\mathbf{v}, \quad (1.6)$$

donde e_k es la carga de cada una de las especies. Con estas dos ecuaciones, podemos usar las ecuaciones de Maxwell para encontrar \mathbf{E} y \mathbf{B} . Cada especie de partícula en el plasma responde de manera diferente dependiendo de la carga y la masa de las partículas que la caracterizan. Entonces, tendremos una ecuación por cada una de las especies involucradas. En principio se estudia cada especie de manera independiente.

Entonces, considerando que el plasma que nos concierne es no colisional, puede ser descrito por un sistema de ecuaciones de Vlasov acopladas a las ecuaciones de Maxwell:

$$\frac{\partial f_j}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f_j + \frac{e_j}{m_j} (\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{B}}{c}) \cdot \frac{\partial f_j}{\partial \mathbf{v}} + \mathbf{g} \cdot \frac{\partial f_j}{\partial \mathbf{v}} = 0, \quad (1.7)$$

La idea de estudiar algunos parámetros del viento solar es para entender su comportamiento, su evolución y su interacción con otros cuerpos que se encuentran en el Sistema Solar. La ecuación de Vlasov permite describir el movimiento del viento solar y depende de la velocidad \mathbf{v} , el campo magnético \mathbf{B} , su masa m que en el caso de las mediciones *in situ* nos referiremos a la densidad N . Estos parámetros varían en el tiempo t .

1.2.2. Choques Hidrodinámicos

Como proponemos un método para encontrar de manera automática Regiones de Compresión, nos interesan las transiciones entre dos estados de plasma diferentes y en ocasiones dependiendo de que tan marcada sea la transición podremos tener choques.

Un choque se puede definir como una transición no lineal entre dos estados diferentes de plasma (Korreck, 2007). El fluido antes del choque tiene una velocidad $v_1 = U$, una densidad de masa

$\rho_1 = m_1 N_1$ y presión p_1 , mientras que después del choque son $v_2 = U - U_2$, ρ_2 y p_2 . Por conservación de masa, momento y energía:

$$\rho_2 v_2 = \rho_1 v_1, \quad (1.8)$$

$$p_2 + \rho_2 v_2^2 = p_1 + \rho_1 v_1^2, \quad (1.9)$$

$$p_2 v_2 + \left(\rho_2 e_2 + \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 \right) = p_1 v_1 + \left(\rho_1 e_1 + \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 \right), \quad (1.10)$$

donde $e = p/[(\gamma - 1)\rho]$ es la energía interna, en donde γ es el cociente entre calores específicos a presión constante C_p y volumen constante C_V .

Con esto, las Relaciones de Salto de Rankine-Hugoniot son:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_2}{\rho_1} &= \frac{(\gamma + 1)M_1^2}{2 + (\gamma - 1)M_1^2}, \\ \frac{v_2}{v_1} &= \frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{(\gamma + 1)M_1^2}, \\ \frac{p_2}{p_1} &= \frac{2\gamma M_1^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1}, \end{aligned} \quad (1.11)$$

donde $M_1 = \frac{v_1}{c_s}$. Estas ecuaciones nos pueden decir algunas características del choque como por ejemplo:

- Si $M_1 \geq 1$, implica que la velocidad de choque (v_1) excede la velocidad del sonido delante del choque;
- Si $v_2 \leq c_{s2}$, el fluido es subsónico detrás del choque (y supersónico delante de él);
- Si $p_2 \geq p_1$, y $\rho_2 \geq \rho_1$, el choque es compresivo;

Hay dos parámetros del plasma que nos pueden servir para determinar quien domina el comportamiento del plasma, ya sean los campos electromagnéticos o simplemente la presión dinámica del medio

Al cociente entre la presión térmica y la presión magnética se le conoce como β del plasma $\beta = \frac{P_k}{P_M}$ con P_k la presión cinética y P_M la presión magnética. Podemos escribir β en función de la velocidad del sonido c_s y la velocidad de Alfvén v_A :

$$c_s^2 = \gamma \frac{P_k}{\rho} \Rightarrow P_k = \frac{c_s^2 \rho}{\gamma},$$

por otro lado, de la definición para la velocidad de v_A se tiene:

$$v_A^2 = \frac{B^2}{4\pi\rho} \Rightarrow P_M = \frac{B^2}{8\pi} = \frac{v_A^2 \rho}{2}.$$

Por lo que tenemos:

$$\beta = \frac{2 c_s^2}{\gamma v_A^2}.$$

Nosotros proponemos identificar choques al comparar las diferencias de velocidades entre el viento solar y la estructura de gran escala y la velocidad de Alfvén.

La velocidad del sonido c_s y la velocidad de Alfvén v_A están directamente ligadas con las dos formas posibles que hay de transferencia de energía en el viento solar. La velocidad de Alfvén depende de los campos magnéticos mientras que la del sonido depende de la presión.

La presión cinética está relacionada con la temperatura mientras que la presión magnética lo está con el flujo magnético por unidad de área.

1.2.3. Campos Magnéticos Congelados

Una de las propiedades más importantes de un plasma ideal es el congelamiento del plasma y el campo magnético. Si la evolución del campo magnético está gobernada por:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (1.12)$$

El campo magnético está definido por líneas de campo y el número de líneas que hay en un elemento de plasma no debe cambiar. Entonces, se puede pensar que las líneas son transportadas con el plasma en el que están embebidas. Por lo tanto, si conocemos como se mueve el plasma también conocemos como se mueve el campo magnético \mathbf{B} . Como el plasma se mueve continuamente, entonces las líneas se mueven continuamente y no se pueden romper. La topología de las líneas se conserva.

Considerando una superficie S que se mueve arbitrariamente y definiendo el flujo que pasa a través de ella como:

$$\Phi(t) = \int_{S(t)} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{A}, \quad (1.13)$$

Esperamos que el flujo $\Phi(t)$ cambie con el tiempo con una dependencia en $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ y la superficie $S(t)$. La contribución de la primera dependencia es:

$$\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A} = \int_S \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{A} = \int_L \mathbf{v} \times \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}, \quad (1.14)$$

donde L es la curva que encierra a S . La contribución de la segunda dependencia es el cambio de superficie entre dos tiempos t y $t + dt$. Podemos definir entonces el área elemental entre dos curvas L y L' como: $\mathbf{v} dt \times d\mathbf{l}$. Entonces el flujo que pasa a través de este pedazo es:

$$-\int_L (dl \times \mathbf{v}) \cdot \mathbf{B} = -\int dl \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (1.15)$$

El cambio en Φ debido al cambio de superficie cancela al cambio debido al cambio en el campo magnético. Para cualquier cambio en la superficie o la orientación de la superficie el flujo se conserva y por tanto el número de líneas que cruzan la superficie también se conserva.

Si esto ocurre para cualquier línea de campo se cumple que la ecuación de inducción queda como:

$$\nabla \times \left(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{B}}{c} \right) = 0, \quad (1.16)$$

donde \mathbf{v} es la velocidad que satisface $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$. De esta forma, la condición general de conservación de línea (Newcomb, 1958) queda como:

$$\mathbf{B} \times \left[\nabla \times \left(\mathbf{E} \times \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{B}}{c} \right) \right] = 0. \quad (1.17)$$

De esta forma, si la línea se conserva y se ha descrito que viaja junto con el plasma, entonces es que las líneas de campo magnético están congeladas.

Con estas ideas básicas, entonces podemos entender la dinámica del viento solar. Esperamos que las propiedades de las estructuras de gran escala en el viento solar sean claras al viajar en el MIP. Las regiones de compresión serán observadas como regiones donde los parámetros son fluctuantes pero fuera de ellas los parámetros del plasma serán estables y definidos tanto para el viento solar como para la estructura que esté viajando en él.

1.3. INSTRUMENTOS

Para este estudio obtuvimos los datos de WIND para el periodo Enero 1997 a Abril 2011 de la página de internet, <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/sp-phys/>.

La resolución temporal de los datos es de 1 minuto. Los parámetros de nuestro interés son: v_x , v_y , v_z , N , B_x , B_y , B_z , T y β .

1.3.1. WIND

El satélite WIND fue lanzado el 1 de Noviembre de 1994. Esta nave lleva a bordo una serie de instrumentos para medir partículas cargadas y los campos eléctrico y magnético que caracterizan al medio interplanetario (MIP) o el viento solar, el cual no es más que un ambiente de plasma (<http://pwg.gsfc.nasa.gov/wind.shtml>).

WIND provee un monitoreo continuo de las condiciones del viento solar cerca de la Tierra. Estas mediciones permiten investigar las distorsiones y los cambios en el viento solar que pueden

provocar fenómenos geomagnéticos importantes (como las auroras y las tormentas magnéticas). El objetivo principal de WIND es avanzar en el entendimiento de la relación entre la dinámica del viento solar y la Tierra. Sus mediciones se usan para estudiar la naturaleza propia del viento solar.

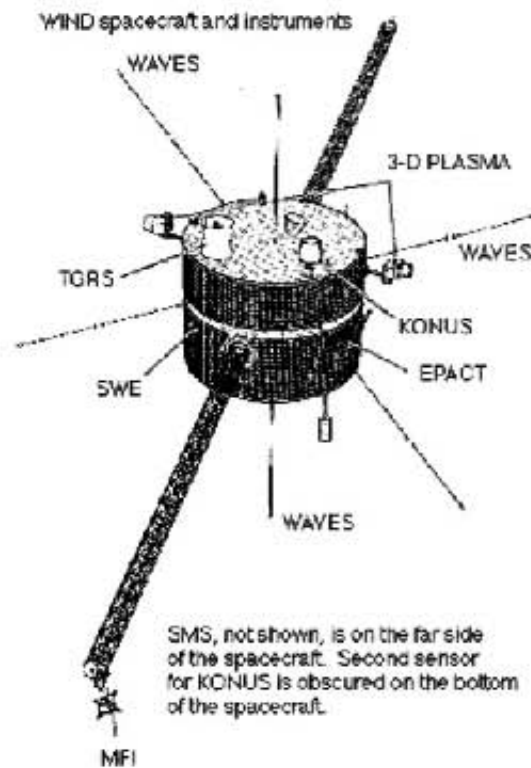


Figura 1.5: Satélite Wind con todos los instrumentos que lleva a bordo. Para nuestro estudio los instrumentos más importantes son SWE y MFI (Imagen tomada de Jian et al., 2008).

Los objetivos de WIND son:

- Dar información completa del plasma, las partículas cargadas, el campo magnético que inciden en la Tierra para estudios ionosféricos y magnetosféricos.
- Determinar la energía que la magnetosfera le cede al MIP en la región de corriente arriba.
- Investigar los procesos básicos del viento solar cerca de la Tierra.
- Dar observaciones en la región de la eclíptica que pueden ser usadas como punto de referencia para las latitudes heliosféricas de ULYSSES.

Ya que nos interesan v_x , v_y , v_z , N , B_x , B_y , B_z , T y β , estos parámetros del viento solar se obtienen de dos de los instrumentos que se encuentran a bordo: El Experimento Viento Solar, que

en inglés se denomina Solar Wind Experiment (SWE) y la Investigación de Campos Magnéticos que en inglés se le llama Magnetic Fields Investigation (MFI).

El SWE es un conjunto de instrumentos destinados a atacar los problemas más sobresalientes en la magnetofunda, el choque y el medio interplanetario (Olgivie et al., 1993). Los rangos de operación se muestran en Tabla ??.

Los parámetros de la velocidad, la densidad y la temperatura de los iones del viento solar serán extraídos de mediciones 3D hechas por un analizador de Faraday el cual está compuesto por dos copas de Faraday. Esta parte del instrumento deriva del instrumento de plasma a bordo de Voyager (Bridge et al., 1977) y los analizadores de Faraday de IMP 7 y 8 (Bellomo & Mavretic, 1978). Este analizador mide como fluye el plasma supersónico en el Medio Interplanetario (MIP).

Tabla 1.1: Rangos de Operación de WIND para los parámetros del viento solar de nuestro interés.

PARÁMETRO	RANGO	PORCENTAJE DE ERROR
Velocidad de protones (3 Componentes)	200 – 1250 $\frac{km}{s}$	$\pm 3\%$
Densidad numérica de protones	0.1 – 2007 $\frac{1}{cm^3}$	$\pm 10\%$
Velocidad térmica	0 – 200 $\frac{km}{s}$	$\pm 10\%$
Número de alfa/protones (Razón de densidad x 100)	0 – 100 %	$\pm 10\%$

Los sensores complementarios de SWE permiten conocer las funciones de distribución de las tres dimensiones de la velocidad de los protones y alfas. Dos copas de Faraday permiten cortes sobre la función de distribución integrada en un intervalo de tiempo de elección y en el plano perpendicular a la normal de la copa (Vasliunas, 1971). Las copas estan colocadas 15° arriba y abajo del plano ecuatorial de la nave permitiendo escaneos 3D de la función de distribución de los iones.

El analizador de Faraday está hecho para determinar las funciones de distribución y los parámetros básicos del flujo de los iones del viento solar. Una copa contiene un conjunto de rejillas planas y dos platos colectores semicirculares en los que solo una sección será afectada por el viento solar. Se mide la corriente eléctrica correspondiente debida a los iones positivos y para determinar la energía de los iones incidentes y discriminar entre las partículas cargadas y la corriente fotoeléctrica producida por la luz solar, se elige una frecuencia de corte a 200 Hz y se mide el flujo. Es decir, se aplica un potencial que varía positivamente con el tiempo y también la dirección en términos de una rejilla metálica. Este potencial es generado por un modulador que produce esta onda cuadrada a 200 Hz (Olgivie et al., 1993).

La forma de onda que resulta puede variar de V (volts) hasta $V + \Delta V$, donde $V + \Delta V$ puede ser tan alto como 8 kV y ΔV hasta 1 kV . La corriente resultante al ser filtrada es acumulada sincrónicamente y es integrada en un capacitor durante un intervalo de tiempo dado. El voltaje resultante es convertido a señal digital.

De esta forma, como ΔV es variable, el ancho de energía/carga del detector es variable sobre una geometría elegida. Esta flexibilidad permite encontrar fácilmente los picos de la distribución del viento solar.

La dirección del viento solar puede ser determinada grado a grado ya que la nave está girando y contiene las copas del analizador de Faraday en direcciones opuestas. El viento solar realmente es medido en $\frac{2}{3}$ del intervalo y las variaciones de la función de distribución de la velocidad pueden ser observadas incluso en resoluciones temporales de 1 segundo.

Si conocemos la distribución de velocidades también se conoce la densidad del viento solar supersónico y además no tienen ningún tipo de corrección por eficiencia de la dependencia en energía.

De esta forma la densidad, velocidad y temperatura del viento se determina tomando los momentos de la corriente medidos en cada ventana de energía. Usando un modelo de distribución de velocidades no lineal y un ajuste de mínimos cuadrados a las corrientes se puede extraer la máxima cantidad de información de las medidas (Olgivie et al (1993)).

De esta forma SWE nos da:

- Alta resolución en $3D$ de las distribuciones de velocidad de las componentes iónicas del viento solar, para iones con energías entre 200 eV y 8 keV .
- Alta resolución en $3D$ de las distribuciones de velocidad del flujo de plasma subsónico incluyendo los electrones del viento solar e información de los iones reflejados en la región de choque con energías entre 7 eV y 22 keV .
- Alta resolución angular en las mediciones del strahl de los electrones del viento solar, tanto en la dirección del campo como en la dirección opuesta con energías entre 5 eV y 5 keV .

El SWE consiste en 5 sensores integrados y una unidad de procesamiento de datos. Los sensores están montados por arriba y por abajo de los escudos de la nave y están extendidos sobre la superficie.

El MFI investigará estructuras de gran escala y las fluctuaciones características del campo magnético en función del tiempo, que influyen en el transporte y pueden acelerar partículas del viento solar así como influir en los procesos dinámicos de la magnetosfera terrestre.

El MFI nos permite obtener:

- Alta resolución de las mediciones del campo magnético en tiempo real.
- Un amplio rango posible que va desde $\pm 0.004 \text{ nT}$ hasta mas de $\pm 65,536 \text{ nT}$ en ocho pasos discretos.
- 44 valores por segundo para el análisis de fluctuaciones al usar transformadas de Fourier.

Este instrumento consta de un magnetómetro triaxial montado en el cuerpo de la nave. Tiene sensores que producen señales analógicas proporcionales a la magnitud del campo magnético que está alineado al sensor. Estas señales son digitalizadas por un microprocesador.

Capítulo 2

FLUCTUACIONES

En general, dependiendo de la diferencia de velocidades, cualquier estructura de gran escala que viaje en el viento solar puede presentar una Región de Compresión. Las Regiones de Compresión mostrarán variaciones importantes en diferentes parámetros. Llamamos a estas variaciones importantes fluctuaciones y analizándolas proponemos un método para determinar de manera automática (sin la necesidad de un observador) cuando los instrumentos detectan una Región de Compresión.

Para nuestro análisis obtenemos del CDAWeb (http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public/) las componentes en el sistema de coordenadas GSE de la velocidad de protones (v_x, v_y, v_z), las correspondientes al campo magnético (B_x, B_y, B_z), los valores de la densidad de protones N , de la temperatura de protones T , y del parámetro beta del plasma β . Éstos son parámetros básicos relacionados con las Regiones de Compresión y el viento solar.

Estimamos las magnitudes de la velocidad \mathbf{v} y del campo magnético \mathbf{B} para cada minuto (resolución temporal que usamos) siguiendo que $\mathbf{P}^2 = P_x^2 + P_y^2 + P_z^2$.

A partir de este momento \mathbf{A} puede ser: $\mathbf{v}, \mathbf{B}, N, T, \beta$, recordando que la resolución de WIND es de 1 minuto y además entendiendo que al referirnos a cada uno de estos parámetros realmente son series de tiempo (vectores) con el número de elementos que corresponde al número de minutos durante Enero 1997 a Abril 2011 ($Z = 7.776 \times 10^5$ minutos). Como \mathbf{A} es un vector lo denotamos en negrita mientras que a cada elemento de este vector nos referiremos a A_i , donde i va desde 1 hasta Z .

Estimamos el promedio móvil $\langle A \rangle_i^*$ para cada elemento de \mathbf{A} tal que:

$$\langle A \rangle_i^* = \frac{\sum_{i-d\mu/2}^{i+d\mu/2} A_i}{d\mu}, \quad (2.1)$$

tomando de esta forma $d\mu$ elementos alrededor de cada valor A_i del vector A , donde A puede ser $\mathbf{v}, \mathbf{B}, N, T$ y β . En los primeros $\frac{d\mu}{2}$ elementos de los vectores $\mathbf{A}[0, \frac{d\mu}{2}]$ tomamos el promedio que

obtenemos en $\mathbf{A}(\frac{d\mu}{2})$ y en los ultimos $\frac{d\mu}{2}$ elementos $\mathbf{A}[Z - \frac{d\mu}{2}, Z]$, el promedio que obtenemos en $\mathbf{A}(Z - \frac{d\mu}{2})$. Ya que necesitamos un análisis estadístico (que discutimos en secciones posteriores) para definir $d\mu$, es decir, el número de elementos a tomar en cuenta en el promedio, en esta capítulo lo dejaremos solo denotado.

La desviación estándar $\sigma(\mathbf{A})$ es un vector que contiene la desviación estándar $\sigma_i(A_i)$ para cada elemento de \mathbf{A} que se define como:

$$\sigma_i(A_i) = \sqrt{\text{var}(A_i)}, \quad (2.2)$$

donde $\text{var}(A_i)$ es la varianza determinada por:

$$\text{var}(A_i) = \frac{\sum_{i-d\mu/2}^{i+d\mu/2} (A_i - \langle A_i \rangle^*)^2}{d\mu}. \quad (2.3)$$

Si el cambio en las fluctuaciones es proporcional al cambio de $\langle A_i \rangle^*$ no podemos distinguir diferencias importantes entre estas fluctuaciones. Para evitarlo, elegimos como referencia el promedio total definido como:

$$\langle \mathbf{A} \rangle_T = \frac{1}{Z} \sum_{i=0}^Z A_i, \quad (2.4)$$

donde Z es el número total de elementos de cada vector parámetro \mathbf{A} , es decir, $Z = 777600$. Si definimos $\Delta(\mathbf{A})$ donde cada uno de sus elementos se toma como:

$$\Delta_i(A_i) = \frac{\sigma(A_i)}{\langle \mathbf{A} \rangle_T}. \quad (2.5)$$

y normalizamos, dividiéndolos entre el valor máximo de $\sigma(\mathbf{A})$ con el fin de comparar las fluctuaciones de los diferentes parámetros entre sí,

$$\delta(\mathbf{A}) = \frac{\Delta(\mathbf{A})}{\text{MAX}(\sigma(\mathbf{A}))}, \quad (2.6)$$

entonces elegimos $\delta(\mathbf{A})$ como nuestra definición de fluctuación.

Esto quiere decir que a partir de \mathbf{A} construimos el arreglo $\delta(\mathbf{A})$ que nos indica el grado de fluctuación normalizado del parámetro \mathbf{A} para cada tiempo. Cabe señalar que $\delta(\mathbf{A})$ es una función del tamaño de la ventana $d\mu$ que se eligió a prueba y error. Si $d\mu$ es muy pequeña tendremos demasiada información de cambios rápidos en \mathbf{A} . Por otra parte, si $d\mu$ es demasiado grande perderemos información de los cambios del parámetro. Se eligió $d\mu = 40$.

Para poder determinar de manera automática las fluctuaciones importantes que nos indiquen, por ejemplo, cuando hay Regiones de Compresión a 1 UA, se eligió la desviación estándar móvil de las fluctuaciones como referencia, obteniendo desviaciones estándares móviles $\sigma_M(\delta\mathbf{A})$ de intervalos

de 6 meses alrededor de las fluctuaciones (3 meses antes y 3 meses después para cada punto del vector $\delta\mathbf{A}$).

Ésto es con el fin de determinar la importancia de las fluctuaciones. Es decir, $\delta(\mathbf{A})$ es importante si $\delta(\mathbf{A}) \geq k\sigma_M(\delta\mathbf{A})$, en donde k es seleccionado de manera estadística y ser $k = 3.6$. Tanto el valor de $d\mu$ como el de k se explicarán más adelante.

2.1. ANÁLISIS DE LAS FLUCTUACIONES

Definimos las fluctuaciones, mediante un promedio móvil que a su vez requiere definir un tamaño de ventana $d\mu$. Para fines prácticos, esta ventana es $d\mu = 40$, que corresponden a 40 minutos. La resolución de los datos es de 1 minuto. El por qué es 40 se explicará más adelante.

En la FIG 2.1 mostramos las fluctuaciones de cada parámetro a lo largo del intervalo de análisis, que corresponde a un ciclo solar aproximadamente. En negro, las fluctuaciones de la velocidad \mathbf{v} , en verde las fluctuaciones de la densidad N , en azul las correspondientes al campo magnético \mathbf{B} , rojo las fluctuaciones de la temperatura T y en morado las fluctuaciones del parámetro β .

Hay una dependencia de la magnitud de las fluctuaciones en términos del ciclo solar. En rosa se muestra este ciclo. La variación de la actividad del Sol en el ciclo se puede medir a través del número de manchas que hay sobre su superficie. Mayor actividad solar implica un mayor número de manchas.

Las fluctuaciones $\delta\beta$ son las únicas que aumentan cuando la actividad solar disminuye. Las fluctuaciones de los demás parámetros tienen una relación directa con el ciclo solar. A mayor actividad más grandes serán las fluctuaciones.

Cuando una Región de Compresión es registrada *in situ*, los parámetros del viento solar varían. Hay una región de interacción entre dos parcelas de plasma con condiciones diferentes que hace que los parámetros no sean estables. Las fluctuaciones de los parámetros que más se relacionan con las Regiones de Compresión son δT , δN , $\delta\mathbf{B}$ y $\delta\mathbf{v}$.

