



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

CIENCIAS ATMOSFÉRICAS, ESPACIALES Y PLANETARIAS

IDENTIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE ESTRUCTURAS DE GRAN ESCALA
ASOCIADAS A LAS OBSERVACIONES DE LAS NAVES STEREO

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

FIS. JUAN CARLOS GONZÁLEZ MARÍN

TUTOR:

DR. ALEJANDRO LARA SÁNCHEZ
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

COMITÉ TUTOR:

DRA. ANDREA INÉS BORGAZZI
DR. PRIMOZ KAJDIC
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO

Presidente

Dr. Héctor Román Pérez Enríquez

Centro de Geociencias (Juriquilla, Qro.), Universidad Nacional Autónoma de México

Vocal

Dr. Rogelio Antonio Caballero López

Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México

Secretario

Dr. Alejandro Lara Sánchez

Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México

Suplentes

Dr. José Alberto Flandes Mendoza

Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Julio César Ramírez Vélez

Instituto de Astronomía (Ensenada, B.C.), Universidad Nacional Autónoma de México

PRESENTACIONES

- 2017 - CNF - Congreso Nacional de Física (presentación en formato de póster) - González Marín, J.C., Lara, A., *Identificación automática de estructuras a gran escala asociadas a las observaciones de las naves STEREO*
- 2017 - 16th Latin American Workshop on Plasma Physics (LAWPP) (presentación en formato de póster) - González Marín, J.C., Lara, A., *Automatic identification of large-scale structures associated with the observations of STEREO spacecraft*

BECAS OTORGADAS

- 2015 - 2017 CONACYT Beca Estudios de Maestría
- 2016 UNAM Posgrado - Apoyo económico para CNF

Agradecimientos

A mi tutor, el Dr. Alejandro Lara, por la infinita paciencia que mostró durante este período, por sus correcciones y la oportunidad de haber colaborado todo este tiempo con él.

A mis sinodales, el Dr. Héctor Román Pérez, el Dr. Alberto Flandes, el Dr. Julio Ramírez y el Dr. Rogelio Caballero, por todas sus valiosas correcciones, comentarios y sugerencias en la revisión de este trabajo de tesis.

A Tatiana Niembro, ya que sin su ayuda, paciencia, conocimientos y su cálida y desinteresada disposición, mucho de este trabajo y mi paso por este posgrado, no hubiera sido posible.

A los compañeros del departamento de Ciencias Espaciales, por sus duras lecciones de vida.

A mi madre, a mi padre, a mi hermano y a mi familia, a quienes no tengo modo alguno de agradecer su único e incondicional apoyo y por todo su amor.

A teacher can never truly teach unless he is still learning himself. A lamp can never light another lamp unless it continues to burn its own flame. The teacher who has come to the end of his subject, who has no living traffic with his knowledge, but merely repeats his lessons to his students can only load their minds; he cannot quicken them. Truth not only must inform but also inspire. If the inspiration dies out, and the information only accumulates, then truth loses its infinity.

Extracto de un pensamiento atribuido a Rabindranath Tagore, escritor indio.
(1861-1941)

A mis padres y a mi hermano, con todo mi cariño.

Resumen

Desde el punto de vista del clima espacial, la identificación y seguimiento de estructuras transitorias heliosféricas como las eyecciones de masa coronal (CMEs por sus siglas en inglés) y las regiones de interacción entre corrientes (SIRs), desde su generación hasta su propagación por el medio interplanetario, son temas muy relevantes debido a las consecuencias de la interacción de dichos eventos con la magnetósfera de la Tierra y a sus efectos sobre determinadas infraestructuras tecnológicas. El estudio de estos fenómenos se basa en la identificación visual de estructuras transitorias de gran escala en imágenes de coronógrafos y en las observaciones *in-situ* de instrumentos a bordo de naves como los Observatorios para las Relaciones entre el Sol y la Tierra (STEREO). Se usaron los datos medidos por las naves STEREO y WIND de la magnitud de la velocidad del viento solar, su densidad, temperatura y la magnitud del campo magnético interplanetario para el período 2008-2013, con el objeto de encontrar intervalos de interés que muestren firmas asociadas con eventos transitorios como son CMEs y SIRs. Esto último, de modo automático en las tres naves y a través del cálculo de las fluctuaciones, de la variable conocida como vaivén total y su correspondiente transformada *wavelet*, basados en la información de los parámetros del viento solar. Tomando en cuenta una serie de catálogos de eventos reportados como base de comparación, se halló una buena correspondencia entre los resultados obtenidos con el vaivén total y sus escalas *wavelet* asociadas para cada nave y en al menos dos naves para el seguimiento de una cantidad dada de eventos analizados.

Abstract

From the space weather point of view, the identification and tracking of Heliospheric transient structures, such as interplanetary coronal mass ejections (CMEs) and stream interaction regions (SIRs), from their emergence to their propagation through the interplanetary medium, are very important issues in terms of space weather, due to the consequences of the interaction of these transient events with the Earth magnetosphere and its dangerous effects on some technological infrastructures. The study of such phenomena is based on the visual identification of large scale transient structures on coronagraph images and the *in-situ* observations of instruments on board of spacecrafts like the Solar and Terrestrial Relations Observatory (STEREO). In this work, we use the measured data from WIND and STEREO spacecrafts of speed, density, temperature and magnetic field magnitude, for the period of time between 2008 and 2013. We look for intervals of interest that shows signatures of transient events like CMEs and SIRs, automatically in the three spacecraft, using the fluctuations of the parameters and the so-called *total seesaw* and its related wavelet transform. . This was compared with a set of catalogs with reported structures, finding a good correspondence between the total seesaw and its transform for each spacecraft and for at least 2 of them regarding the following of a set of specific events

Índice general

1	Introducción	1
2	Eventos transitorios asociados con la actividad solar y su observación	7
2.1	Eyecciones de masa coronal interplanetarias (ICME)	8
2.2	Regiones de interacción de corrientes	13
2.3	Medios de observación y detección de eventos transitorios	15
3	Elementos del marco de trabajo	22
3.1	Fluctuaciones de los parámetros	22
3.2	Fluctuaciones globales y locales	25
3.3	Escalas de tiempo en el contexto de las fluctuaciones de los parámetros del viento solar	28
3.4	Vaivenes: La “norma” de las fluctuaciones	31
3.5	La transformada <i>wavelet</i>	33
4	Metodología	35
5	Resultados	40
6	Discusión y conclusiones	68
Apéndice A Análisis de series de tiempo mediante el uso de la transformada <i>wavelet</i>		73
A.1	Consideraciones prácticas y técnicas de la transformada wavelet usada en este trabajo	79
Referencias		89

Capítulo 1

Introducción

Dentro de la variedad de manifestaciones de la actividad solar, destacan aquellos fenómenos que se desplazan por el medio interplanetario y que interactúan con otros cuerpos dentro de la Heliosfera. Dentro de esta clase de eventos se encuentran las eyecciones de masa coronal interplanetarias (cuyas siglas en inglés son ICME) y las regiones de interacción de corrientes (SIR). Una *eyección de masa coronal* puede ser vista como una parcela de plasma solar atmosférico que es proyectada hacia el espacio extrasolar con velocidades que varían desde los 100 hasta los 3,000 km s⁻¹ y que posee un campo magnético propio. Estos eventos interactúan con el flujo de partículas del viento solar e incluso, en determinadas condiciones, con la magnetosfera de la Tierra y provocan daños en la infraestructura artificial orbital.

Por otro lado, una *región de interacción de corrientes* es una zona del medio interplanetario donde un flujo de viento solar rápido (con una magnitud de velocidad del orden de 750 km s⁻¹ y baja densidad de partículas) interactúa con un flujo de viento lento (con magnitud de velocidad del orden de 400 km s⁻¹ y mayor densidad comparativamente) liberado previamente. Además, se sabe que el movimiento de una SIR se corresponde con el de la rotación solar y el campo magnético interplanetario por lo que sigue una trayectoria curva en espiral conocida como espiral de Parker. La información que contiene dicha región puede mantenerse por un período de tiempo del orden de un ciclo de rotación solar, pero existen casos en los que una SIR puede

estar presente por más de un ciclo de rotación (ver por ejemplo, Siscoe & Intriligator, 1993). Eventos como estos son conocidos como regiones de interacción corrotantes (o CIRs).

Junto con las ráfagas solares, las CMEs y las SIRs se ubican dentro de los fenómenos transitorios más energéticos que muestra la actividad solar. Su estudio incluye desde las mediciones *in-situ* de instrumentos a bordo de orbitadores como son los Observatorios para el estudio de las Relaciones entre el Sol y la Tierra (STEREO por sus siglas en inglés) hasta las imágenes de los telescopios coronógrafo que misiones como el Observatorio de eventos Solares y Heliosféricos (SOHO por sus siglas en inglés) llevan a bordo.

La identificación de eventos asociados con la actividad solar es pues, un tema de alta relevancia y de desarrollo importante en los últimos años. Los métodos usados para la detección y seguimiento de este tipo de eventos incluyen la identificación por inspección visual sobre los datos obtenidos por los instrumentos que se encuentran a bordo de misiones como son las STEREO o ACE (siglas del *Advanced Composition Explorer*). Por ejemplo, Huang, Song & Li (2017) usan los datos medidos por las misiones antes mencionadas para ubicar eventos que hayan sido registrados por las tres naves, utilizando un conjunto de seis criterios observacionales sobre dichos datos. El período considerado para el estudio fue de 2007 al 2010, que coincide con la fase inicial de vuelo de la misión STEREO, cuando las naves se encontraban más cerca de la Tierra y el ACE, que se mantenía en torno al punto lagrangiano L1.

La detección y seguimiento de eventos también se realiza con las imágenes obtenidas por telescopios coronógrafos en órbita, los cuales son un tipo especial de telescopio que cuentan con un ocultador en medio de la lente que permite generar un eclipse artificial cuando se dirigen hacia el Sol. Esto permite observar de manera eficiente la salida aparente del disco solar de eventos de eyección de masa coronal. Las naves STEREO cuentan con este tipo de instrumentos, así como otros tipos de telescopios que permiten el rastreo y seguimiento de eventos en el espacio interplanetario que se ubica entre el Sol y la Tierra. Tappin & Howard (2009) realizaron este tipo de seguimiento para el caso

particular de regiones de interacción de corrientes, usando las imágenes de los telescopios HI a bordo de las naves STEREO, calculando la trayectoria y el momento en que se detectarían por dichos aparatos. Esto lo hicieron mediante un modelo simple de movimiento a velocidad angular constante, aprovechando el movimiento del evento con respecto a la estrella. Para llevar a cabo dicho trabajo los autores utilizaron también información de la nave ACE, por lo que ambos trabajos son esfuerzos por identificar y darle seguimiento a eventos de SIRs y CIRs.

Por otro lado, se han realizado trabajos para automatizar el proceso de identificación de eventos, reduciendo la intervención humana en favor de la eficiencia que un sistema computacional puede ofrecer. Sin embargo, esta clase de esquemas aún presentan algunos inconvenientes a considerar. A continuación se presentan un par de ejemplos.

En la figura 1.1, se presentan los conteos diarios promediados de eventos de eyecciones de masa coronal, generados por Robbrecht et al. (2009), de acuerdo con las observaciones disponibles realizadas por el instrumento LASCO¹, (*Large Angle and Spectrometric CO*ronagraph) a bordo de la nave SOHO, así como las detecciones automáticas del programa *Computer Aided CME Tracking software* (CACTus²). Como referencia se incluyeron también los conteos diarios y mensuales de manchas solares publicados por el Centro de Análisis de Datos sobre la Influencia de eventos Solares (SIDC por sus siglas en inglés) el cual pertenece al Observatorio Real de Bélgica. Sin embargo, sólo se distingue una tendencia general en las tres curvas, la cual está relacionada con el ciclo de actividad de 11 años que muestra el Sol. En efecto, el número de manchas solares observables está correlacionado con el momento en el que se encuentre el estado de actividad dentro de dicho ciclo. Tal y como apuntan Webb & Howard (2012), las diferencias entre los contenidos de ambos catálogos (los cuales incluyen las discrepancias en el número de eventos por día y la forma de la curva asociada a CDAW hacia el final del intervalo) pueden hallar su explicación en el hecho de que hay, por lo menos cuatro diferentes observadores que

¹Disponible en el sitio web http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html.

²<http://sidc.be/cactus>

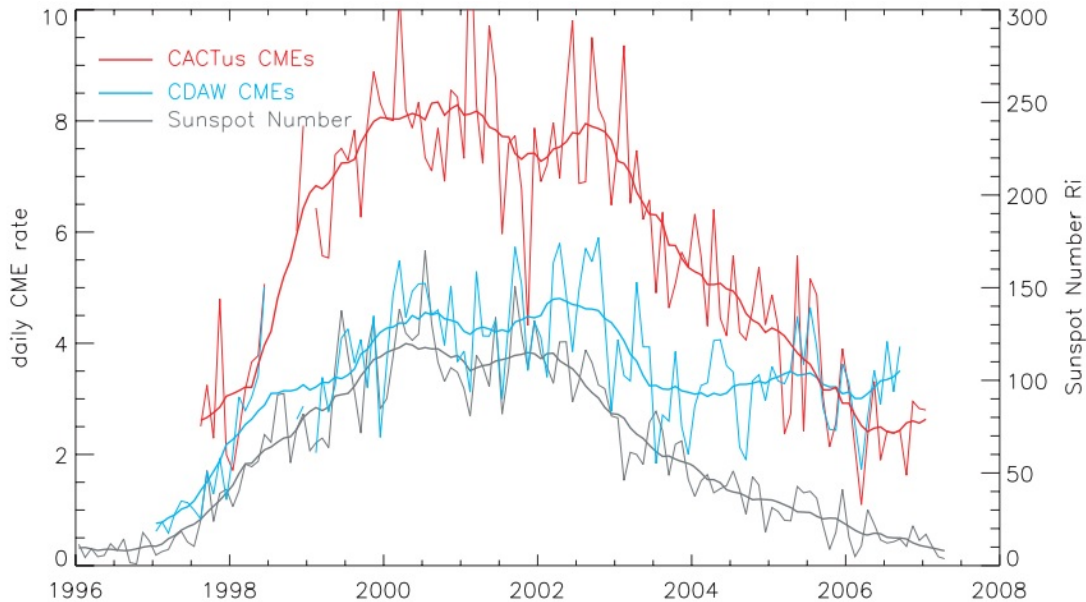


Figura 1.1: Se muestra la gráfica reportada por Robbrecht et al. (2009) con datos del número diario de CMEs reportados en el catálogo CACTus (mostrados en color rojo), los reportados en el catálogo de eventos identificados por el instrumento LASCO (en color azul claro) y los conteos de manchas solares por día y mensuales, generados por el Centro de Análisis de Datos sobre la Influencia de eventos Solares (SIDC por sus siglas en inglés) del Observatorio Real de Bélgica, para el período de 1996 a 2006. En el caso de las curvas asociadas con observaciones de CACTus y LASCO, las curvas de mayores variaciones con respecto al tiempo representan promedios móviles mensuales sobre los conteos diarios, mientras que las curvas más suaves representan promedios móviles sobre períodos de 13 meses para dichos conteos. Para los asociados con manchas solares, la curva de mayor variación representa los conteos diarios de manchas, mientras que la más suave, representa los promedios móviles mensuales sobre dicho conteo. Tomado de Webb & Howard, (2012).

han intervenido en las observaciones de la misión SOHO. Por ejemplo, firmas en los parámetros del viento solar como las de una CME que previamente no se habían tomado como tales. Adicionalmente, son también Robbrecht et al. (2009) quienes reportan que prácticamente la mitad de los eventos contabilizados corresponden a fenómenos de baja apertura angular aparente (del orden de 20°).

Otro ejemplo de lo anterior aparece en el estudio de Gopalswamy et al. (2010), que muestra (fig. 1.2) una serie de eventos contabilizados por año, de acuerdo con los datos de diversos programas de detección automática y su comparación con la identificación manual de eventos, los cuales aparecen registrados en el catálogo CDAW del instrumento LASCO. Los datos analizados para estas gráficas provienen también del sistema CACTus, del programa *Automatic Recognition of Transient Events and Marseille Inventory from Synoptic maps* (ARTEMIS) y del *Solar Eruptive Event Detection System* (SEEDS). Los conteos se rea-

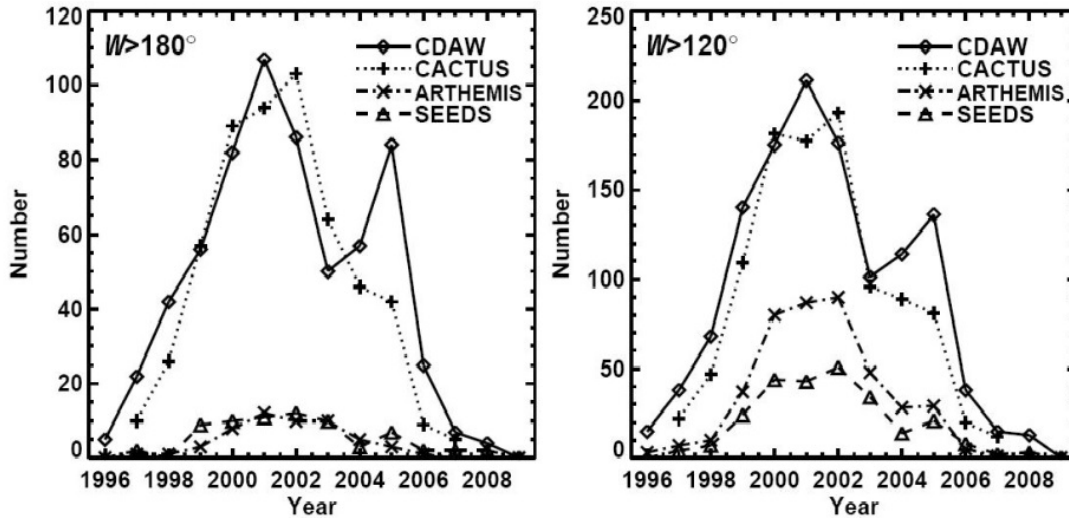


Figura 1.2: Conteos anuales de eventos de CMEs, realizados por Gopalswamy et al. (2010), usando los datos de los catálogos CDAW del instrumento LASCO, de CACTus, ARTEMIS y SEEDS. En la gráfica de la izquierda se muestran el número de CMEs por año con apertura angular aparente mayor a 180 grados, mientras que en la derecha, se presentan el número de eventos por año con apertura aparente mayor a 120 grados.

lizaron de eventos cuya apertura angular aparente es mayor a 180° (izquierda) y mayor a 120° . Los autores indican que durante el intervalo sobre el que generaron las gráficas (el cual abarca de 1996 a 2007) los datos de los catálogos CDAW y el de CACTus presentaron diferencias menores, excepto en el año 2005. En ese caso el CDAW registra 84 eventos con apertura angular mayor a 180° , mientras que CACTus, ARTEMIS y SEEDS sólo muestran 42, 3 y 7 eventos, respectivamente, en el mismo año. Aunado a lo anterior, ARTEMIS y SEEDS muestran una tendencia más consistente en sus números anuales cuando se considera un abanico mayor de eventos, sin ser notoria la diferencia, con respecto a los eventos con alta anchura angular.

Como se puede notar en los ejemplos anteriores, los métodos actuales de identificación automática de eventos muestran determinados sesgos en sus resultados de detección y contabilización de eventos (en estos casos particulares, de eyecciones de masa coronal). Estos sesgos están relacionados con el tipo de eventos que se pretenden detectar y con sus características morfológicas y/o de observación.

Con el presente trabajo se pretende ubicar las firmas de eventos que se propagan a través del espacio interplanetario, como son eyecciones

de masa coronal y regiones de interacción de corrientes, mediante un esquema de trabajo que depende únicamente de las observaciones de los instrumentos a bordo de las naves STEREO y WIND. También se pretende poder identificar eventos concretos que hayan sido observados por las tres naves y generar, en el futuro, un nuevo tipo de indentificación automática de eventos, alternativo a los actuales, con un sesgo en el proceso de detección menor al que presentan los sistemas automáticos en la actualidad.

El esquema de trabajo, propuesto inicialmente por Niembro & Lara (2016) y mostrado en Niembro (2018) se sustenta en una metodología geométrica y estadística cuyo objetivo es reducir la subjetividad asociada al proceso de identificación de eventos transitorios debidos a la actividad solar. La estructura del presente trabajo de tesis es la siguiente: en el capítulo 2 se ofrece un resumen de las características de los eventos transitorios estudiados, así como de las de las misiones utilizadas. En el capítulo 3 se presenta la metodología y sus propiedades, así como las herramientas matemáticas y computacionales más relevantes para, en el capítulo 4, ofrecer el orden y los pasos realizados en la realización del trabajo. En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos. Y finalmente, en el capítulo 6 se presentan la discusión y las conclusiones del trabajo.

Capítulo 2

Eventos transitorios asociados con la actividad solar y su observación

En términos generales, podemos considerar que la actividad solar se muestra en una diversidad de formas, dentro de las cuales destacan aquellos eventos transitorios que son liberados hacia el espacio interplanetario de manera abrupta o gradual y que se propagan a través del flujo de partículas que conforma el viento solar. Éstos últimos pueden ser denominados como *regiones de interacción* (Lee, 2000).

Sin embargo, antes de continuar, conviene recordar lo que es el *viento solar*. Este es un flujo continuo de partículas de plasma que se extiende desde la corona hacia el medio interplanetario; debe su existencia a la enorme diferencia de presión y temperatura que existe entre la parte superior de la atmósfera solar y el espacio que la rodea, las cuales causan que el plasma coronal se mueva hacia afuera a pesar de la influencia de la gravedad solar. Se compone principalmente de protones y electrones (no obstante, un 5% corresponde a partículas alfa y un porcentaje aún menor a iones de elementos más pesados) y se presenta, embebido en este flujo, un campo magnético de baja intensidad (del orden de 5 nT a una UA) cuya dirección forma un ángulo de 45° con relación a la línea Sol-Tierra, a una UA (Kivelson y Russell, 1995).

Una de las principales propiedades del viento solar es que puede ser observado como dos tipos de flujos: Los llamados *viento lento* y *viento rápido*. El viento lento y denso tiene asociada una magnitud de la

velocidad promedio de 400 km s^{-1} y surge del cinturón ecuatorial de cascos coronales; mientras que el viento rápido y tenue posee una magnitud de velocidad promedio de 750 km s^{-1} y se origina en los agujeros coronales. La densidad de partículas del viento rápido es del orden de 3 cm^{-3} a 1 UA y presentan temperaturas distintas dependiendo del tipo de partícula: para electrones es del orden de $1 \times 10^5 \text{ K}$, mientras que para protones del orden de $2 \times 10^5 \text{ K}$; en el caso del viento lento, la densidad es del orden de 8 a 10 cm^{-3} , mientras que las temperaturas para protones y electrones son similares, del orden de $3 \times 10^4 \text{ K}$ (Kallenrode, 2004).