Para determinar si existe una relación entre las fluctuaciones de los diferentes parámetros que nos pudiera ayudar con la identificación de estructuras de interés, en la Figura 2.2 comparamos las fluctuaciones de $\delta\mathbf{v}$ con las fluctuaciones δN , $\delta\mathbf{B}$, δT y $\delta\beta$. En cada gráfica hay más de 7×10^6 puntos. Para poder visualizar mejor una posible relación entre las fluctuaciones, se obtuvieron los promedios mensuales, las comparaciones se muestran en la FIG 2.3.

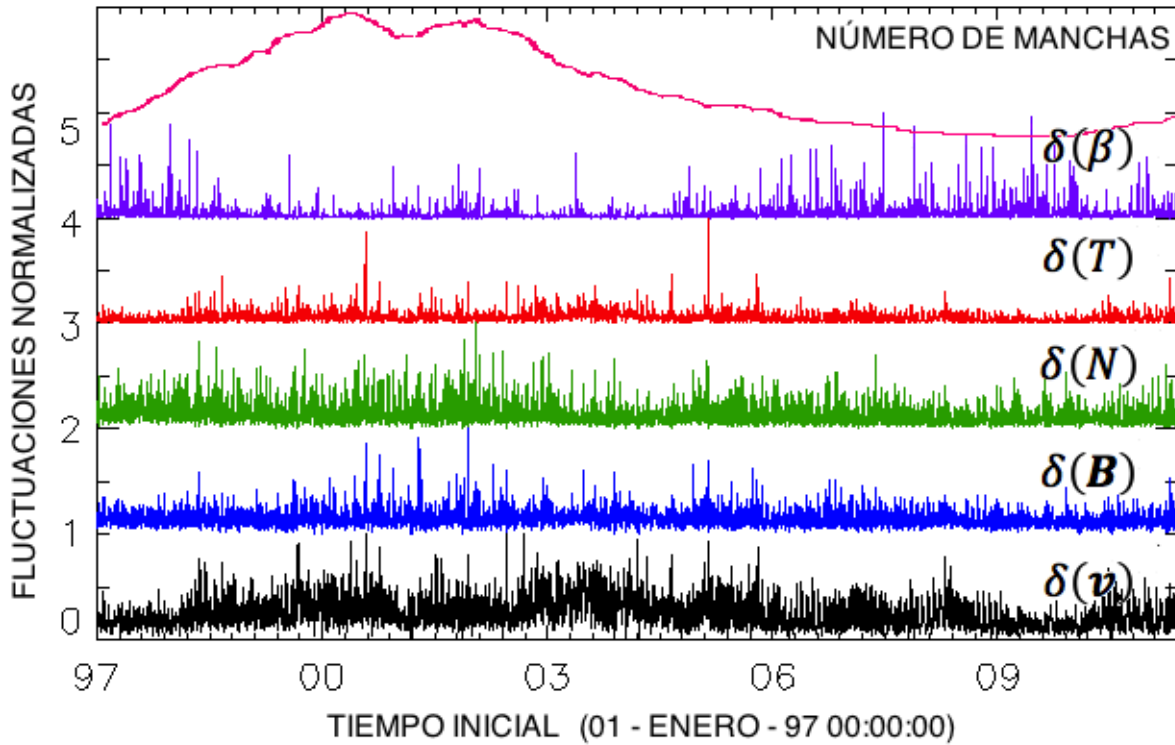


Figura 2.1: Relación entre el ciclo solar y las fluctuaciones $\delta\beta$, δT , δN , $\delta\mathbf{B}$ y $\delta\mathbf{v}$. En negro, las fluctuaciones de la velocidad $\delta\mathbf{v}$, en verde las fluctuaciones de la densidad δN (+1), en azul las correspondientes al campo magnético $\delta\mathbf{B}$ (+2), rojo las fluctuaciones de la temperatura δT (+3) y en morado las fluctuaciones $\delta\beta$ (+4). En rosa (+5) se muestra el ciclo solar, mostrado por el número de manchas sobre la superficie del Sol. Hemos sumado los números entre paréntesis solamente para efectos de claridad en la gráfica, recordando que todos los parámetros están normalizados.

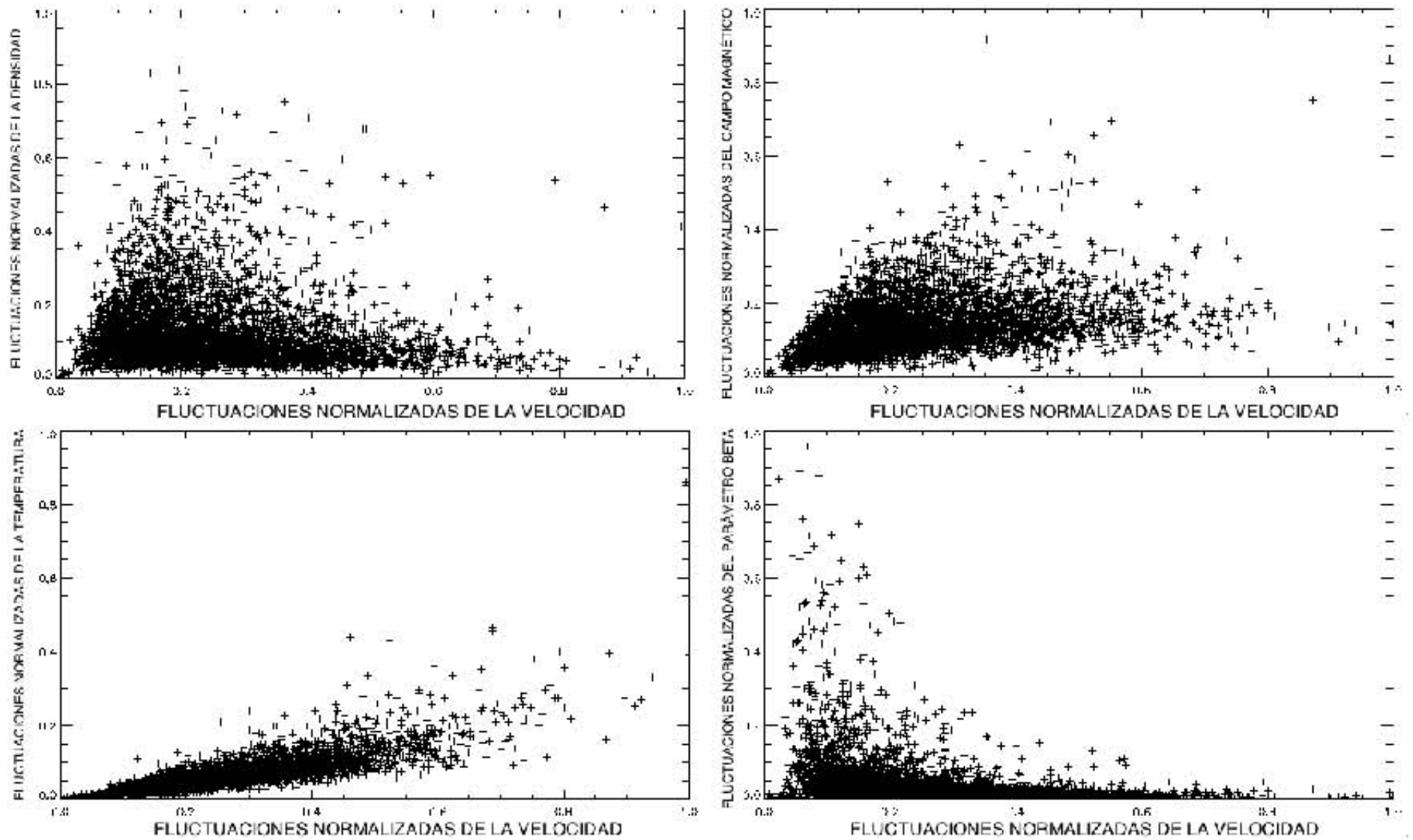


Figura 2.2: Posible relación de las fluctuaciones δv con δN (superior izquierda), δB (superior derecha), δT (inferior izquierda) y $\delta \beta$ (inferior derecha). Las fluctuaciones δT son las que presentan una clara relación con las fluctuaciones δv .

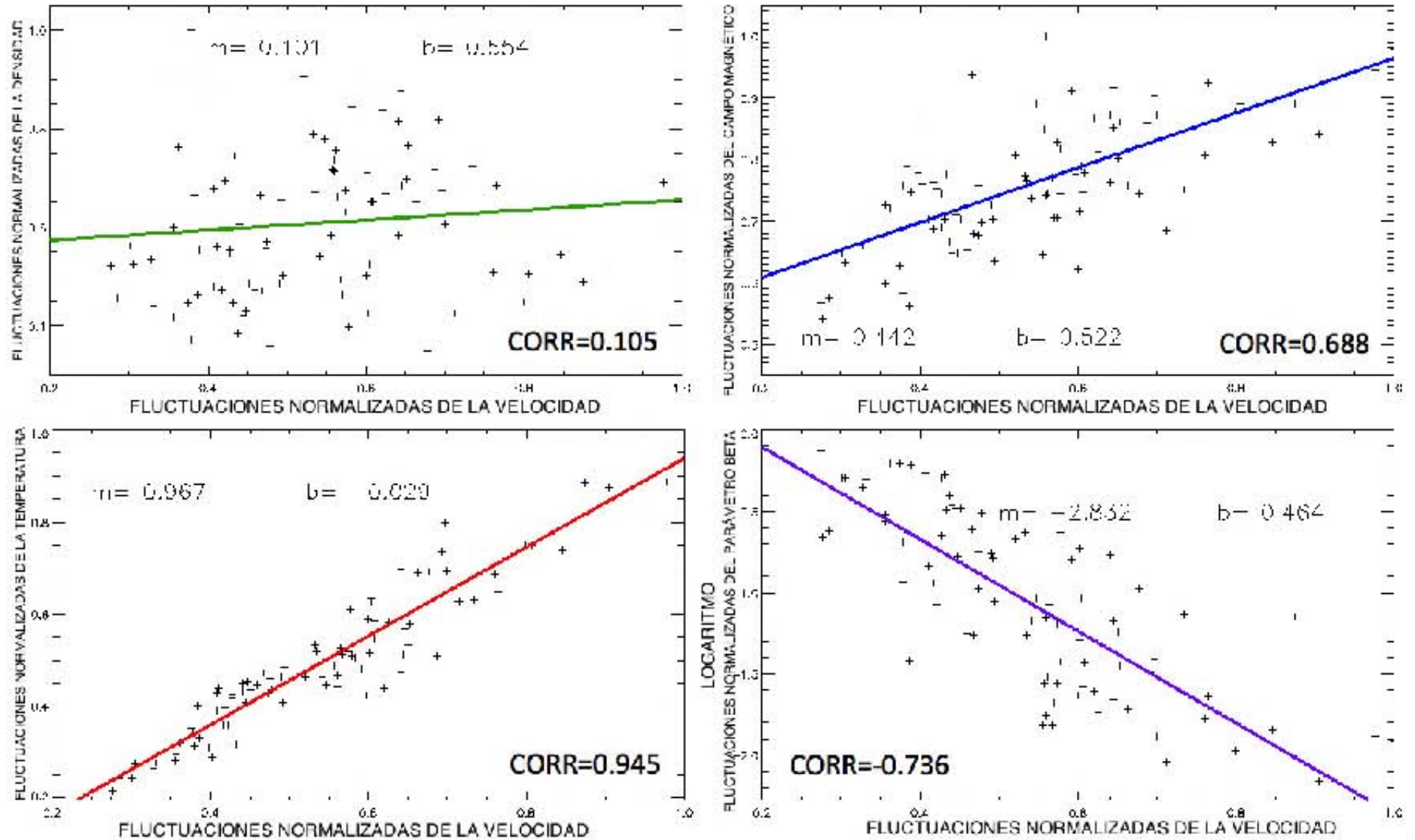


Figura 2.3: Relación de las fluctuaciones promediadas por mes de δv con δN (superior izquierda), δB (superior derecha), δT (inferior izquierda) y $\delta \beta$ (inferior derecha). Las fluctuaciones de δT son las que presentan una clara relación con las fluctuaciones de δv . En líneas de color se muestran los ajustes lineales (verde para la δN , azul para δB , rojo para δT y morado para $\delta \beta$). Para cada recta se escribieron su pendiente m y su ordenada al origen b . También se estimaron sus coeficientes de correlación. Las fluctuaciones con mayor correlación con δv son las fluctuaciones de δT . En este caso no usamos la correlación cruzada, sólo la correlación lineal.

Las dependencias lineales son de la forma $y = mx + b$. Para $\delta\beta$ es de la forma $\log y = mx + b$. En el CUADRO 2.1 se muestran las pendientes (m), las ordenadas al origen (b) y el coeficiente de correlación para cada relación entre las fluctuaciones.

Cuadro 2.1: Dependencia lineal y coeficiente de correlación para cada una de las relaciones de $\delta\mathbf{v}$ con δN , $\delta\mathbf{B}$, δT y $\delta\beta$

RELACIÓN	PENDIENTE (m)	ORDENADA (b)	CORRELACIÓN
$\delta\mathbf{v}/\delta N$	0.101	0.55	0.105
$\delta\mathbf{v}/\delta\mathbf{B}$	0.44	0.52	0.688
$\delta\mathbf{v}/\delta T$	0.967	-0.029	0.945
$\delta\mathbf{v}/\delta\beta$	-2.832	0.464	0.736

Los coeficientes de correlación son los valores más importantes de este cuadro. Las fluctuaciones $\delta\mathbf{v}$ están directamente relacionadas con $\delta\mathbf{B}$ y δT . A medida que $\delta\mathbf{v}$ aumentan, δN , $\delta\mathbf{B}$ y δT también aumentan. Por otra parte, cuando $\delta\mathbf{v}$ aumentan $\delta\beta$ disminuyen.

El coeficiente de correlación de $\delta\mathbf{v}$ con δN es menor a 0.5. Para entender esto, pensemos en una arcada que viaja a una velocidad de $400 \frac{km}{s}$ y con un ancho de $\frac{1}{2}UA = 7.5 \times 10^7 km$.

Considerando que $\Delta t = \frac{\Delta d}{v}$, tal que, $\Delta t = 1.875 \times 10^5 s \approx 52 h$. Para una arcada que viaja a $1000 \frac{km}{s}$, $\Delta t = 7.5 \times 10^4 s \approx 21 h$.

Un cambio en la densidad se puede definir como $\Delta\rho = \frac{\Delta n}{V}$, donde n se refiere al número de partículas y V el volumen. Podemos pensar el volumen $V = A\Delta X$ y $\Delta X = v\Delta t$ donde A es el área, v es la velocidad y t es el tiempo. Al sustituir obtenemos que $\Delta\rho = \frac{1}{v} \frac{\Delta n}{A\Delta t}$. Esta ecuación nos dice que las fluctuaciones de la densidad no sólo dependen de los cambios en el número de partículas (directamente) sino también inversamente de la velocidad del viento solar.

Por ejemplo, si suponemos que una fluctuación en el parámetro ocurre en 10 minutos para la arcada que viaja a $400 \frac{km}{s}$ podremos detectar 31 fluctuaciones mientras que para una arcada que va a una velocidad de $1000 \frac{km}{s}$ tan solo detectaremos 12. Este es un problema observacional y es por esto que las gráficas de relación de $\delta\mathbf{v}$ con δN presentan una correlación tan baja y no una dependencia lineal.

En principio, δN nos podrá ayudar a encontrar el inicio de las estructuras, pero no podrá ser útil para determinar el final de ellas, ya que las fluctuaciones no están directamente correlacionadas con las correspondientes a la velocidad y los demás parámetros. Usaremos la correlación entre las fluctuaciones de estos parámetros para determinar la duración de las Regiones de Compresión.

Como la densidad no está correlacionada no es útil para determinar la duración de las Regiones de Compresión.

La correlación entre $\delta\mathbf{v}$ y $\delta\mathbf{B}$ es de 0.688, suficiente para considerar que existe una relación entre estas fluctuaciones. Pensamos que esta correlación es debida a que el plasma está *congelado* en el campo magnético.

Para la temperatura la correlación es de 0.945, esto quiere decir que existe una relación directa entre las fluctuaciones independientemente de los instrumentos. (Borovsky, 2006) publicó la misma dependencia y correlación con otra aproximación estadística, usando turbulencia, el número de Reynolds y el transporte de energía en el viento solar.

De esta forma, en esta sección mostramos que nuestro método cumple con todos los detalles conocidos que se asocian a Regiones de Compresión y que nuestras fluctuaciones también presentan la misma dependencia al ciclo de actividad solar que los parámetros.

Capítulo 3

CORRELACIONES

Las correlaciones indican cuando dos series de tiempo varían sistemáticamente una con respecto a la otra. Dentro de las funciones de IDL, se encuentra la función de correlación cruzada P_{xy} , es decir, una medida de la similitud entre dos conjuntos de datos desfasados (que llamaremos x y y). Para $lag \geq 0$ la correlación cruzada se define como:

$$P_{xy} = \frac{\sum_{k=0}^{N-lag-1} (x_k - \bar{x})(y_{k+lag} - \bar{y})}{\sqrt{[\sum_{k=0}^{N-lag-1} (x_k - \bar{x})^2][\sum_{k=0}^{N-lag-1} (y_{k+lag} - \bar{y})^2]}}$$

En nuestro caso, nuestras variables son funciones del tiempo. Esta función requiere, que le digamos cuanto tiempo de retardo (lag) puede existir entre una señal y otra para buscar las similitudes. Tomamos el tiempo de retardo máximo $lag = 1 \text{ hr}$, cuidando que tomara media hora antes del valor a analizar y terminara media hora después. Es decir, la relación entre las variables debe ocurrir en menos de 1 hora.

Nos interesó correlacionar las fluctuaciones $\delta\mathbf{v}$, $\delta\mathbf{B}$, δN , δT y $\delta\beta$, pero la función C_CORRELATE solo puede correlacionar dos variables. Como se correlacionan en pares, tenemos 10 combinaciones diferentes.

Las correlaciones pueden tener un valor $[-1, 1]$ y para cada entrada de las fluctuaciones se obtiene un vector con el número de elementos de lag a los que se le asigna el valor de correlación para cada lag . Lo que hace es buscar para cada entrada donde tiene mayor similitud dado el rango de tiempo de tardanza que le asignamos.

Exigimos que los máximos de las correlaciones ocurrieran en un intervalo de menos de 5 minutos e hicimos histogramas para contar cuantos pares de fluctuaciones repetían, en el mismo tiempo, un máximo de correlación. Desde solo un par, hasta los diez pares juntos, que es contar el número de parámetros que tienen fluctuaciones similares en el mismo tiempo.

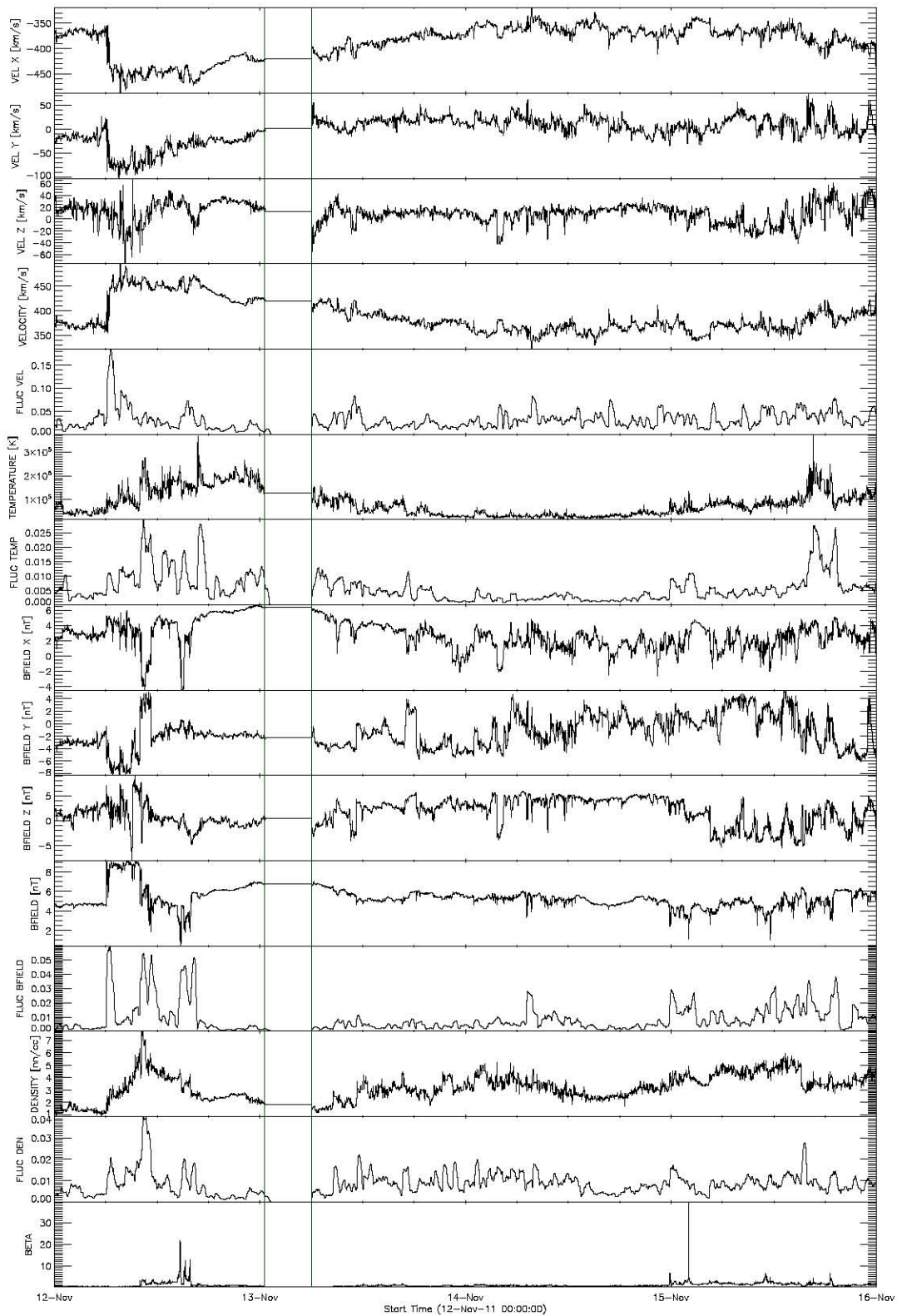


Figura 3.1: Ejemplo de un evento donde hay ausencia de datos en los parámetros. El intervalo de tiempo sin datos está limitado por dos rectas verticales en color verde. Este tipo de intervalos son ubicados (temporalmente) por este método de correlaciones cruzadas. Como nos interesa caracterizar las Regiones de Compresión y en trabajos posteriores las estructuras que continúan, no sirve tener periodos de tiempo con ausencia de datos. Cuando los eventos de todas las listas que usamos en este trabajo presentaron más de dos parámetros con intervalos de ausencia de datos fueron eliminados.

Los máximos no forzosamente son 1. Cuando hicimos los histogramas también permitimos variar el valor máximo dentro de $[0.9, 0.99]$. Solo nos interesan las correlaciones más altas, así que las otras no representan información útil para nuestro análisis.

En principio, el uso de las correlaciones cruzadas es una idea muy parecida a la que utilizamos para encontrar *estructuras de interés*, sin embargo, los resultados fueron totalmente diferentes. Las correlaciones encontraron la ubicación (o los tiempos) donde el instrumento no obtuvo mediciones, ya sea por saturación o porque simplemente no midió dentro de esos intervalos, es decir, tenemos una ausencia de datos. De esta forma, este método permite eliminar las *estructuras de "no" interés* donde hay ausencia de datos en al menos dos de los diferentes parámetros.