A partir de aquí, podemos definir una *región de interacción* como una zona del espacio interplanetario dentro del flujo de viento solar donde dos corrientes de viento solar se encuentran e interactúan entre sí. En particular, cuando una corriente de viento solar rápido alcanza e interactúa con otra corriente de viento solar, como una de viento lento. La presencia de regiones de interacción en la heliosfera (y con ello, los cambios en la velocidad en el viento solar con respecto a la distancia heliocéntrica) se deben a las variaciones temporales de la estructura y topología de la corona o a las variaciones espaciales de la configuración coronal junto con el efecto combinado de la rotación del Sol (Lee, 2000). Las *eyecciones de masa coronal* pertenecen a la primer categoría, mientras que las *regiones de interacción de corrientes* se ubican en la segunda (véase la fig. 2.1).

2.1. Eyecciones de masa coronal interplanetarias (ICME)

Este tipo de evento es, como su nombre lo sugiere, las contrapartes heliosféricas interplanetarias de las eyecciones de masa coronal (CMEs) que son liberadas desde determinadas zonas de la corona solar hacia el exterior. Una CME es un sistema autocontenido el cual consiste en una parcela de plasma atmosférico expulsada hacia el espacio interplanetario, con velocidades que se ubican entre los 100 y los $3,000 \text{ km s}^{-1}$

y que posee un campo magnético propio.

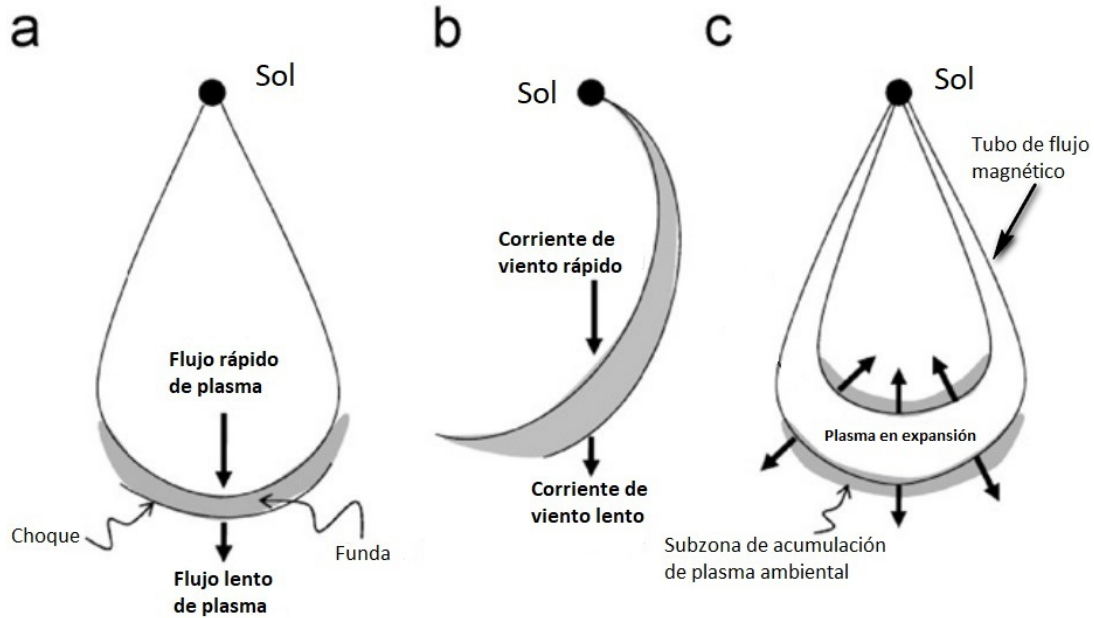


Figura 2.1: Representación esquemática de los diversos tipos de regiones de interacción, los cuales producen aumentos en las mediciones en la densidad de del viento solar. En (a), se muestra la región producida por una onda de choque - que se genera cuando la diferencia de velocidades entre un evento de ICME y el viento solar supera la magnitud de la velocidad de fase de una onda magnetosónica (Guo et al., 2010) - que muestra valores del número de Mach magnetosónico M_{MS} del orden de 2; entre el choque generado y el evento se acumula y comprime una cantidad de plasma ambiental en una zona conocida como funda. En (b), los cambios en la estructura espacial coronal y la rotación solar permiten la interacción entre corrientes de viento lento y rápido, las cuales generan zonas de compresión de plasma y aumentos en los valores medidos de la presión total perpendicular al campo. En (c), una estructura magnética conocida como tubo de flujo, la cual se considera presente en el interior de una cantidad no despreciable de eventos reportados de ICMEs, se expande a medida que se propaga por el espacio interplanetario, debido a que existe una región de rarefacción dentro del tubo, que es compensada con la acumulación de material en la superficie del mismo, fenómeno que también se detecta como aumentos en los valores detectados de densidad y en las observaciones en luz blanca, debida al fenómeno de dispersión Thomson. Tomado y adaptado de Rouillard (2011).

En promedio, una CME puede contener una masa del orden de 1.3×10^{12} kg (Vourlidas et al., 2011). Autores como Manchester et al. (2017), afirman que una CME puede ubicarse a una distancia no mayor de $30 R_{\odot}$ y que más allá de este límite, a dicho evento se le considera una ICME.

Las eyecciones de masa coronal interplanetarias interactúan con el flujo de viento solar ambiental, mediante una transferencia de momento y energía. De manera específica, si la velocidad del evento es mayor a la del viento solar, el evento cederá energía y momento lineal al viento solar, reduciendo su velocidad con tendencia a igualar a la del viento; de

lo contrario, el proceso de aceleración de la eyección se vuelve gradual de modo que el viento es el que cede su energía al evento, aumentando su velocidad.

Dentro de las ICMEs, existe un subconjunto de eventos conocidos como *nubes magnéticas*. Nombradas de este modo por Burlaga et al. (1981), una nube magnética se caracteriza por mostrar una intensidad de campo magnético mucho mayor que los valores ambientales normalmente medidos, respecto a otros eventos de ICMEs. Hay también la presencia de una rotación del vector de campo magnético, así como valores reducidos del parámetro beta del plasma y baja temperatura de los protones que conforman el plasma de la nube (Burlaga et al., 1981; Démoulin, 2008; Dasso et al., 2011).

Con relación a las componentes de una eyección, existe un largo debate sobre los detalles observacionales detectables en dicho tipo de eventos. Hundhausen et al. (1984) definieron una eyección de masa coronal como un cambio observable en la estructura coronal que (1) ocurre en una escala de tiempo que se extiende desde unos cuantos minutos hasta varias horas y (2) involucra una nueva y discreta firma de luz blanca brillante en el campo de visión del coronógrafo. Más adelante, Illing y Hundhausen (1985), propusieron una estructura tripartita que hasta el momento se sigue considerando: un delgado y brillante *anillo* (visto en luz blanca) que forma un borde exterior, que contiene un *núcleo* o centro, también brillante, separados por una cavidad de densidad mucho menor que las anteriores. Posteriormente, Vourlidis y colaboradores (2013) propusieron un esquema de doble frente que actualiza el esquema anterior para los eventos de alta velocidad, incluyendo la estructura antes descrita y las firmas de la *funda* y las de los *choques*.

De manera formal, si la diferencia de velocidades entre la eyección y el viento solar es mayor que la velocidad de propagación de ondas rápidas MHD en el plasma del viento solar (Owens et al., 2005; Guo et al., 2010), se generan ondas de choque que también se propagan por el espacio interplanetario. Un *choque frontal*, por ejemplo, puede observarse *in-situ* como un incremento abrupto en las mediciones de

la magnitud de la velocidad del viento solar, la magnitud del campo magnético, la densidad de partículas y la temperatura. Por otro lado un *choque inverso* se distingue por un incremento en velocidad y temperatura, con una caída en los valores de densidad y magnitud del campo (Howard, 2011).

Si bien los valores de los parámetros y sus incrementos o caídas abruptas funcionan como indicadores cualitativos de la presencia de ondas de choque, el *número de Mach magnetosónico* M_{MS} es un modo cuantitativo de analizar el viento solar en búsqueda de ondas de choque y de los eventos transitorios causantes de estos últimos. El número Mach magnetosónico se define como $M_{MS} = v_{sw}/C_{MS}$, donde v_{sw} es la magnitud de velocidad del viento solar y C_{MS} es la velocidad de fase de una onda magnetosónica¹ que puede propagarse en el plasma del viento solar. En términos de los parámetros del viento solar, $C_{MS}^2 = \frac{\gamma P_0}{\rho_0} + \frac{B_0^2}{\mu_0 \rho_0}$, donde ρ_0 , B_0 y P_0 son la densidad (de materia), la magnitud del campo magnético y la presión dinámica del viento solar (los subíndices 0 representan los valores en ausencia de perturbaciones), respectivamente, mientras que μ_0 y γ corresponden a la permeabilidad del vacío y al cociente de calores específicos.

Para el viento solar, $C_{MS} \approx 50 \text{ km s}^{-1}$, no obstante, el valor de la velocidad del viento solar y en particular, la de propagación de una onda de choque en el viento solar, pueden generar valores típicos de $M_{MS} \approx 2.2$ (Cravens, 2004). En un estudio realizado con 91 eventos de ICME y las ondas de choque asociadas con éstas, Manoharan et al. (2004) reportaron los correspondientes valores de M_{MS} , los cuales se ubican en un intervalo entre 0.9 y 8.4, con un promedio de 2.44 y en donde, de los 91 eventos, 87 mostraron un valor de M_{MS} mayor a 1.0. Lo que implica que en la mayoría de los casos, el paso de una onda de choque está asociada con un valor de M_{MS} mayor a 1.0.

La alteración en los parámetros ambientales provocada por una onda de choque es tal que produce una diferenciación en las propiedades

¹Una perturbación u onda magnetosónica es aquella que se propaga en un plasma que posee un campo magnético de fondo inmerso en éste, de modo que el vector de propagación \vec{k} es perpendicular al vector local de campo magnético \vec{B}_0 , es decir, $\vec{k} \perp \vec{B}_0$ (Bittencourt, 2013).

locales del plasma, de modo que el área que se encuentra entre el choque y la eyección que lo produce se le denomina *funda* (también conocida como *región de compresión*), donde el viento solar es, justamente, comprimido, y las variables observadas muestran fluctuaciones de gran amplitud (Mitsakou y Moussas, 2014). En un estudio donde se analizaron 46 eventos geoeffectivos detectados en el período 1996-2005, Zhang y colaboradores (2008) encontraron que la longitud característica promedio y la duración promedio de una funda asociada a una CME es de 0.13 UA y 10.6 horas, respectivamente, lo cual es comparativamente menor que las propiedades características promedio de las ICME asociadas a dichas fundas, 0.37 UA y 30.6 horas, respectivamente.

En la figura 2.1 podemos observar dos esquemas de subestructuras asociadas a una ICME que generan incrementos en los valores medidos de densidad del viento solar (Rouillard, 2011), que corresponden a los casos (a) y (c). Retomando la definición más reciente de Vourlidis et al. (2013), en (a), se presenta la onda de choque generada por la propagación de eventos cuya velocidad supera a la del viento solar y la funda que existe entre el evento y el choque, mientras que en (c) se muestra lo que corresponde a lo que se considera el interior de la eyección misma, *un tubo de flujo magnético* el cual se encuentra cubierto por la funda y el choque anteriores. Un tubo de flujo magnético se puede definir como un sistema magnético auto-contenido, compuesto por líneas de campo magnético con morfología helicoidal en torno a un eje central determinado (Zhang et al., 2013), capaz de almacenar una gran cantidad de energía magnética (Zhang et al., 2012). La primera evidencia observacional de la existencia de este tipo de topologías se da con la detección cercana a la Tierra de nubes magnéticas (Burlaga et al., 1981). Además, autores como Chen (2017), consideran que una CME consiste esencialmente en un tubo de flujo magnético, incluso durante las primeras etapas de formación de este tipo de eventos, dada también la evidencia observacional de esto último (Zhang et al., 2012).

Sin embargo, es posible que la configuración de tubo de flujo magnético pueda modificarse durante el proceso de propagación de una ICME por el medio interplanetario, ya sea por la interacción entre el

evento y el mismo medio, o bien, por eventos “complejos” - que consisten en la interacción entre dos o más eventos de ICME o bien entre una ICME y una región de interacción entre corrientes (CIR) - de modo que la estructura magnética interna de una ICME se vuelva mucho más compleja de describir que la que posee una nube magnética (ver por ejemplo, Nieves-Chinchilla et al., 2018). Es por ello que en la literatura, a la estructura magnética que contiene la ICME se le denomina de modo menos formal como “obstáculo magnético” para mayor generalidad, y poder incluir una variedad de configuraciones que disten de la definición de una nube magnética.

Para este trabajo, se utilizan los catálogos recopilados por Lan K. Jian, quien hace una separación entre eventos de ICME que muestran firmas de una funda debido a la existencia de una onda de choque, así como eventos de ICME que constan de sólo un obstáculo magnético; en casos donde la velocidad de propagación de la ICME es menor que la del flujo de viento solar ambiental o bien en casos de eventos complejos (Jian et al., 2018). El catálogo de eventos de ICME compilado con datos de las naves STEREO, será denotado en este trabajo como JICME18S². La autora sigue un criterio de identificación de eventos que incluye la detección de un aumento en la presión total³, calculada para el viento solar, así como un aumento en la magnitud del campo magnético y de la velocidad (esta última seguida por una caída gradual), y de una rotación suave en la componentes del vector de campo magnético (Jian et al., 2006, 2013)

2.2. Regiones de interacción de corrientes

Como se mencionó anteriormente, existen momentos en los que los flujos de viento solar de alta velocidad alcanzan a los flujos de baja

²Disponible en el sitio web www-ssc.igpp.ucla.edu/form/stereo/stereo_level_3.html

³La cual consiste en la suma de la presión magnética dada por $P_M = B^2/2\mu_0$, donde B es la magnitud del campo magnético de fondo y μ_0 es la permeabilidad del vacío; y la presión térmica de cada tipo de partículas que conforma del viento solar. Esta última está dada por la ley de gas ideal, $P_{th} = n_i k T_i$, donde n_i es la densidad numérica, k es la constante de Boltzmann, T_i es la temperatura, y el subíndice i puede denotar electrones, protones, partículas alfa, etc.

velocidad, por el efecto de la rotación solar. Sin embargo, debido a su posición relativa a la corona solar y al momento en el que se generan dichas corrientes, la estructura del campo magnético *congelado*⁴ que llevan consigo es distinta, lo que impide a estas corrientes el poder mezclarse entre sí (Gosling y Pizzo, 1999; Jian et al., 2006).

A la zona donde se observa lo anterior se le conoce como *región de interacción de corrientes (SIR)*. Además, se observa que el patrón que muestran los flujos de viento solar es cuasi-estacionario, de modo que las regiones de interacción de corrientes pueden formar trayectorias curvas en el plano ecuatorial solar en forma de espirales de Arquímedes que se mueven y rotan junto con el Sol. Si este patrón es recurrente por más de un ciclo de rotación solar, dichas regiones también se conocen como *regiones de interacción corrotantes (CIRs)* (ver por ejemplo Siscoe & Intriligator, 1993; Gosling y Pizzo, 1999; Jian et al., 2006).

Dentro de una SIR/CIR, existe una subregión que actúa como frontera entre los flujos de viento solar, la cual se conoce en la literatura como *stream interface* (o la *interfaz entre corrientes* de viento solar, en castellano). Es aquí donde la presión ejercida por las partículas de ambos tipos de viento solar alcanza un máximo local, debido a que es la zona de máximo esfuerzo cortante (Gosling y Pizzo, 1999).

En su estudio que abarca desde 1995 al 2004, Jian et al. (2006) encuentran que la duración promedio de un evento de SIR es de 36.7 ± 0.9 horas, mientras que para un evento de CIR, es de 36.8 ± 1.2 horas. Esto último tiene que ver con el intervalo temporal en el que las mediciones de los parámetros del viento solar (en particular de la presión total perpendicular al campo magnético interplanetario) se llevan a cabo y, específicamente, con las firmas que los autores consideran

⁴La expresión *campo magnético congelado* se refiere a una traducción de la frase inglesa *frozen-in magnetic field* que en la literatura, hace referencia a lo que sucede cuando se considera un campo magnético inmerso en un flujo de partículas cargadas que presenta una alta conductividad eléctrica. En este caso, se puede demostrar que el cambio con respecto al tiempo del flujo de campo magnético, a través de una superficie inmersa dentro del flujo de partículas, es inversamente proporcional a la conductividad eléctrica del medio, lo que implica que el flujo de campo tiende a ser constante a través de dicha superficie a medida que la conductividad aumenta, mostrando un comportamiento cuasiestático. Esto da la impresión de que el flujo de partículas transporta un campo magnético que no cambia demasiado con respecto a la distancia y al tiempo, como si estuviese *congelado* en dicho flujo.

para la identificación visual de los eventos, las cuales incluyen a las que definen a la interfaz: un aumento repentino en las mediciones de la presión total con una subsecuente caída abrupta, así como una discontinuidad en la magnitud de la velocidad y un incremento importante de la temperatura, a la vez que un decremento en los valores de la magnitud del campo magnético y la densidad en ese mismo tiempo. Más adelante, serían integrados los valores calculados de la entropía (Siscoe & Intriligator, 1993), como un criterio adicional. Para este trabajo, fueron considerados los catálogos de eventos de SIR/CIR compilados por Lan K. Jian con datos de las naves STEREO y WIND. El catálogo que reúne datos de las naves gemelas STEREO será denotado como JCIR18S⁵ mientras que el que contiene los datos tomados de WIND será denominado JCIRW⁶.

2.3. Medios de observación y detección de eventos transitorios

En el caso de las eyecciones de masa coronal, como ya se mencionó anteriormente, la detección de eventos se realiza de manera común con el uso de imágenes obtenidas con telescopios coronógrafos, como los que cuentan naves como las STEREO o el instrumento LASCO a bordo de la nave SOHO. Con el paso del tiempo, se han generado catálogos de imágenes con las observaciones hechas sobre éstas de CMEs, vistas a distancias cercanas al Sol (del orden de $4 R_{\odot}$), como son el catálogo de eventos reportados de LASCO⁷. Por otro lado, también se han realizado esfuerzos para utilizar estas herramientas visuales en la identificación y seguimiento de eventos de SIR, además de las mediciones de los instrumentos a bordo de misiones espaciales, como se indicó en la introducción. No obstante, la cantidad de catálogos de eventos de SIRs es considerablemente menor a la que existe para eventos de ICMEs.

⁵Disponible en el sitio web www-ssc.igpp.ucla.edu/form/stereo/stereo_level_3.html

⁶www-ssc.igpp.ucla.edu/~jlan/ACE/level3/SIR_List_from_Lan_Jian.pdf

⁷Disponible en el sitio web http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html.

A lo largo de la historia reciente de la era espacial, una cantidad de misiones han sido lanzadas al espacio con el objeto de estudiar el Sol y el espacio interplanetario que existe entre esta estrella y la Tierra. Ejemplos de dichas misiones, los encontramos en las ya citadas SOHO y ACE, sólo por mencionar algunos. A continuación se presenta un resumen de la información relevante acerca a las tres naves cuyos datos fueron usados para este trabajo: el orbitador WIND y las gemelas STEREO.

WIND

El orbitador WIND (junto con su nave hermana, el POLAR) forma parte del proyecto de Ciencia Global Geoespacial (*Global Geospace Science* o GGS) de la NASA. Consiste en un satélite con forma cilíndrica de aprox. 1.8 metros de altura y 2.4 metros de diámetro y fue lanzada el primero de noviembre de 1994 (Harten y Clark, 1995; Ogilvie y Parks, 1996). Posee un total de ocho conjuntos de instrumentos:

- Los magnetómetros *Magnetic field investigation* (MFI), cuya misión es el estudio de la estructura a gran escala y las fluctuaciones en las propiedades del campo magnético interplanetario como función del tiempo (Lepping et al., 1995).
- El *Radio and plasma wave investigation* (WAVES), que consta de un grupo de antenas y magnetómetros diseñados para el estudio del espectro electromagnético en radio. Consta del *Low Frequency FFT receiver* (FFT, que cubre entre 0.3 Hz hasta 11 kHz), el *Thermal Noise Receiver* (TNR, entre 4 y 256 kHz), el *Radio receiver band 1* (RAD1, entre 20 y 1040 kHz), el *Radio receiver band 2* (RAD2, entre 1.075 y 13.825 MHz), y el *Time Domain Sampler* (TDS) (Bougeret et al., 1995).
- El conjunto *Solar wind experiment* (SWE), que consta de dos espectrómetros y de una pareja de dispositivos conocidos como *copas de Faraday*, que permiten la realización de mediciones de

velocidad, densidad y temperatura de las partículas del viento solar (Ogilvie et al., 1995).

- El analizador *3D-Plasma* (3DP), cuyo objetivo es el estudio de partículas del viento solar con energías que se ubican en un intervalo amplio de energías, desde unos 3 eV, pasando por energías del orden de 400 keV y de rayos cósmicos de bajas energías (del orden de 1 MeV para electrones y hasta 11 MeV para iones) (Lin et al., 1995).

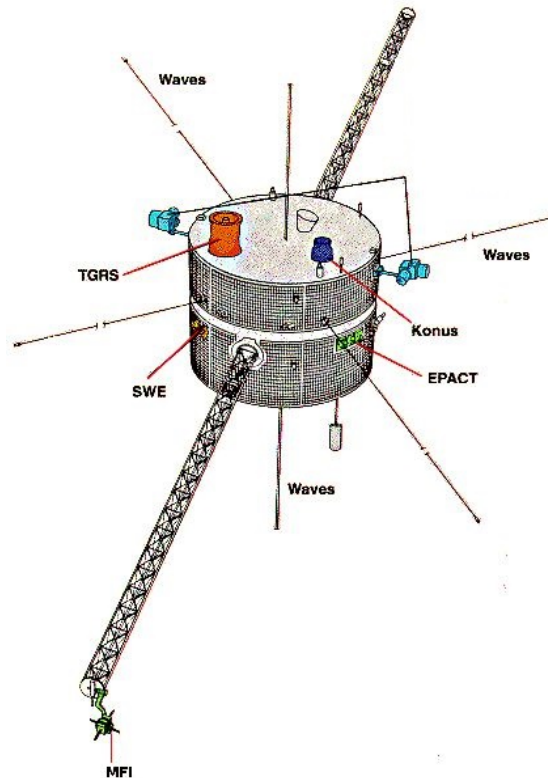


Figura 2.2: Esquema de la nave WIND que muestra los instrumentos que van a bordo de ésta. Créditos de la imagen: cse.ssl.berkeley.edu.