Por lo tanto, las correlaciones, en el método localizan temporalmente la ausencia de datos en al menos dos parámetros. Si tenemos ausencia de datos en dos parámetros, ya no es un evento útil para el análisis de identificación.

Utilizando esta información se eliminaron de la lista de *estructuras de interés* y de las listas que usamos para comparar (CDAW2010, Richardson & Cane (2011) y Jian (2006)) todas aquellas que tuvieran ausencia de datos. No hay que olvidar que para la lista de *estructuras de interés* y las listas CDAW2010, Richardson & Cane (2011) y Jian (2006) se usaron las mediciones *in situ* de \mathbf{v} , \mathbf{B} , N , T y β de WIND, instrumento localizado a 1 UA del Sol, cercano a la Tierra.

En la Figura 3.1 mostramos un ejemplo de un evento que tiene un intervalo de tiempo donde hay ausencia de datos. Este tipo de eventos no son útiles para caracterizar las Regiones de Compresión y tampoco para tratar de especificar el tipo de estructura que sigue después de ellas. Este tipo de eventos fueron descartados de todas las listas que usamos en este trabajo. Con esto, de 997 *estructuras de interés* encontradas automáticamente, solo quedaron 678.

Capítulo 4

BASES DE DATOS

Con el objeto de probar la efectividad de nuestro método automático comparamos las *estructuras de interés* con RICs y EMCIs reportadas en la literatura. Para esto, utilizamos las siguientes listas:

- Richardson & Cane (2011) (EMCIs Enero 1996 - Octubre 2011)
- Jian (2006) (RICs Enero 1997 - Abril 2011)
- CDAW2010 (EMCIs Enero 1997 - Enero 2007)

Cada una de estas listas considera también eventos que son híbridos, es decir, EMCIs viajando junto a RICs o incluso con otras EMCIs.

Definimos las *estructuras de interés* como Regiones de Compresión de estructuras de gran escala del viento solar.

4.1. RICHARDSON & CANE (2011)

Esta lista cuenta con 353 EMCIs, incluyendo estructuras híbridas, observadas durante el periodo que va de Enero 1996 a Octubre 2011 y reportadas en Richardson & Cane (2011). Se compararon los tiempos de arribo, los tiempos iniciales y finales de las EMCIs, sus velocidades máximas y las magnitudes del campo magnético ya que son los únicos parámetros en común con nuestro método. Cabe señalar que estos parámetros fueron obtenidos por inspección directa (subjetivamente) de los datos de WIND a 1 UA.

De la lista, con las correlaciones cruzadas (descritas en el capítulo anterior) fueron eliminados los eventos que cayeran justo donde hubiera ausencia de datos. Sólo se eligieron EMCIs dentro del intervalo de Enero 1997 a Enero 2007, esto se debe a que estas EMCIs ocurrieron durante el periodo en común con las otras listas. Usamos un total de 302 EMCIs.

4.2. JIAN (2006)

Esta lista cuenta con más de 500 eventos durante el periodo Enero 1995 a Diciembre 2009 reportados en Jian et al (2006). De la misma forma, se compararon los tiempos de arribo y los tiempos finales, las velocidades máximas y las magnitudes del campo magnético, parámetros en común con nuestro método y las otras listas. Esta lista es de RICs y SIRs obtenidas por inspección directa de los datos de WIND a 1 UA.

También se eliminaron los eventos con intervalos de tiempo con ausencia de datos usando las correlaciones cruzadas. De Enero 1997 a Enero 2007 ocurrieron 375 RICs.

Es importante notar que en Jian et al. (2006) se considera la región de compresión como parte de las RICs, mientras que en CDAW2010 (<http://cdaw.gsfc.nasa.gov>) y Richardson & Cane (2011) no se toma como parte de la estructura. Esto confirma la necesidad de unificar criterios de forma tal que sean independientes del observador.

4.3. CDAW2010

Esta lista cuenta con 85 EMCIs reportadas en CME LASCO y analizadas por diferentes autores. De esta lista se eligieron aquellos eventos que las EMCIs fueran suficientemente claras y que no fueran cuestionables, dejando un total de 74 EMCIs a analizar. En general, los criterios que se tomaron para considerar que son EMCIs son las descritas en Zurbuchen et al (2006), algunas de ellas fueron enlistadas en el marco teórico de este trabajo.

Se escribió una rutina en IDL que permite graficar, un día antes y cuatro días después de una fecha de interés (por ejemplo la de arribo de una EMCI) los siguientes parámetros: v_x , v_y , v_z , \mathbf{v} , $\delta\mathbf{v}$, N , δN , B_x , B_y y B_z , \mathbf{B} , $\delta\mathbf{B}$, T , δT y β . Las componentes de \mathbf{B} ayudan para determinar cuando las EMCIs son nubes magnéticas.

Comparamos los cambios que hay en las fluctuaciones con los cambios en los parámetros. Los cambios importantes en las fluctuaciones nos ayudaron a determinar mejor los tiempos de arribo, duración y final de las ICMEs reportadas en CDAW2010.

En CDAW2010 la selección de estos tiempos es por inspección directa (subjetivamente) de los datos *in situ* de WIND a 1 UA. Los autores no toman la región de compresión como parte de la EMCI. Esta lista contiene eventos ocurridos en el periodo de tiempo entre Enero 1997 a Enero 2007.

Nuestra rutina permite elegir los tiempos de arribo de la región de compresión y los tiempos iniciales y finales de la EMCI. Las fluctuaciones ayudan a determinar con mayor precisión los tiempos de arribo y permiten valorar con mayor seguridad los tiempos finales tanto de la región

de compresión como de la EMCI. Obtiene promedios de los parámetros y las fluctuaciones dentro de las regiones de compresión y las EMCIs y en otros intervalos de tiempo que para trabajos posteriores serán de gran utilidad, como por ejemplo, el promedio de los parámetros \mathbf{v} , \mathbf{B} , N , T , $\delta\mathbf{v}$, $\delta\mathbf{B}$, δN y δT , 10 minutos antes, 10 minutos después de la región de compresión, durante los primeros 10 minutos y los últimos 10 minutos de la EMCI, calcula la velocidad de Alfvén 10 minutos antes de la región de compresión.

Nosotros no consideramos la región de compresión dentro de la EMCI. En la Tabla 4.1 mostramos los tiempos de arribo de las regiones de compresión y los tiempos iniciales y finales de las 74 EMCIs de acuerdo con nuestro método de fluctuaciones.

Las fluctuaciones tienen relación directa con la región de compresión y con el arribo de diferentes estructuras que viajan (ya sea dependiente o independientemente) dentro de las EMCIs. En general, las EMCIs tienen estructuras muy complejas. Es difícil caracterizar los tiempos finales de las EMCIs. En la mayor parte de los eventos, el tiempo final se eligió en el momento en que una siguiente estructura truncó el evento de interés. En las gráficas de estos eventos notamos que:

- En la mayoría de los casos existen estructuras *intrusas*. Estas estructuras presentan fluctuaciones propias, es decir, muestran cambios en los parámetros, pero que, una vez que pasaron completamente a través del instrumento, tanto las fluctuaciones como los parámetros, regresan a un comportamiento muy parecido al que tenían antes del arribo de estos *intrusos* (ver la Figura 4.1).
- En los casos donde hay un evento seguido inmediatamente por otro, las fluctuaciones aumentan antes del arribo de la segunda. Es posible que exista una región de compresión debido a la interacción entre dos sistemas de plasma con diferentes características (ver la Figura 4.1). De esta forma, vemos que las fluctuaciones nos indican cuando es posible que haya estructuras diferentes viajando dentro de las EMCIs.
- La elección del tiempo final de las EMCIs no fue un proceso sencillo ya que la mayoría de los casos muestran no solo el arribo de un evento sino de varios. En la mayoría de los eventos, los tiempos finales, son considerados cuando el siguiente evento truncó al evento de nuestro interés. Diferentes autores consideran que el tiempo final de las EMCIs es cuando otra estructura la trunca (ver la Figura 4.2).

Hasta donde sabemos, no existe aún un trabajo sólido que describa la interacción entre estructuras de gran escala que llevan en sí plasma con condiciones muy diferentes (Liu et al., 2012). Aún no queda claro si estas estructuras pueden interactuar o viajan independientemente a través del medio interplanetario. Esta situación complica la elección más precisa de la duración de la región de compresión y la terminación de las EMCIs.

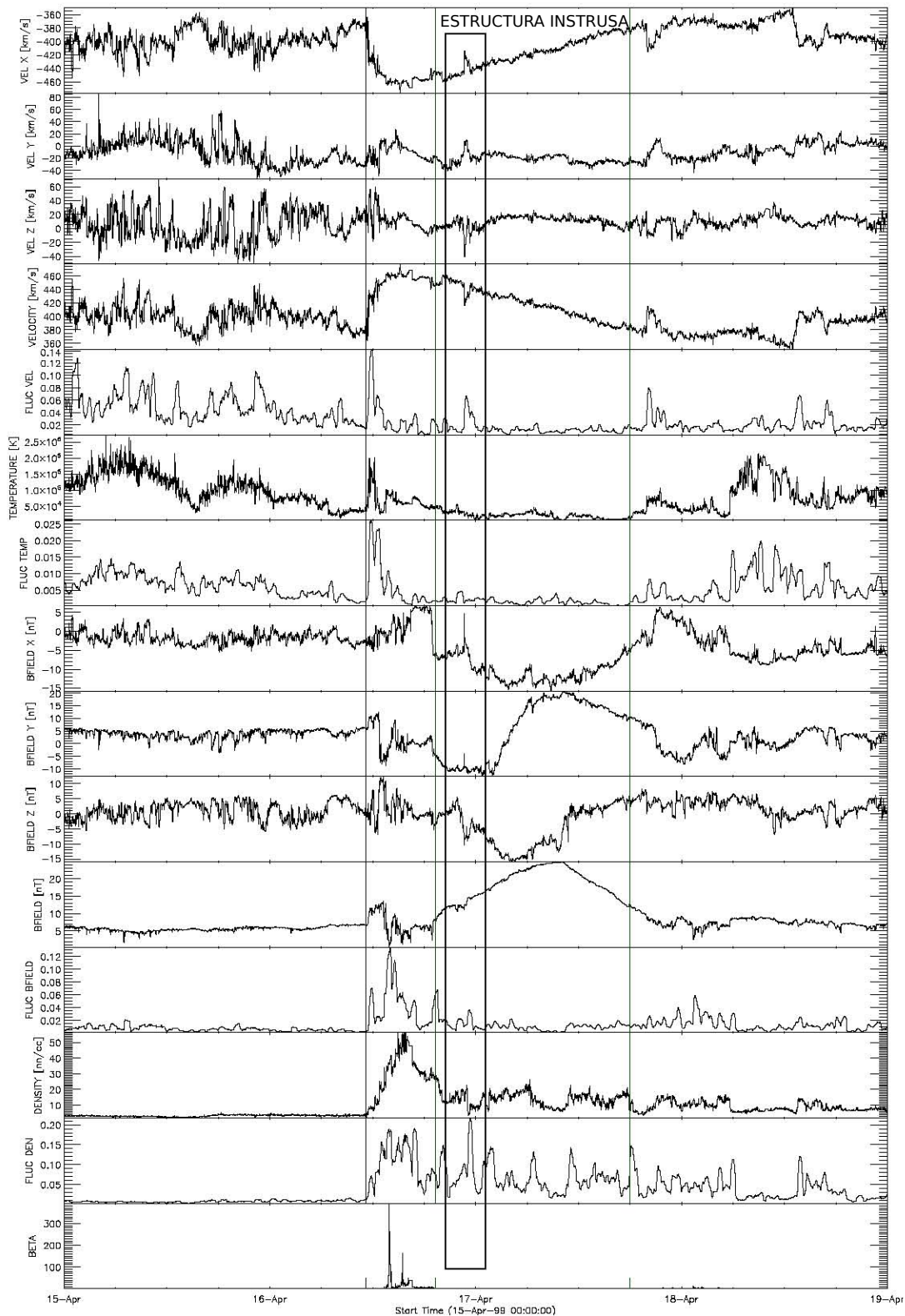


Figura 4.1: EVENTO 13. Gráficas de v_x , v_y , v_z , \mathbf{v} , $\delta\mathbf{v}$, N , δN , B_x , B_y , B_z , \mathbf{B} , $\delta\mathbf{B}$, T , δT y β . La línea negra muestra el tiempo de arribo de la región de compresión mientras que en verde el inicio y final de la EMCI. Es claro que las fluctuaciones están directamente relacionadas con el arribo de la región de compresión. Existen otras fluctuaciones dentro del recuadro negro que posiblemente están atribuidas a otra estructura. La región de compresión está caracterizada por presentar "ruido".

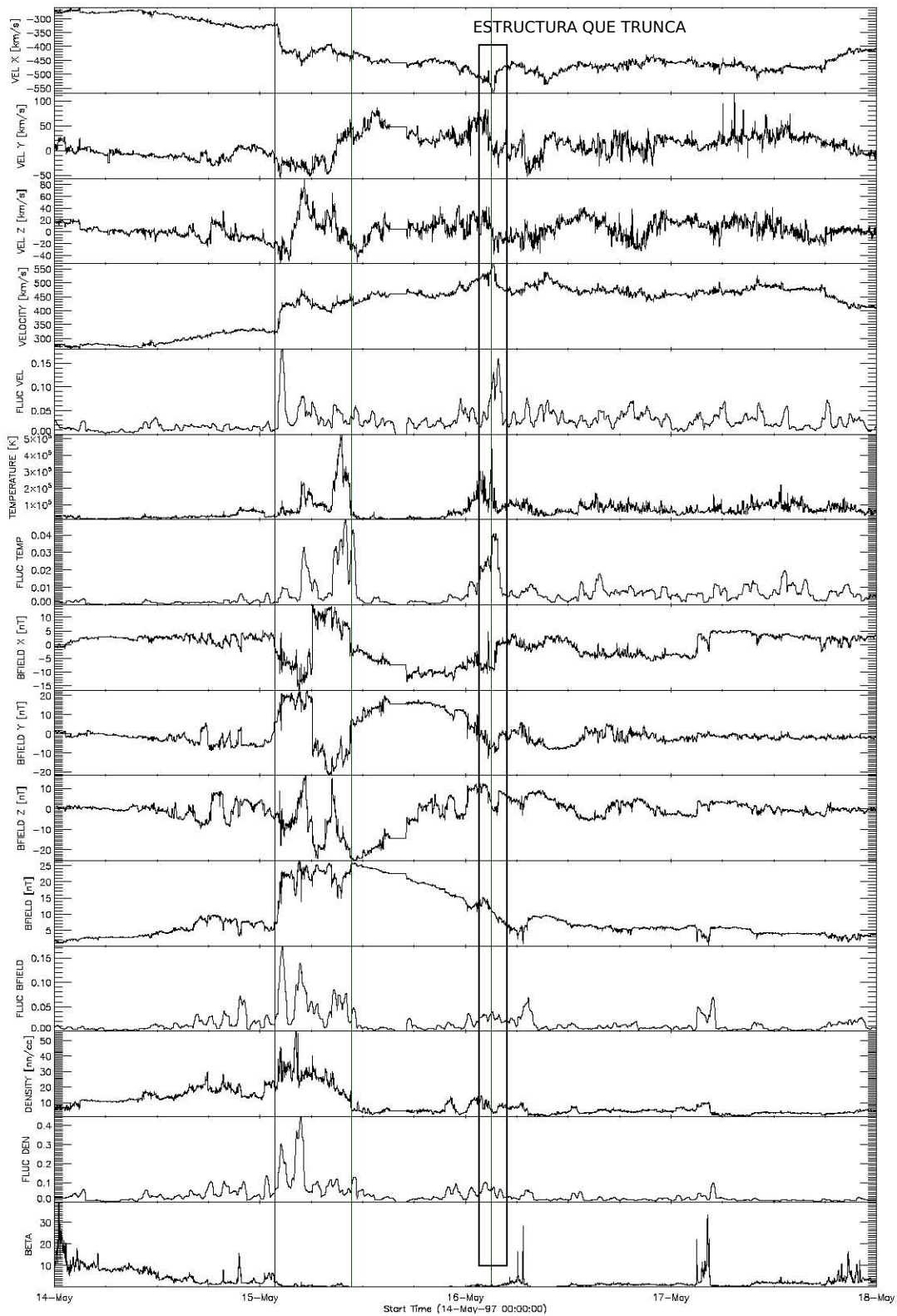


Figura 4.2: EVENTO 02. Gráficas de v_x , v_y , v_z , \mathbf{v} , $\delta\mathbf{v}$, N , δN , B_x , B_y , B_z , \mathbf{B} , $\delta\mathbf{B}$, T , δT y β . La línea negra muestra el tiempo de arribo de la región de compresión mientras que en verde el inicio y final de la EMCI. En este ejemplo se puede notar como el arribo de una nueva estructura (recuadro negro) trunca el final de la EMCI que se estaba analizando. Unos minutos antes del arribo de la siguiente estructura se considera el tiempo final.

En principio, las EMCIs pueden o no presentar choque. Para nuestra identificación, lo único que exigimos es que haya región de compresión. Estas 74 EMCIs, en su mayoría están directamente relacionadas con tormentas magnéticas terrestres (Gopalswamy, 2002).

Tabla 4.1: Lista EMCIs con sus tiempos del arribo de la región de compresión, inicio y final de la EMCI. Los tiempos en esta lista son los que resultan de usar las fluctuaciones para mejorarlos.

	TIEMPO DE ARRIBO	T. INICIAL DE LA EMCI	T. FINAL DE LA EMCI
01	10-jan-1997 01:10:00	10-jan-1997 05:50:00	11-jan-1997 02:50:00
02	15-may-1997 01:35:00	15-may-1997 10:40:00	16-may-1997 03:00:00
03	06-nov-1997 22:20:00	07-nov-1997 06:20:00	08-nov-1997 14:00:00
04	22-nov-1997 09:42:00	22-nov-1997 20:00:00	23-nov-1997 12:12:00
05	10-dec-1997 05:30:00	10-dec-1997 19:40:00	11-dec-1997 11:20:00
06	01-may-1998 21:59:00	02-may-1998 13:00:00	03-may-1998 16:30:00
07	03-may-1998 18:00:00	03-may-1998 20:00:00	04-may-1998 02:00:00
08	04-may-1998 02:50:00	04-may-1998 15:20:00	05-may-1998 05:50:00
09	18-oct-1998 19:29:00	19-oct-1998 05:20:00	20-oct-1998 06:00:00
10	07-nov-1998 07:36:00	07-nov-1998 11:20:00	08-nov-1998 05:20:00
11	13-nov-1998 00:30:00	13-nov-1998 05:20:00	14-nov-1998 07:50:00
12	18-feb-1999 02:48:00	18-feb-1999 14:00:00	19-feb-1999 11:30:00
13	16-apr-1999 11:10:00	16-apr-1999 19:18:00	17-apr-1999 18:00:00
14	26-jun-1999 20:30:00	27-jun-1999 02:00:00	27-jun-1999 23:00:00
15	02-jul-1999 01:10:00	02-jul-1999 04:20:00	02-jul-1999 17:30:00
16	08-aug-1999 18:40:00	09-aug-1999 10:48:00	10-aug-1999 15:48:00
17	22-sep-1999 12:00:00	22-sep-1999 23:00:00	24-sep-1999 02:00:00
18	21-oct-1999 02:13:00	21-oct-1999 05:00:00	22-oct-1999 05:50:00
19	22-jan-2000 02:00:00	22-jan-2000 10:00:00	23-jan-2000 08:00:00
20	20-feb-2000 21:40:00	21-feb-2000 07:00:00	22-feb-2000 12:40:00
21	06-apr-2000 16:32:00	07-apr-2000 09:32:00	08-apr-2000 05:20:00
22	23-may-2000 23:42:00	24-may-2000 17:40:00	25-may-2000 15:00:00
23	10-jul-2000 06:20:00	10-jul-2000 16:00:00	11-jul-2000 11:22:00
24	11-jul-2000 11:50:00	12-jul-2000 01:00:00	13-jul-2000 04:00:00
25	15-jul-2000 14:18:00	15-jul-2000 21:06:00	17-jul-2000 07:50:00
26	26-jul-2000 18:58:00	27-jul-2000 00:28:00	27-jul-2000 19:35:00
27	28-jul-2000 06:39:00	28-jul-2000 14:30:00	29-jul-2000 10:06:00
28	10-aug-2000 05:10:00	10-aug-2000 12:40:00	11-aug-2000 18:00:00
29	11-aug-2000 18:51:00	12-aug-2000 06:00:00	13-aug-2000 14:06:00

	TIEMPO DE ARRIBO	T. INICIAL DE LA EMCI	T. FINAL DE LA EMCI
30	17-sep-2000 16:30:00	18-sep-2000 00:00:00	19-sep-2000 07:20:00
31	05-oct-2000 03:23:00	05-oct-2000 18:30:00	07-oct-2000 13:00:00
32	12-oct-2000 22:36:00	13-oct-2000 17:00:00	14-oct-2000 16:54:00
33	28-oct-2000 09:30:00	29-oct-2000 00:50:00	29-oct-2000 23:30:00
34	06-nov-2000 09:20:00	06-nov-2000 15:00:00	07-nov-2000 15:40:00
35	26-nov-2000 05:30:00	27-nov-2000 10:00:00	28-nov-2000 04:00:00
36	03-mar-2001 11:30:00	03-mar-2001 13:30:00	05-mar-2001 01:30:00
37	19-mar-2001 11:33:00	19-mar-2001 19:00:00	21-mar-2001 16:50:00
38	11-apr-2001 13:50:00	12-apr-2001 00:00:00	13-apr-2001 06:30:00
39	18-apr-2001 00:49:00	18-apr-2001 12:40:00	20-apr-2001 12:00:00
40	21-apr-2001 16:00:00	22-apr-2001 01:00:00	23-apr-2001 03:00:00
41	28-apr-2001 05:02:00	28-apr-2001 23:20:00	30-apr-2001 04:00:00
42	17-aug-2001 11:00:00	18-aug-2001 05:40:00	19-aug-2001 14:30:00
43	30-sep-2001 19:14:00	01-oct-2001 01:00:00	02-oct-2001 12:00:00
44	11-oct-2001 16:50:00	11-oct-2001 22:20:00	13-oct-2001 00:30:00
45	21-oct-2001 17:00:00	22-oct-2001 02:00:00	23-oct-2001 19:40:00
46	24-nov-2001 06:00:00	24-nov-2001 15:00:00	26-nov-2001 00:00:00
47	18-mar-2002 13:13:00	18-mar-2002 17:30:00	20-mar-2002 09:50:00
48	17-apr-2002 11:01:00	17-apr-2002 20:18:00	19-apr-2002 08:18:00
49	11-may-2002 10:00:00	11-may-2002 11:40:00	12-may-2002 02:00:00
50	20-may-2002 03:40:00	20-may-2002 11:00:00	21-may-2002 22:00:00
51	23-may-2002 10:44:00	23-may-2002 21:00:00	25-may-2002 11:40:00
52	30-may-2002 02:15:00	30-may-2002 07:09:00	31-may-2002 11:20:00
53	17-jul-2002 15:50:00	17-jul-2002 21:00:00	18-jul-2002 12:10:00
54	01-aug-2002 05:10:00	01-aug-2002 19:00:00	02-aug-2002 20:00:00
55	07-sep-2002 16:40:00	08-sep-2002 06:00:00	08-sep-2002 17:22:00
56	17-aug-2003 13:00:00	18-aug-2003 03:36:00	19-aug-2003 03:24:00
57	20-nov-2003 08:35:00	20-nov-2003 11:30:00	21-nov-2003 06:40:00
58	22-jan-2004 01:40:00	22-jan-2004 14:00:00	23-jan-2004 13:45:00
59	22-jul-2004 10:40:00	22-jul-2004 20:00:00	23-jul-2004 18:00:00
60	24-jul-2004 06:20:00	24-jul-2004 17:00:00	25-jul-2004 12:18:00
61	26-jul-2004 22:25:00	27-jul-2004 01:00:00	27-jul-2004 23:00:00
62	29-aug-2004 10:00:00	29-aug-2004 20:00:00	30-aug-2004 20:00:00
63	07-nov-2004 18:20:00	08-nov-2004 00:00:00	09-nov-2004 09:00:00
64	09-nov-2004 09:05:00	09-nov-2004 21:54:00	10-nov-2004 18:40:00

	TIEMPO DE ARRIBO	T. INICIAL DE LA EMCI	T. FINAL DE LA EMCI
65	11-dec-2004 13:43:00	11-dec-2004 19:00:00	12-dec-2004 14:50:00
66	16-jan-2005 11:20:00	16-jan-2005 17:20:00	17-jan-2005 06:30:00
67	15-may-2005 04:00:00	15-may-2005 10:00:00	16-may-2005 07:30:00
68	20-may-2005 04:00:00	20-may-2005 08:20:00	21-may-2005 05:18:00
69	29-may-2005 10:00:00	30-may-2005 00:00:00	30-may-2005 22:00:00
70	12-jun-2005 08:30:00	12-jun-2005 18:00:00	13-jun-2005 11:40:00
71	10-jul-2005 04:00:00	10-jul-2005 12:30:00	12-jul-2005 04:00:00
72	02-sep-2005 14:32:00	02-sep-2005 23:03:00	03-sep-2005 18:00:00
73	15-sep-2005 09:00:00	15-sep-2005 19:40:00	17-sep-2005 03:00:00
74	19-aug-2006 10:51:00	20-aug-2006 00:00:00	21-aug-2006 15:30:00

4.4. EVENTOS EN COMÚN ENTRE LAS LISTAS

Para el presente análisis, estamos utilizando tres listas diferentes, cada una de ellas, identifica sus eventos con diferentes condiciones sobre los parámetros. Nos interesó saber cuántos eventos comunes fueron identificados en las diferentes listas.. En la Figura 4.3 mostramos el número de eventos que hay en cada lista y con un diagrama de Venn el número de eventos que tienen en común.