- El conjunto de detectores *Energetic particles: acceleration, composition transport* (EPACT), que consta del ensamble *Low Energy Matrix Telescope system* (LEMT, el cual analiza partículas con energía entre 1 y 10 MeV), el *Electron-Isotope Telescope system* (ELITE, el cual consta de tres unidades, de las cuales sólo una continúa en operación, haciendo estudios sobre flujos de protones

de 20 MeV), y el *Suprathermal Energetic Particle telescope system* (STEP, el cual detecta iones más pesados que el protón, con energías entre 20 keV y 1 MeV) (Von Rosenvinge et al., 1995).

- El *Solar Wind and Suprathermal Ion Composition* (SMS), que consta del *SupraThermal Ion Composition Spectrometer* (STICS), el cual realiza mediciones de la energía y masa por unidad de carga para iones en el rango de energía entre 6 y 230 keV; el espectrómetro de masa MASS, y el *Solar Wind Ion Composition Spectrometer* (SWICS), el cual analiza la carga, masa y energía de iones en el rango de 0.5 a 30 keV (Gloeckler et al., 1995).
- El *Transient gamma-ray spectrometer* (TGRS) y el instrumento KONUS son un conjunto de detectores de rayos gamma. El TGRS realiza mediciones en el rango de energía de 15 keV a los 10 MeV, mientras que el KONUS, de origen ruso, estudia eventos de estallidos en rayos gamma en el rango de energía de 10 a 770 keV (de acuerdo con el apartado especial para WIND del sitio web heasarc.gsfc.nasa.gov).

Como se menciona en la página dedicada al orbitador, wind.nasa.gov, los objetivos científicos de la misión *WIND*, incluyen la investigación de los procesos que ocurren en el flujo de viento solar que está por interactuar con la magnetósfera de la Tierra, así como fenómenos asociados con partículas energéticas que viajan con el viento y con el campo magnético interplanetario y sus interacciones con la ionósfera y la magnetósfera terrestres.

STEREO

Los Observatorios para el estudio de las Relaciones entre el Sol y la Tierra (STEREO por sus siglas en inglés) son una pareja de orbitadores espaciales lanzados el 26 de octubre de 2006 desde Cabo Cañaveral, Florida, EEUU (Driesman et al., 2008). Las naves, denominadas *Ahead* y *Behind* (los cuales se deben a su posición relativa con respecto a la Tierra: *Ahead*, o simplemente A, posee un período orbital menor al de

la Tierra y orbita al Sol a una distancia menor que el planeta. Por otro lado, *Behind* o simplemente B, posee un período mayor al de la Tierra y orbita al Sol a una distancia mayor que esta última), poseen un conjunto de instrumentos y telescopios diseñados para llevar a cabo los siguientes objetivos (de acuerdo con el sitio web *stereo.gsfc.nasa.gov*):

- El entendimiento de las causas y mecanismos de generación de una eyección de masa coronal,
- la caracterización de la propagación de una CME a través de la heliosfera,
- el identificación de los mecanismos y de las zonas de aceleración de partículas energéticas dentro de la corona baja y en el medio interplanetario, además de
- mejorar la caracterización de la estructura del viento solar ambiental.

Tanto STEREO-A como STEREO-B poseen cuatro conjuntos de instrumentos:

- El equipo que conforma el instrumento *Sun-Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation* (SECCHI), que consta de cinco telescopios: el EUVI, el cual capta imágenes de la cromosfera solar y la baja corona en cuatro líneas de emisión; los telescopios coronógrafos COR1 y COR2, diseñados para tomar imágenes de la corona solar a distancias que van desde los 1.4 hasta los 15 R_{\odot} ; y los telescopios heliosféricos HI1 y HI2, capaces de seguir eventos como ICMEs, a distancias que van desde los 15 hasta los 318 R_{\odot} , en el visible (Howard et al., 2008).
- El conjunto de antenas que conforman el *STEREO/WAVES* (SWAVES), los cuales permiten el análisis de campos eléctricos en el espacio interplanetario. Sus objetivos incluyen el estudio de CMEs y sus ondas de choque, así como la detección de ondas de radio,

fenómeno asociado con turbulencia en el plasma, y con los estallidos de tipo II vinculados a eventos de eyecciones, entre otros (Bougeret et al., 2008).

- El conjunto *In-Situ Measurements of Particles and CME Transients* (IMPACT), que contiene siete sensores que cumplen una cantidad diversa de subobjetivos, entre los cuales están el *Solar Wind Electron Analyzer* (SWEA) que mide las propiedades de las corrientes de electrones que se pueden observar en el viento solar; el magnetómetro MAG y los telescopios SEP (*Solar Energetic Particle*), formados por el *Suprathermal Ion Telescope* (SIT), el *Solar Electron and Proton Telescope* (SEPT), el *Low Energy Telescope* (LET) y el *High Energy Telescope* (HET) (Luhmann et al., 2008).
- El espectrómetro de masas que conforma el *Plasma and Suprathermal Ion Composition* (PLASTIC), que permite estudiar los parámetros de flujo, composición y estados de ionización de las partículas del viento solar, en específico de protones e iones más pesados (Galvin et al., 2008).

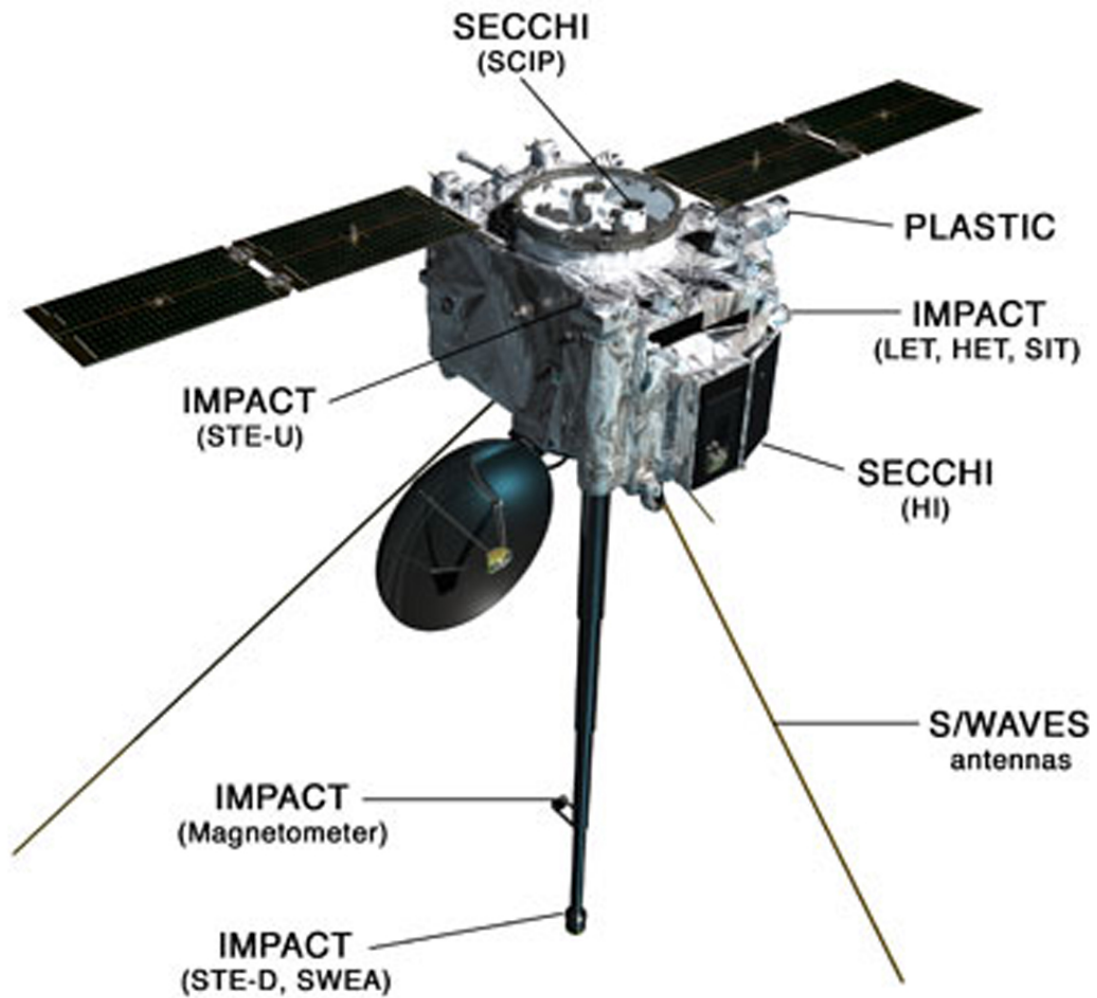


Figura 2.3: Esquema de las naves STEREO y sus instrumentos. Créditos de la imagen: APL/NASA.

Capítulo 3

Elementos del marco de trabajo

En el capítulo anterior, se presentó un resumen sobre los eventos transitorios de interés para este trabajo de tesis. Además, se presentaron también, de manera breve, las características de las misiones y los instrumentos que registraron los datos usados para la detección de dichos eventos. Por lo que ahora es necesario considerar los elementos y herramientas que constituyen la metodología utilizada para el tratamiento de datos observacionales del viento solar y del campo magnético interplanetario.

Como se mencionó, se sigue el trabajo propuesto en Niembro & Lara (2016) y en Niembro (2018), en los que se presenta un algoritmo basado en la construcción de un espacio de trabajo que presenta una semejanza a un espacio vectorial, con el que se analizan la magnitud de la velocidad de flujo del viento solar v , la magnitud del campo magnético interplanetario B , la densidad (numérica) del viento solar n y la temperatura T , para la identificación de intervalos considerados como *de interés*, que contienen firmas asociadas a eventos transitorios de la actividad solar, como son ICMEs y SIRs.

3.1. Fluctuaciones de los parámetros

El estado que guarda un sistema y sus componentes, puede ser descrito por un conjunto de variables que lo describen, así como de una

serie de ecuaciones que establecen relaciones entre dichas variables y que describen las razones de cambio que presentan (comúnmente, con respecto a las coordenadas espaciales y al tiempo). A primera aproximación y en términos estadísticos, son los valores *promedio* de las variables, aquellos que suelen tomarse como característicos. Sin embargo, existen sistemas físicos como los que nos ocupan (el viento solar y los eventos transitorios que se propagan a través de éste) que presentan pronunciados cambios en las variables que las describen, con respecto al espacio y al tiempo. Por esta razón los valores promedio de parámetros como la velocidad de flujo y el campo magnético, no describen de manera adecuada el estado del viento solar así como su evolución y las perturbaciones que pueden detectarse en el flujo de partículas desde el Sol hacia el medio interplanetario.

Son estas fuertes variaciones las que dan pie al uso de herramientas de corte estadístico y al cálculo de las *fluctuaciones* en los parámetros del sistema. Siguiendo a Landau & Lifshitz (1980) así como a Kompaneyets (1962), tenemos que una *fluctuación* se puede definir como cualquier desviación o cambio en el valor de una variable con respecto al promedio de la misma. Esto es, dado un parámetro A , la fluctuación ΔA (la cual, denominaremos como *fluctuación básica* en este trabajo) está definida como

$$\Delta A = A - \bar{A}, \quad (3.1)$$

donde \bar{A} es el valor promedio del parámetro. Notemos que el valor de la fluctuación básica puede ser positivo o negativo, así como el hecho de que su promedio es igual a cero:

$$\overline{\Delta A} = \bar{A} - \bar{A} = 0, \quad (3.2)$$

esto, debido a que el promedio de una constante es igual a la constante misma, por lo que en su lugar, podemos utilizar el cuadrado de la fluctuación, $(\Delta A)^2 = (A - \bar{A})^2$, para considerar todas las contribuciones dentro de las posibles variaciones del parámetro A respecto al promedio \bar{A} . No obstante, el promedio del cuadrado de la fluctuación básica es equivalente a lo siguiente:

$$\overline{(\Delta A)^2} = \overline{(A - \bar{A})^2} = \bar{A}^2 - (\bar{A})^2. \quad (3.3)$$

Observemos que la cantidad $\bar{A}^2 - (\bar{A})^2$ es la *varianza* del parámetro A , denotada por $\sigma^2(A)$. Por lo que el valor esperado del cuadrado de la fluctuación básica de A es igual a la varianza de A . Por tanto, al extraer la raíz cuadrada (positiva) de dicho valor, el cual se conoce como *fluctuación absoluta* o *fluctuación rms* de A , vemos que se corresponde con la desviación estándar del parámetro, esto es,

$$\sqrt{(\Delta A)^2} = \sqrt{\bar{A}^2 - (\bar{A})^2} = \sigma(A). \quad (3.4)$$

La fluctuación absoluta del parámetro A es una medida de la extensión de la desviación de A respecto a su promedio \bar{A} . Por otro lado, al dividir la fluctuación rms de A entre su valor promedio \bar{A} , se obtiene lo que se conoce como la *fluctuación relativa* del parámetro A .

En estadística, el cociente entre la desviación estándar de una variable y el promedio de la misma se conoce como *coeficiente de variación* y es una medida de la dispersión de un parámetro o propiedad de un sistema dado, el cual en la literatura se suele presentar en forma de porcentaje. El coeficiente de variación, a diferencia de otras medidas de dispersión, tiene la ventaja de ser invariante a las unidades en las que se expresa la observación, por definición, lo que permite la comparación directa de las dispersiones entre dos variables completamente diferentes, a pesar de que es sensible a la magnitud del promedio del parámetro considerado. Por lo general, esto puede ser considerado como una desventaja, siempre que los valores del promedio tiendan a ser muy pequeños. Sin embargo, este no es el caso y para efectos de este trabajo, esta desventaja deja de serlo con lo que es posible modificar el sentido y significado estadístico y físico de la fluctuación relativa, usando promedios calculados sobre intervalos de tiempo de duración diferente.

De hecho, notemos que hasta el momento no se han dado detalles sobre el número de datos asociados con la medición de un parámetro, o cuáles se asocian directamente con el cálculo del promedio \bar{A} , ni sobre su impacto en la fluctuación relativa, por lo que si se tiene un conjunto de datos de un parámetro, es posible calcular fluctuaciones relativas (en forma de coeficientes de variación) para todo el conjunto,

o bien, sobre subconjuntos o muestras de estas mediciones. Con esto en mente pueden calcularse fluctuaciones que describan globalmente al conjunto o aquellas que describan porciones ó segmentos específicos de datos de dicho parámetro. Además, al considerar períodos de tiempo muy largos (del orden de años) con relación al período de duración del paso de un evento de SIR/CIR o de ICME (que es del orden de días), se genera un esquema con valor estadístico respecto al número de eventos identificados, así como sus propiedades, con base en lo que los parámetros y sus fluctuaciones indican.

Por otra parte, si se piensa en las mediciones de los parámetros como un conjunto de funciones dependientes del tiempo (y hasta del espacio), podemos catalogarlas como un conjunto de señales no-estacionarias, debido a sus características de localidad, es decir, que poseen zonas con un comportamiento específico dentro de intervalos finitos y especiales en el tiempo, que no muestran un patrón definido, como pueden ser las asociadas al paso de un evento de ICME. Anteriormente, el análisis de este tipo de señales se realizaba con herramientas como pueden ser la transformada de Fourier, que utiliza un conjunto de funciones seno y coseno que se extiende a través de todo el eje temporal. No obstante, el tipo de señales derivadas de las mediciones de las naves, no es infinita a lo largo del tiempo y contiene elementos localizados, por lo que la transformada de Fourier no es una herramienta adecuada para el análisis de este tipo de señal. Como se verá más adelante, es la transformada *wavelet* la herramienta de estudio de señales de tipo no-estacionario elegida para esta tarea, en virtud de las propiedades de estas últimas.

3.2. Fluctuaciones globales y locales

La fluctuación relativa, vista como un coeficiente de variación, se encuentra en el corazón de la definición de fluctuación que se utiliza en el presente trabajo. Con los datos obtenidos de las naves STEREO y WIND, de los parámetros mencionados con anterioridad del viento solar, es posible generar el conjunto correspondiente de fluctuaciones

asociadas a cada parámetro.

Dentro del marco de trabajo establecido en Niembro & Lara (2016) y en Niembro (2018), se consideran dos tipos de fluctuaciones, como una de sus principales características. Previo a estos trabajos, sólo se utilizaba un tipo de fluctuación relativa para los parámetros antes citados, por lo que pueden ser considerados pioneros en este punto en específico. Los tipos de fluctuaciones usadas en la metodología reflejan los efectos de diferentes escalas de tiempo relevantes dentro de la física del viento solar.

En primer lugar, para este trabajo se calcularon las fluctuaciones absolutas (es decir, las desviaciones estándar) de cada parámetro para intervalos móviles de tres horas. La desviación estándar puede ser obtenida en términos de la varianza, la cual se define de la siguiente manera, para cualquier parámetro del viento solar A , evaluado en el tiempo t_i :

$$\sigma^2[A(t_i)] = \frac{\sum_{j=i-\Delta\tau_0/2}^{j=i+\Delta\tau_0/2} [A(t_j) - \langle A \rangle_i]^2}{\Delta\tau_0 - 1}. \quad (3.5)$$

Una de las ideas clave dentro del marco de trabajo es que cada medición $A(t_i)$ del parámetro A tiene asociada una fluctuación absoluta. Sin embargo, para calcular la varianza asociada a $A(t_i)$, se consideran las mediciones que se tomaron *antes* y *después* de $A(t_i)$. Por lo que la definición dada en la ec. 3.5 se refiere a una varianza *centrada* en $A(t_i)$. La cantidad $\Delta\tau_0 = 180$ corresponde con el intervalo de datos de tres horas antes mencionado, mientras que el valor esperado $\langle A \rangle_i$, corresponde al promedio móvil del parámetro, centrado en $A(t_i)$, calculado sobre el mismo intervalo. La fluctuación absoluta $\sigma[A(t_i)]$ es, entonces, la raíz cuadrada de $\sigma^2[A(t_i)]$.

Posteriormente, son considerados dos promedios móviles distintos, que dan origen a dos clases de fluctuaciones relativas diferentes, aunque en ambos casos, se utiliza el mismo valor de $\sigma[A(t_i)]$. Por un lado, se genera una fluctuación relativa *global*, dividiendo el valor $\sigma[A(t_i)]$ entre el promedio móvil $\langle A \rangle_{G,i}$ del parámetro A , centrado en el valor $A(t_i)$,

calculado sobre un período de un año:

$$F_{RG}[A(t_i)] = \frac{\sigma[A(t_i)]}{\langle A \rangle_{G,i}}. \quad (3.6)$$

Además se calculon fluctuaciones relativas *locales* en los que se divide el mismo valor de la desviación estándar entre el promedio móvil $\langle A \rangle_{L,i}$ del parámetro A , centrado en $A(t_i)$, calculado sobre un período de 15 días:

$$F_{RL}[A(t_i)] = \frac{\sigma[A(t_i)]}{\langle A \rangle_{L,i}}. \quad (3.7)$$

Para este trabajo, se usaron los datos medidos por las naves STEREO y WIND, abarcando un período que va desde 2008 hasta 2013. Esto tiene que ver con las órbitas de las misiones STEREO, por los que desde la segunda mitad de 2014 en adelante, la misión STEREO-B presentó problemas con relación a sus mediciones. Por ello se tomó el intervalo dado como el que presenta los registros más fiables de datos del viento solar. Por otro lado, debido a cómo se definen estas fluctuaciones relativas, fueron necesarios los datos de los últimos seis meses del 2007 y los seis primeros meses de 2014, los cuales estuvieron disponibles en la base de datos OMNI de la NASA¹ mediante la interfaz CDAWeb.

Por último, se consideraron los máximos de ambos tipos de fluctuación relativa, dentro del intervalo antes mencionado, y se dividieron las series de tiempo generadas entre el valor correspondiente máximo, con el objeto de normalizar respecto al máximo de las fluctuaciones relativas para cada tipo. Esto permite definir una *fluctuación global* asociada al valor $A(t_i)$ como el cociente entre la fluctuación relativa global de $A(t_i)$ y el máximo total de estos valores calculados sobre el intervalo 2008 a 2013,

$$F_G[A(t_i)] = \frac{F_{RG}[A(t_i)]}{\text{MAX}(F_{RG}[A(2008 - 2013)])}, \quad (3.8)$$

mientras que definimos la *fluctuación local* asociada a la medición $A(t_i)$ como el cociente entre la fluctuación relativa local de $A(t_i)$ y el máximo

¹Disponible en <https://omniwebgsfc.nasa.gov>

total en el intervalo dado,

$$F_L[A(t_i)] = \frac{F_{RL}[A(t_i)]}{MAX(F_{RL}[A(2008 - 2013)])}. \quad (3.9)$$

3.3. Escalas de tiempo en el contexto de las fluctuaciones de los parámetros del viento solar

En la sección anterior, se mostró cómo se construyeron las fluctuaciones utilizadas en este trabajo dentro del marco de trabajo propuesto en Niembro & Lara (2016) y en Niembro (2018), pero no se presentó ninguna justificación para el uso del intervalo de tres horas en las fluctuaciones absolutas y de los intervalos de quince días y un año para las fluctuaciones relativas.

Por un lado es importante mencionar que, para la detección de eventos de ICME, el concepto de discontinuidad se vuelve relevante dentro de este contexto. Las discontinuidades en los parámetros - las cuales se presentan en intervalos de tiempo cortos (ver por ejemplo Borovsky (2010) o bien, Borovsky & Denton (2010)) - pueden ser provocadas por el paso de una región de interacción. Cuando dos flujos de viento solar se encuentran e interactúan, el resultado puede ser visto como un *obstáculo* en el flujo de partículas del viento solar. Por lo que el estudio de estos obstáculos, los cuales pueden ser observados como incrementos repentinos en los parámetros del viento solar, se vuelve crucial dentro de la metodología.

En Niembro (2018), se toma un intervalo de tres horas para la desviación estándar, con el objeto de ajustar la metodología para la detección de dispersiones en los parámetros, debidas al paso de obstáculos, como por ejemplo, eventos transitorios de actividad solar.