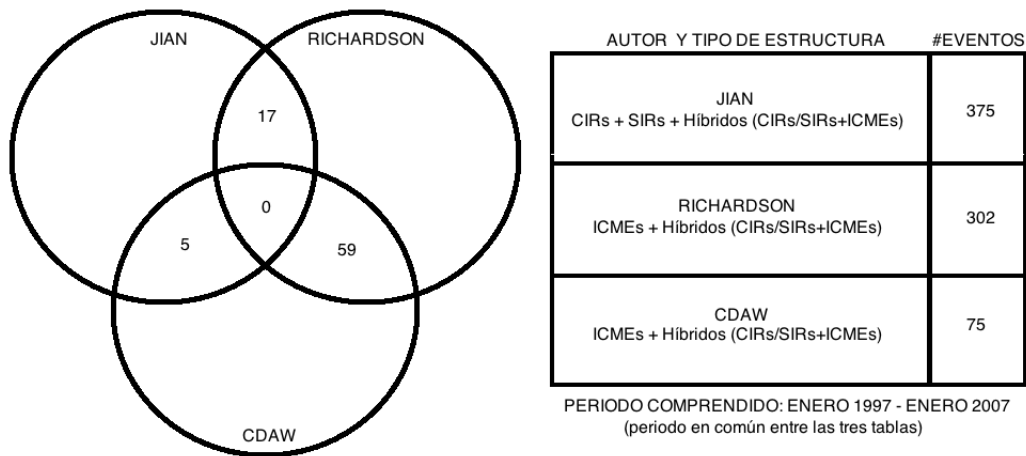


Figura 4.3: Número total de eventos identificados en cada lista, que ocurrieron en el periodo Enero 1997 a 2007. Diagrama de Venn para mostrar el número de eventos en común entre ellas. No hay eventos en común entre las tres listas.

Cada lista tiene un tiempo diferente de arribo del evento. De manera general, tomamos 12 horas antes y 12 horas después del tiempo de una de ellas para considerar que otra lista tiene el mismo evento dentro del registro.

Entre las tres listas no hay ningún evento registrado por las tres, lo cual, indica que existen condiciones que permiten separar el tipo de estructura entre RICs y EMCIs. Entre las dos listas de EMCIs sí existen varios eventos que se repiten, lo que se espera dado que identifican el mismo tipo de estructura.

4.5. LOS PARÁMETROS

En esta sección reportamos los resultados más importantes del análisis de los parámetros de las 74 EMCIs reportadas en CDAW2010. Corregimos los tiempos reportados en CDAW2010 usando los tiempos en los que la mayoría de las fluctuaciones de los parámetros presentaban un comportamiento similar. El arribo de estructuras diferentes está marcado con las fluctuaciones (ver Figura 4.2) , permitiendo determinar el tiempo donde el arribo de nuevas estructuras trunca la anterior, así como determinar mejor los tiempos de duración de las estructuras cuando las fluctuaciones permitían delimitar las estructuras intrusas.

DIFERENCIAS ENTRE LA REGIÓN DE COMPRESIÓN Y LAS EMCIs

Con el fin de caracterizar la transición entre el Viento Solar y las *estructuras de interés*, se obtuvieron los promedios de los parámetros dentro de la región de compresión y los promedios de los parámetros 10 minutos antes de la región de compresión. Se estimaron las diferencias entre estos promedios, las diferencias mínimas y máximas se sintetizan en la Tabla 4.2 mientras que en la Figura 4.4 se muestran los histogramas correspondientes. Estos histogramas nos dicen la distribución de estas diferencias.

Las mayoría de las EMCIs de nuestro estudio tienen diferencia de velocidad con el viento solar ambiente $< 50 \text{ km/s}$. Dado que esta diferencia no es muy grande, es muy probable que su estructura no sea tan clara.

En la Figura 4.4 se muestran 6 histogramas con los que se puede concluir que:

- 37 eventos tienen diferencias en velocidad entre 50 y 100 km/s mientras que 24 eventos entre 100 y 150 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$. Además 61 eventos tienen diferencias de velocidad $< 150 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, es decir, más del 80 % de nuestro muestreo son regiones de compresión no muy intensas.
- 38 eventos tienen diferencias en N entre 5 y 10 $\frac{1}{\text{cm}^3}$ mientras que 19 eventos entre 10 y 15 $1/\text{cm}^3$. Más del 74 % de los eventos tienen diferencias $< 15 \frac{1}{\text{cm}^3}$.

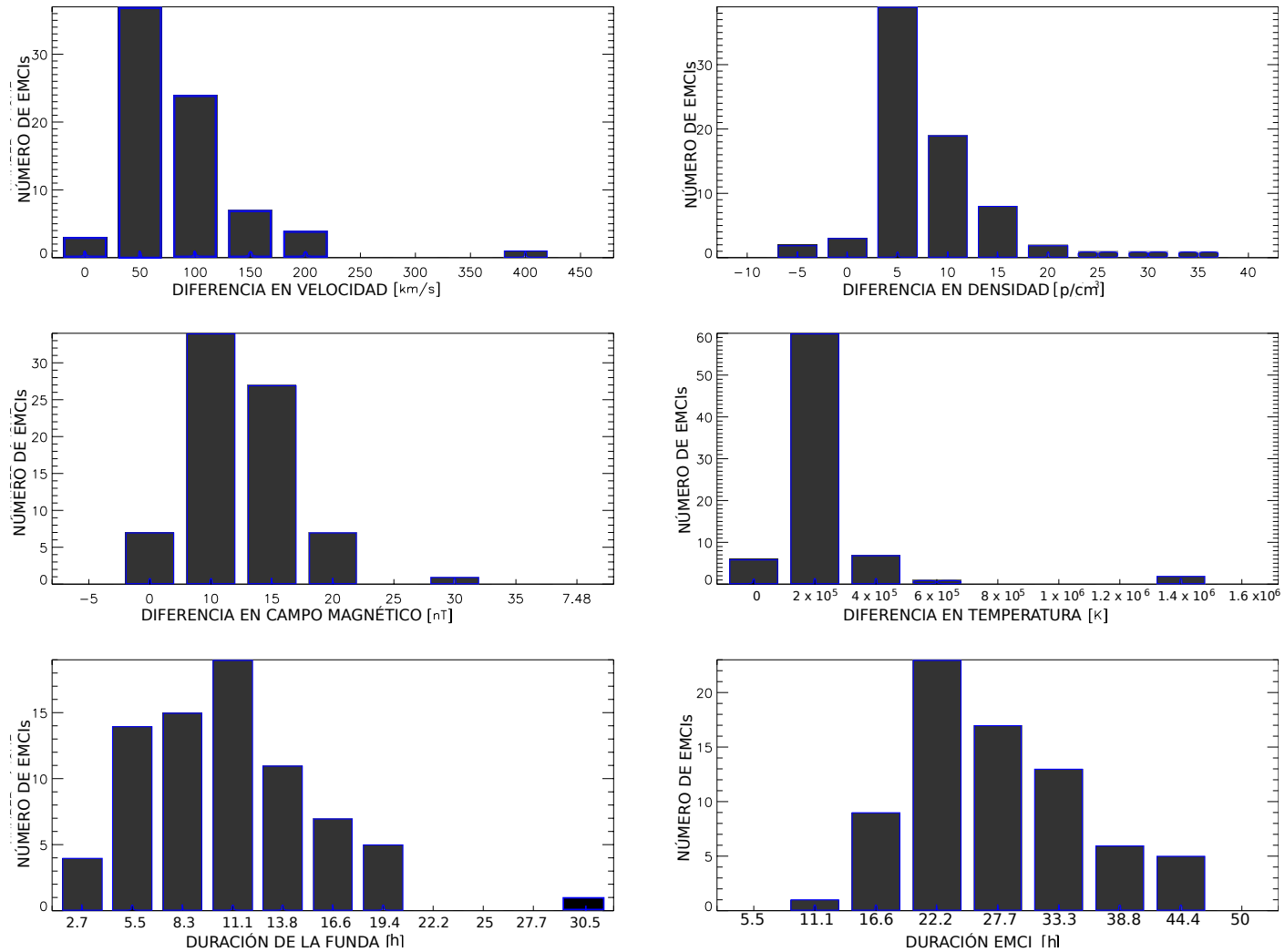


Figura 4.4: Histogramas de las diferencias entre las intensidades promedio de \mathbf{v} (superior izquierda), N (superior derecha), \mathbf{B} (central izquierda) y T (central derecha) durante la región de compresión y las intensidades promedio \mathbf{v} , \mathbf{B} , N y T de las EMCIs. En la parte inferior izquierda, se muestran los histogramas relacionados con las duraciones de las regiones de compresión (su inicio se marca por el arribo de la región de compresión y su final por el arribo de las EMCIs) y en la derecha las duraciones de las EMCIs (en general, el final de las EMCIs está marcado por tiempos truncados debido al arribo de otros eventos)

- 34 eventos tienen diferencias en \mathbf{B} entre 10 y 15 nT y 27 eventos entre 15 y 20 nT . Más del 80 % de los eventos tienen diferencias $< 20 nT$.
- 60 eventos tienen diferencias en T entre 2×10^5 y $4 \times 10^5 K$. Con solo este rango ya contamos con más del 78 % de los eventos.

Tabla 4.2: Diferencia entre los promedios de \mathbf{v} , N , \mathbf{B} , T y β entre las regiones de compresión y las EMCIs.

PARÁMETRO	DIFERENCIA MÍNIMA	DIFERENCIA MÁXIMA
\mathbf{v} [km/s]	-28.54	372
N [$1/cm^3$]	-9.58	33
\mathbf{B} [nT]	-1.51	21
T [K]	-8.85×10^4	1.38×10^6
β	-3.37	1.95

De esta forma sabemos que la mayoría de los eventos que estamos analizando no tienen una estructura simple. Como nosotros planteamos un método de identificación automática, estos eventos serán de gran utilidad puesto que no son EMCIs fáciles de distinguir en el viento solar.

DURACIÓN DE LAS REGIONES DE COMPRESIÓN

Se estimaron las duraciones de las regiones de compresión . Desde su tiempo de arribo hasta el tiempo de arribo de las EMCIs. Los eventos no exceden de 80000 s de duración, es decir, las regiones de compresión no duran más de 22 horas. 19 eventos tienen una duración entre [11, 13] horas. La distribución de más del 77 % de los eventos tienen regiones de compresión que duran [5, 16] horas (Figura 4.4).

DURACIÓN DE LAS EMCIs

Más del 81 % de las EMCIs reportadas en la Tabla 4.2 duran entre 16 y 27 horas. En la mayoría de los casos, el tiempo final de la EMCI, se tomó como el tiempo de arribo de una siguiente estructura, es decir, son tiempos truncados (Figura 4.4).

PARÁMETROS DURANTE LAS REGIONES DE COMPRESIÓN Y EL INICIO DE LAS EMCIs

Tomamos los promedios de los parámetros durante 10 minutos después del arribo de las EMCIs y obtuvimos los resultados que mostramos en 4.3. En la Tabla 4.3 encontramos los valores mínimos, máximos y promedios de intensidad de \mathbf{v} , \mathbf{B} , N , T , y β de las regiones de compresión y durante los primeros 10 minutos del arribo de las EMCIs.

Tabla 4.3: Mínimos, máximos y promedios de los parámetros durante las regiones de compresión (RCs) y las EMCIs.

PARÁMETRO	MIN EN RC	MAX EN RC	PROMEDIO EN RC
\mathbf{v} [km/s]	331.74	970.98	535.39
N [$1/cm^3$]	3.41	43.73	16.43
\mathbf{B} [nT]	6.68	40.64	16.54
T [K]	3.9×10^4	1.4×10^6	2.6×10^5
β	0.24	14.29	1.65

PARÁMETRO	MIN INICIO EMCI	MAX INICIO EMCI	PROMEDIO INICIO EMCI
\mathbf{v} [km/s]	349	1084.0	556.66
N [$1/cm^3$]	0.64	74.62	10.85
\mathbf{B} [nT]	3.55	52.65	16.63
T [K]	1.16×10^4	1.3×10^6	1.59×10^5
β	0.010	40.75	1.5

La velocidad promedio dentro de la región de compresión es menor que la velocidad promedio durante el inicio de la EMCI. Lo importante para este trabajo es que dentro de la región de compresión las fluctuaciones de la velocidad son considerables a comparación de los primeros 10 minutos después de la región de compresión. Las diferencias en N , \mathbf{B} y β entre las regiones de compresión y el inicio de la EMCIs pueden ser positivas o negativas, dependiendo del tipo de estructura que tenga la EMCI en relación al Viento Solar. Las diferencias en temperatura son negativas, es decir, dentro de la región de compresión la temperatura es mayor.

Capítulo 5

ESTRUCTURAS DE INTERÉS

En este capítulo se describen las condiciones que aplicamos sobre las fluctuaciones definidas por nuestro método para la identificación automática de Regiones de Compresión. En la primera sección de este capítulo se define lo que es una *estructura de interés*, que el método automatizado encuentra en base a ciertas condiciones sobre las fluctuaciones. Cierta número de estas estructuras están relacionadas con las EMCIs.

Para determinar cuando las fluctuaciones están relacionadas con las *estructuras de interés*, es necesario definir ciertos parámetros de análisis como el tamaño de la ventana del promedio móvil, el ancho de las barras del histograma, así como el número de veces que las fluctuaciones tienen que exceder el nivel de ruido. El desarrollo estadístico que podrá determinar estos valores se presenta en la segunda sección.

En la tercera sección presentamos nuestra primera caracterización de EMCIs, utilizando como condición la comparación entre la diferencia de velocidades de las regiones de compresión o *estructuras de interés* v_E y la velocidad característica del MIP (velocidad de Alfvén, v_A). Separamos las estructuras dependiendo de su velocidad v_E como aquellas que presentan choque ($v_E > 2v_A$) y vientos rápidos $2v_A > v_E > v_A$.

En la cuarta sección presentamos el análisis de la variación del número de choques cuando $v_E > 2v_A$ y el número de *estructuras de interés* al cambiar los parámetros k y $d\tau$.

En la quinta sección comparamos el número de estructuras que nuestro método encuentra con las registradas en las listas de EMCIs y RICs.

En estas cinco secciones del capítulo, el análisis se ha hecho al tomar las desviaciones globales. En la sexta y última sección de este capítulo, analizamos el número de *estructuras de interés* que el método automatizado encontró en base a las mismas condiciones sobre las fluctuaciones, pero ahora usando desviaciones móviles. Recordando que esto es un promedio de 6 meses (móvil), es

decir, 3 meses antes y 3 meses después para cada punto de los vectores que tienen la información de cada parámetro.

5.1. ESTRUCTURAS DE INTERÉS

Una vez que estimamos las fluctuaciones, se buscaron las regiones o intervalos de tiempo en donde se cumpliera que:

- Las fluctuaciones fueran k veces más grande que el nivel de ruido dado por la desviación estándar móvil $\sigma_M(\delta A)$.
- 3 de 4 parámetros tuvieran una fluctuación en un intervalo de tiempo $\leq dm$.

Se escribió una rutina en IDL para encontrar los tiempos en los que las fluctuaciones cumplieran estas condiciones. De esta forma, una *estructura de interés* queda definida cuando las fluctuaciones cumplan ambas condiciones.

En la siguiente sección se expondrá el método y selección de los valores de k y dm .

El hecho de elegir las fluctuaciones que son k veces mayores que el nivel de ruido ($\sigma_M(\delta A)$), elimina aquellos casos en que las fluctuaciones son causadas por estructuras pequeñas. De esta forma, k nos asegura que solo buscaremos fluctuaciones que puedan ser atribuidas a estructuras que sean "violentas" o "extremas" como los RICs, EMCIs, etc.

5.2. $d\mu$, k Y dm

Para poder elegir los valores de estos tres parámetros, que son fundamentales en nuestro método, se hizo un estudio estadístico basado en 27 EMCIs de las 74 EMCIs de CDAW2010. Se eligieron aquellas EMCIs que tuvieran estructuras muy complejas.

Las regiones de compresión de estas EMCIs están determinadas por fluctuaciones. Para nosotros, estas regiones de compresión son *estructuras de interés*.

Hicimos una rutina en IDL que permitió graficar en base a la fecha del arribo de la EMCI, un día antes y cuatro días después los diferentes parámetros. Intervalo de tiempo suficiente como para cubrir todo un evento.

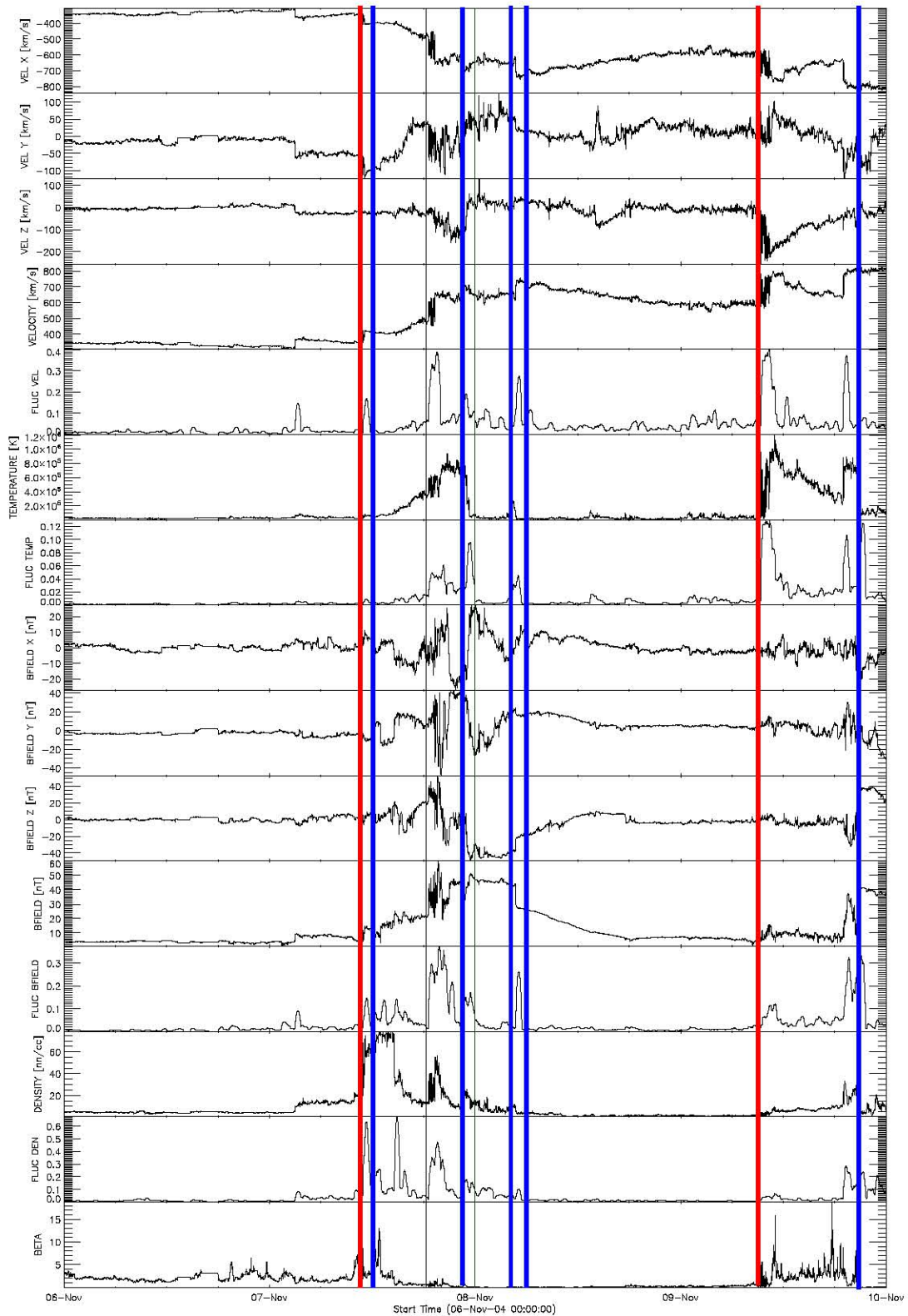


Figura 5.1: EVENTO 02. Gráficas de v_x , v_y , v_z , \mathbf{v} , $\delta\mathbf{v}$, N , δN , B_x , B_y , B_z , \mathbf{B} , $\delta\mathbf{B}$, T , δT y β . Las líneas rojas son todos los posibles tiempos iniciales y las líneas azules son los posibles tiempos finales. Cuando la estructura es compleja habrá más posibilidades para estos tiempos. Cuando las EMCI's tienen estructuras simples es muy probable que solo tengan un tiempo inicial y uno final para la región de compresión.

La duración de una región de compresión está determinada por el tiempo entre el *tiempo inicial* y el *tiempo final*. Estos tiempos están determinados por las fluctuaciones cuando cumplen las siguientes condiciones:

TIEMPO INICIAL:

- Las fluctuaciones deben ser más grandes que $k\sigma_M(\delta A)$.
- 3 de 4 parámetros tienen una fluctuación en un tiempo parecido, $\leq dm$.

TIEMPO FINAL:

- Las fluctuaciones son menores a $k\sigma_M(\delta A)$.
- 3 de 4 parámetros tienen una fluctuación en un tiempo parecido, $\leq dm$.