Este intervalo también está asociado con la duración de zonas en el flujo del viento solar dentro de las cuales la suma de las presiones térmica y magnética es constante, conocidas en la literatura como *estructuras de presión equilibrada* (o PBS por sus siglas en inglés). Estas regiones, descritas por Burlaga (1968), están relacionadas con las fluctuaciones

de la densidad y magnitud del campo magnético así como su anticorrelación (Tu y Marsch, 1994) y son características de las fundas de las ICME y las regiones de compresión dentro de una CIR (Bavassano y Bruno, 1989, 1991; Shodhan et al., 1999; Crooker et al., 2000), por lo que con este intervalo específico, se mantiene una consistencia frente a determinadas subestructuras y su duración, que son específicas al interior de las regiones de interacción de interés, ICMEs y SIRs/CIRs.

El concepto de coeficiente de variación, como se presentó anteriormente, no hace una referencia explícita a todos los intervalos de tiempo sobre los cuales está construida. Con la duración de tres horas para el tiempo característico de la desviación estándar, son necesarios ahora los tiempos asociados a los promedios móviles de los parámetros. Estos se establecen en términos de otros tiempos característicos dentro del estudio de los eventos transitorios de origen solar y de la física subyacente, que serán descritos a continuación.

El intervalo de quince días para uno de los promedios móviles está relacionado con los períodos de duración y de viaje de una ICME. Por lo que al usar dicho intervalo, se establece que las fluctuaciones locales calculadas reflejan la presencia de perturbaciones u obstáculos en el viento solar, cuya duración sea del orden de días, como lo son las ICME (y de hecho, también las SIR/CIR, como se mostrará más adelante), de modo que todo tipo de manifestaciones físicas con tiempos característicos del orden de horas o menos no son tomados en cuenta por la metodología.

Por otro lado, el uso del segundo promedio de un año, genera una relación con el período de actividad magnética solar de 11 años, tomando entonces la undécima parte de este intervalo como una muestra estadísticamente significativa en términos de la actividad solar, vista desde este marco de trabajo. Es entonces que la metodología combina las contribuciones de dos formas de comparación de los datos: la dispersión de los parámetros respecto a un intervalo del orden de días y la misma dispersión vista desde una perspectiva anual.

Estos promedios móviles también pueden encontrar su explicación

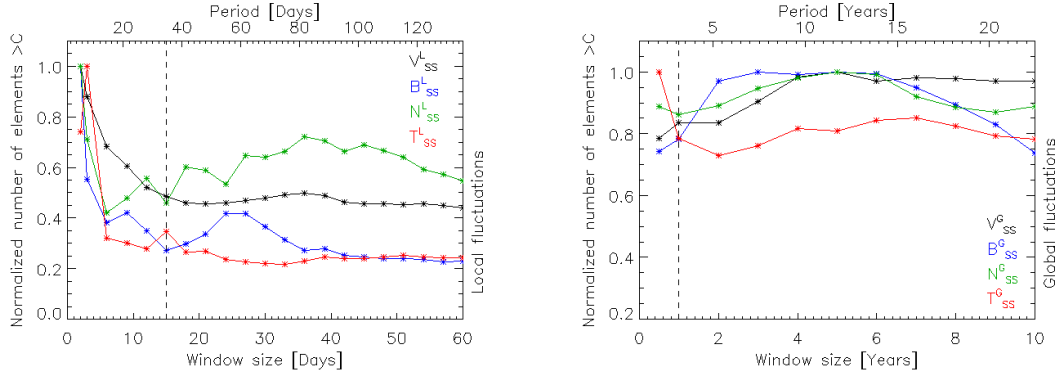


Figura 3.1: Se presentan los resultados de las pruebas realizadas con fluctuaciones locales y globales, usando diferentes promedios móviles, realizadas en Niembro (2018). Se muestra en color negro las curvas con los valores calculados para los datos de velocidad, en verde las curvas para la densidad, en azul las de la magnitud de campo magnético y en rojo las de temperatura. En el eje vertical aparece el número de elementos dentro de cada serie de tiempo generada con cada tipo de fluctuación cuyo valor es mayor al del promedio total en cada serie (normalizado con respecto al máximo obtenido con todas las ventanas).

de forma cuantitativa. Para establecer los promedios móviles adecuados para la caracterización de las regiones de compresión, en Niembro (2018) se llevó a cabo una prueba, en la que se calcularon las fluctuaciones locales y globales, usando diferentes promedios móviles. En el caso de las locales, variando $\langle A \rangle_L$ desde 1 hasta 60 días; mientras que en caso de las globales, variando $\langle A \rangle_G$ de 1 a 10 años. Esto se realizó con los datos de velocidad, densidad, campo magnético y temperatura, registrados por la misión WIND entre 1997 y 2016. En la figura 3.1 se muestran los resultados de esta prueba.

En ambos paneles se grafica el tiempo de duración del promedio móvil en el eje horizontal. En el panel izquierdo el caso de las fluctuaciones locales es mostrado mientras que en el panel derecho, el de las globales. Una vez que se calculan las fluctuaciones locales y globales con un intervalo dado para el promedio móvil, se calculó el valor promedio de cada fluctuación y se contó el número de veces en las que la serie de tiempo generada con cada tipo de fluctuación supera a dicho valor promedio. Al normalizar cada conteo respecto al máximo obtenido con las ventanas más cortas para cada caso se obtienen las curvas mostradas.

El número de elementos dentro de cada serie que supera al promedio aumenta conforme la ventana se hace más estrecha, para el caso de

las fluctuaciones locales, mientras que para el caso de las globales, a medida que la ventana aumenta, el número de elementos con valor mayor al promedio empieza a comportarse de forma invariante frente al tamaño de la ventana. Por lo que se decidió que los intervalos relevantes a considerar serían aquellos que minimizaran en todos los parámetros al número de elementos con esta característica. Y los parámetros que cumplen con esta condición son los de 15 días para las fluctuaciones locales y un año para las fluctuaciones globales.

Cabe destacar que este planteamiento y el tratamiento de datos derivado de este último, no ha sido utilizado antes, de ahí que pueda ser considerado como una metodología de innovación.

3.4. Vaivenes: La “norma” de las fluctuaciones

Como se mencionó anteriormente, a cada medición (ó de manera equivalente, a cada momento de tiempo en el que se tiene un dato) de un parámetro específico, le corresponde un valor de una fluctuación global y una local, definidas por las relaciones (3.8) y (3.9). Es entonces razonable pensar que a cada tiempo de medición se le asocia una especie de pareja ordenada de números, que es el par de fluctuaciones antes dichas. Con esta idea en mente, en la metodología se considera la posibilidad de definir, de manera análoga a un espacio vectorial, una cantidad que vincule a las dos fluctuaciones y su efecto combinado en una sola variable, asociada de manera directa con las mediciones de cada parámetro.

Cada una de estas parejas, dentro de la metodología es vista como una especie de vector dentro de un espacio de dos dimensiones. Recordando que en el espacio vectorial \mathbb{R}^2 existe una función denominada *norma*, definida para todo vector, se genera una cantidad asociada a cada tiempo de medición que asemeja una medida de distancia al origen dentro de dicho espacio, una “norma” para las fluctuaciones. Esta “norma”, a la cual llamaremos a partir de este momento como *vaivén*²

²El nombre de esta variable toma inspiración del popular mueble para niños que puede ser

se define de manera análoga a como se usa la regla de Pitágoras para vectores en \mathfrak{R}^2 , excepto que las coordenadas son sustituidas por las fluctuaciones local y global, como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} N[A(t_i)] &= \sqrt{F_G[A(t_i)]^2 + F_L[A(t_i)]^2} \\ &= \left\{ \frac{F_{RG}^2[A(t_i)]}{MAX^2(F_{RG}[A])} + \frac{F_{RL}^2[A(t_i)]}{MAX^2(F_{RL}[A])} \right\}^{(1/2)}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Esto se hace para poder cuantificar el efecto combinado, o de “promediar” las fluctuaciones en un sólo número, tanto de las fluctuaciones que están asociadas a períodos de comparación de días (locales) como de las fluctuaciones que reflejan el comportamiento representativo del período de actividad de 11 años (globales).

El cálculo de un vaivén cualquiera genera una nueva serie de tiempo que contiene la información de los intervalos en los que se pueden presentar discontinuidades asociadas con eventos de ICME. Debido al hecho de que, es posible ubicar las firmas de las discontinuidades provocadas por el paso de una ICME suponiendo que los cuatro parámetros del viento solar estudiados aumentan prácticamente de manera *simultánea* sus valores con el paso de un evento de eyección, se genera una variable complementaria que puede ser llamada *vaivén total*. Esta última es igual a la suma de los vaivenes de las fluctuaciones provenientes de los parámetros. De modo que el vaivén total mostrará un aumento local con la presencia de eventos de ICME (y también de CIR, como se verá más adelante).

El vaivén total se propone, entonces, como la variable más adecuada para generar una nueva señal dependiente del tiempo de una dimensión e ideal para ser analizada con una herramienta como la transformada *wavelet*.

encontrado en cualquier parque recreativo. Suele ser nombrado también como “balancín” o “sube y baja” en español y como “seesaw” en inglés. Fue elegido por Niembro & Lara (2016) para denotar el “balance” que generan las fluctuaciones a cada tiempo de medición.

3.5. La transformada *wavelet*

Por último, la metodología propuesta hace uso de una herramienta matemática y computacional con un desarrollo relativamente reciente y con un importante uso en diversas ramas de la investigación. Estamos hablando de la transformada *wavelet*.

Técnicamente hablando, es posible rastrear el origen de la transformada *wavelet* hasta inicios del siglo pasado, aunque su base matemática teórica se encuentra en la transformada de Fourier y no fue sino hasta los trabajos de Jean Morlet y colaboradores que se conceptualizó la transformada *wavelet* como se usa en la actualidad. Para mayores detalles acerca del funcionamiento y las propiedades de la transformada *wavelet*, véase el contenido del Apéndice A, al final de este trabajo.

El objetivo del uso de la transformada es el de la identificación automática de las que se denominan en este trabajo como *intervalos de interés*, los cuales son subintervalos dentro de las series de tiempo que contienen la información de las perturbaciones que se presentan dentro del flujo del viento solar. Perturbaciones como las que se generan por la presencia de eventos transitorios.

De acuerdo con Niembro (2018), los intervalos de interés pueden ser asociados con las fundas o regiones de compresión cercanas a eventos de ICME. Sin embargo, estas zonas también pueden hallarse dentro de una CIR, por lo que es también posible detectar un evento de este tipo con la metodología. La transformada *wavelet*, a semejanza de la de Fourier, genera una descomposición de una serie de tiempo en un conjunto de funciones. Y al igual que con la transformada de Fourier, esta descomposición muestra un peso mayor hacia determinadas “frecuencias”, de las cuales nos interesan aquellas que se relacionen con longitudes o intervalos de tiempo característicos de eventos o fenómenos asociados con el viento solar.

Dentro de la metodología, se usaron un conjunto de escalas (de tiempo), las cuales están programadas por defecto en el algoritmo usado para el cálculo de la transformada (véase el Apéndice A al final de este

documento para más detalles), de las cuales destacan seis: Las escalas 43, 57, 75, 100, 132 y 174. De éstas en particular, en Niembro (2018) se indica que la que presenta mejores resultados en el proceso de identificación es la escala 100, usando como criterio la ubicación de todos aquellos intervalos de interés dentro de esta componente que superen el promedio total calculado sobre el intervalo de tiempo de estudio. Estos intervalos incluyen aquellos que reflejan la presencia de regiones de compresión de eventos como ICMEs, CIRs e incluso pueden incluir otros fenómenos como son los cambios de sector (o SB por sus siglas en inglés). Sin embargo, la identificación automática de intervalos de interés no implica la de los eventos en específico en esta etapa de desarrollo de la metodología, por lo que es necesario recurrir a catálogos de eventos reportados como apoyo para la discriminación de los intervalos de interés asociados con eventos a gran escala, como son ICMEs y CIRs, de aquellos que son provocados por perturbaciones de origen distinto.

Capítulo 4

Metodología

En el capítulo previo se presentó un resumen de los elementos más importantes de la metodología propuesta por Niembro & Lara (2016) para rastrear e identificar eventos transitorios asociados con la actividad solar, por medio de sus fundas o regiones de compresión, presentando los conceptos de las fluctuaciones local y global, el vaivén asociado a las fluctuaciones, y el uso de la transformada wavelet sobre el vaivén total. Así, en este capítulo, se describen de manera detallada los pasos llevados a cabo para la realización del presente trabajo, tomando en cuenta toda la información mostrada hasta ahora. En el proceso, se usó una serie de programas escritos en el lenguaje *Interactive Data Language* (IDL) y se utilizaron comandos de la paquetería *SolarSoft*, el cual funciona sobre dicho lenguaje y que realizan la mayoría de las tareas contenidas en los siguientes pasos.

- (I) Se recopilaron los datos disponibles de la magnitud de la velocidad, la densidad y la temperatura del flujo de viento solar así como la magnitud del campo magnético interplanetario, tomados por los instrumentos PLASTIC de las naves STEREO-A y STEREO-B, con cadencia temporal de un minuto entre mediciones. Los datos se encuentran disponibles en la plataforma digital OMNIWeb (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>). Se eligió el intervalo que comprende del primero de julio de 2007 a las 00:00 UT hasta el 30 de junio de 2014 a las 23:59 UT, comprendiendo un intervalo total de siete años de datos y un intervalo efectivo de análisis de

seis años. De este modo, se reunieron cuatro series de tiempo de datos por nave, una por cada parámetro seleccionado, a las que se sumaron las cuatro series asociadas a los parámetros medidos por la nave WIND, brindados por Tatiana Niembro.

- (II) Con los datos de las naves STEREO y WIND para los cuatro parámetros seleccionados y preparados para su procesamiento posterior, se llevó a cabo el cómputo de las fluctuaciones globales y locales. Para ello, se tomó cada una de las doce series de tiempo de datos y se calcularon las desviaciones estándar de intervalos móviles de tres horas, así como los promedios móviles aritméticos de intervalos de un año y quince días. Con lo anterior, las fluctuaciones se calcularon mediante los cocientes de las desviaciones estándar entre los promedios anuales y quincenales, dividiendo a su vez, en cada caso, por el máximo global de cada conjunto de datos, como se mencionó en el capítulo 3.
- (III) Una vez calculados ambos tipos de fluctuaciones para cada parámetro, se realizó el cómputo de los vaivenes. Éstos consisten en la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las fluctuaciones globales y locales para cada parámetro. Con ello, se obtuvo una serie de tiempo que consiste en el vaivén de cada parámetro observado para un total de doce series, cuatro por nave.
- (IV) Dados los parámetros y los vaivenes antes mencionados se calculó la transformada *wavelet* del vaivén total. Éste es igual a la combinación lineal de los cuatro vaivenes correspondientes a cada nave, y se generó con el objeto de analizar el efecto combinado de todas las contribuciones por parámetro a la transformada. Dentro del vaivén total, el coeficiente que multiplica a cada sumando es igual a uno, asignando con esto igual peso a todos los sumandos. La función generatriz seleccionada para la transformada es la de Morlet. En total, se obtuvo una transformada por nave, tomando en cuenta los canales 43, 57, 75, 100, 132 y 174.
- (V) De las escalas consideradas, se eligió la escala 100 debido a que muestra la mejor correspondencia con el número de eventos re-

portados de ICME, dentro del marco de la metodología, como se indica en Niembro (2018). De las tres transformadas obtenidas, se obtuvo la correspondiente escala 100 y se calculó el promedio total aritmético *por año* para cada escala. Usando estos promedios como referencia, se buscaron todos aquellos intervalos de interés que cumplieran la condición de tener valores de la amplitud de la escala mayores que el promedio y se almacenaron los tiempos iniciales y finales, así como el intervalo de duración temporal. Lo anterior se realizó para cada escala obtenida. Con esto, se encontraron los máximos locales del vaivén total dentro de cada intervalo de interés, almacenando el tiempo en el que se presenta.

- (VI) Posteriormente, se comenzó la búsqueda de eventos en específico de ICME y de CIR con la información que proporcionan las fluctuaciones, el vaivén total y sus correspondientes transformadas *wavelet*. Para ello se utilizaron los catálogos de eventos de regiones de interacción entre corrientes JCIR18S y JCIRW, donde usaron dichos eventos como referencia posterior. En particular, se usó el tiempo reportado del máximo local para la presión total como punto crítico para la ubicación de la interfaz entre los flujos de viento solar rápido y lento. Además, se consideró que en este momento, el vaivén total mostraría un máximo local, ubicable dentro de un determinado intervalo de interés. Bajo esta premisa, se realizó una nueva búsqueda para hallar las correspondencias temporales entre los máximos locales del vaivén total, ubicados dentro de todos los intervalos de interés identificados automáticamente en el paso anterior para las tres naves, y los tiempos reportados para la interfaz.
- (VII) Por otro lado, se retoma el modelo de movimiento de velocidad angular constante de Tappin & Howard (2009), en el que se considera que una región de interacción de corrientes, se mueve siguiendo una curva de espiral de Arquímedes que rota con el campo magnético solar (cuya proyección en el plano eclíptico es la llamada *espiral de Parker*), con una velocidad angular $\Omega = 2.7 \times 10^{-6}$ rad s^{-1} . A partir de los tiempos de máximo local de presión para los

que se encontraron correspondencia con un lapso en la escala 100, para STEREO-B, se consultaron los valores de posición angular de las naves STEREO con respecto a la línea Sol-Tierra, disponibles en la página web *stereo-ssc.nascom.nasa.gov*. Con estos datos, se calcularon los intervalos de tiempos que le tomaría a la curva de espiral de Arquímedes trasladarse desde la posición de STEREO-B a la de WIND y posteriormente, a la de STEREO-A, mediante las siguientes fórmulas:

$$\Delta t_W = \frac{\theta_W}{\Omega} \quad ; \quad \Delta t_A = \Delta t_W + \frac{\theta_A}{\Omega} \quad (4.1)$$

donde Δt_W es el tiempo de traslado de la posición de STEREO-B a la de WIND, Δt_A es el tiempo de traslado de la posición de STEREO-B a la de STEREO-A, θ_W es la posición angular de STEREO-B con respecto a la línea Sol-Tierra, θ_A es la posición angular de STEREO-B, con respecto a la misma referencia, y Ω es la velocidad angular de rotación solar a nivel ecuatorial antes mencionada.

- (VIII) Posteriormente, se repitió la búsqueda de correspondencias entre las fechas calculadas de observación para WIND y los lapsos hallados en la escala 100 asociada a la misma nave, así como la búsqueda entre los correspondientes fechas calculadas y lapsos para STEREO-A. Además, usando el catálogo JICME18S de eventos de ICMEs, se repitió el paso (VI), usando como referencia los tiempos reportados de inicio de los eventos, los cuales son mostrados como de inicio de la funda para aquellos eventos en los que se determina que existe dicha subestructura.

En la siguiente figura se presenta un diagrama de flujo que resume el contenido de este capítulo.

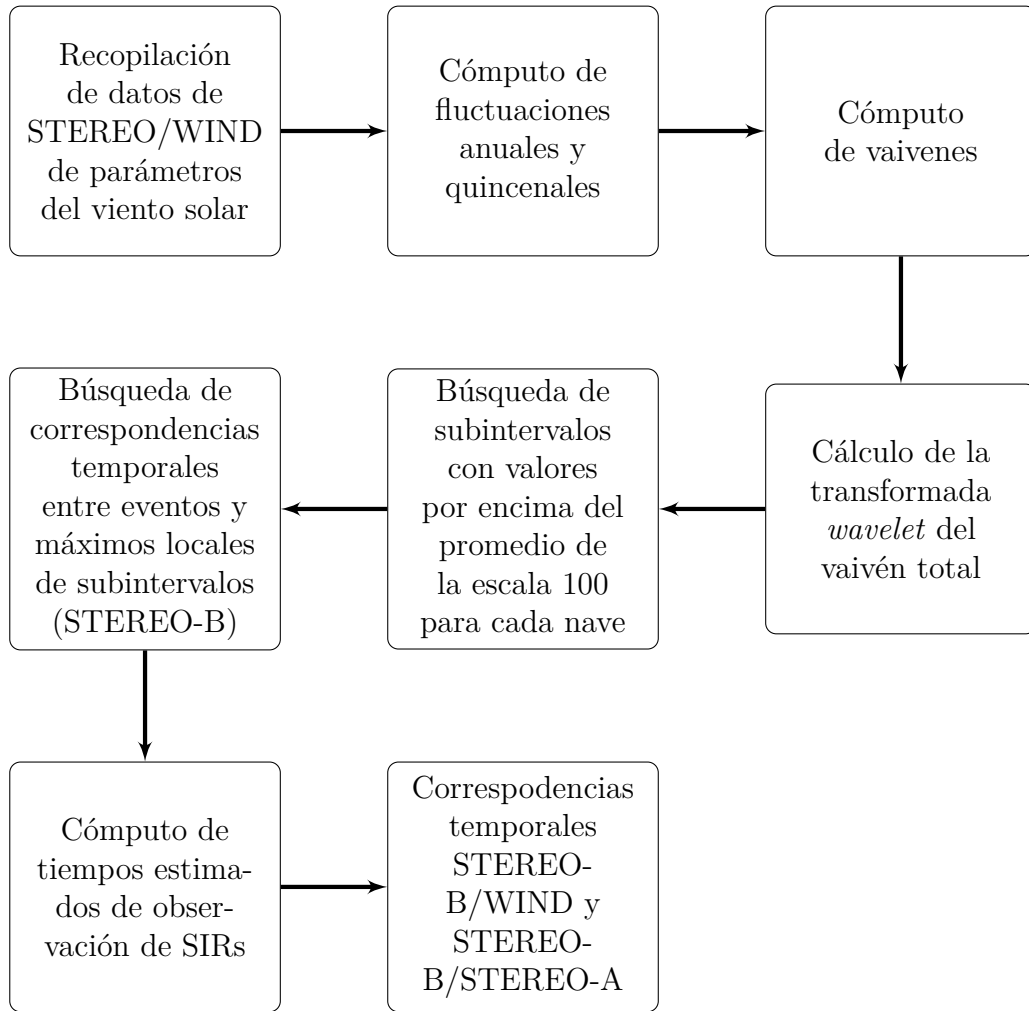


Figura 4.1: Diagrama de flujo que muestra los pasos que fueron llevados a cabo y descritos en el capítulo 4.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos aplicando los pasos descritos en el capítulo anterior, describiendo lo obtenido por tipo de evento transitorio.