Si la estructura es muy simple, solo se encontrarán un tiempo inicial y un tiempo final bien determinados. Sin embargo, si la estructura es compleja, se encontrarán varias posibilidades para los tiempos iniciales y finales (ver Figura 5.1). En este caso, nuestro método encontrará dependiendo de $d\mu$, k y dm , no solo una opción para cada tiempo (inicial y final) sino varias.

Los índices $d\mu$, k y dm tienen un rango de operación que está determinado con las características temporales de las EMCIs. En la Tabla 5.1 se muestran los valores que pueden tener cada uno de estos índices.

Tabla 5.1: Rangos de operación para los diferentes índices del método numérico que proponemos para la identificación de EMCIs.

ÍNDICE	MÍNIMO	MÁXIMO
$d\mu$ [min]	0	50
k [veces]	2	4
dm [s]	0	5000

$d\mu$ se refiere al tamaño de la ventana del promedio móvil. Para que las fluctuaciones tengan sentido en términos de los tiempos de inicio y final de una EMCI, deben de ocurrir en tiempos menores de los de una región de compresión. Dado que la resolución de los datos es de 1 minuto, el tiempo máximo que tomamos fue de 50 minutos.

El promedio móvil actúa como un filtro pasa bajas, siendo en este caso $\frac{1}{d\mu}$ la frecuencia de corte. Si $d\mu$ es muy pequeño la frecuencia de corte se va al infinito y el filtro no "hace nada". Por otra parte si $d\mu$ es muy grande, se filtraran todas las estructuras, sin importar su dimensión.

k se refiere al número de veces que las fluctuaciones deben ser más grandes que $\sigma_M(\delta A)$. Lo mínimo para que las fluctuaciones tengan relevancia en nuestro estudio es que sea dos veces más grande que el nivel de ruido.

dm es la diferencia de tiempo que pueden tener las fluctuaciones de los diferentes parámetros, para ser consideradas como parte de la misma estructura.

De las 27 EMCIs de CDAW2010 se eligió un evento con una estructura muy compleja (EVENTO 42: 17 Agosto del 2001). La rutina permite variar $d\mu$, k y dm . Se contó el número de tiempos iniciales y finales y se buscaron los valores de los índices que daban el número menor de tiempos posibles (FIG 5.3). En esta figura, los recuadros amarillos resaltan los rangos en los que hubo menor número de tiempos. En el lado izquierdo se muestran los tiempos iniciales mientras que en el derecho los finales. Para $d\mu$, el recuadro amarillo resalta en el rango de $[31, 42]$ para los tiempos iniciales mientras que para los finales un rango de $[37, 48]$ sería apropiado. El rango en común es $[37, 42]$, el valor medio entero es 40. Este valor es el valor que tomamos para este trabajo, es decir, $d\mu = 40$.

Para k , el menor número de tiempos iniciales se obtuvo en el rango de $[3.5, 4]$ mientras para los finales en los rangos $[3.2, 3.3]$ y $[3.5, 3.6]$. El rango en común es $[3.5, 3.6]$. Tomamos el máximo, es decir, $k = 3.6$.

Por último para dm , los rangos para los tiempos iniciales son $[0, 2600]$ y $[2000, 2400]$, el rango en común es $[2000, 2400]$, tal que, $dm = 2200$.

Con estos valores de $d\mu$, k y dm encontramos que nuestro método logró:

- En 25 de 27 eventos el tiempo inicial de la región de compresión fue localizada con una diferencia ≤ 40 min.
- En 18 de 27 eventos se encontró el tiempo inicial y final de la región de compresión de la EMCI.
- En 12 de 27 eventos la duración de las regiones de compresión tiene una diferencia de tiempo ≥ 5 hrs.

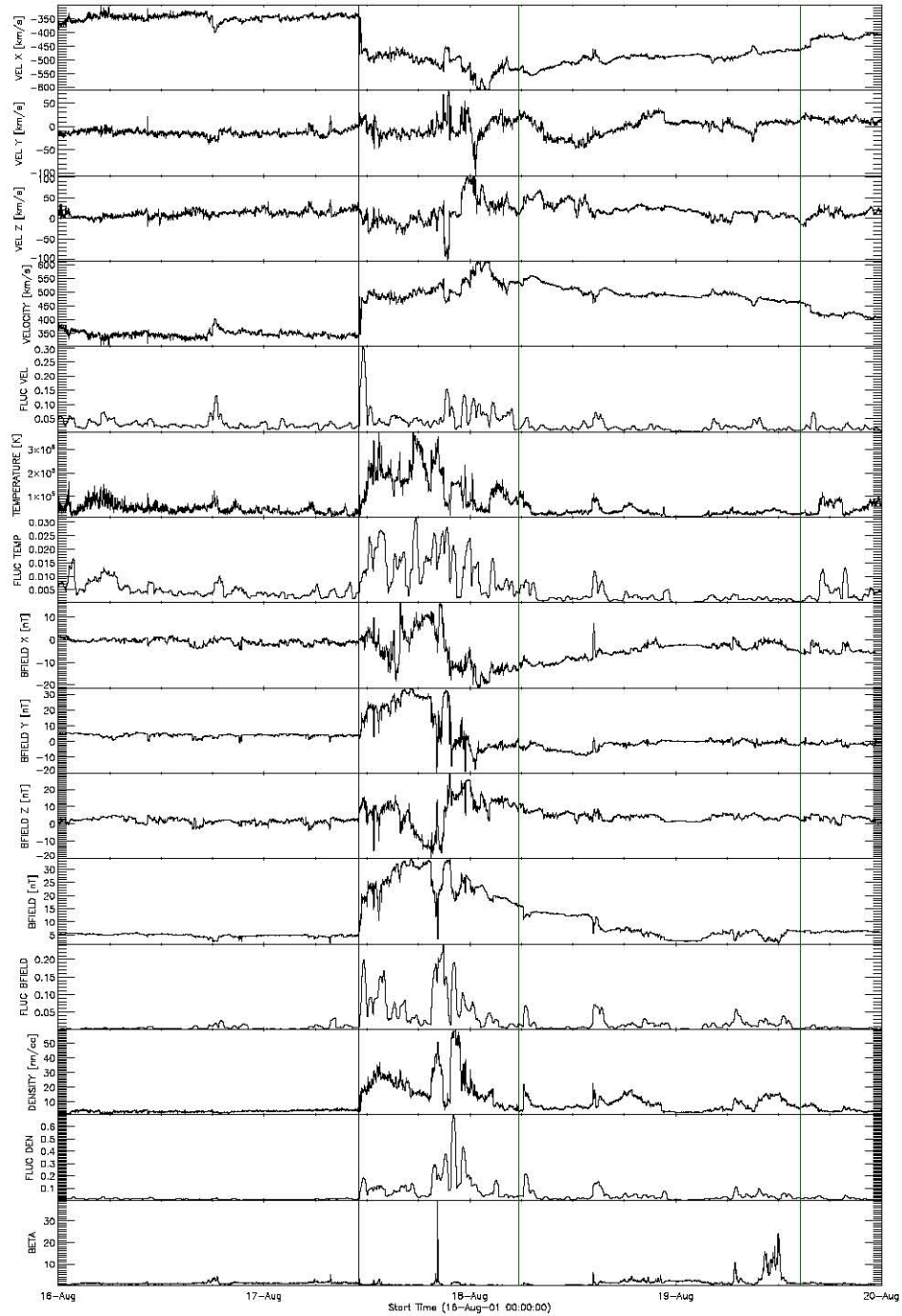


Figura 5.2: EVENTO 02. Gráficas de v_x , v_y , v_z , \mathbf{v} , $\delta\mathbf{v}$, N , δN , B_x , B_y , B_z , \mathbf{B} , $\delta\mathbf{B}$, T , δT y β . La línea negra muestra el tiempo de arribo de la región de compresión mientras que en verde el inicio y final de la EMCI. Este es el evento de estructura compleja que se eligió para determinar los valores de $d\mu$, k y dm . En principio, el tiempo de arribo de la región de compresión y los tiempos inicial y final de la EMCI fueron elegidos por inspección directa con ayuda de las fluctuaciones, sin embargo, las fluctuaciones dentro de la región de compresión podrían interpretarse como si hubiera dos o hasta tres subestructuras dentro de esta región, que hacen difícil determinar realmente el tiempo final de la región de compresión.

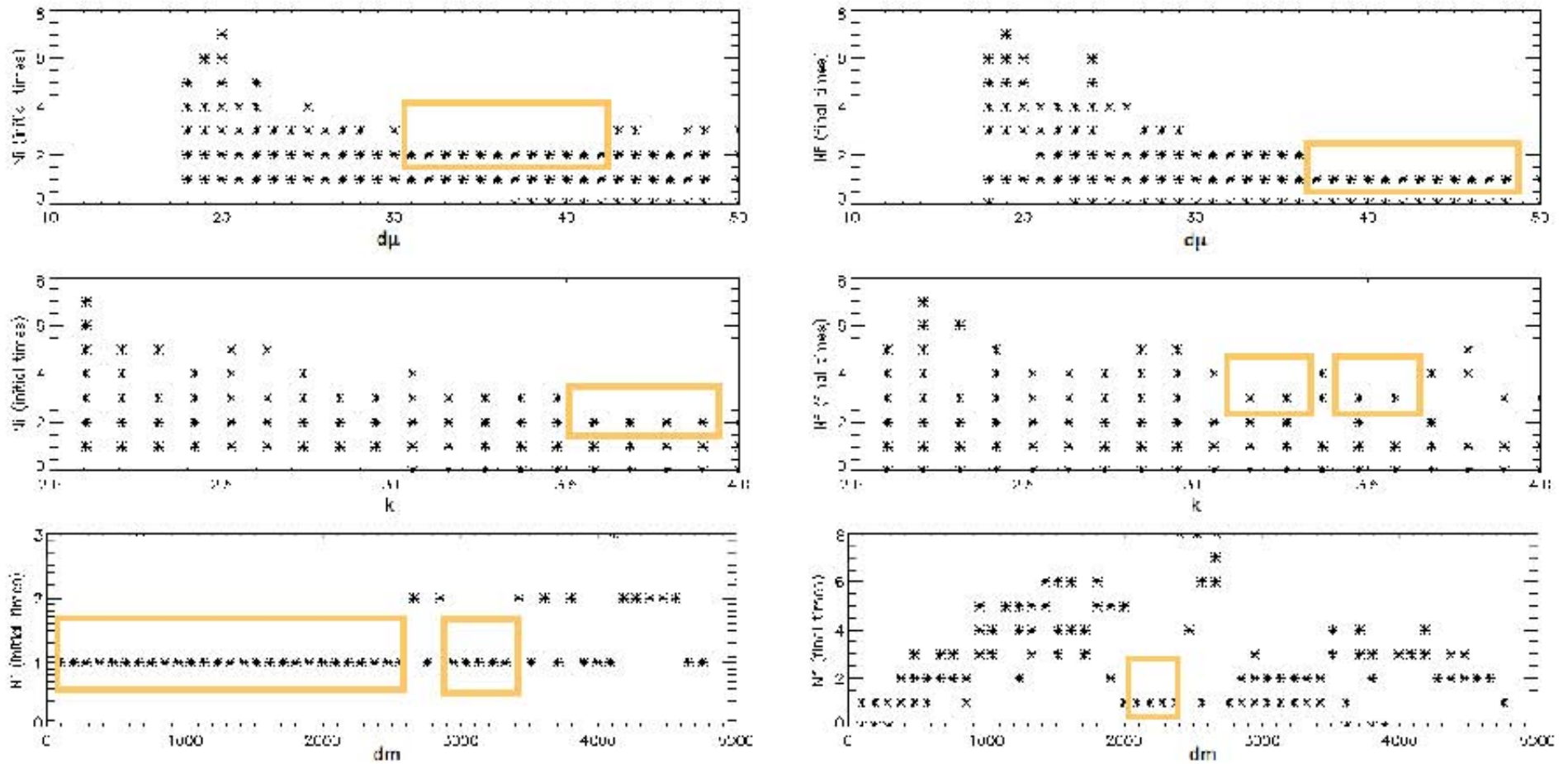


Figura 5.3: Número de tiempos iniciales y finales en función de $d\mu$, k y dm . En el lado izquierdo se muestran los números de tiempos iniciales mientras que en el derecho los números de posibles tiempos finales. En la parte superior se muestran los números mencionados en términos del tamaño de la ventana del promedio móvil $d\mu$; en medio, en términos de k veces $\sigma_M(\delta A)$; y en la parte inferior en términos del tamaño del intervalo del histograma dm (segundos). En recuadros amarillos se marcan los intervalos de cada índice en el que se tiene el menor número de tiempos iniciales y finales posibles.

Se revisaron cada una de las 27 EMCIs para comparar resultados y para denotar lo que ocurrió con aquellos eventos que el método no encontró, además de entender por qué el método perdió información en términos de la duración de la región de compresión.

En 9 de los 27 eventos no se pudo determinar el tiempo final de la región de compresión, y esto es posiblemente por dos razones:

- Son eventos muy complejos.
- Los cambios en los parámetros no son muy grandes.

Encontrar el *tiempo inicial* de la región de compresión usando el método es fácil. Sin embargo, cuando los eventos son complejos la estimación del tiempo final no es sencilla, ya que realmente no queda claro en dónde termina la región de compresión, empiezan las otras estructuras o si realmente continúan las estructuras aún cuando hay estructuras *intrusas* dentro de ellas.

5.3. VELOCIDAD DE ALFVÉN

Como primera caracterización de las *estructuras de interés*, se compararon las velocidades de las *estructuras de interés* v_E con la velocidad de Alfvén v_A . Es posible usar la velocidad magnetosónica para determinar estas estructuras, sin embargo, por simplicidad en este trabajo solamente usamos v_A . De esta forma, utilizamos v_A para determinar cuando las *estructuras de interés* presentan choque, es decir, $v_E > 2v_A$ o simplemente cuando son vientos rápidos $2v_A > v_E > v_A$. La velocidad de Alfvén se define como:

$$v_A = \frac{\mathbf{B}}{\sqrt{\mu_0 n_i m_i}} \quad (5.1)$$

donde \mathbf{B} es la magnitud campo magnético, μ_0 es la permeabilidad en el vacío, n_i el número de densidad iónica y m_i es la masa de los iones (en nuestro caso, protones). Como nos referimos a la velocidad característica del MIP usamos los promedios de los parámetros en un intervalo de 10 minutos tomados alrededor del mínimo de la velocidad que encuentre en un intervalo de tiempo entre medio día antes (tiempo que definiremos como $d\tau$) y el tiempo de arribo del choque.

$d\tau$ evita que el tiempo de la *estructura de interés* se sitúe en intervalos de tiempo donde antes ya había otra estructura evolucionando. En la siguiente sección, estudiamos que pasa con el número de estructuras si disminuimos este intervalo.

En la Tabla 5.2 mostramos el número de *estructuras de interés* y las condiciones para determinar cuando tienen choque o simplemente son vientos rápidos. 207 *estructuras de interés* no cumplen ninguna de las condiciones.

Tabla 5.2: Condiciones impuestas para considerar qué *estructuras de interés* corresponden a choques o a vientos rápidos.

TIPO DE ESTRUCTURA	CONDICIÓN	NÚMERO
ESTRUCTURAS DE INTERÉS		678
CHOQUE	$v_E > 2v_A$	382
VIENTO RÁPIDO	$2v_A > v_E > v_A$	154

Una vez determinada la existencia de choques en las estructuras, se contó el número de *estructuras de interés* que tuvieran choque por mes. Así como el número de *estructuras de interés* por mes que se consideraron vientos rápidos.

Para comparar, se contó también el número de EMCs registradas en la lista de LASCO CME (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/), en el periodo Enero 1997 hasta Abril 2011. Este conteo se hizo de dos formas diferentes:

- Número total de EMCs por mes, el cual comparamos con el número total de *estructuras de interés*.
- Número de EMCs por mes que excedieran en velocidad $500 \frac{km}{s}$ y tuvieran un ancho mayor a 200. Estas EMCs tienen la velocidad y ancho suficientes para asegurar el choque al viajar en el MIP cercano a la Tierra.

En la Figura 5.4 se comparan el número de *estructuras de interés* con el número de EMCs observadas por LASCO. Esperamos que el número sea mucho menor, puesto que no todas las EMCs que se observan en el Sol, llegan a la Tierra, pero observamos que hay una cierta correlación, donde hubo más EMCs, nuestro método encontró más *estructuras de interés*.

En la Figura 5.5 se comparan el número de *estructuras de interés* que cumplen que su velocidad excedió dos veces v_A con el número de EMCs con una velocidad mayor de $500 \frac{km}{s}$ y un ancho mayor a 200. El número de eventos identificados por nuestro método es mucho menor que la lista de LASCO CME por la misma razón anterior. No todas las EMCs llegan a la Tierra.

Es seguro que, aun cuando elegimos una condición sobre las *estructuras de interés* muy simple, con este método se pueden caracterizar diferentes estructuras en el MIP. En esta sección solo separamos, en términos de la velocidad de Alfvén, choques y vientos rápidos. Con el mismo planteamiento, esperamos caracterizar estas estructuras para encontrar no solo EMCs sino diversas estructuras del MIP en trabajos posteriores .

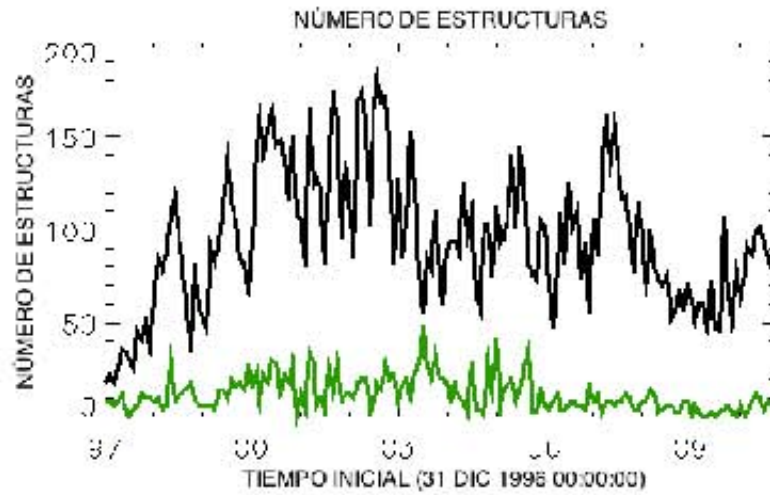


Figura 5.4: Número de EMCs registradas en la lista de LASCO CME por mes (negro). En verde se muestra el número de *estructuras de interés* (multiplicadas x2 para ser comparables visualmente) que identificó nuestro método.

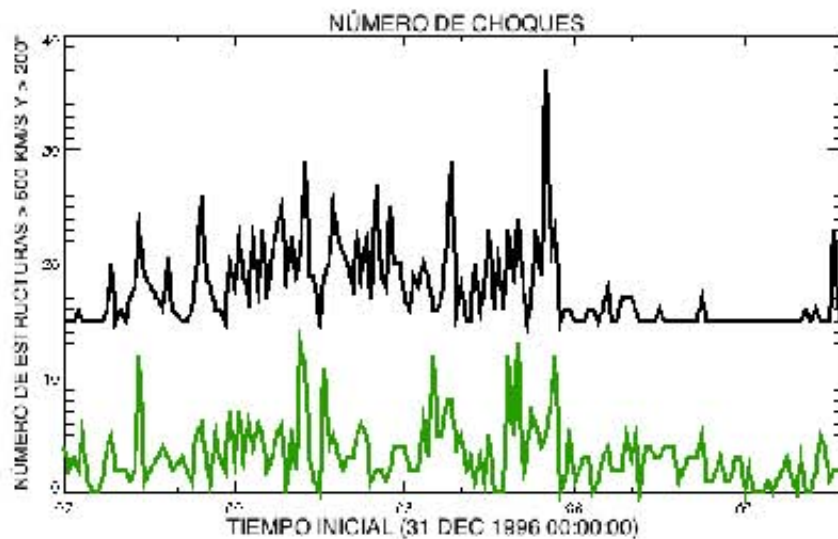


Figura 5.5: Número de EMCs registradas en la lista de LASCO CME por mes (+15, negro) que tienen una velocidad mayor a $500 \frac{km}{s}$ y una ancho superior a 200. En verde se muestra el número de *estructuras de interés* que identificó nuestro método y que además cumplen que la velocidad de la región de compresión es $2v_A$.

Es posible que con los mismos valores de $d\mu$, k y dm , también podamos identificar RICs. Implicando que podemos elegir las condiciones sobre las *estructuras de interés* y no solo encontrar EMCIs, sino cualquier otra estructura que viaje en el viento solar.

Este método de fluctuaciones podría utilizarse para encontrar otro tipo de estructuras en otra escala, con la única condición de realizar el análisis estadístico correspondiente para determinar $d\mu$, k y dm que definirá las *estructuras de interés*.

5.4. DIFERENTES k Y $d\tau$

En esta sección presentamos un análisis breve de la variación del número de *estructuras de interés* y el número de choques (cuando $v_E > 2v_A$) al cambiar k a tres valores diferentes: 3.6, 3.0 y 2.0.

Para este análisis usamos las 74 EMCIs que fueron estudiadas en el capítulo anterior. Contamos el número de EMCIs que encontró el método automático de estas 74 EMCIs y comparamos. En la Tabla 5.3 mostramos los números de EMCIs que el método automático encuentra de las 74 EMCIs al variar k .

Tabla 5.3: Comparación del número de EMCIs que encontró el método automático con las 74 EMCIs reportadas al variar k manteniendo $d\tau = 1/2$ día.

74 EMCIs	k	ESTRUCTURAS
	3.6	49
	3.0	54
	2.0	72

En principio, cuando estudiamos las características de la velocidad de las 74 EMCIs, notamos que la mayoría de los eventos tenían una diferencia de velocidades entre la región de compresión y el MIP $< 55 \frac{km}{s}$. Así que encontrar menos del 62% es de esperarse.

Entre menor es el valor de k , mayor es el número de *estructuras de interés*. El elegir $k = 2.0$ resulta contraproducente ya que el número de *estructuras de interés* cambia en un orden de magnitud. Ésto es porque a medida que disminuimos k , entonces las fluctuaciones que rebasan $k\sigma_M$ se aproximan más al nivel de ruido.

Aunque perdemos eventos, resulta mucho mejor conservar $k = 3.6$. Las fluctuaciones por arriba de $3.6\sigma_M$ se encuentran fuera del nivel de ruido lo suficiente para no excluir eventos de fluctuaciones bajas sin comprometer el número de eventos que nuestro método encuentra automáticamente.

En un análisis similar, elegimos variar $d\tau$: 1/2 día, 5 horas y 3 horas. En la Tabla 5.4 mostramos que disminuye el número de EMCIs de las 74 EMCIs que el programa automático encuentra. Por lo tanto, tampoco beneficia el acercarnos más al tiempo de arribo del choque.

Tabla 5.4: Comparación del número de EMCIs que encontró el método automático con las 74 EMCIs al variar $d\tau$ tomando $k = 3.6$.

$d\tau$	ESTRUCTURAS
12 horas	54
5 horas	32
1 hora	26

No conviene cambiar k ni $d\tau$ demostrando que el método estadístico previamente descrito, donde se seleccionaron los valores de k y $d\tau$ convenientes para nuestra identificación.

Este análisis también demuestra que las fluctuaciones sirven para identificar regiones de compresión en una serie de datos. Cuando elegimos $k = 2.0$ el método encontró el 95 % de los eventos. Sin embargo, ya estamos dentro del nivel de ruido de una manera muy considerable, lo que hace que $k = 2.0$ no sea un valor conveniente.

Puesto que se debe limitar la variación en la k , esto impone una limitación en el método, el cual despreciará estructuras de gran escala en el viento solar cuya velocidad no difiera tanto con la velocidad del MIP. Este método servirá solo para encontrar estructuras de gran escala cuya velocidad sea considerable con respecto al viento solar.