Regiones de interacción entre corrientes/corrotantes (SIR/CIR)

Es relevante mencionar que el catálogo JCIR18S enlista un total de 203 eventos detectados por STEREO-A y un total de 198 eventos observados por STEREO-B, aplicando los criterios de selección que son mencionados por Jian et al. (2006). Esta cantidad de eventos para ambas naves, corresponde al período de tiempo seleccionado de trabajo 2008-2013. Sin embargo, contiene algunos eventos etiquetados como “dudosos”, en los que se propone que puedan ser catalogados como SIR/CIR, aunque no cumplen con todos los criterios propuestos para la clasificación. También se reportan eventos *complejos*, que corresponden a eventos de interacción entre SIRs/CIRs e ICMEs. Ambos tipos de eventos fueron descartados, dejando un total de 189 eventos efectivos observados por STEREO-A y 179 por STEREO-B. En el caso de JCIRW, los datos reportados cubren hasta el año 2009, por lo que, con respecto al período de trabajo, se tienen 79 eventos de los cuales 4 son considerados como complejos y no hay eventos calificados como

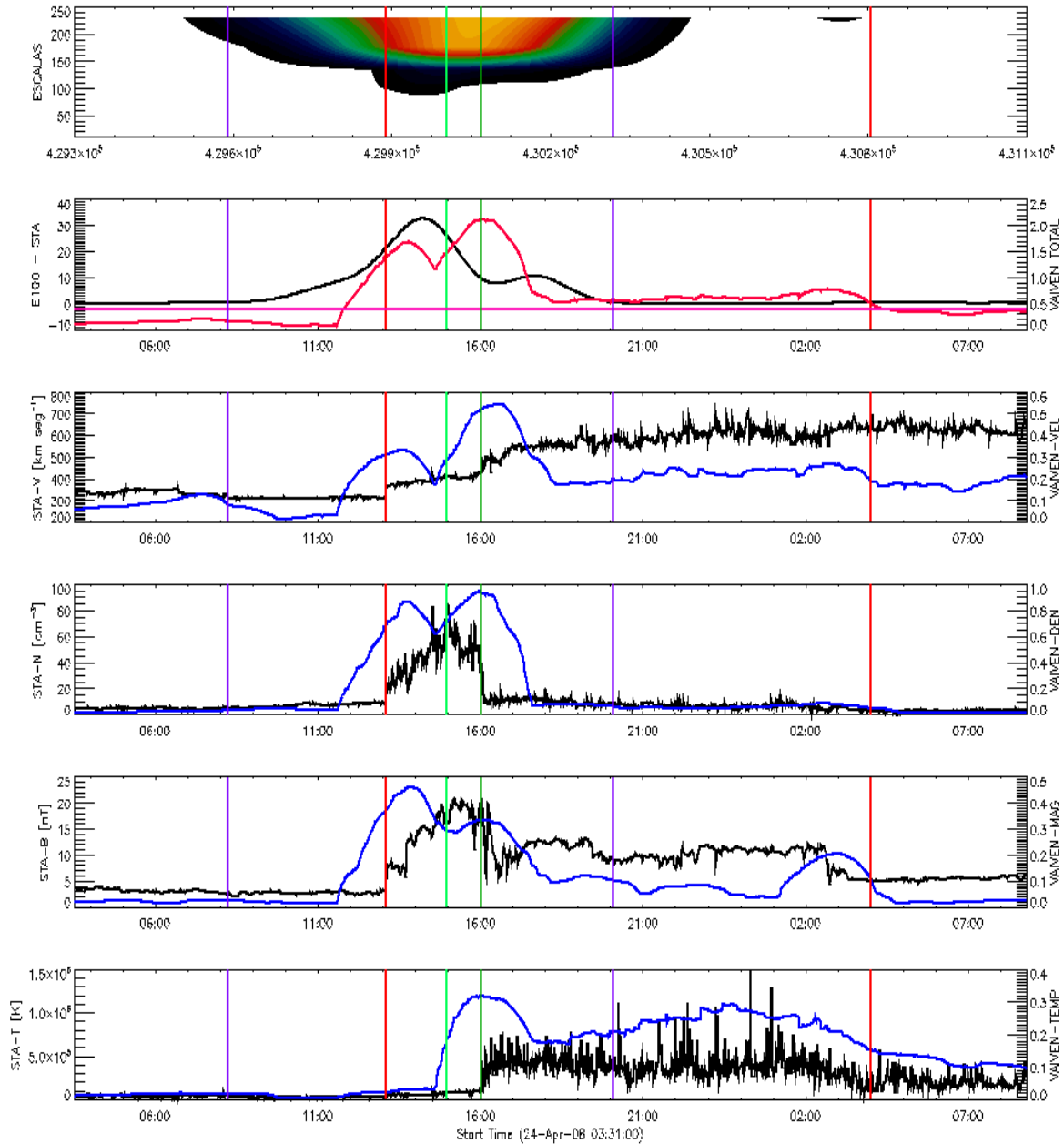


Figura 5.1: Se presenta un ejemplo de una región de interacción entre corrientes (SIR) detectada por STEREO-A y reportada en JCIR18S, en torno al 24 de abril de 2008. Primero, se muestra el espacio de la transformada wavelet donde se grafican todas las escalas seleccionadas con respecto al tiempo y usando una escala de color en la que los colores más oscuros indican valores bajos del coeficiente de comparación, mientras que los tonos verdosos indican valores medios y los tonos rojizos, los valores más altos. En el segundo panel, en color negro aparece la escala 100 y en rojo, el vaivén total. Los posteriores paneles muestran la magnitud de la velocidad (en km s^{-1}), la densidad (en cm^{-3}), la magnitud de campo magnético (en nT) y la temperatura (en K) del viento solar en color negro y los vaivenes de cada parámetro en color azul. Las líneas verticales rojas indican el inicio y final del evento, reportados en JCIR18S, mientras que la vertical verde claro indica el tiempo reportado para la interfaz entre corrientes (SI). Por último, las verticales en morado muestran los tiempos de inicio y final del intervalo de interés identificado automáticamente, mientras que la vertical verde oscuro indica el tiempo del máximo local del vaivén total.

“dudosos”, por lo que para este trabajo se tomaron en cuenta los 75 eventos no complejos.

Como se indicó en el paso (I), se recopilaron datos de la magnitud de velocidad, densidad y temperatura del viento solar, así como de la magnitud del campo magnético interplanetario, de la base de datos OMNI de la NASA, mediante el servicio CDAWeb. Sin embargo, las series de tiempo procedentes de esta base presentaron ausencias de datos, las cuales se tuvieron que ajustar para evitar problemas con los pasos subsecuentes. Dichas ausencias aparecen como períodos en los que los parámetros lucen con valores constantes, lo que se refleja en valores nulos en las fluctuaciones. En lo que se refiere a los pasos posteriores, se trabajaron con arreglos de 3,682,080 elementos, uno por cada parámetro medido por las tres naves, que corresponden a siete años en total para cada parámetro, con los que se llevaron a cabo los pasos (II) al (V).

En términos de lo que se mencionó en el paso (VI), la búsqueda de *intervalos de interés* con valores mayores al promedio anual en la escala 100 del vaivén total asociado a STEREO-B, arrojó un total de 2300 resultados, mientras que la búsqueda para WIND y STEREO-A generó 2274 y 2475 intervalos, respectivamente. El total de intervalos encontrados para cada nave no refleja automáticamente la existencia de un evento de SIR/CIR o de eyección, debido justamente a la forma en como se definen los vaivenes totales y su correspondiente transformación. Sin embargo, la metodología permite encontrar intervalos de interés, asociados a eventos de ICME, debido a que en varios casos, los eventos de ICME presentan una onda de choque frontal que se puede distinguir como un incremento abrupto en los cuatro parámetros, prácticamente de manera simultánea, por lo que esta es la pauta impuesta ubicar eventos específicos de ICME. No obstante, a pesar de mantener esta configuración, fue posible ubicar eventos de SIR/CIR (como se puede observar en la fig. 5.1), aún cuando las firmas asociadas no obedecen exactamente este mismo patrón.

Con relación al paso (VI), se tomó un margen de diferencias de tiempo de entre 2 y 480 minutos. Esta es la diferencia entre el tiempo para

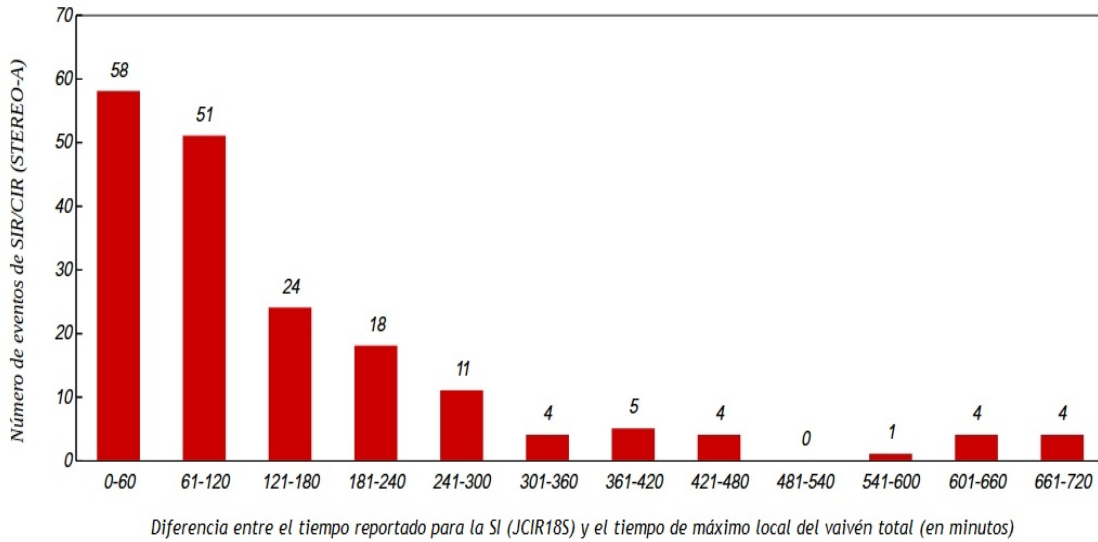


Figura 5.2: Histograma en el que se muestran los resultados de la búsqueda de correspondencias entre las tiempos reportadas para la interfaz entre corrientes (dentro de eventos de SIR/CIR) en JCIR18S y los de los máximos locales del vaivén total de STEREO-A. Los números que se ubican sobre cada barra representan el número de eventos de SIR/CIR de JCIR18S cuya diferencia entre los tiempos antes mencionados se ubica dentro del marcador indicado sobre el eje horizontal.

las SI de los eventos reportados en JCIR18S y JCIRW y el tiempo del máximo local del vaivén total, ubicado dentro de un intervalo de interés. Para STEREO-A se encontraron 175 resultados (que corresponde con un 92.59 % del total de eventos reportados en JCIR18S), 168 para STEREO-B (93.85 %) y 71 para WIND (94.67 % de los eventos de JCIRW). Con un margen de diferencias de hasta 720 minutos, se hallaron 184 para STEREO-A (97.35 %), 170 para STEREO-B (94.97 %) y 73 para WIND (97.33 %).

Para contrastar con la búsqueda anterior, se realizó adicionalmente una segunda serie de búsquedas. Estas se llevaron a cabo tomando en cuenta los tiempos de inicio reportados de los eventos. Dentro del margen de diferencias de entre 2 y 480 minutos, se obtuvieron 107 (que corresponden a 56.61 % de los eventos reportados en JCIR18S) resultados para STEREO-A, 113 para STEREO-B (62.57 %) y 41 para WIND (que representan el 54.67 % de los eventos reportados en JCIRW); con el margen de 720 minutos, se hallaron 144 correspondencias para STEREO-A (76.19 %), 142 para STEREO-B (79.33 %) y 56 para WIND (74.67 %). Con esto se puede observar que los tiempos

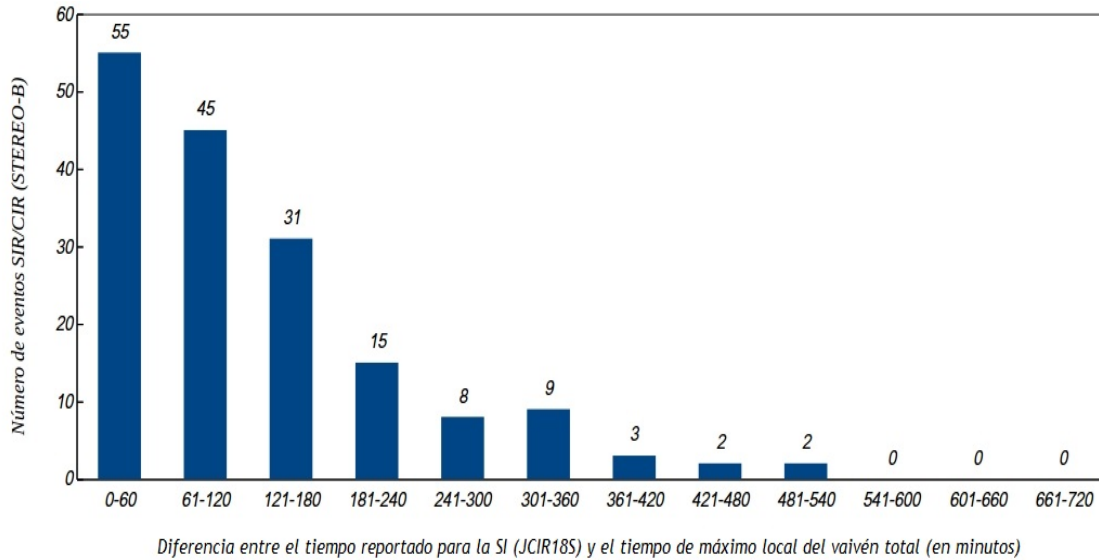


Figura 5.3: Los resultados mostrados en este histograma corresponden a los que se obtuvieron para la búsqueda citada en el pie de la imagen de la figura 5.2, para el caso de STEREO-B. El contenido del pie de imagen de la figura 5.2 aplica para este caso.

reportados para la SI (asociados con un máximo local en la presión total) están mejor representados por un intervalo de interés (y el correspondiente máximo local en el vaivén total) en la escala 100 de cada nave que los tiempos de inicio de los eventos de SIR/CIR. Es decir, que las perturbaciones (en los parámetros) producidas en los momentos de un máximo local en la presión y su efecto combinado en el vaivén total y en sus correspondientes transformadas, son más probables de ser ubicadas en el tiempo que aquellas perturbaciones provocadas al inicio reportado de los eventos. Por ello las firmas asociadas con la presencia de las interfases entre corrientes (SI) son más adecuadas para la posterior identificación de eventos concretos que las firmas asociadas con el inicio de los eventos de SIR/CIR.

Los resultados anteriores de las búsquedas hechas sobre la información reportada de la SI, se muestran representados en formato de histogramas, para STEREO-A (fig. 5.2), STEREO-B (fig. 5.3) y WIND (fig. 5.4). En los tres casos, los resultados aparecen ordenados en función de determinadas ventanas para las diferencias de tiempo. Como puede observarse de las figuras 5.2 y 5.3, el mayor número de eventos que muestra una correspondencia con un intervalo de interés y su co-

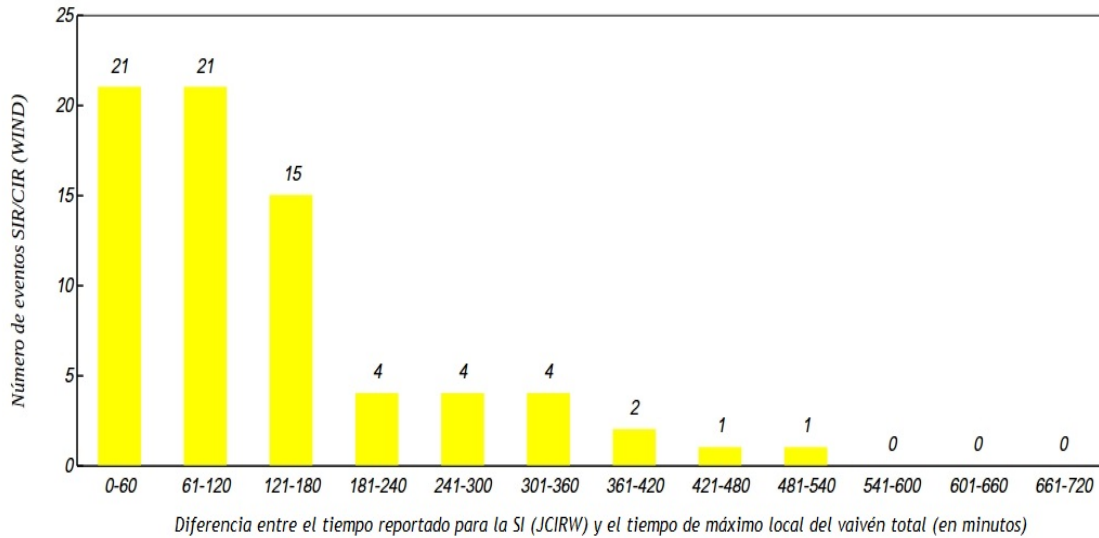


Figura 5.4: Se presentan los resultados que se obtuvieron para la búsqueda citada en el pie de la imagen de la figura 5.2, para el caso de WIND. El contenido del pie de imagen de la figura 5.2 también se aplica en este caso.

respondiente máximo local en el vaivén total, muestra una diferencia temporal con el valor reportado para la SI, de entre 0 y 60 minutos, es decir, del orden de una hora. El caso de los eventos observados por WIND muestra un patrón que puede deberse a la cantidad de eventos que se ubican dentro del intervalo de trabajo (75 eventos entre 2008 y 2009 contra los 189 y 179 reportados para STEREO-A y STEREO-B, respectivamente).

Con respecto al paso (VII), la búsqueda de correspondencias entre las fechas de paso de la SI calculadas para WIND y los máximos locales del vaivén total, asociada a esta misma nave dio como resultado 110 coincidencias (usando una ventana de hasta 480 minutos) y 135 (con la ventana amplia de 720 minutos). Para las fechas calculadas de STEREO-A y los máximos locales de su vaivén total, la búsqueda brindó 111 coincidencias (con la ventana de 480 minutos) y 125 (con la ventana de 720 minutos). Es importante recalcar que esta búsqueda difiere de la anterior en el sentido de que la primera usa los tiempos reportados de la SI y lo obtenido con los vaivenes totales y su transformada *wavelet* para la identificación de eventos en concreto de SIR/CIR y sus interfases entre corrientes. Por otro lado la segunda agrega un elemento más, que corresponde al modelo simple, que busca relacio-

nar el movimiento de la espiral de Arquímedes (y la información que “guarda”) con los recursos que considera la metodología, en un intento por ubicar eventos comunes a las tres naves (las STEREO y WIND) y dar un seguimiento a los eventos transitorios concretos detectados.

De este modo, la segunda búsqueda genera un relación entre parejas de naves, es decir, entre STEREO-B y WIND, así como entre STEREO-B y STEREO-A, por medio de lo obtenido con el modelo. Usando la ventana amplia de 720 minutos, se tomaron los 135 resultados obtenidos para la pareja STEREO-B/WIND y se consideraron los correspondientes tiempos de STEREO-A; mientras que para los 125 resultados asociados con la pareja STEREO-B/STEREO-A se consideraron los tiempos correspondientes de WIND.

De ambas listas generadas con los conjuntos de tres tiempos, se ubicaron 17 eventos que fueron reportados previamente en un estudio llevado a cabo por Huang, Song & Li (2017). Dichos autores realizaron un proceso de identificación de eventos de regiones de interacción de corrientes y corrotantes, basados en los datos de las naves STEREO y ACE, mediante criterios observacionales aplicados sobre los datos y abarcando desde el 2007 hasta el 2010. Los eventos de CIR reportados por Huang et al. (2017) fueron seleccionados de acuerdo con las siguientes condiciones:

- Un incremento en la magnitud de velocidad del viento solar,
- un incremento en la magnitud de campo magnético interplanetario,
- un incremento en la densidad del viento solar,
- un incremento en la temperatura asociada al flujo de protones del viento solar,
- que la diferencia entre el máximo y mínimo de velocidad del viento solar detectada por STEREO-A no sea mayor a 100 km s^{-1} que la que se calcula con STEREO-B, y por último,
- que la diferencia de tiempo entre el momento de cruce de la hoja de corriente heliosférica (HCS) asociada al paso de una CIR con el

cálculo teórico que proponen los autores de su observación sea menor a 24 horas.

De estas condiciones, las primeras cuatro son consideradas de forma inherente, mientras la quinta se infiere de lo expuesto por los autores en su trabajo. Es el último de estos criterios el que no se toma en cuenta para el presente trabajo. Los eventos reportados por los autores que se ubicaron en el intervalo de 2008-2010, los cuales suman un total de 17, fueron identificados con el catálogo JCIR18S a partir de los resultados de la metodología. Sin embargo, en el trabajo no se indican ni la hora ni el minuto en el que definen el tiempo de observación de la SI, por lo que no es posible una comparación directa entre los tiempos calculados con el modelo ni con la metodología y los tiempos calculados por los autores.

En la tabla 5.1, en la primera columna, se muestran los días de observación de las SI, reportadas por Huang et al. (2017), para los eventos que ubican de acuerdo con los datos de STEREO-B; mientras que en la primera columna de las tablas 5.2 y 5.3, aparecen los tiempos de observación de la SI de los eventos observados por ACE y STEREO-A respectivamente. En la segunda columna de las tres tablas, se presentan los tiempos reportados para la SI en JCIR18S y en JCIRW para STEREO-B, WIND y STEREO-A. Con respecto a éstos, es importante recalcar que están vinculados con el momento en que, de acuerdo con Jian et al. (2006), los instrumentos detectan el paso de la interfaz, la cual produce un máximo local en la presión total, debido a la interacción entre las corrientes de viento rápido y lento.

Nótese también que en los últimos tres eventos, para WIND, no existen los correspondientes tiempos debido a que JCIRW sólo contiene eventos observados hasta el 2009, lo que dificulta el análisis y comparación con eventos reportados del 2010 en adelante. Las columnas restantes ofrecen tiempos asociados con las búsquedas anteriormente mencionadas en este capítulo y el anterior. La última columna de la tabla 5.1 y las penúltimas de las tablas 5.2 y 5.3 muestran los tiempos asociados con los máximos locales del vaivén total de cada nave.

Tabla 5.1. Tiempos de detección asociados con *STEREO-B*

No. de evento	Fecha/hora SI		Fecha/hora P_{max}		Fecha/hora máx. local E100 STB (UT)
	Huang et al. STB (UT)	JCIR188 STB (UT)	JCIR188 STB (UT)	JCIR188 STB (UT)	
1 (H12)	03-01-08/-:-		03-01-08/22:21		03-01-08/20:20
2 (H13)	09-02-08/-:-		09-02-08/09:26		09-02-08/11:24
3 (H14)	27-02-08/-:-		27-02-08/07:53		27-02-08/05:33
4 (H15)	06-03-08/-:-		06-03-08/19:22		06-03-08/18:45
5 (H16)	02-04-08/-:-		02-04-08/05:44		02-04-08/06:11
6 (H17)	22-04-08/-:-		22-04-08/19:38		22-04-08/19:26
7 (H18)	13-06-08/-:-		13-06-08/19:08		13-06-08/20:25
8 (H19)	12-09-08/-:-		12-09-08/20:12		12-09-08/20:45
9 (H20)	26-10-08/-:-		26-10-08/15:56		26-10-08/16:17
10 (H21)	04-11-08/-:-		04-11-08/18:57		04-11-08/22:19
11 (H22)	22-11-08/-:-		22-11-08/02:43		22-11-08/05:43
12 (H23)	10-02-09/-:-		10-02-09/22:44		10-02-09/21:59
13 (H24)	13-04-09/-:-		13-04-09/10:27		13-04-09/05:12
14 (H25)	18-07-09/-:-		18-07-09/16:47		18-07-09/18:12
15 (H26)	27-04-10/-:-		27-04-10/19:40		27-04-10/19:13
16 (H27)	15-05-10/-:-		15-05-10/03:55		15-05-10/02:08
17 (H28)	21-06-10/-:-		21-06-10/15:26		21-06-10/19:39

Tabla 5.2. Tiempos de detección asociados con WIND/ACE

No. de evento	Fecha/hora SI Huang et al. ACE (UT)	Fecha/hora P_{max} JCIRW WIND (UT)	Fecha/hora máx. local E100 WIND (UT)	Fecha/hora calc. WIND (UT)
1 (H12)	05-01-08/-:-	05-01-08/06:24	05-01-08/08:15	05-01-08/08:15
2 (H13)	10-02-08/-:-	10-02-08/05:22	10-02-08/06:22	11-02-08/04:01
3 (H14)	28-02-08/-:-	28-02-08/10:25	28-02-08/15:42	29-02-08/02:32
4 (H15)	08-03-08/-:-	09-03-08/09:35	09-03-08/16:59	08-03-08/14:01
5 (H16)	04-04-08/-:-	04-04-08/17:59	05-04-08/02:50	04-04-08/00:24
6 (H17)	23-04-08/-:-	23-04-08/05:52	23-04-08/05:48	24-04-08/14:37
7 (H18)	15-06-08/-:-	14-06-08/21:06	14-06-08/17:52	15-06-08/17:29
8 (H19)	15-09-08/-:-	14-09-08/21:16	14-09-08/22:53	15-09-08/09:53
9 (H20)	28-10-08/-:-	28-10-08/18:52	28-10-08/20:22	29-10-08/15:08
10 (H21)	07-11-08/-:-	07-11-08/12:02	07-11-08/17:46	07-11-08/20:05
11 (H22)	25-11-08/-:-	25-11-08/07:34	25-11-08/04:37	25-11-08/07:15
12 (H23)	14-02-09/-:-	14-02-09/05:21	14-02-09/05:56	14-02-09/12:13
13 (H24)	16-04-09/-:-	16-04-09/14:55	16-04-09/16:43	16-04-09/23:19
14 (H25)	22-07-09/-:-	22-07-09/04:35	22-07-09/10:21	22-07-09/09:12
15 (H26)	02-05-10/-:-	-----/-:-	02-05-10/15:24	03-05-10/02:43
16 (H27)	19-05-10/-:-	-----/-:-	19-05-10/13:30	20-05-10/10:10
17 (H28)	26-06-10/-:-	-----/-:-	25-06-10/23:32	26-06-10/21:05

Tabla 5.3. Tiempos de detección asociados con *STEREO-A*

No. de evento	Fecha/hora SI		Fecha/hora P_{max}		Fecha/hora máx.		Fecha/hora calc.	
	Huang et al.	STA (UT)	JCIR18S STA (UT)	JCIR18S STA (UT)	local E100 STA (UT)	local E100 STA (UT)	STA (UT)	STA (UT)
1 (H12)	07-01-08/-:-	-:-	06-01-08/21:34	-:-	07-01-08/01:44	-:-	07-01-08/05:50	-:-
2 (H13)	11-02-08/-:-	-:-	12-02-08/03:52	-:-	12-02-08/06:35	-:-	12-02-08/19:18	-:-
3 (H14)	01-03-08/-:-	-:-	01-03-08/00:21	-:-	29-02-08/22:51	-:-	01-03-08/18:43	-:-
4 (H15)	09-03-08/-:-	-:-	09-03-08/12:51	-:-	09-03-08/10:51	-:-	10-03-08/06:44	-:-
5 (H16)	07-04-08/-:-	-:-	08-04-08/02:07	-:-	08-04-08/02:47	-:-	08-04-08/19:25	-:-
6 (H17)	24-04-08/-:-	-:-	24-04-08/14:57	-:-	24-04-08/16:01	-:-	26-04-08/12:06	-:-
7 (H18)	16-06-08/-:-	-:-	17-06-08/05:14	-:-	16-06-08/09:10	-:-	17-06-08/23:23	-:-
8 (H19)	16-09-08/-:-	-:-	17-09-08/03:22	-:-	16-09-08/20:37	-:-	18-09-08/07:19	-:-
9 (H20)	31-10-08/-:-	-:-	31-10-08/17:42	-:-	31-10-08/20:24	-:-	01-11-08/17:02	-:-
10 (H21)	09-11-08/-:-	-:-	09-11-08/15:08	-:-	09-11-08/16:17	-:-	10-11-08/22:35	-:-
11 (H22)	29-11-08/-:-	-:-	29-11-08/00:04	-:-	28-11-08/21:34	-:-	28-11-08/10:40	-:-
12 (H23)	17-02-09/-:-	-:-	17-02-09/20:14	-:-	17-02-09/15:11	-:-	17-02-09/18:16	-:-
13 (H24)	20-04-09/-:-	-:-	20-04-09/07:04	-:-	20-04-09/06:03	-:-	20-04-09/10:43	-:-
14 (H25)	26-07-09/-:-	-:-	26-07-09/15:11	-:-	26-07-09/18:17	-:-	26-07-09/12:52	-:-
15 (H26)	07-05-10/-:-	-:-	08-05-10/04:11	-:-	08-05-10/00:05	-:-	08-05-10/07:26	-:-
16 (H27)	24-05-10/-:-	-:-	25-05-10/00:27	-:-	25-05-10/03:30	-:-	25-05-10/17:38	-:-
17 (H28)	01-07-10/-:-	-:-	01-07-10/08:41	-:-	01-07-10/11:45	-:-	02-07-10/11:08	-:-

Las últimas columnas de las tablas 5.2 y 5.3 contienen los tiempos calculados con el modelo, para el paso de la SI.

En varios de los eventos se presenta una considerable diferencia entre el tiempo calculado con el modelo y el reportado en JCIR18S y en JCIRW. Estas diferencias pueden deberse al uso de la presión como uno de los principales factores a tomar en cuenta por la autora, en el momento de detectar un evento de SIR, mientras que en este trabajo no se considera dicha variable.

Cuando se calcula la transformada *wavelet* sobre el vaivén total, esta última contiene la información contenida en los cuatro parámetros estudiados (magnitud de velocidad, densidad, magnitud del campo magnético y temperatura), por lo que la transformada, revela las aportaciones a diferentes escalas de dicha combinación, no de una variable por separado, por lo que los tiempos en los que se presentan las discontinuidades en los parámetros estudiados, el máximo local de presión total reportado en los catálogos y el tiempo del máximo local en el vaivén total, no son iguales.

Para un evento de SIR/CIR, puede ocurrir que las discontinuidades en los cuatro parámetros, se presenten de una forma muy similar a lo que ocurre en un evento de ICME. No obstante, existen casos en los que las discontinuidades se presentan en tiempos distintos para cada parámetro, como el que se muestra en la figura 5.5, donde cada parámetro muestra una o más discontinuidades en tiempos distintos entre sí.

Otro posible factor en las diferencias entre dichos tiempos, puede encontrarse en el modelo usado para este trabajo, en el que existen casos donde la diferencia entre el tiempo calculado y el reportado en JCIR18S y en JCIRW puede ser del orden de día y medio, como sucede con el evento no. 7 de la tabla 5.3; sin embargo, existen casos como el no. 11 de la tabla 5.2, donde la diferencia temporal es del orden de 15 minutos. Las diferencias entre los tiempos reportados en JCIR18S y en JCIRW y los asociados con máximos locales de la escala 100 en cada nave son menores que las que existen con los tiempos calculados.

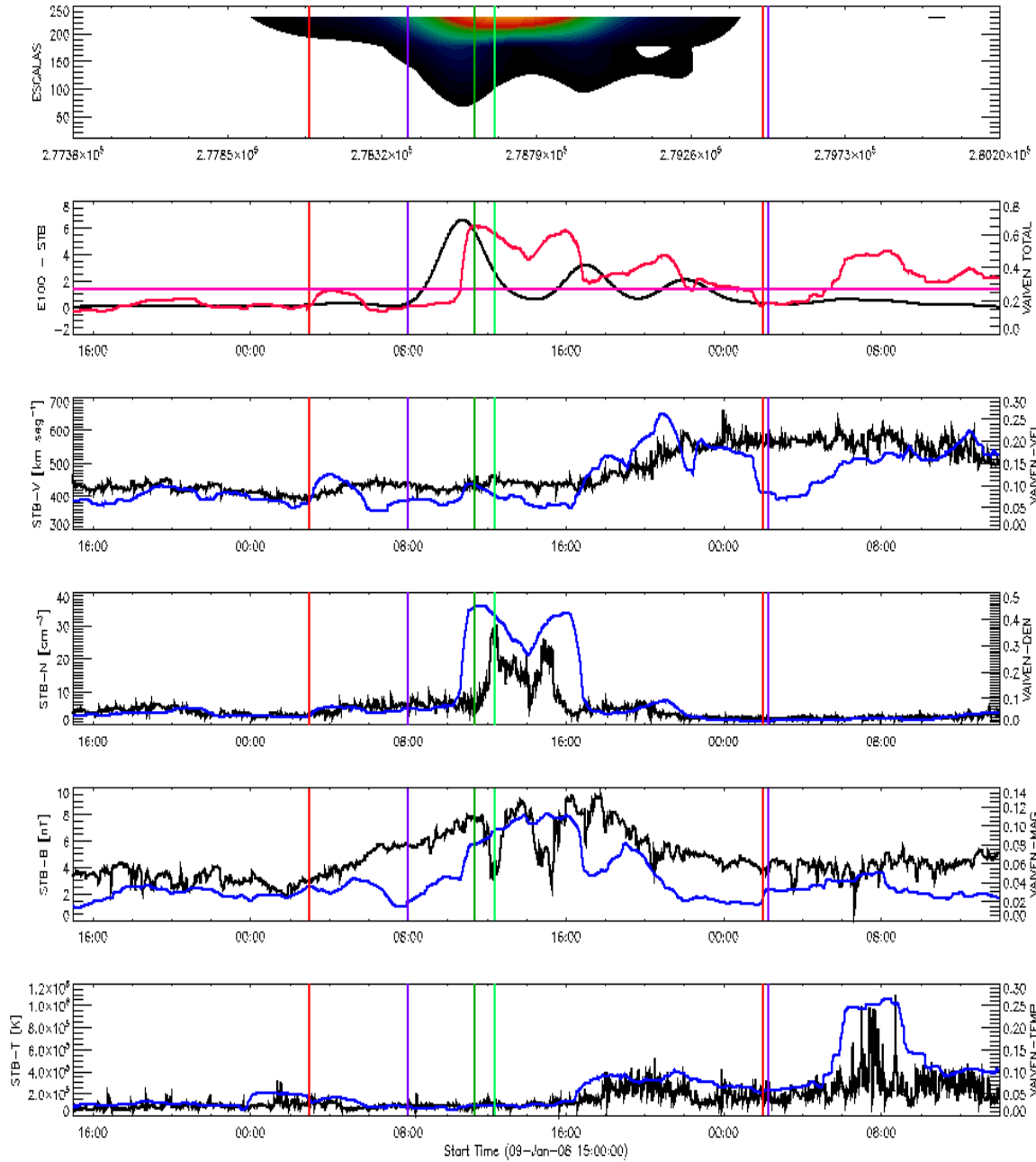


Figura 5.5: Se presenta un segundo ejemplo de evento de SIR/CIR, observado en torno al 10 de enero de 2008 por STEREO-B y reportado en JCIR18S. El orden de presentación y contenido de este ejemplo es el mismo que aparecen en la figura 5.1 por lo que se aplica lo explicado en su pie de imagen. Nótese que cada parámetro fluctúa de modo distinto en el tiempo, lo cual se ve reflejado en el vaivén total y en la escala 100 de la transformada. Por otro lado, obsérvese el comportamiento entre la densidad y el campo magnético, el cual puede indicar una posible anticorrelación.

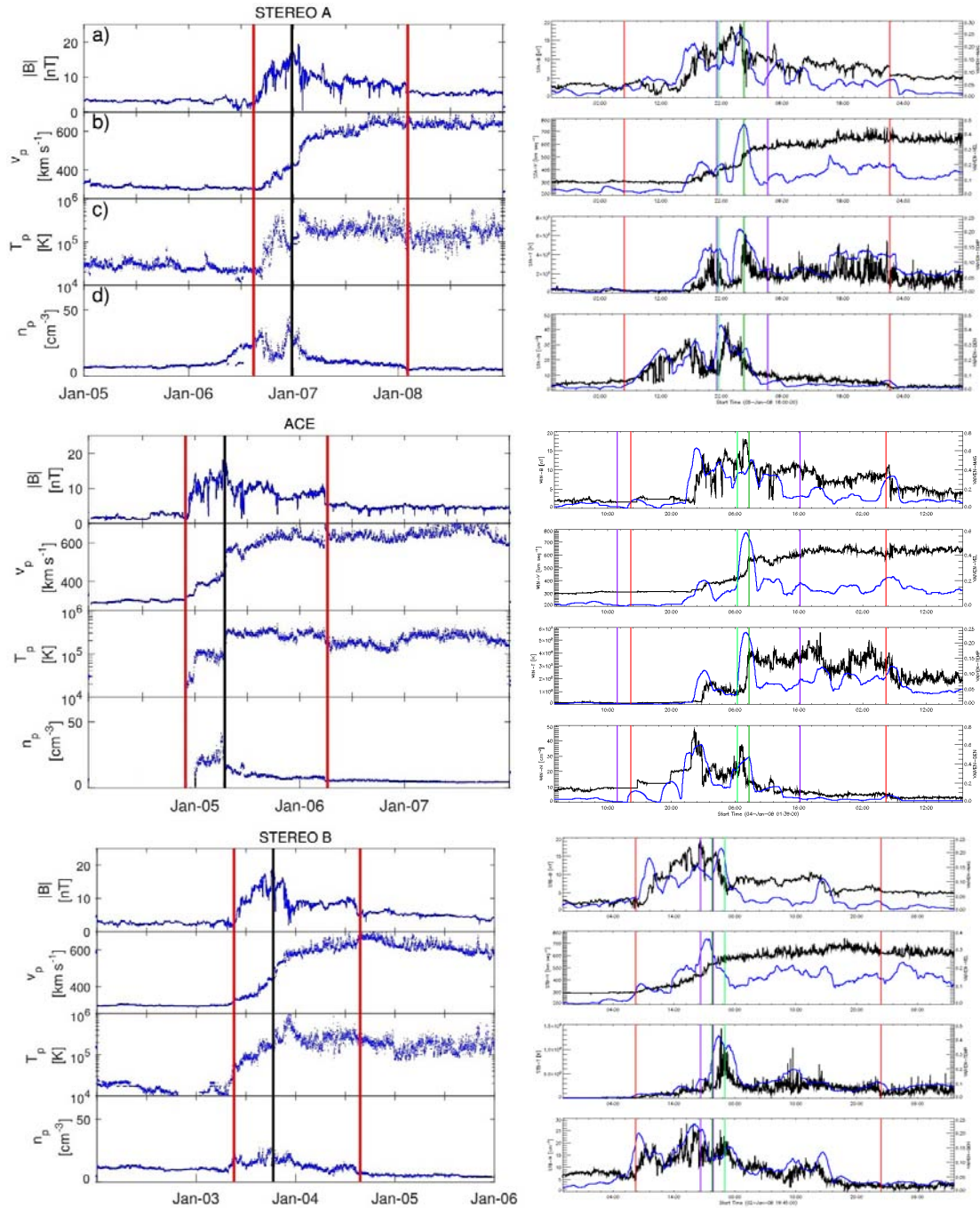


Figura 5.6: Se presentan los parámetros analizados por Huang, Song & Li (2017) del evento de CIR de principios de enero de 2008 en la columna de la izquierda. Mientras que el mismo evento pero con los tiempos reportados en JCIR18S y JCIRW así como el de máximo local del vaivén total, obtenido con la metodología, se muestra en la columna derecha. Las gráficas de Huang, Song & Li (2017), muestran los datos de magnitud del campo magnético, magnitud de velocidad, temperatura y densidad de protones, medidos por STEREO-A (primera fila de arriba hacia abajo), ACE (segunda fila) y STEREO-B (última fila). Las líneas rojas indican el inicio y el final del evento reportados por los autores y la línea negra la posición de la SI. A la derecha, los parámetros y las gráficas de las naves aparecen en el mismo orden que en la columna de la izquierda, además de que el vaivén para cada curva de datos (en color negro), se muestra en color azul, a la vez que los tiempos de inicio y final de los eventos, reportados en JCIR18S y en JCIRW, se muestran las verticales de color rojo. Las verticales moradas indican el inicio y el final del intervalo de interés asociado a este evento, mientras que la vertical verde claro, el tiempo reportado para la SI. La vertical verde oscuro indica el máximo local del vaivén total.

Lo que implica que aún con la configuración actual de la metodología (ajustada para la detección de firmas de ICMEs), es posible hallar el efecto de firmas vinculadas con el paso de eventos de SIR/CIR con un margen de error temporal razonable.

Un ejemplo de lo anterior puede observarse en los paneles que aparecen en la figura 5.6, en los que se presentan las gráficas del trabajo de Huang et al. (2017) en la columna izquierda, con un evento de CIR detectado por las naves STEREO y ACE a principios de enero de 2008. En las gráficas también se incluyen los tiempos de inicio de los eventos así como las del final de cada uno (marcadas con una línea vertical de color rojo) además del tiempo que los autores señalan como el de detección de la interfaz entre corrientes (señalada con una línea vertical negra).

Como se mencionó antes, los autores no brindan los tiempos precisos que consideran para los momentos antes mencionados. En la columna de la derecha, se muestran los mismos eventos (para el caso de las naves STEREO) y el que se considera que es el mismo evento observado por ACE, pero detectado por la nave WIND. Se han incluido los tiempos reportados en JCIR18S y en JCIRW para el inicio y el final de los eventos (con líneas verticales de color azul), así como la de la interfaz (de color rojo). Las líneas de color verde para el caso de STEREO-A y WIND indican el tiempo donde se ubica un máximo local en la escala 100 calculada sobre el vaivén total de cada nave.

En los cuadros que se muestran a continuación, se presentan los máximos locales de los parámetros, a excepción de la magnitud de velocidad, medidos por las tres naves, para los eventos que aparecen en las tablas 5.1 a 5.3. Estos máximos fueron ubicados considerando los datos de inicio y final de cada evento, reportados en JCIR18S y en JCIRW en sus catálogos. Esto se realiza con el objetivo de observar las diferencias entre valores representativos de los parámetros, a medida que los eventos de SIR se trasladan desde la posición de STEREO-B a la de WIND y de ésta a la de STEREO-A.

Tabla 5.4. Máximos locales medidos por las naves STEREO-B y WIND

No. de evento	Δv [STB] (km/s)	n [STB] (cm^{-3})	$ B $ [STB] (nT)	T [STB] (10^6 K)	Δv [WIND] (km/s)	n [WIND] (cm^{-3})	$ B $ [WIND] (nT)	T [WIND] (10^6 K)
1 (H12)	449.021	27.717	19.137	1.421	373.153	46.400	18.059	0.561
2 (H13)	360.119	51.131	17.667	1.714	378.859	27.400	17.269	0.476
3 (H14)	528.323	47.106	18.631	2.126	499.422	31.270	11.649	0.698
4 (H15)	418.747	55.352	17.085	0.863	301.905	40.550	17.798	0.786
5 (H16)	496.663	21.684	11.465	0.661	258.854	19.220	14.407	0.479
6 (H17)	256.811	20.831	12.596	1.174	358.505	22.020	15.284	0.576
7 (H18)	420.782	27.010	12.727	1.229	318.220	46.840	18.284	0.664
8 (H19)	311.935	23.967	12.822	0.597	116.815	22.860	10.194	0.127
9 (H20)	432.739	22.456	12.992	0.742	414.296	19.580	14.013	0.440
10 (H21)	247.112	19.331	8.198	0.509	300.458	35.500	12.980	0.355
11 (H22)	310.622	29.939	12.032	1.264	276.146	66.390	23.909	0.471
12 (H23)	302.247	38.450	17.998	1.370	262.727	71.470	18.297	0.758
13 (H24)	274.018	29.349	13.713	0.559	241.679	29.250	11.148	0.236
14 (H25)	218.730	64.078	19.231	1.203	154.652	48.280	17.920	0.254
15 (H26)	390.019	44.912	22.642	1.838	439.621	45.500	19.867	0.760
16 (H27)	380.977	49.133	18.168	1.419	210.352	46.750	17.122	0.462
17 (H28)	180.587	45.445	15.501	0.966	206.665	47.270	11.966	0.299

Tabla 5.5. Máximos locales asociados a STEREO-A

No. de evento	Δv [STA] (km/s)	n [STA] (cm^{-3})	$ \mathbf{B} $ [STA] (nT)	T [STA] (10^6 K)
1 (H12)	441.426	44.657	19.208	0.601
2 (H13)	431.118	37.687	15.345	0.978
3 (H14)	548.503	78.369	16.131	1.955
4 (H15)	380.578	65.152	22.182	1.268
5 (H16)	305.045	17.179	14.227	1.165
6 (H17)	356.179	84.534	20.957	1.479
7 (H18)	368.019	33.837	11.962	0.878
8 (H19)	275.478	54.598	14.494	0.977
9 (H20)	359.011	90.507	19.603	1.482
10 (H21)	289.007	76.476	15.739	1.780
11 (H22)	271.683	87.089	19.989	0.824
12 (H23)	333.711	63.536	17.562	0.922
13 (H24)	180.356	58.389	14.864	0.570
14 (H25)	266.850	19.374	12.297	0.434
15 (H26)	359.724	34.698	18.105	1.484
16 (H27)	291.826	56.524	14.058	0.642
17 (H28)	221.689	47.065	14.515	1.025

En el caso específico de la magnitud de la velocidad, se consideró la diferencia entre el máximo y el mínimo valor medido (este último se tomó con dos días de antelación a cada evento, para ser consistente con el valor del viento solar sin perturbaciones) por los instrumentos de las naves STEREO y WIND. Esto se llevó a cabo para estar en mayor concordancia con el formato de datos reportados por Huang et al. (2017), quienes en la tabla 1 de su trabajo reportan la que parece ser esta diferencia entre velocidades.