Los valores de $d\mu$, k y dm se tomaron del análisis de un evento muy particular. Para generalizar, analizamos las distribuciones de las fluctuaciones de cada parámetro (Figura 5.6).

Los valores promedio de las fluctuaciones son:

PARÁMETRO	FLUCTUACIÓN PROMEDIO
VELOCIDAD	0.0318
DENSIDAD	0.0187
CAMPO MAGNÉTICO	0.1317
TEMPERATURA	0.0060

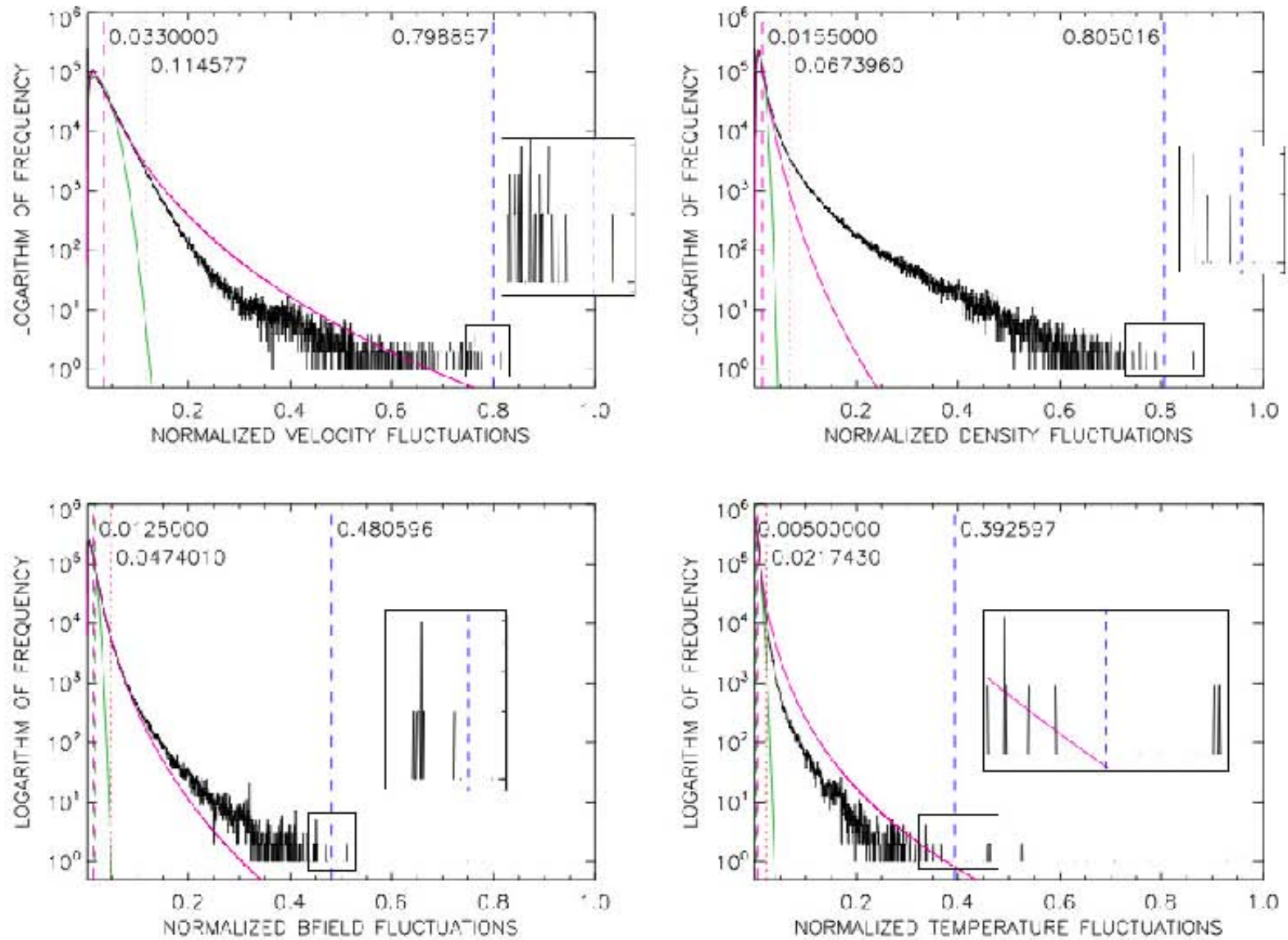


Figura 5.6: Distribuciones de las fluctuaciones para los diferentes parámetros. Las curvas verdes son el ajuste de una función gaussiana mientras que las rosas son funciones normales logarítmicas. Las funciones log-normales se ajustan mucho mejor que las funciones gaussianas. Se estimaron los anchos a potencia media y en líneas verticales discontinuas rosadas se muestra el valor de la fluctuación correspondiente. En azul un valor de fluctuación que se sale de la distribución completamente. En color rojo se muestran los valores $3.6\sigma_M(\delta A)$ que obtuvimos en el análisis de un solo evento con estructura muy compleja.

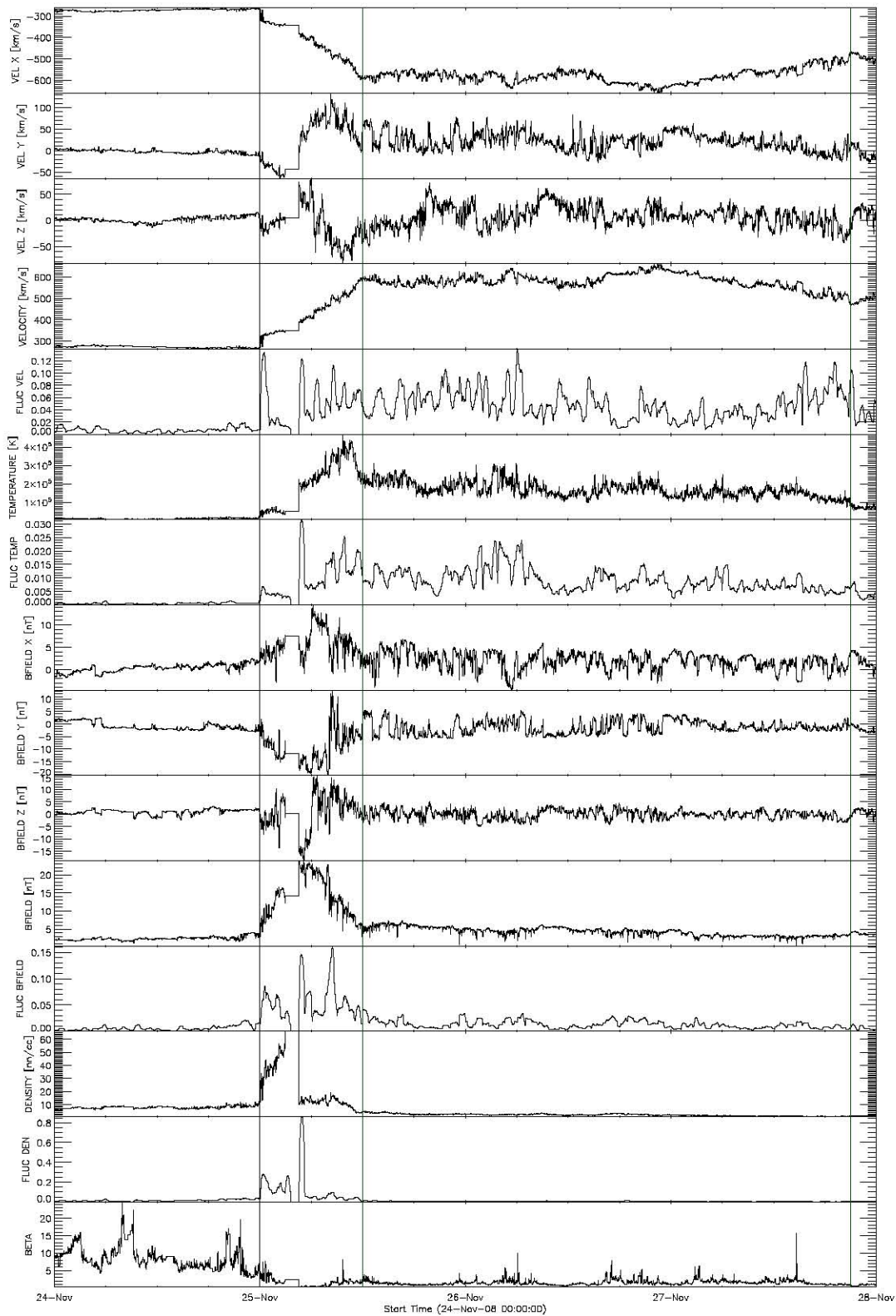


Figura 5.7: EVENTO 02. Gráficas de v_x , v_y , v_z , \mathbf{v} , $\delta\mathbf{v}$, N , δN , B_x , B_y , B_z , \mathbf{B} , $\delta\mathbf{B}$, T , δT y β .. La línea negra muestra el tiempo de arribo de la región de compresión mientras que en verde el inicio y final de la EMCI. Esta es una EMCI que no está registrada en ninguna de las listas que usamos en este trabajo. Esta EMCI fue encontrada de forma automática por nuestro método de fluctuaciones.

Para obtener las distribuciones se hicieron histogramas con un bin de 0.0005, que es un orden de magnitud menor que la mínima fluctuación promedio obtenida correspondiente a la temperatura. Las distribuciones se muestran en la Figura 5.6. Ajustamos una función gaussiana (en verde) y una función log-normal (en rosa) a cada curva. En todos los casos la función log-normal se ajusta mejor.

Cabe mencionar que usamos la función gaussiana definida en la biblioteca de IDL, que permite ajustar una función gaussiana a una curva generada por dos vectores x (independiente) y y (dependiente de x). Este ajuste permite elegir el número de términos, nosotros usamos 3, la altura máxima (A), la posición del centro (B) y el ancho (C) de la campana. La función gaussiana se define como:

$$G(y(x)) = Ae^{-\frac{(y(x)-B)^2}{2C^2}}.$$

A cada distribución se ajustó una gaussiana con su propia altura máxima (A), la posición del centro (B) y el ancho (C).

La distribución log-normal es la misma función gaussiana que se ajusta a dos vectores solo que se le aplica el logaritmo al vector x . Estimamos el ancho a potencia media de las funciones log-normales, que se grafican como líneas discontinuas rosadas.

Tabla 5.5: EMCIs que encontró el método automático que se encuentran totalmente fuera de la distribución de las fluctuaciones.

AÑO	MES	DÍA	HORA	MIN
*1998	10	19	4	58
2000	7	15	14	58
2001	3	31	0	58
2001	11	6	21	38
2001	11	24	5	38
2004	7	26	22	58
2005	1	18	13	38
2007	4	9	6	18
2008	11	25	4	18

En cada gráfica se aprecia una línea vertical discontinua azul. Esta línea representa el valor que limita el nivel de ruido, las fluctuaciones que superen este valor están fuera del nivel de ruido. Los valores se muestran en la parte superior para cada línea. Tomamos un valor que se encontrara

totalmente fuera de la distribución, de esta forma aseguramos que aquellas *estructuras de interés* que superan estos valores de fluctuación son eventos claros.

Con este análisis encontramos las *estructuras extremas*. Llamamos *estructuras extremas* a aquellas estructuras cuyas fluctuaciones se salen de la distribución completamente (en la Figura 5.6 los valores de fluctuaciones son más grandes que los valores marcados con líneas azules). Encontramos 9 estructuras que enlistamos en Tabla ??, estas estructuras cumplen que las fluctuaciones exceden esos valores y además que 3 de 4 parámetros lo cumplen.

Estas 9 estructuras encontradas automáticamente son EMCIs claras, exceptuando un caso que es una combinación entre una EMCI y una RIC (9 Abril 2007 reportada en Jian (2006)). Nuestro método logró encontrar EMCIs sin la intervención de un observador. Las primeras 7 EMCIs de esta lista se encuentran reportadas en la lista de Richardson & Cane (2011), mientras que la última EMCI no está registrada en ninguna lista. En la Figura 5.7 mostramos la EMCI que fue encontrada automáticamente y que que no está registrada en ninguna lista.

Los valores $3.6\sigma_M(\delta A)$ que salieron del análisis estadístico de un evento particular complejo son aproximadamente 4 veces las fluctuaciones que corresponden al ancho a potencia media. Es decir, de esta forma podemos generalizar este resultado y no solo es válido para el evento complejo que seleccionamos sino para toda la serie de eventos.

5.5. ESTRUCTURAS DE INTERÉS, EMCIs Y RICs

Comparamos el número y los tiempos de las *estructuras de interés* con los registrados en CDAW2010, Richardson & Cane (2011) (EMCIs) y Jian (2006) (RICs).

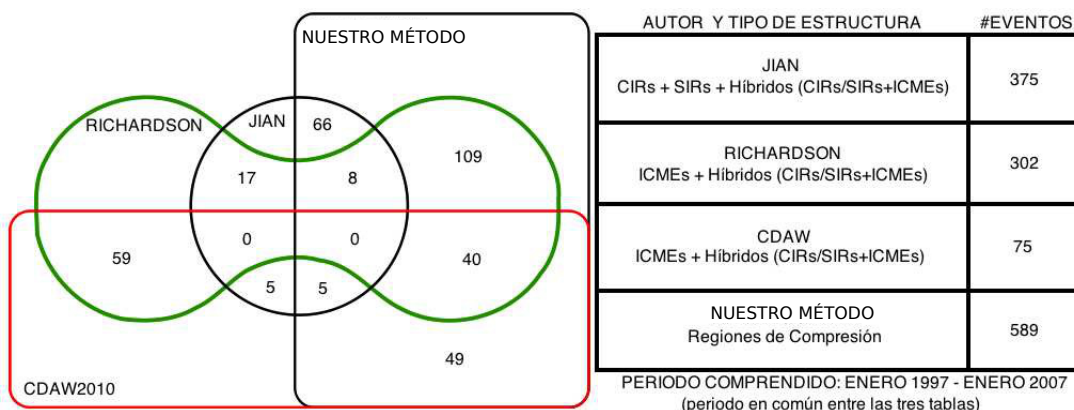


Figura 5.8: Número total de eventos de cada lista y el número de *estructuras de interés* encontradas automáticamente que ocurrieron en el periodo Enero 1997 a 2007. Diagrama de Venn para mostrar el número de eventos que tienen en común entre ellas.

En la Figura 5.8 mostramos el número de eventos en común entre las *estructuras de interés* y las listas mencionadas anteriormente. Para poder determinar que un evento es el mismo entre ellas, se buscaron los tiempos que difieren con la lista de *estructuras de interés* en menos de 12 horas.

En comparación, el número total de *estructuras de interés* que se encontraron en común en las listas: $49 + 109 + 66 = 224$ son menos de la mitad de 589 *estructuras de interés* que encontramos automáticamente dentro del periodo 1997 – 2007.

Se contaron 66 *estructuras de interés* en común con Jian et al. (2006), nuestro método encuentra también Regiones de Compresión debidas a RICs. Este número es mucho menor que la mitad del número total de RICs registradas en la lista, por lo tanto, no todas las RICs son registradas por nuestro método.

Por ahora no hay forma de distinguir qué Regiones de Compresión son de EMCIs y cuáles son debidas a RICs, al menos no en base a lo que estamos presentando en este trabajo. Será necesario imponer otro tipo de condiciones sobre la Región de Compresión o dentro de la estructura que continua después de ella para poder clasificarlas.

Capítulo 6

REGIONES DE COMPRESIÓN

Supusimos que todas las *estructuras de interés* son Regiones de Compresión, es decir, regiones de interacción entre dos parcelas de viento solar a diferente velocidad. Recordando que estas *estructuras de interés* fueron encontradas por el método automático. Este mismo método le asigna su tiempo *inicial* y *final* sin la necesidad de un observador que lo elija subjetivamente. El tiempo final es aquel en que las fluctuaciones que habían superado $3.6\sigma_M(\delta A)$ en 3 de 4 parámetros bajen por debajo de este mismo valor.

Analizamos sus duraciones y algunos de sus parámetros y las comparamos con las Regiones de Compresión de las EMCIs que estudiamos anteriormente durante Enero de 1997 hasta Enero del 2007 de la lista CDAW2010. De las 678 *estructuras de interés* solo tomaremos 589 que se encontraron en el intervalo de tiempo que tienen en común las listas que estamos usando como referencia.

En la parte superior de las Figuras 6.1 y 6.2, mostramos en negro las intensidades de \mathbf{v} , N , \mathbf{B} , T y β para todas las Regiones de Compresión que encuentra nuestro método. En rojo superpuestas las intensidades de \mathbf{v} , N , \mathbf{B} , T y β de las 74 EMCIs.

En la parte inferior mostramos aquellos eventos que tienen en común la muestra de Regiones de Compresión de nuestro método y las 74 EMCIs. En común estas dos listas tienen 49 eventos con una diferencia temporal menor a 3 horas. Este número corresponde al 65 % de las 74 EMCIs.

Recordemos que una *estructura de interés* cumple que 3 de 4 parámetros presentan una fluctuación mayor que $3.6\sigma_M(\delta A)$. Para determinar qué pasa con las estructuras que no fueron encontradas por el método automático, se analizaron las fluctuaciones obtenidas al aplicar el método sobre las 74 EMCIs de la lista CDAW2010 (*grafparam.pro* permite guardar este tipo de información)

Los valores promedio de las $3.6\sigma_M(\delta A)$ se muestran en la Tabla 6.1. Sumamos estos valores, hacemos lo mismo para las 74 EMCIs y comparamos. Resulta que las 26 estructuras que no

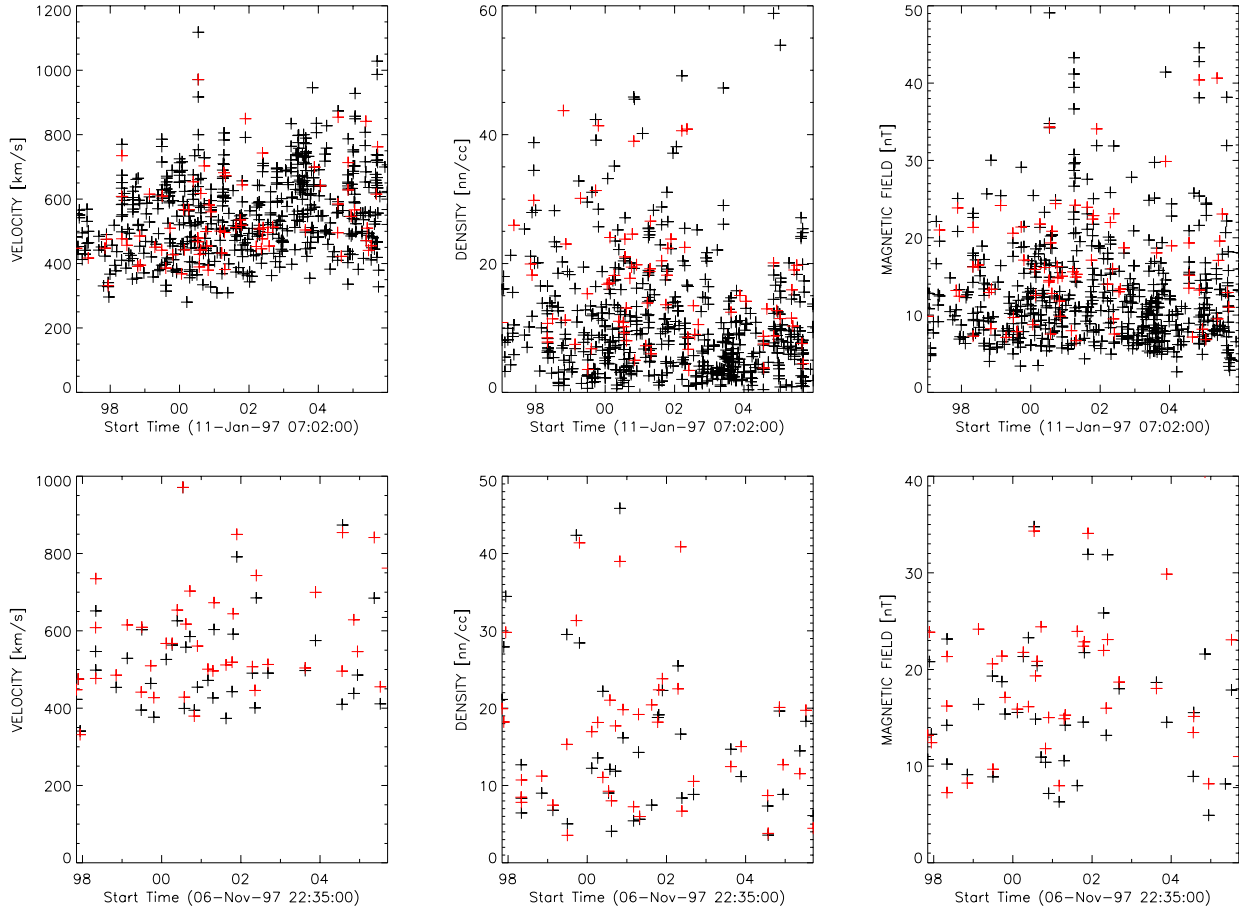


Figura 6.1: En la parte superior se grafican \mathbf{v} , N y \mathbf{B} para todas las Regiones de Compresión que encuentra nuestro método. En rojo superpuestas \mathbf{v} , N , \mathbf{B} correspondientes a las 74 EMCIs. En la parte inferior \mathbf{v} , N y \mathbf{B} que corresponden a los 49 eventos que tienen una diferencia menor a 3 horas entre nuestro método y las 74 EMCIs.

encontró el programa se encuentran por debajo del valor que tomamos como referencia para determinar las *estructuras de interés*. Estas 26 EMCIs se encuentran dentro del nivel de ruido. En la gráfica inferior de la Figura 6.3 mostramos las sumas de las fluctuaciones para las 74 EMCIs, una línea horizontal marca la suma de $3.6 \sigma_M(\delta A)$. En la gráfica superior se muestra la distribución de las sumas de las fluctuaciones, y en una línea vertical el valor que más se aproxima a la suma de $3.6 \sigma_M(\delta A)$.

Más de 30 eventos se encuentran por debajo de $\Sigma PROM(3.6 \sigma_M(A))$, es decir, esas 26 EMCIs no identificadas automáticamente son eventos que se encuentran próximos al nivel de ruido y no cumplen la condición que 3 de 4 parámetros tengan fluctuaciones arriba de $3.6 \sigma_M$. Podríamos medir la efectividad de nuestro método como la razón entre el número de eventos que encontró entre 74 que es el número de EMCIs que estamos usando para comparar, es decir, tenemos una efectividad de casi 70%. Recordando que las 74 EMCIs son eventos donde la mayoría son próximos al nivel

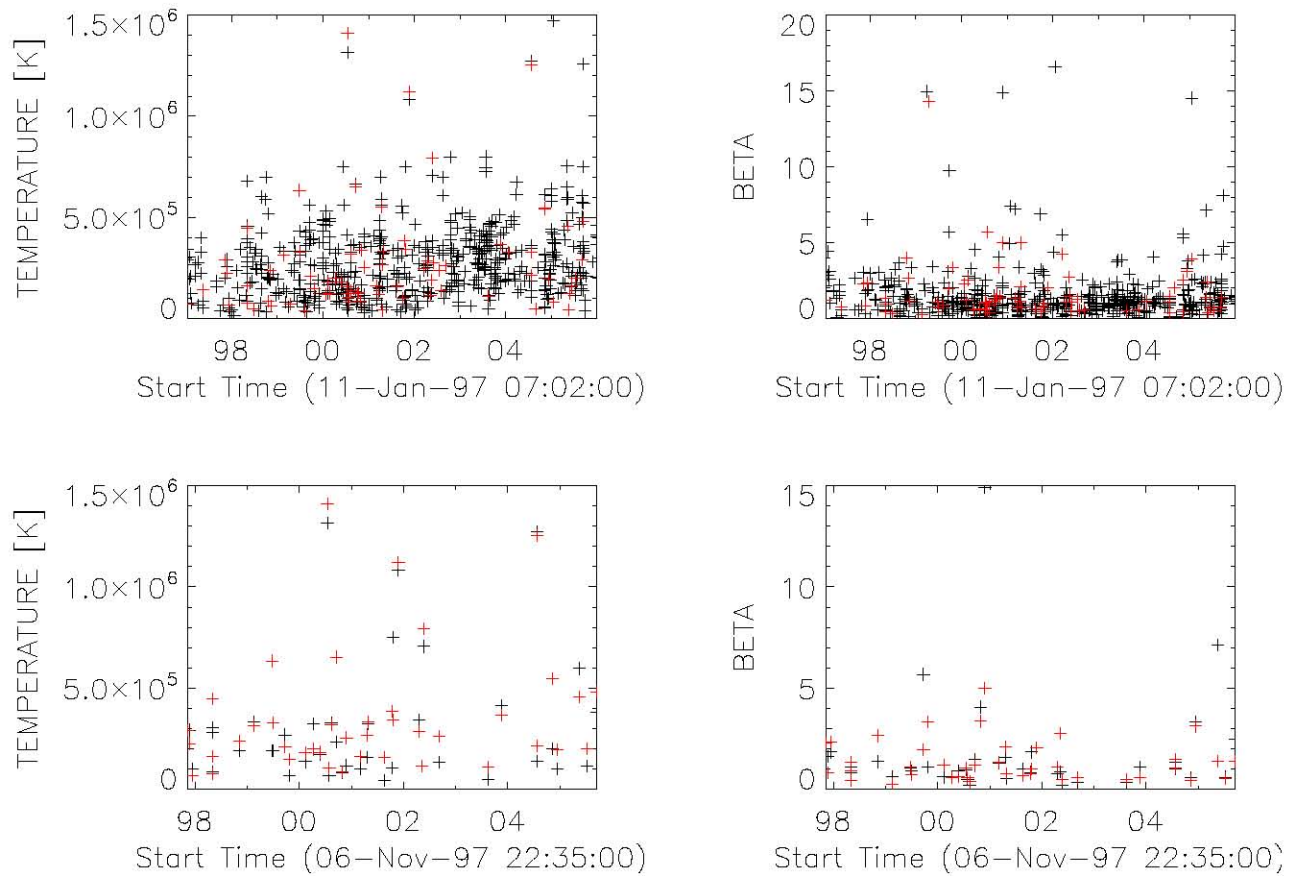


Figura 6.2: En la parte superior se grafican T y β para todas las Regiones de Compresión que encuentra nuestro método. En rojo superpuestas T y β de las 74 EMCIs. En la parte inferior estos mismos parámetros para los 41 eventos que tienen en común entre nuestro método y las 74 EMCIs

de ruido. Sin embargo, para evaluar la rutina es necesario determinar qué tipo de estructuras de gran escala son las *estructuras de interés* que encontró.

El método automático que proponemos es capaz de estimar las intensidades de \mathbf{v} , N , \mathbf{B} , T y β . De esta forma, podemos comparar estos valores con la información adquirida de manera subjetiva de los 49 eventos comunes (que sí fueron registrados por nuestro método).

Estimamos las diferencias entre ambos métodos, resumiendo los resultados en la Tabla 6.2. En esta tabla mostramos los valores correspondientes a la diferencias máxima y mínima de cada parámetro cuando se usan diferentes métodos. Para comparar en la cuarta columna dejamos el rango encontrado en los 49 eventos que tienen una diferencia menor a 3 horas con los que encontramos en nuestro método automático.

Notamos que las diferencias no exceden estos rangos (ver Tabla 6.2). Cuando la diferencia de velocidad es muy baja, las estructuras son más simples. En general, presentan un solo choque. Mientras que a mayor diferencia, la estructura es mucho más compleja y puede involucrar no solo

Tabla 6.1: Valores de las desviaciones estándares promedio de las fluctuaciones de los cuatro parámetros usados para la identificación de *estructuras de interés*.

PARÁMETRO PROMEDIO	VALOR
PROM(3.6 $\sigma_M(\delta\mathbf{v})$)	0.114577
PROM(3.6 $\sigma_M(\delta N)$)	0.067396
PROM(3.6 $\sigma_M(\delta\mathbf{B})$)	0.047401
PROM(3.6 $\sigma_M(\delta T)$)	0.021743
Σ PROM(3.6 $\sigma_M(A)$)	0.251117

Tabla 6.2: Diferencias máximas y mínimas entre las magnitudes promedio estimadas de \mathbf{v} , N , \mathbf{B} , T y β por ambos métodos: automático y observacional.

PARÁMETRO	DIF. MÁXIMA	DIF. MÍNIMA	RANGO OBS
\mathbf{v} [km/s]	190.523	0.138	[331.54, 970.98]
N [cm ⁻³]	24.226	0.215	[3.41, 43.73]
\mathbf{B} [nT]	32.487	0.342	[6.68, 40.64]
T [K]	443962	206.94	[39331, 1410500]
β	9.947	0.003	[0.24, 14.29]

una EMCIs sino el arribo de varias. En la Figura 6.4 mostramos las distribuciones de las diferencias en las magnitudes de los parámetros y en la duración de la Región de Compresión.

Dada las condiciones que imponemos sobre las *estructuras de interés*, la rutina encuentra las EMCIs de la lista del CDAW2010. Como discutimos anteriormente si variamos ese 3.6 a 2.0 entonces encuentra todavía más EMCIs, sin embargo, contaminamos nuestra lista con eventos que seguramente no son ningún tipo de evento sino simplemente ruido. Eligiendo $k = 3.6$ excluimos esos eventos que se encuentran cercanos al nivel de ruido y nuestro método es capaz de encontrar eventos que seguramente son más relevantes.

Al pedir que la Región de Compresión termine cuando las fluctuaciones de 3 de 4 parámetros vuelven a bajar por debajo de $3.6 \sigma_M$ podemos estimar la duración de las Regiones de Compresión.

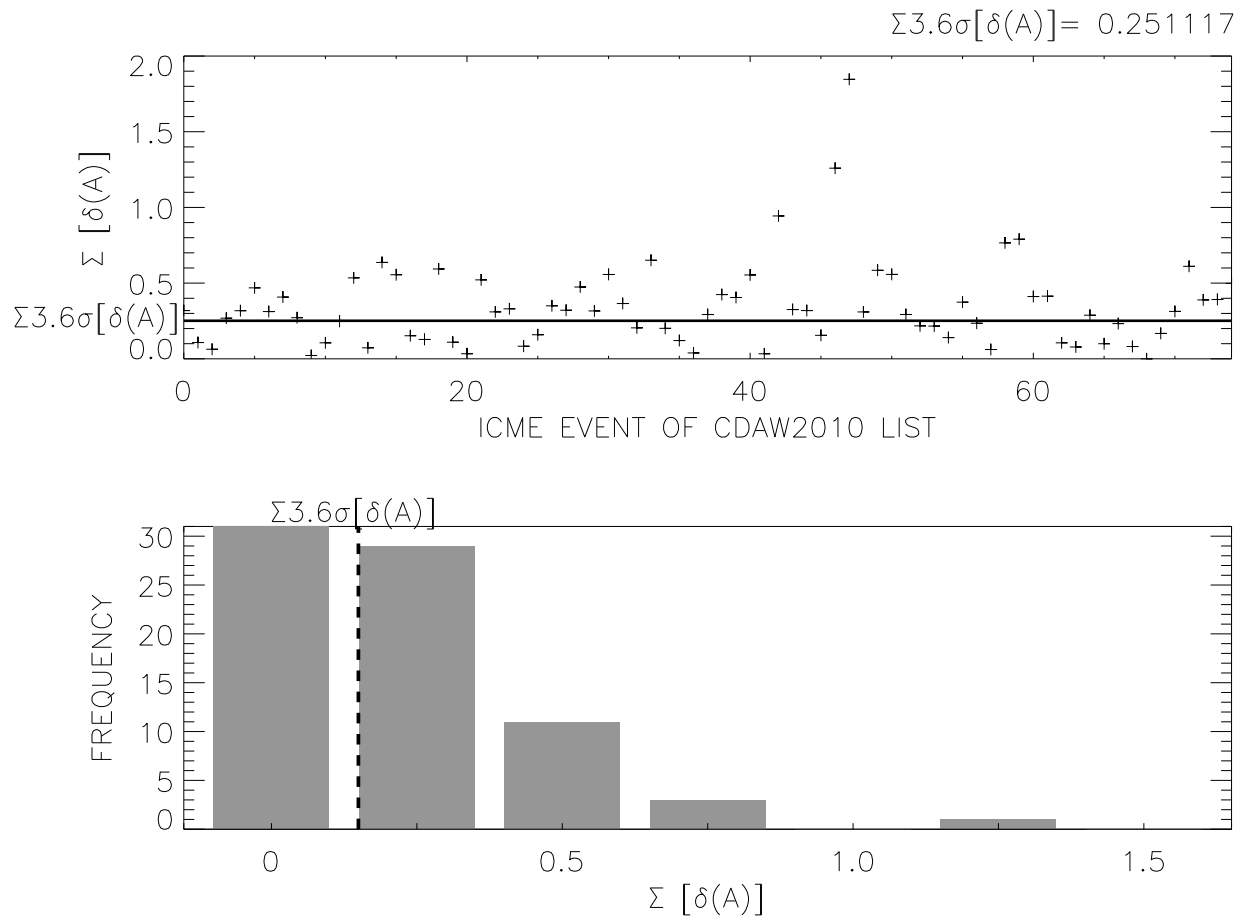


Figura 6.3: En la gráfica superior, mostramos la suma de las fluctuaciones que corresponde a cada una de las 74 EMCIs analizadas de la lista CDAW2010. La línea horizontal representa la suma de las desviaciones estándares globales de los cuatro parámetros que se tomaron en cuenta para la identificación de *estructuras de interés*. Aquellos eventos que nuestro método no registró son eventos que se encuentran por debajo de esta recta, es decir, son eventos cercanos al nivel de ruido. En la gráfica inferior, la distribución de la suma de las fluctuaciones. La línea vertical es el valor de la suma de las desviaciones estándares globales de los parámetros.

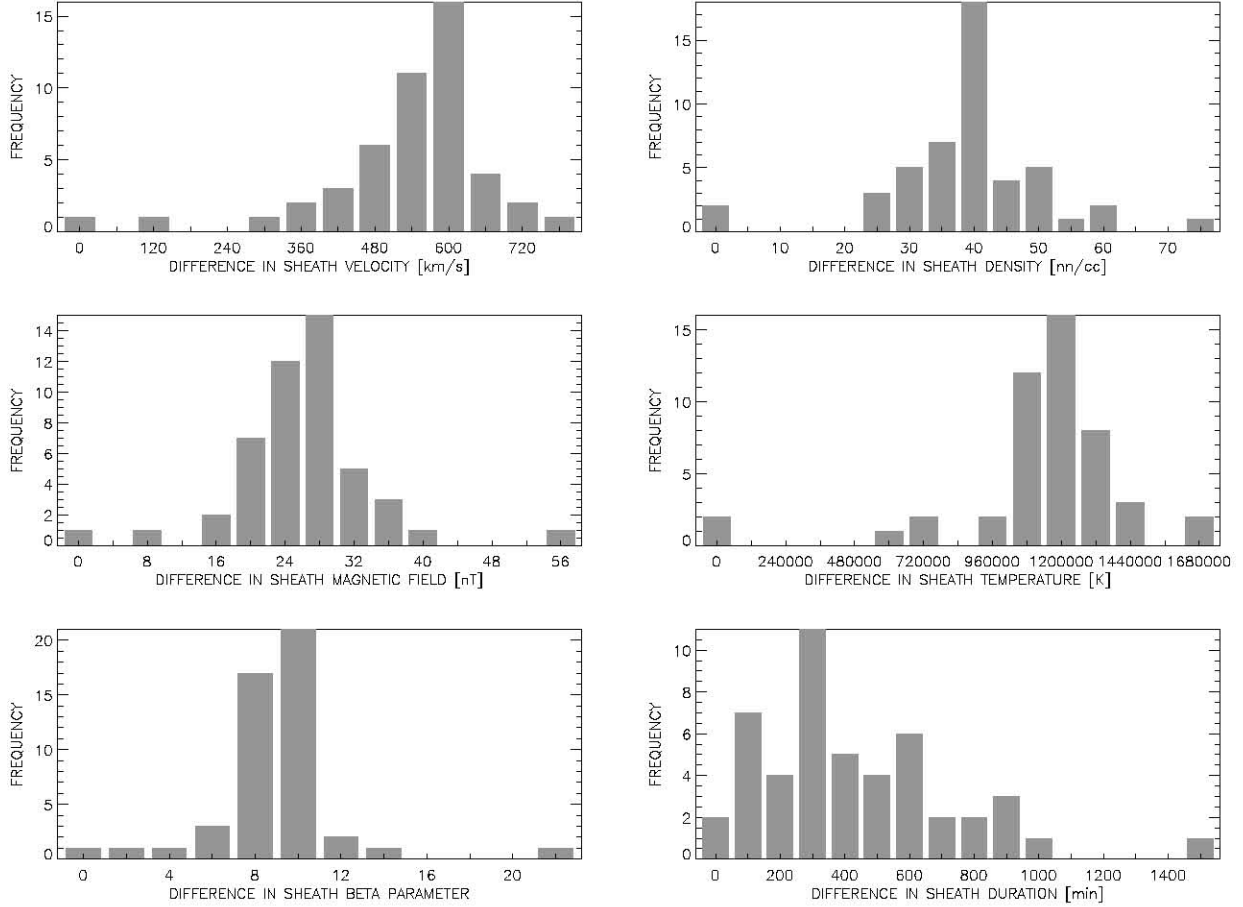


Figura 6.4: Distribuciones de las diferencias entre las magnitudes de los parámetros registradas en CDAW2010 y las que estima nuestro método, así como la diferencia entre las duraciones de las Regiones de Compresión que mide un método en comparación del otro, es decir, estamos comparando el método automático y el de inspección directa. Estas diferencias son considerables ya que la mayoría de los eventos que usamos para la comparación son de estructura compleja y cercanas al nivel de ruido. Creemos que en mucho se debe a que estamos tomando como final de las regiones de compresión la primera caída de las fluctuaciones por debajo de $3.6\sigma_M(\delta A)$ y que ocurra en 3 de 4 parámetros. Las regiones de compresión son regiones inestables y es muy posible que el final no sea la primera caída sino el tiempo en que las fluctuaciones se mantengan por debajo de $3.6\sigma_M(\delta A)$. Este análisis se hará en trabajos posteriores.

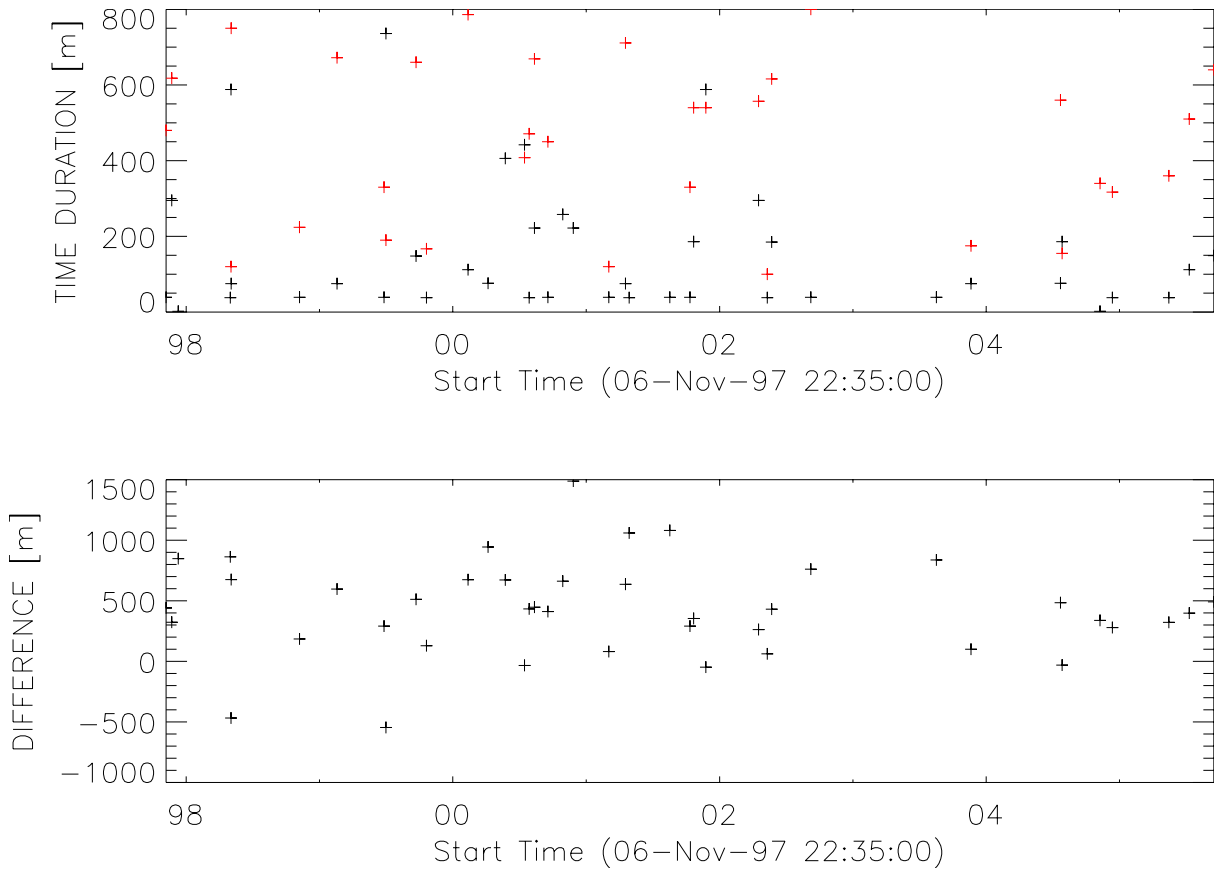


Figura 6.5: En la gráfica superior se muestran las duraciones de las Regiones de Compresión de las EMCIs (negro) reportadas en CDAW2010 y de las Regiones de Compresión de nuestro método (rojo). En la parte inferior, la diferencia de duración entre ambos métodos.

En la parte superior de la Figura 6.5 mostramos la duración en minutos (t) de las Regiones de Compresión de las EMCIs en rojo y de nuestro método en negro de los 49 eventos en común. En la parte inferior, las diferencias entre ambos métodos. 31 Regiones de Compresión ($> 75\%$) presentan que $-3 < \Delta t < 11.6$ horas.

Para determinar el tiempo final de la Región de Compresión, se pide el primer tiempo donde las fluctuaciones son menores que 3.6 veces el nivel de fondo.

Cuando estudiamos las EMCIs, notamos que las fluctuaciones ayudan a estimar el tiempo final de la Región de Compresión. Sin embargo, solo hemos podido caracterizarla de manera subjetiva. Ésto se debe a que no hemos estudiado las fluctuaciones atribuidas a estructuras *intrusas* embebidas en las EMCIs, no podemos separar sus fluctuaciones de aquellas fluctuaciones que son debidas a la Región de Compresión. Aún no entendemos la dinámica de estas estructuras con las EMCIs.

CONCLUSIONES

En este trabajo implementamos un método de análisis de los siguientes parámetros: velocidad, densidad, campo magnético y temperatura en el viento solar, los cuales son medidos *in situ* recabados por los instrumentos a bordo de WIND localizado a 1 UA. Este método permite identificar estructuras de gran escala que viajan en el viento solar. Para esto, definimos una fluctuación de estos parámetros como la ecuación 2.6, en donde se ha tomado en cuenta la dependencia con el ciclo solar y además normalizamos para facilitar su comparación.

En un primer análisis de las fluctuaciones, encontramos una alta correlación entre las fluctuaciones de la velocidad y las fluctuaciones del campo magnético, la temperatura y el parámetro beta, así como una muy baja correlación entre las fluctuaciones de la velocidad y las fluctuaciones de la densidad. Proponemos una explicación para este valor pequeño de la correlación.

Por otra parte, usando las correlaciones cruzadas entre pares de fluctuaciones de los parámetros encontramos un método para definir automáticamente los intervalos de tiempo en donde no hay ausencia de datos.

Comparamos los cambios en las fluctuaciones con los cambios en el respectivo parámetro y su relación con las EMCIs reportadas en la lista CDAW2010. Encontramos que los cambios importantes en las fluctuaciones nos ayudan a determinar los tiempos de arribo del choque, la duración de la funda y el probable final con precisión. Usamos los tiempos marcados por las fluctuaciones para determinar el valor promedio de los parámetros antes, durante y después de la funda y los comparamos con los valores reportados. De esta forma, eliminamos la subjetividad al evaluar dichos valores.

Para ayudar a la determinación automática de las estructuras de gran escala, definimos una *estructura de interés* como una región en donde las fluctuaciones de 3 de los 4 parámetros analizados exceden un nivel predeterminado. Este nivel es 4 veces el ancho a potencia media de la distribución de las fluctuaciones. De esta forma en el periodo analizado encontramos 589 *estructuras de interés*.

Para encontrar la relación de nuestras *estructuras de interés* con las estructuras de gran escala del Viento Solar, buscamos bases de datos de EMCIs, RICs y otras estructuras en la literatura. Al compararlas con nuestros resultados encontramos que un poco menos de la mitad (224 de 589 estructuras) fueron identificadas por nuestro método automático. La mayor parte de las estructuras no identificadas son tan débiles que nuestro método no es capaz de identificarlas. En el caso de EMCIs la rutina parece tener una efectividad de 70 % al comparar el número de EMCIs registradas en CDAW2010 y aquellos eventos encontrados por nuestro método que tuvieran una diferencia de tiempo menor a 3 horas.

Con el objetivo de encontrar regiones de compresión determinamos la velocidad de las *estructuras de interés* en función de la velocidad de Alfvén. Las dividimos en dos grupos: vientos rápidos y ondas de choque, e hicimos una comparación simple con las EMCs reportadas en SoHO-LASCO.

El método propuesto puede estimar automáticamente los tiempos iniciales y finales de las Regiones de Compresión, definidas como regiones en donde las fluctuaciones de 3 de los 4 parámetros analizados exceden (tiempo inicial) y caen por debajo de (tiempo final) un nivel predeterminado. Estimamos automáticamente las duraciones de las Regiones de Compresión y las comparamos con las reportadas en la literatura. De un total de 589 Regiones de Compresión encontramos que 48 están asociadas a EMCIs de la lista de 74 EMCIs del CDAW2010. De éstas, la diferencia mínima entre los tiempos reportados y los estimados es de 3 segundos y la máxima de 8 horas, excepto un caso extraordinario de 11.6 horas en el que la estructura es muy compleja.

Encontramos que las fluctuaciones que obviamente se salen de las distribuciones (log-normal en la mayoría de los casos) están asociadas a EMCIs.

De esta forma, estamos proponiendo una nueva aproximación que permite determinar automáticamente los casos extremos de EMCIs (muy por arriba del nivel de ruido) y evaluar los parámetros del Viento Solar asociados a Regiones de Compresión, eliminando la subjetividad de un método manual.