Sin embargo esto es una inferencia debido a que el criterio exacto de reporte no es mostrado explícitamente.

En las gráficas de las figuras 5.7 y 5.8 se presenta el seguimiento por parámetro de los valores presentados en las tablas 5.4 y 5.5. En dichas gráficas se muestran la relación entre los valores máximos de cada parámetro y la posición angular de las naves con respecto a WIND, denotando la posición de STEREO-B con WIND con un ángulo nega-

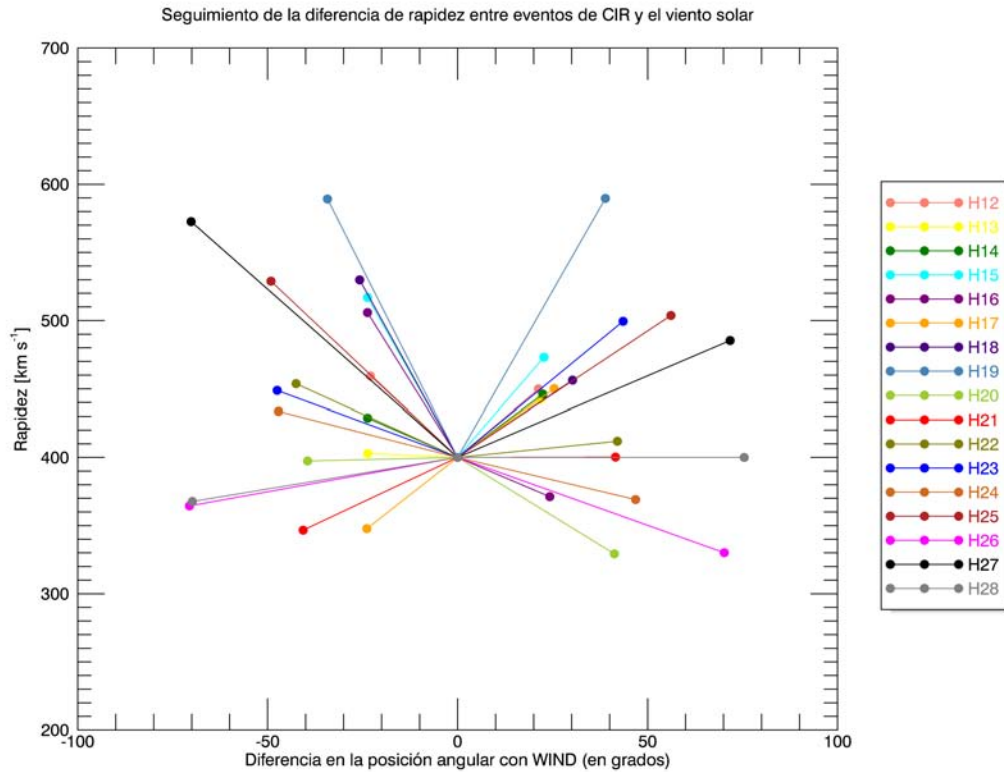


Figura 5.7: Se presenta el seguimiento normalizado de la diferencia de entre los valores máximo y mínimo de velocidad de los eventos detectados con la metodología y reportados previamente por Huang et al. (2017). Cada evento está diferenciado por un color y de modo que la numeración que se muestra es la misma que la presentada en la tabla 1 del trabajo antes citado. Es decir, el evento no. 12 de los autores aparece como el no. 1 en las tablas 5.1 a 5.5. En el eje de las abcisas se presenta la diferencia angular en las posiciones entre las naves STEREO y WIND. Los puntos centrales representan mediciones hechas por WIND, mientras que los puntos a la izquierda y derecha representan las de STEREO-B y STEREO-A, respectivamente.

tivo y en un formato tal que, se ha generado una normalización con respecto a determinados valores específicos para cada parámetro.

Las posiciones angulares que se eligieron para las gráficas, corresponden a las de las posiciones de observación en el momento en que los eventos fueron detectados por cada nave, usando como referencia los tiempos de máximo local reportados en JCIR18S. Es necesario recordar que en el tiempo en el que se detectan los eventos desde STEREO-B a WIND hasta STEREO-A, hay un período variable de tiempo que corresponde con el intervalo en el que la curva de espiral de Arquímedes se traslada de la posición de STEREO-B a la de WIND, y lo mismo

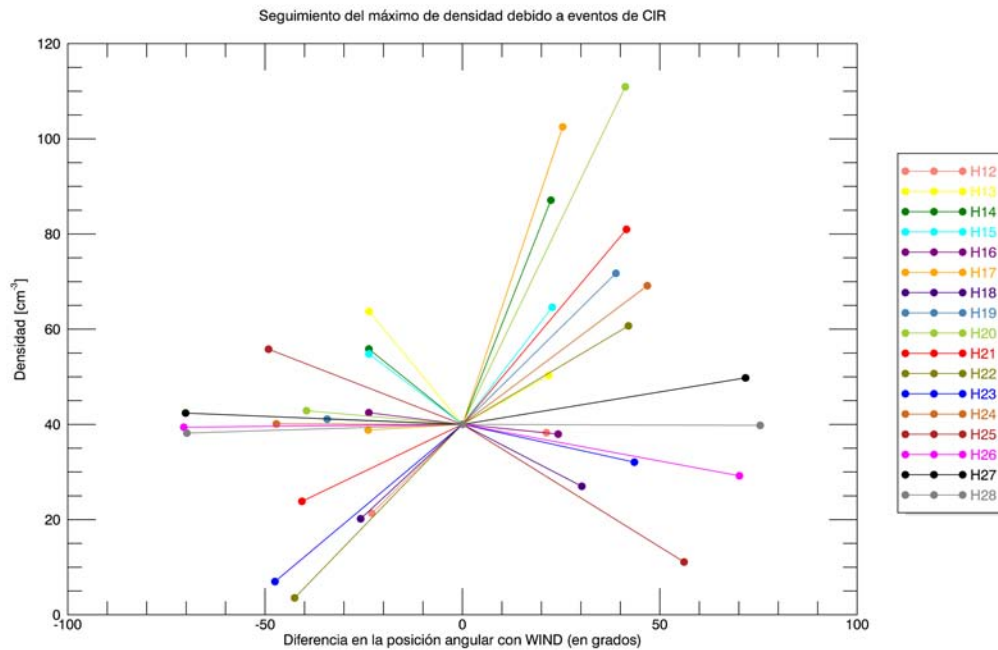


Figura 5.8: Se presenta el seguimiento normalizado del máximo local de densidad de los eventos detectados con la metodología y reportados previamente por Huang et al. (2017). Las indicaciones del pie de imagen de la figura 5.7 se aplican a este caso.

ocurre para WIND y STEREO-A. Por lo mismo las posiciones presentadas pueden ser consideradas como representativas de cada evento. No obstante, de manera formal, hay una variación en la posición angular que corresponde a fracciones de grado sexagesimal, ya que las naves STEREO se desplazan en sus respectivas órbitas, del orden de 22 grados por año, por lo que el desplazamiento de la curva en períodos del orden de entre 2 a 10 días, a primera aproximación es despreciable.

Llama la atención el patrón de dispersión en los datos que se muestra en las gráficas 5.7 a 5.10. En el caso de la magnitud de la velocidad, densidad y magnitud del campo magnético, no es posible distinguir una tendencia general para todos los casos, pero es posible encontrar algunos patrones menores. Por ejemplo, existen casos donde tiende a incrementarse la diferencia entre valores extremos locales de la velocidad, mientras que en otros, dicha diferencia tiende a disminuir. También existen casos en los que la diferencia asociada con los datos de WIND puede ser mayor o menor que las de las naves STEREO.

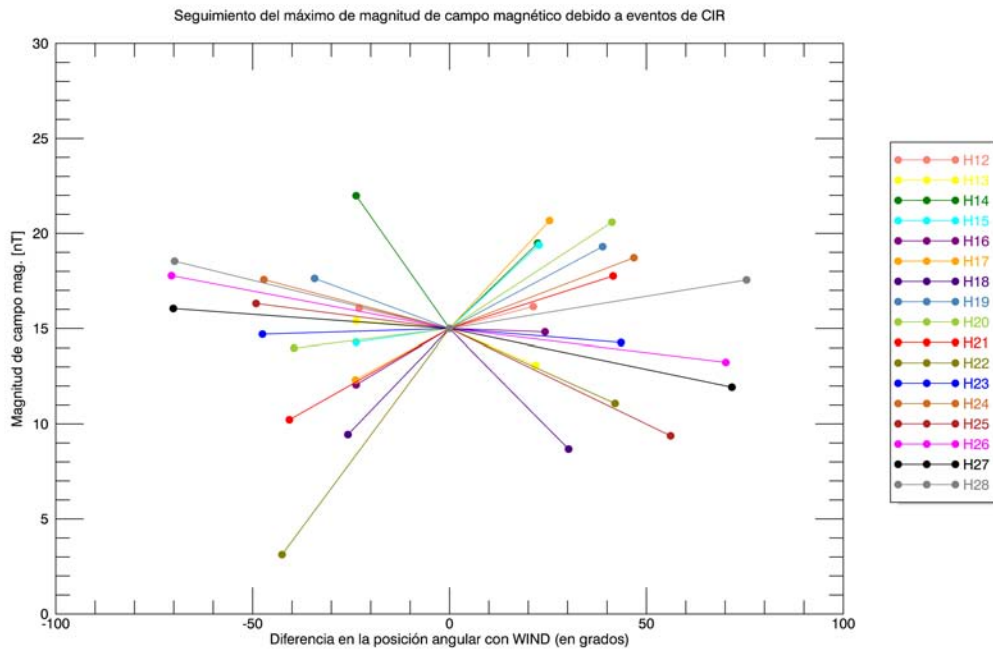


Figura 5.9: Se muestra el seguimiento normalizado del máximo local de magnitud de campo magnético de los eventos detectados con la metodología y reportados previamente por Huang et al. (2017). Las indicaciones del pie de imagen de la figura 5.7 se aplican a este caso.

Por ende para cada caso de evento detectado por las tres naves éste debe ser estudiado de manera independiente para encontrar la causa de estos subpatrones.

No obstante, la forma en como se presentan los seguimientos en el caso de la temperatura difiere en el sentido de que es el único caso en el que predomina el patrón de ubicar los valores medidos por WIND por debajo de los reportados por las naves STEREO en todos los casos. Sin embargo la dispersión de los valores asociados a las tres naves se da en un amplio rango de valores, al mismo tiempo de que no hay una tendencia clara respecto a las diferencias entre las mediciones entre STEREO-A y STEREO-B.

Las diferencias en velocidad entre las naves STEREO y WIND, no muestran un patrón único. Debido a esto, se pensó en analizar el movimiento con respecto a la componente transversal y, para ello, considerar la velocidad de rotación angular a la distancia de las naves STEREO.

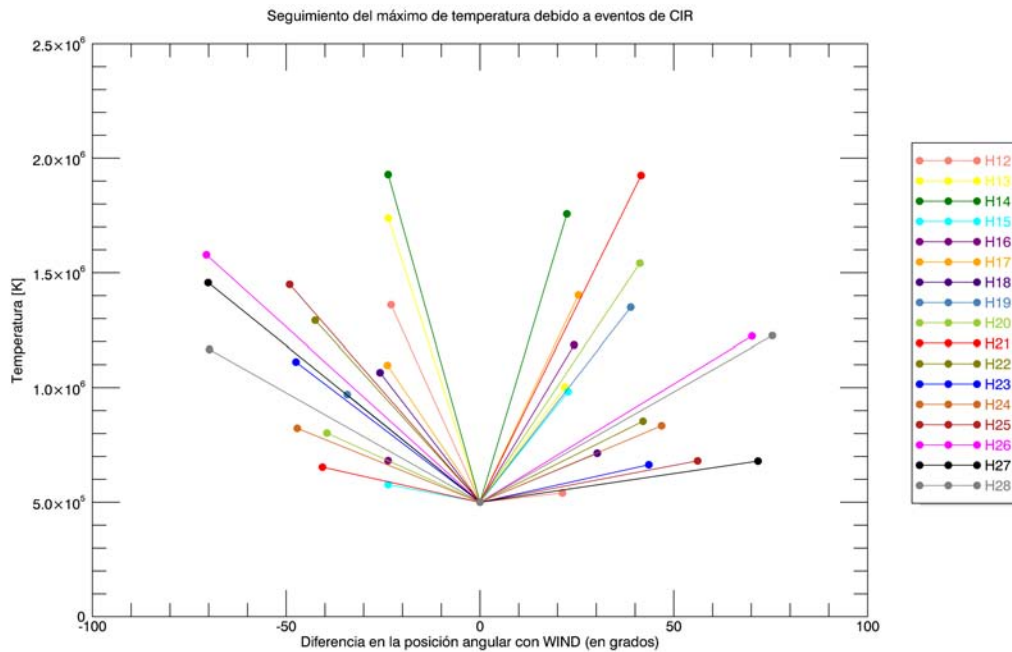


Figura 5.10: Se muestra el seguimiento normalizado del máximo local de temperatura de los eventos detectados con la metodología y reportados previamente por Huang et al. (2017). Las indicaciones del pie de imagen de la figura 5.7 se aplican a este caso.

Se realizó un cálculo tomando las diferencias de tiempo reportado (en JCIR18S) de observación de la interfaz para ambas naves STEREO, así como la diferencia del tiempo reportado para STEREO-B y los de máximo local asociados a la escala 100 dados por la metodología para STEREO-A, de modo en que para ambos casos se calcularon las velocidades angulares de rotación aproximadas que se medirían para distancias a las que se ubican las naves STEREO. Para ello, se tomaron en cuenta las separaciones angulares de la pareja de naves, en los tiempos asociados a STEREO-A. En la figura 5.11 se muestra el resultado de este cálculo en el que se le ha restado la velocidad de rotación solar a nivel ecuatorial (que es del orden de 2.7×10^{-6} rad s $^{-1}$) y se ha tomado el valor absoluto en ambos casos.

Los puntos en cada curva de la figura 5.11 representan los eventos de Huang et al. (2017). La diferencia entre los patrones que muestran las curvas no es significativa, aunque sí se observa que para los eventos cercanos al 2008, hay una importante variación entre las velocidades de

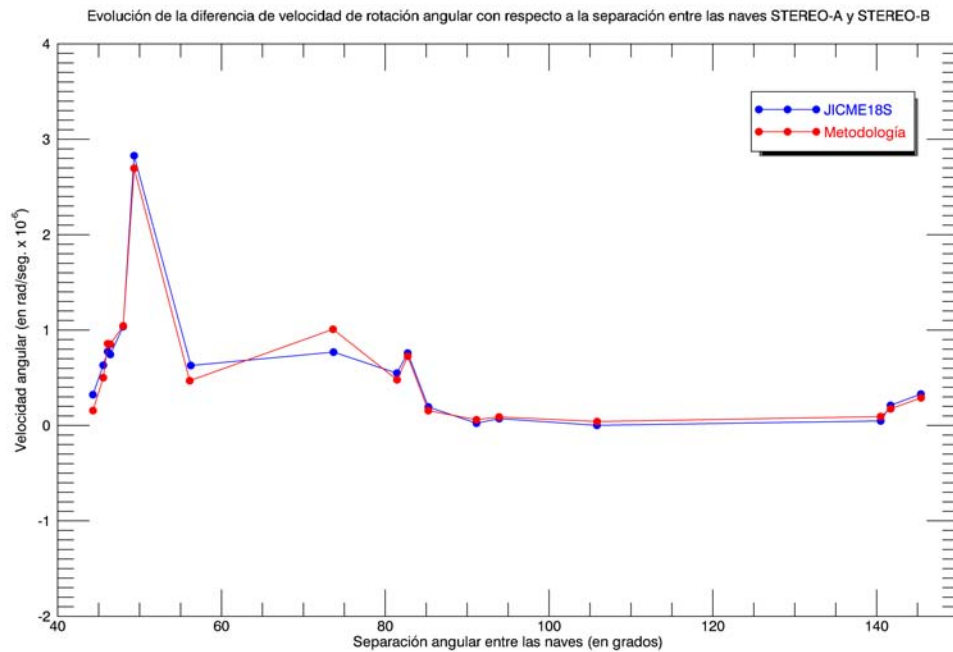


Figura 5.11: Se presenta el seguimiento de la diferencia entre la velocidad angular de rotación calculada con datos reportados en *JICME18S* y la velocidad de rotación solar a nivel ecuatorial en la curva de color azul, mientras que la de color rojo muestra la diferencia entre la velocidad calculada con datos obtenidos con la metodología y la de rotación solar.

rotación calculadas y la de rotación solar. A medida que se avanza en el tiempo (lo cual indirectamente se presenta como un incremento en la separación angular entre las naves), esta diferencia entre velocidades tiende a cero para luego volver a aumentar ligeramente. Este patrón carece de una justificación, si se toma en cuenta lo presentado en este trabajo, por lo que una investigación más profunda y específica es necesaria para brindar una explicación a este tema, así como a los patrones de dispersión mostrados en los seguimientos de los parámetros. Es relevante recordar que Huang y colaboradores utilizan un criterio con más elementos observacionales y de respuesta temporal, cuando es necesario estudiar estos resultados a la luz de la evolución con respecto al tiempo de los parámetros.

Eyecciones de masa coronal interplanetarias (ICME)

Con respecto a los eventos de ICME y a la información disponible en JICME18S, se tomó una consideración adicional. Para empezar, es importante mencionar que para STEREO-A se reportaron 107 eventos y para STEREO-B, 102, dentro del período de estudio 2008-2013. El criterio antes mencionado de selección de eventos de CIR es el mismo que se usó para este caso, en el que se eliminaron los eventos calificados como “dudosos”, así como los eventos *complejos*, llegando de este modo a las cifras antes mencionadas para estas dos naves.

Sin embargo, a diferencia de lo realizado anteriormente con los casos de eventos de CIR, aquí se realizó una separación en dos categorías de eventos de ICME, agrupando aquellos eventos en los que se reporta la existencia de una funda (los cuales se van a representar por una letra F) y aquellos sólo identificados como “obstáculos magnéticos” (denotados por las letras OM), en donde hay ausencia de firmas de una funda.

Un ejemplo de un evento de tipo F se muestra en la figura 5.12, en la que se grafican la transformada *wavelet* asociada a los parámetros del viento solar así como estos últimos y sus vaivenes asociados. Se presentan en la parte superior el conjunto de escalas que se tomaron en cuenta para este trabajo. Se observa una importante contribución de las escalas 100 y mayores en el lapso de tiempo cercano al inicio del evento de ICME, de manera similar a lo que se observa en los tiempos cercanos al paso de las interfases de los eventos de SIR/CIR (véase la figura 5.1). Estos altos valores en la magnitud de los coeficiente de correspondencia¹ (que también pueden ser asociados a la amplitud de cada componente de la superposición que constituye la transformada) son representados por tonos rojizos.

¹Para más detalles sobre esto, véase el Apéndice A que trata sobre generalidades de la transformada *wavelet*.

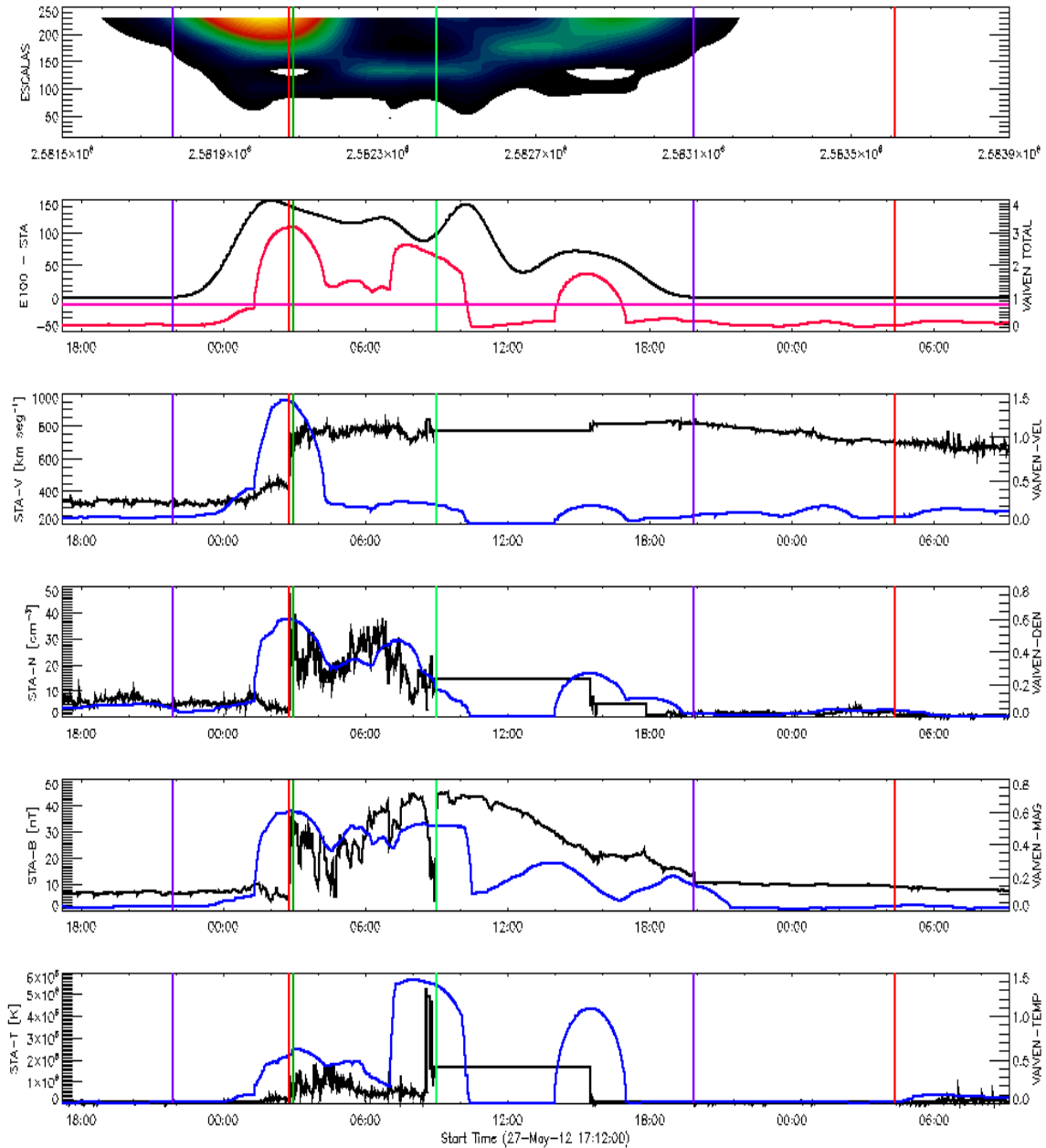


Figura 5.12: En este conjunto de gráficas se presenta un ejemplo de un evento de ICME, observado por STEREO-A en torno al día 28 de mayo de 2012. Primero, se muestra el espacio de la transformada wavelet donde se grafican todas las escalas seleccionadas con respecto al tiempo y usando una escala de color en la que los colores más oscuros indican valores bajos del coeficiente de comparación, mientras que los tonos verdosos indican valores medios y los tonos rojizos, los valores más altos. La siguiente curva graficada en color negro corresponde a la escala 100 de la transformada mientras que el vaivén total aparece en color rojo. Las subsecuentes gráficas muestran la magnitud de la velocidad (en km s^{-1}), la densidad (en cm^{-3}), la magnitud de campo magnético (en nT) y la temperatura (en K) del viento solar en color negro y los vaivenes de cada parámetro en color azul. Las líneas rojas indican el inicio y final del evento, reportadas en JICME18S, mientras que la vertical verde clara indica el tiempo de inicio del llamado “obstáculo magnético” ubicado dentro de la ICME. Por último, las verticales en morado muestran los tiempos de inicio y final del intervalo de interés identificado automáticamente, mientras que la vertical verde oscuro indica el tiempo del máximo local del vaivén total. Nótese el efecto del subintervalo con ausencia de datos, ubicado alrededor de las 15:00 horas, sobre los vaivenes de velocidad, campo magnético y temperatura.