Bibliografía

- [1] J. W. Belcher. Alfvénic Wave Pressures and the Solar Wind. *ApJ*, 168:509, 1971.
- [2] J. E. Borovsky. Eddy viscosity and flow properties of the solar wind: Co-rotating interaction regions, coronal-mass-ejection sheaths, and solar-wind/magnetosphere coupling. *PLPh*, 13:056505, 2006.
- [3] L. F. Burlaga and A. J. Lazarus. Lognormal distributions and spectra of solar wind plasma fluctuations: Wind 1995-1998. *JGR*, 105:2357, 2000.
- [4] L. F. Burlaga and A. F. Vinas. Multi-scale probability distributions of solar wind speed fluctuations at 1 au described by a generalized tsallis distribution. *GRL*, 31:16807, 2004.
- [5] J. Chen. Physics of Coronal Mass Ejections: A New Paradigm of Solar Eruptions. *SSR*, 95:165, 2001.
- [6] P. Corona-Romero and J. A. Gonzalez-Esparza. Numeric and analytic study of interplanetary coronal mass ejection and shock evolution: Driving, decoupling, and decaying. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 116:5104, 2011.
- [7] G. Dalakishvili et al. Magnetic clouds in the solar wind: a numerical assessment of analytical models. *AAP*, 536, 2011.
- [8] S. Dasso et al. Progressive transformation of a flux rope to an icme. comparative analysis using the direct and fitted expansion methods. *SoPh*, 244:115, 2007.
- [9] J. A. Davies, R. A. Harrison, C. H. Perry, C. Mostl, N. Lugaz, T. Rollett, C. J. Davis, S. R. Crothers, M. Temmer, C. J. Eyles, and N. P. Savani. A Self-similar Expansion Model for Use in Solar Wind Transient Propagation Studies. *ApJ*, 750:23, 2012.
- [10] I. V. Despirak et al. Development of substorm bulges during different solar wind structures. *AnGeo*, 27:1951, 2009.
- [11] C. Dumitrache, N. A. Popescu, and A. Oncica. Tracking a Ulysses High-latitude ICME Event Back to Its Solar Origins. *SoPh*, 272:137–157, 2011.

- [12] V. Eselevich, M. Eselevich, V. Romanov, D. Romanov, and K. Romanov. On existence of two different mechanisms for forming coronal mass ejections. *ArXiv e-prints*, 2011.
- [13] P. T. Gallagher et al. Coronal mass ejection detection using wavelets, curvelets and ridgelets: Applications for space weather monitoring. *AdSpR*, 47:2118, 2011.
- [14] N. Gopalswamy. Relation between coronal mass ejections and their interplanetary counterparts. In *Solar-Terrestrial Magnetic Activity and Space Environment*, page 157, 2002.
- [15] N. Gopalswamy. Properties of interplanetary coronal mass ejections. *SSRv*, 124:145, 2006.
- [16] N. Gopalswamy. Corona mass ejections: a summary of recent results. In *20th National Solar Physics Meeting*, page 108, 2010.
- [17] N. Gopalswamy. *Universal Heliophysical Processes*, page 9. Springer, 2011.
- [18] N. Gopalswamy et al. Radio signatures of coronal mass ejection interaction: Coronal mass ejection cannibalism? *ApjL*, 548, 2001.
- [19] N. Gopalswamy et al. The soho lasco cme catalog. *EMP*, 104:295, 2009.
- [20] R. A. Harrison, J. A. Davies, C. Mostl, Y. Liu, M. Temmer, M. M. Bisi, J. P. Eastwood, C. A. de Koning, N. Nitta, T. Rollett, C. J. Farrugia, R. J. Forsyth, B. V. Jackson, E. A. Jensen, E. K. J. Kilpua, D. Odstroicil, and D. F. Webb. An Analysis of the Origin and Propagation of the Multiple Coronal Mass Ejections of 2010 August 1. *Apj*, 750:45, 2012.
- [21] P. Hellinger, P. Travnicek, J. C. Kasper, and A. J. Lazarus. Solar wind proton temperature anisotropy: Linear theory and WIND/SWE observations. *GRL*, 33:9101, 2006.
- [22] G. Hnat et al. Intermittency, scaling, and the fokker-planck approach to fluctuations of the solar wind bulk plasma parameters as seen by the wind spacecraft. *PRE*, 67:056404, 2003.
- [23] T. A. Howard and S. J. Tappin. Interplanetary Coronal Mass Ejections Observed in the Heliosphere: 1. Review of Theory. *SSR*, 147:31–54, 2009.
- [24] T. A. Howard and S. J. Tappin. Interplanetary Coronal Mass Ejections Observed in the Heliosphere: 3. Physical Implications. *SSR*, 147:89–110, 2009.
- [25] A. J. Hundhausen. Some macroscopic properties of shock waves in the heliosphere. *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 34:37, 1985.
- [26] K. E. J. Huttunen et al. Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds in the rising, maximum and early declining phases of solar cycle 23. *AnGeo*, 23:625, 2005.

- [27] L. Jian. *Radial evolution of large-scale solar wind structures*. PhD thesis, University of California, Los Angeles, 2008.
- [28] L. Jian et al. Properties of stream interactions at one au during 1995-2004. *SoPh*, 239:337, 2006.
- [29] L. Jian, C. T. Russell, J. G. Luhmann, and R. M. Skoug. Properties of Interplanetary Coronal Mass Ejections at One AU During 1995 2004. *SoPh*, 239:393–436, 2006.
- [30] L. Jian, C. T. Russell, J. G. Luhmann, and R. M. Skoug. Evolution of solar wind structures from 0.72 to 1 AU. *Advances in Space Research*, 41:259–266, 2008.
- [31] L. K. Jian, C. T. Russell, J. G. Luhmann, R. M. Skoug, and J. T. Steinberg. Stream Interactions and Interplanetary Coronal Mass Ejections at 0.72 AU. *SoPh*, 249:85–101, 2008.
- [32] K. E. Korreck et al. Heating of heavy ions by interplanetary coronal mass ejection driven collisionless shocks. *ApJ*, 659:773, 2007.
- [33] A. S. Krieger, A. F. Timothy, and E. C. Roelof. A Coronal Hole and Its Identification as the Source of a High Velocity Solar Wind Stream. *SoPh*, 29:505, 1973.
- [34] V. Kunkel and J. Chen. Evolution of a coronal mass ejection and its magnetic field in interplanetary space. *ApjL*, 715, 2010.
- [35] R. P. Lepping, M. H. Acuña, L. F. Burlaga, W. M. Farrell, J. A. Slavin, K. H. Schatten, F. Mariani, N. F. Ness, F. M. Neubauer, Y. C. Whang, J. B. Byrnes, R. S. Kennon, P. V. Panetta, J. Scheifele, and E. M. Worley. The Wind Magnetic Field Investigation. *SSR*, 71:207–229, 1995.
- [36] J. G. Luhmann et al. Stereo in-situ observations of solar wind structure. In *38th COSPAR Scientific Assembly*, volume 38, page 1879, 2010.
- [37] S. A. Maloney and P. T. Gallagher. Solar wind drag and the kinematics of interplanetary coronal mass ejections. *ApjL*, 724, 2010.
- [38] C. Mostl et al. Stereo and wind observations of a fast icme flank triggering a prolonged geomagnetic storm on 5-7 april 2010. *GeoRL*, 37:24103, 2010.
- [39] K. W. Olgivie et al. Swe, a comprehensive plasma instrument for the wind spacecraft. *SSRv*, 71:55, 1995.
- [40] M. I. Pudovkin et al. Electric field in the region of solar flares. *GeAe*, 36:8, 1996.

- [41] I. Richardson and H. Cane. Interplanetary coronal mass ejections during 1996 - 2007. *ICRC*, 1:319, 2008.
- [42] I. Richardson and H. Cane. Near-earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996 - 2009): Catalog and summary of properties. *SoPh*, 264:189, 2010.
- [43] N. P. Savani et al. Observational evidence of a coronal mass ejection distortion directly attributable to a structured solar wind. *ApJL*, 714, 2010.
- [44] N. P. Savani et al. Evolution of coronal mass ejection morphology with increasing heliocentric distance. i. geometrical analysis. *ApJ*, 731:109, 2011.
- [45] R. Schwenn et al. The association of coronal mass ejections with their effects near the earth. *AnGeo*, 23:1033, 2005.
- [46] R. Schwenn et al. *Coronal Observations of CMEs*, page 127. Springer, 2006.
- [47] M. Temmer et al. Influence of the ambient solar wind flow on the propagation behavior of interplanetary coronal mass ejections. *ApJ*, 743:101, 2011.
- [48] M. Temmer, B. Vršnak, T. Rollett, B. Bein, C. A. de Koning, Y. Liu, E. Bosman, J. A. Davies, C. Mostl, T. vZic, A. M. Veronig, V. Bothmer, R. Harrison, N. Nitta, M. Bisi, O. Flor, J. Eastwood, D. Odstrcil, and R. Forsyth. Characteristics of Kinematics of a Coronal Mass Ejection during the 2010 August 1 CME-CME Interaction Event. *ApJ*, 749:57, 2012.
- [49] B. T. Tsurutani et al. Magnetic decrease formation from 1 au to 5 au: Corotating interaction region reverse shocks. *JGR*, 114:8105, 2009.
- [50] A. Vourlidas et al. Large-angle spectrometric coronagraph measurements of the energetics of coronal mass ejections. *ApJ*, 534:456, 2000.
- [51] C. Wang and J. Richardson. Mhd simulations of the solar wind and icme dynamics from the inner to the outer heliosphere. In *Numerical Modeling of Space Plasma Flows*, volume 359, page 220, 2006.
- [52] Y.-M. Wang and N. R. Sheeley, Jr. The rotation of photospheric magnetic fields: A random walk transport model. *ApJ*, 430:399, 1994.
- [53] D. F. Webb and R. A. Howard. The solar cycle variation of coronal mass ejections and the solar wind mass flux. *JGR*, 99:4201, 1994.
- [54] Y. Zhang et al. Statistical analysis of corotating interaction regions and their geoeffectiveness during solar cycle 23. *JGR*, 113:8106, 2008.

- [55] T. H. Zurbuchen and I. G. Richardson. In-situ solar wind and magnetic field signatures of interplanetary coronal mass ejections. *SSR*, 123:31, 2004.

RUTINAS EN IDL

En esta sección describimos en breve las rutinas en IDL necesarias para lograr el desarrollo de este trabajo. Al final mostramos el diagrama de flujo.

PARÁMETROS

listadatos.pro

- LECTURA: Archivos del CDAWeb. Cada archivo contiene tres meses de datos, tienen un tamaño de $\sim 20 MB$.
- VARIABLES: dia-mes-año, hora – min – sec, B_x , B_y , B_z , v_x , v_y , v_z , N , T , β
- PROCESO: Genera un solo archivo .sav con todos los datos desde Enero de 1997 a Abril 2011 (último mes disponible cuando fue su última actualización).
- DURACIÓN DEL PROCESO: ~ 6 horas.
- RESULTADO: alldata.sav
- VARIABLES RESULTANTES: diadat, horadat, bgsexini, bgseyini, bgsezini, velxini, velyini, velzini, densityini, initialtemp, initialbetha

param.pro

- LECTURA: alldata.sav
- VARIABLES: diadat, horadat, bgsexini, bgseyini, bgsezini, velxini, velyini, velzini, densityini, initialtemp, initialbetha
- PROCESO:
 1. Compone el vector tiempo de la forma [hora, min, sec, msec, dia, mes , año]
 2. Calcula el magnitud del campo magnético ($\mathbf{B} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$).

3. Calcula el magnitud de la velocidad ($\mathbf{v} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$).

- DURACIÓN DEL PROCESO: ~ 30 minutos.
- RESULTADO: param.sav
- VARIABLES RESULTANTES: tex, vvxx, vvyv, vvzz, velocity, density, bbxx, bbyy, bbzz, bfield, betha, temp

FLUCTUACIONES

fluctuations.pro

- LECTURA: alldata.sav
- VARIABLES: diadat, horadat, bgsexini, bgseyini, bgsezini, velxini, velyini, velzini, densityini, initialtemp, initialbetha. Se puede variar k , dm y $d\mu$.
- PROCESO: Calcula las fluctuaciones y su desviación estándar de la siguiente forma:

1. $\mathbf{A} = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$

2. $\Delta A = \frac{A}{\langle A \rangle^*}$

3. $\langle A \rangle^* = \sum_{i=0}^Z \frac{\sum_{-d\mu/2}^{d\mu/2} A_i}{d\mu}$

4. $\delta A = \frac{\Delta A}{\langle A \rangle_T}$

5. $\sigma(\delta A)$.

- DURACIÓN DEL PROCESO: ~ 1 hora.
- RESULTADO: fluctuations.sav
- VARIABLES RESULTANTES: tex, norflucsdevel, norflucsdevden, norflucsdevbfield, norflucsdevbeta, norflucsdevtemp

desviacionmovil.pro

- LECTURA: fluctuations.sav
- VARIABLES: diadat, horadat, bgsexini, bgseyini, bgsezini, velxini, velyini, velzini, densityini, initialtemp, initialbetha. Se puede variar k , dm y $d\mu$.

- PROCESO: Calcula las desviaciones estándar móviles (promedio de 6 meses alrededor de cada elemento del vector) de las fluctuaciones. Guarda los datos en un archivo *.sav*.
- DURACIÓN DEL PROCESO: 1 semana.
- RESULTADO: smovil6M.sav
- VARIABLES RESULTANTES: tex, smovil6Mvel, smovil6Mmag, smovil6Mden, smovil6Mtem, smovil6Mbeta

k, dm Y $d\mu$

kdmval.pro

- LECTURA:
 1. param.sav
 2. fluctuations.sav
 3. listdata.txt
- VARIABLES:
 1. tex, vvxx, vvyv, vvzz, velocity, density, bbxx, bbyy, bbzz, bfield, betha, temp
 2. tex, norflucsdevel, norflucsdevden, norflucsdevbfield, norflucsdevbeta, norflucsdevtemp
 3. eventodata, yeardata, mdata, daydata, hdata, mindata, doydata
- PROCESO: Lee una lista de los días en los que ocurrieron ICMEs y estima los tiempos iniciales y finales posibles de la funda. Esta rutina forma parte de una subrutina que varía k dm y $d\mu$ y guarda el número de tiempos en un archivo *.txt*.
- DURACIÓN DEL PROCESO: ~ 30 minutos.
- RESULTADO: parametros77total.txt
- VARIABLES RESULTANTES: *evento, nsig, escala, caj, ni, nf*

lectura.pro

- LECTURA: parametros77total.txt
- VARIABLES: *evento, nsig, escala, caj, ni, nf*

- PROCESO: Grafica el número de tiempos iniciales y finales al variar k , dm y $d\mu$.
- DURACIÓN DEL PROCESO: ~ 1 minuto.
- RESULTADO: kdmval.ps
- VARIABLES RESULTANTES: Ninguna

CORRELACIONES

correlations.pro

- LECTURA: fluctuations.sav
- VARIABLES: tex, norflucsdevel, norflucsdevden, norflucsdevbfield, norflucsdevbeta, norflucsdevtemp
- PROCESO: Calcula las correlaciones cruzadas entre pares de vectores. Hay 10 combinaciones posibles. Guarda la información en un archivo *.sav*.
- DURACIÓN DEL PROCESO: ~ 2 minutos.
- RESULTADO: correlations.sav
- VARIABLES RESULTANTES: ccorrvelden, ccorrvelmag, ccorrvelbeta, ccorrveltemp, ccorrdenmag, ccorrdenbeta, ccorrden-temp, ccorr-magbeta, ccorr-magtemp, ccorr-beta-temp

corranalysis.pro

- LECTURA: correlations.sav
- VARIABLES: ccorrvelden, ccorrvelmag, ccorrvelbeta, ccorrveltemp, ccorrdenmag, ccorrdenbeta, ccorrden-temp, ccorr-magbeta, ccorr-magtemp, ccorr-beta-temp
- PROCESO: Obtiene histogramas en donde cuenta cuantos pares de correlaciones tienen correlación por arriba de un umbral. Se puede variar el umbral.
- DURACIÓN DEL PROCESO: ~ 1 minuto.
- RESULTADO: LM99.ps
- VARIABLES RESULTANTES: Ninguna.

cleancorrlist.pro

- LECTURA:
 1. param.sav
 2. correlations.sav
 3. smovilstruclist.sav
 4. ListaCIRs.txt
 5. ICMEsRichardson.txt
 6. CMEsObs.txt
- VARIABLES: El vector de tiempo de inicio de las estructuras para las diferentes listas. Dentro de las listas también se encuentran algunos parámetros referentes a los eventos como la velocidad y el campo magnético.
- PROCESO: Elimina aquellos eventos en donde las estructuras de las listas de diferentes autores caen en ausencia de datos en el archivo param.sav.
- DURACIÓN DEL PROCESO: ~ 1 hora.
- RESULTADO: smovilstruclistcorr.sav, ListaCIRscorr.sav, ICMEsRichardsoncorr.sav, ICMEsLaracorr.sav
- VARIABLES RESULTANTES: Los vectores de tiempo de inicio y final de las estructuras con algunos de los parámetros más importantes como la velocidad y el campo magnético.

ESTRUCTURAS

estructuras.pro

- LECTURA: fluctuations.sav
- VARIABLES: tex, norflucsdevel, norflucsdevden, norflucsdevbfield, norflucsdevbeta, norflucsdevtemp
- PROCESO:
 1. Estima la desviación estándar de cada parámetro.
 2. Encuentra cuando las fluctuaciones exceden $k\sigma$ en 3 de 4 parámetros casi al mismo tiempo. En este mismo programa variamos k .

3. Imprime el número de estructuras que encuentra.
 4. Guarda la información temporal de las estructuras en un archivo *.sav* y en un *.txt*.
- DURACIÓN DEL PROCESO: ~ 20 minutos.
 - RESULTADO:
 1. *struclist.sav*
 2. *struclist.txt*
 - VARIABLES RESULTANTES: *horasho*, *minsho*, *secscho*, *msho*, *diasho*, *messho*, *aasho*

finestructuras.pro

- LECTURA: *fluctuations.sav*
- VARIABLES: *tex*, *norflucsdevel*, *norflucsdevden*, *norflucsdevbfield*, *norflucsdevbeta*, *norflucsdevtemp*
- PROCESO:
 1. Estima la desviación estándar de cada parámetro.
 2. Encuentra cuando las fluctuaciones son menores a $k\sigma$ en 3 de 4 parámetros casi al mismo tiempo. En este mismo programa variamos k .
 3. Imprime el número de estructuras que encuentra.
 4. Guarda la información temporal de las estructuras en un archivo *.sav* y en un *.txt*.
- DURACIÓN DEL PROCESO: ~ 20 minutos.
- RESULTADO:
 1. *sheathlist.sav*
 2. *sheathlist.txt*
- VARIABLES RESULTANTES: *horasheath*, *minsheath*, *secsheath*, *msheath*, *diasheath*, *messheath*, *aasheath*

choques.pro

- LECTURA:

1. alldata.sav
2. struclist.sav

- VARIABLES:

1. diadat, horadat, bgsexini, bgseyini, bgsezini, velxini, velyini, velzini, densityini, initialtemp, initialbetha
2. horasho, minsho, secsho, msho, diasho, messho, aasho

- PROCESO:

1. Encuentra el tiempo de las estructuras en el archivo que incluye todos los datos.
2. Calcula la velocidad característica del medio, el promedio de cada uno de los parámetros y el mínimo en un rango de 10 minutos antes de la estructura.
3. Calcula el promedio de cada uno de los parámetros y el máximo en un rango de 10 minutos después de la estructura.
4. Estima la velocidad de Alfvén
5. Compara la velocidad promedio de la estructura 10 minutos después con la velocidad de Alfvén
6. Cuenta cuántas estructuras exceden 2 veces esta velocidad
7. Guarda la información temporal, la velocidad de Alfvén, la diferencia de velocidades, la velocidad antes, la velocidad después, la velocidad máxima, la velocidad mínima, el campo magnético antes, el campo magnético después, la diferencia de campo magnético, el campo magnético máximo y el campo magnético mínimo en un archivo .txt.

- DURACIÓN DEL PROCESO: \sim 1 minuto.

- RESULTADO: SHOCKSLIST.txt

- VARIABLES RESULTANTES: estrucc(0), estrucc(1), estrucc(2), estrucc(3), estrucc(4), estrucc(5), estrucc(6), velalf, deltavel, velan(0), veldes(0), maxvel, minvel, magne(0), magnefin(0), deltamag, maxmag, minmag

BASES DE DATOS

grafparam.pro

- LECTURA:
 1. param.sav
 2. fluctuations.sav
- VARIABLES:
 1. tex, norflucsdevel, norflucsdevden, norflucsdevbfield, norflucsdevbeta, norflucsdevtemp
 2. tex, vvxx, vvyv, vvzz, velocity, density, bbxx, bbyy, bbzz, bfield, betha, temp
- PROCESO: Al decirle el tiempo del choque, el tiempo inicial y final de la ICME, estima más de 100 variables diferentes. Guarda las gráficas y estas variables en un archivo *.txt*.
- DURACIÓN DEL PROCESO: ~ 5 minutos.
- RESULTADO: CMEsObs.txt
- VARIABLES RESULTANTES: más de 100 variables diferentes.

REGIONES DE COMPRESIÓN

regiones.pro

- LECTURA:
 1. param.sav
 2. fluctuations.sav
 3. correlations.sav
 4. estructuras.sav
 5. finestructuras.sav
- VARIABLES:
 1. tex, norflucsdevel, norflucsdevden, norflucsdevbfield, norflucsdevbeta, norflucsdevtemp
 2. tex, vvxx, vvyv, vvzz, velocity, density, bbxx, bbyy, bbzz, bfield, betha, temp

3. ccorrvelden, ccorrvelmag, ccorrvelbeta, ccorrveltemp, ccorrdenmag, ccorrdenbeta, ccorrden-temp, ccorrmagbeta, ccorrmagtemp, ccorrbetatemp
- PROCESO: Guarda un archivo *.sav*.
 1. Encuentra las estructuras y sus finales temporalmente.
 2. Elimina aquellas estructuras donde hay ausencia de datos.
 3. Encuentra el primer final que haya después del tiempo de la estructura.
 4. Calcula su duración y el promedio de algunos parámetros dentro de ese tiempo.
 - DURACIÓN DEL PROCESO: ~ 10 minutos.
 - RESULTADO:
 1. sheaths.sav
 2. sheathtot.sav
 - VARIABLES RESULTANTES:
 1. position, inifun, finfun, ttfun, velstru, denstru, magstru, betastru, tempstru
 2. endshe, funini, funfin, fundif, anvel, funvel, desvel, flucanvel, flucfunvel, flucdesvel, anden, funden, desden, flucanden, flucfunden, flucdesden, anmag, funmag, desmag, flucanmag, flucfunmag, flucdesmag, anbeta, funbeta, desbeta, flucanbeta, flucfunbeta, flucdesbeta, antemp, funtemp, destemp, flucantemp, flucfuntemp, flucdestemp

regionanalysis.pro

- LECTURA:
 1. sheathtat.sav
 2. CMEsObs.txt
- VARIABLES:
 1. endshe, funini, funfin, fundif, anvel, funvel, desvel, flucanvel, flucfunvel, flucdesvel, anden, funden, desden, flucanden, flucfunden, flucdesden, anmag, funmag, desmag, flucanmag, flucfunmag, flucdesmag, anbeta, funbeta, desbeta, flucanbeta, flucfunbeta, flucdesbeta, antemp, funtemp, destemp, flucantemp, flucfuntemp, flucdestemp
 2. más de 100 variables diferentes.

- PROCESO: Grafica más de 8 gráficas diferentes, cada una con una gráfica por parámetro. Su motivación es encontrar relaciones o valores importantes. Las guarda en un archivo *.ps*.
- DURACIÓN DEL PROCESO: ~ 2 minutos.
- RESULTADO: sheathanalisis.ps
- VARIABLES RESULTANTES: Ninguna.