En el siguiente nivel, visto desde arriba hacia abajo, se puede observar la curva que genera la escala 100 únicamente, la cual toma valores elevados a medida que pasa el momento en el que se dan las discontinuidades en los cuatro parámetros, graficados más abajo.

Este ejemplo sirve también para mostrar un efecto observado en el cálculo de la transformada “wavelet”: La presencia de contribuciones a la escala 100, debidas a la existencia de momentos con ausencia de datos, los cuales pueden alterar la escala y crear intervalos con máximos locales de forma “artificial” (es decir, que no estén asociados a eventos relacionados con la actividad solar). En este caso, la mayor contribución para este evento se da cerca de las 04:00 UTC del 28 de mayo de 2012, en el que se observa que los incrementos en los parámetros se dan prácticamente de forma *simultánea*, lo cual no sucede con los eventos de CIR, en los que hay un retraso entre los incrementos de densidad y campo magnético con los de velocidad y temperatura. Además, es relevante mencionar que este efecto temporal se refleja también en los vaivenes, graficadas de color azul, en las que se observan incrementos abruptos de forma cuasi-simultánea, cuando se observan dichos incrementos en los parámetros.

Por otro lado, en la figura 5.13, se muestra un ejemplo de un evento tipo *OM*, en el que se presentan algunas diferencias, dentro de las cuales destaca que el inicio del evento es similar al presentado en la figura 5.12, excepto que no existe una alta dispersión en los datos de densidad y campo magnético que si muestra el evento del 28 de mayo de 2012, dentro de la zona de la funda. No obstante, el efecto de cuasi-simultaneidad en los incrementos en los parámetros se encuentra presente. Cabe mencionar que estos eventos muestran de manera general ciertas características que fueron tomadas en cuenta dentro de la configuración usada en la metodología.

Se llevó a cabo un procedimiento similar al descrito en el paso (VI) y (VII), pero realizando dos búsquedas diferentes. En la primera, se usaron los tiempos de inicio de todos los eventos, tomados en un sólo conjunto; mientras que en la segunda, se usaron los tiempos de inicio para los eventos tipo *OM* y los tiempos reportados del final de la funda

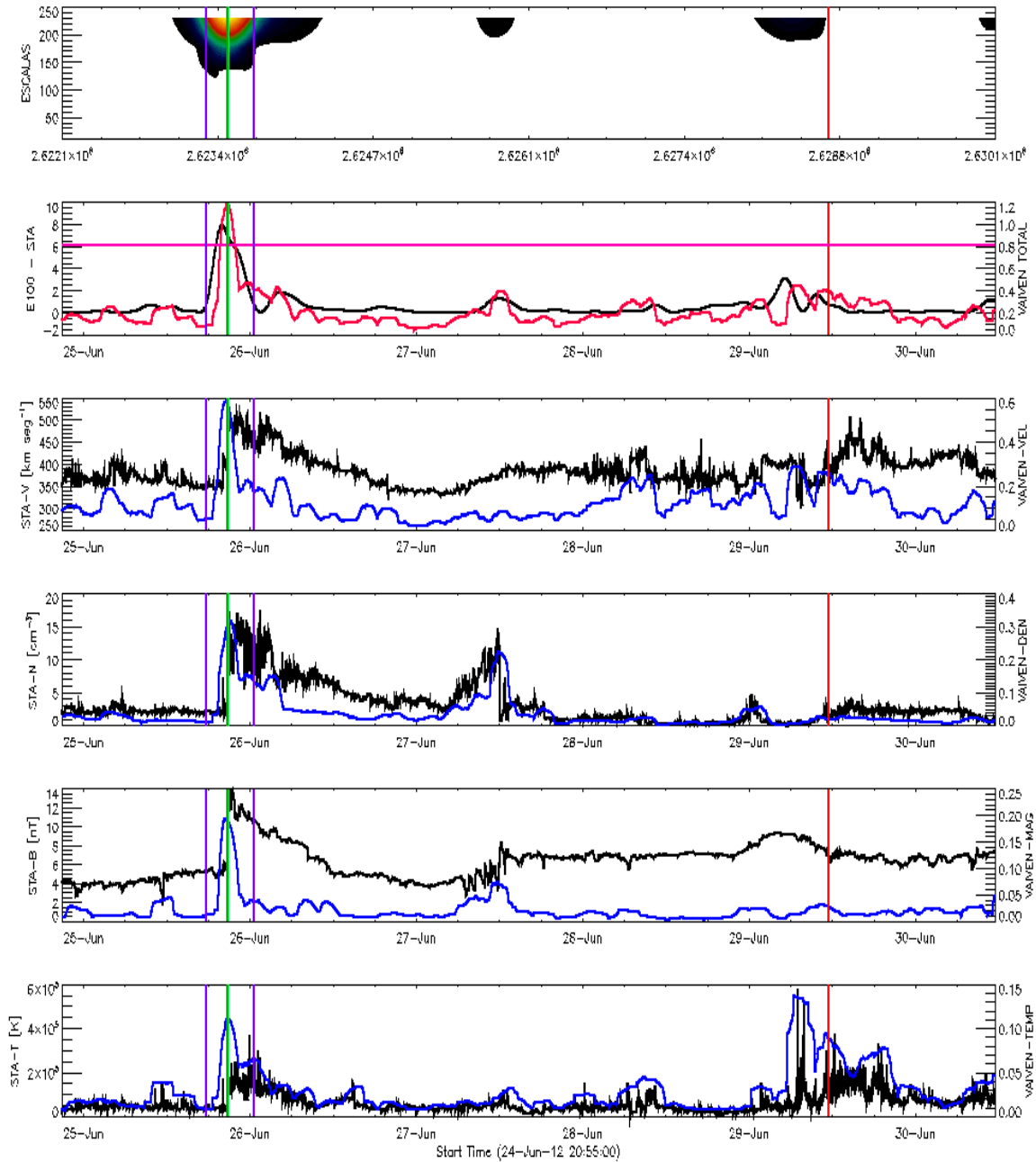


Figura 5.13: Se muestran un segundo conjunto de gráficas con un ejemplo de un evento tipo “obstáculo magnético” de una ICME, observado por STEREO-A en torno al día 26 de junio de 2012, que contrasta con el de la figura 5.12. El orden de presentación y contenido de esta figura es el mismo que en el de la 5.12 por lo que se aplica lo explicado en su pie de imagen. En este caso, las líneas verticales de color verde claro y oscuro se traslapan, debido al intervalo de tiempo graficado.

para los tipo F . De los 107 eventos reportados de las mediciones de STEREO-A, de acuerdo con lo que se indica en JICME18S, se tienen un total de 73 eventos tipo F y 34 tipo OM . En el caso de STEREO-B, de los 102 eventos reportados, 56 son de tipo F y 46 son de tipo OM .

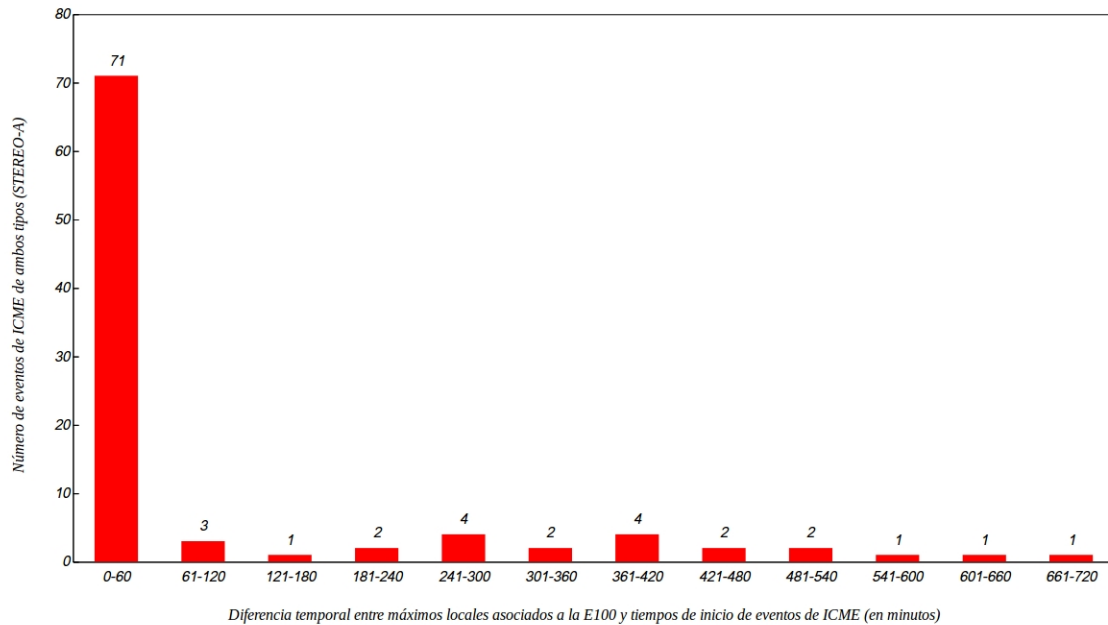


Figura 5.14: Se presenta en formato de histograma los resultados de las búsquedas de correspondencia entre los tiempos de inicio de eventos de ICME detectados por STEREO-A y los de máximo local de la escala 100 asociada a dicha nave, separados por la duración del intervalo de tiempo que divide a ambas fechas. Los números sobre las barras indican el número de eventos dentro de los intervalos dados.

Suponiendo una diferencia máxima de hasta 480 minutos entre el inicio de las fundas y los máximos locales de los lapsos, para la primera búsqueda (con todos los eventos de cada nave en un único conjunto) se encontraron 89 correspondencias para STEREO-A (que suman el 83.18 % de los eventos reportados en JICME18S) y 90 para STEREO-B (88.23 %). Con una ventana mayor, de hasta 720 minutos, el número aumenta a 94 para STEREO-A (87.85 %) y a 92 para STEREO-B (90.2 %).

Con respecto a la segunda búsqueda, realizada sobre las fechas de inicio de la estructura magnética interna de la ICME para eventos de tipo F y sobre las fechas de inicio de los eventos de tipo OM , para los eventos de STEREO-A, se hallaron 61 coincidencias de eventos tipo F y 25 con eventos tipo OM , con una ventana de hasta 480 minutos. Con STEREO-B y la misma ventana de diferencias, se encontraron 50 coincidencias con eventos tipo F y 38 con eventos tipo OM .

Al extender la ventana hasta 720 minutos, para STEREO-A, se encuentran 68 coincidencias con eventos de tipo F y 28 con eventos

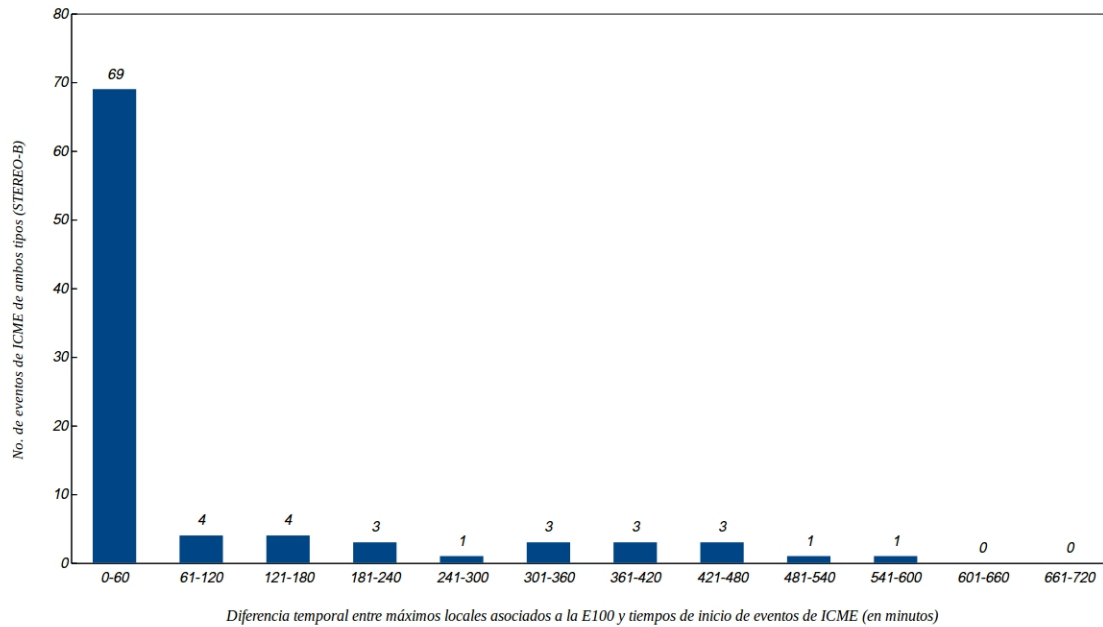


Figura 5.15: Se muestra un histograma con los resultados de las búsqueda de correspondencias entre las fechas de inicio de ICMEs observados por STEREO-B y los de máximo local de la escala 100 asociada a dicha nave, organizados por la duración del lapso de tiempo que separa ambas fechas. Los dígitos sobre las barras indican el número de eventos dentro de los intervalos dados.

tipo *OM*; mientras que para STEREO-B, se hallaron 55 coincidencias con eventos tipo *F* y 38 con eventos tipo *OM*. Si bien las diferencias entre las búsquedas no son considerables, este ejercicio permite afirmar que la forma más adecuada para hallar correspondencias entre fechas asociadas con los eventos de ICME y las de máximo local de la escala 100 de cada nave es la primera, donde son consideradas las fechas reportadas de inicio de todos los eventos. Los histogramas de las figuras 5.14 y 5.15 muestran los resultados de la primera búsqueda en términos de la diferencia temporal, justo como se muestra en las figuras 5.2 a 5.4, donde el patrón de diferencia predominante es el mismo que en el caso de los eventos de SIR/CIR, del orden de una hora.

Capítulo 6

Discusión y conclusiones

En este trabajo se presentó una aplicación a la metodología presentada en Niembro & Lara (2016) y en Niembro (2018) que permite la identificación automática de intervalos de interés, los cuales constituyen una firma característica de la presencia de eventos transitorios vinculados con la actividad solar. Esto es llevado a cabo por medio de la información contenida tanto en las fluctuaciones asociadas a los parámetros básicos que describen el flujo de viento solar, como en la transformada *wavelet* aplicada sobre el vaivén total, el cual se genera con los datos de las naves gemelas STEREO medidos entre 2008 y 2013.

La metodología, usando la configuración mostrada en esta tesis, permite ubicar perturbaciones en las mediciones de la magnitud de la velocidad, densidad y temperatura del flujo de viento solar así como en la magnitud de campo magnético interplanetario, asociadas con el paso de una eyección de masa coronal interplanetaria (ICME). No obstante, se confirma que dicha configuración es capaz de hallar alteraciones en los parámetros del viento solar debidas a eventos de regiones de interacción entre corrientes (SIR) y corrotantes (CIR), a pesar de no ser la más óptima para desarrollar esta tarea.

El uso de la metodología para la detección de firmas en el viento solar asociadas al paso de un evento de SIR/CIR con los datos de las naves STEREO, sumado al trabajo previo realizado con la nave WIND por los autores antes citados, dio paso a investigar la posibilidad de

poder rastrear un evento a medida que se propaga por el medio interplanetario siguiendo una curva de espiral de Arquímedes, pasando por cada una de las tres naves antes mencionadas. Junto con un modelo simple de movimiento a velocidad constante, es posible encontrar firmas de eventos que son considerados como el mismo (visto por tres naves distintas) según afirman autores como Huang et al. (2017).

Sin embargo, el equipo instrumental que usan STEREO, ACE y WIND es diferente y esto debe ser considerado al asociar las mediciones del viento solar entre diversas naves. Además, el criterio usado por Huang et al. (2017) para la asociación de eventos puede ser considerado como subjetivo, debido a que usa una vinculación más bien temporal y no estudia a profundidad cómo es el proceso de evolución de los eventos, a medida que son detectados por cada nave. Esto puede ser observado en la figura 5.6, en el que se muestra un ejemplo del que es considerado como el mismo evento pero detectado por las naves STEREO y ACE en momentos diferentes. Es posible observar que la medición de los instrumentos de las naves STEREO, es similar pero no es exactamente la misma, lo que indica la posibilidad de la evolución del evento (concediendo el hecho de que sea el mismo) y descartando efectos como los producidos por cambios en la calibración de los instrumentos. Los seguimientos mostrados en las figuras 5.7 a 5.10 revelan que la evolución que cada evento muestra es aparentemente distinta y, al menos, no muestran un patrón discernible y dependiente, por ejemplo, del ciclo de actividad de 11 años o de cualquier otro factor capaz de alterar las firmas propias de los eventos reportados. Esto no quiere decir que no exista dicho patrón. Además de mostrar un posible *error de calibración* o de otra clase en los instrumentos, debido a lo que se observa en particular en la figura 5.10.

Esto último también se refleja en las fluctuaciones de los parámetros, las cuales responden de forma estrictamente diferente entre ambas naves, así como la correspondiente transformada *wavelet*, la cual brinda una respuesta distinta formalmente en cada caso. La forma en que evoluciona un evento de CIR es un tema que debe ser estudiado, con respecto a los parámetros, así como con lo obtenido de las fluctuaciones

y su transformada *wavelet*.

Otro punto es el uso del modelo básico de movimiento de velocidad angular constante, usado para ubicar temporalmente fenómenos de SI-R/CIR. Si bien es útil como referencia para ubicar candidatos a eventos en las tres naves para ser considerados como el mismo fenómeno visto por misiones distintas, no es adecuado para hacer predicciones confiables de los tiempos de observación con un margen de error razonable, como se mostró previamente con las tablas 5.2 y 5.3. Por otro lado, se demuestra que el error que existe entre los tiempos asociados con los eventos y los de máximos locales en la escala 100 de la transformada de cada nave, son menores que los que se presentan entre los tiempos calculados con el modelo y los reportados para las interfases entre corrientes de los eventos y, en consecuencia, con los máximos locales de las escalas 100, como se demuestra en los histogramas de las figuras 5.2, 5.3, 5.14 y 5.15, donde la diferencia más común para eventos reportados desde el 2008 al 2013 es de entre una y dos horas. Es entonces, necesario, si se desea un desarrollo más profundo y adecuado, utilizar un modelo más avanzado que permita calcular las fechas de forma más precisa.

Una de las características fundamentales de la metodología es la identificación de la presencia de regiones de compresión por medio de las perturbaciones que generan estas zonas en los parámetros del viento solar. Para el caso de las regiones de interacción entre corrientes, se presenta una diferencia que entre los tiempos reportadas en JCIR18S para la zona de máxima presión total local (la cual está asociada a su vez con la interfaz entre corrientes) y los máximos locales asociados a las escalas 100.

En este trabajo se usó la suposición de que en estas fechas, los incrementos en los parámetros son indicadores indirectos del aumento de la presión total local (debido a como se define esta cantidad, que es dependiente de la densidad, temperatura e intensidad del campo magnético), por lo que un aumento en la amplitud en las escalas indirectamente está relacionado con una fluctuación importante en la presión total. Una alternativa a la presión total es la vorticidad del campo de veloci-

dades, $\vec{\omega} = \nabla \times \vec{v}$, propuesta por Borovsky & Denton (2010), quienes en un análisis de eventos de regiones de interacción corrotantes, usan una de las componentes de la vorticidad como indicador de la interfaz, debido a que esta componente y sus máximo locales están relacionados con la turbulencia local presente en el plasma dentro de las regiones de compresión. Es posible aplicar la metodología tanto a parámetros simples como a derivados, como lo es la vorticidad y sus componentes, de modo que podría ser una segunda ruta para la ubicación de regiones de compresión.

Del mismo modo, otras variables pueden ser analizadas por medio del modelo, como son las componentes del campo magnético o la velocidad, así como los números de Mach, la entropía, etc., los cuales podrían aportar información adicional sobre los eventos, como por ejemplo, su duración total. Aunado al hecho de que, para una región de interacción entre corrientes, no es aplicable la idea de la cuasi-simultaneidad en el tiempo de detección de las perturbaciones en los parámetros, por lo que la metodología puede ser modificada para ajustarse a este tipo de modelos, ya sea con el uso de las otras escalas o bien, mediante el cálculo de dos *vaivenes subtotales*, uno que sume sólo el vaivén de las fluctuaciones de velocidad y temperatura y el otro la suma del de densidad y campo magnético, así como la transformada de estas dos nuevas variables.

Por último, es importante mencionar el análisis de la respuesta de la metodología, tanto en fluctuaciones como en su transformada, en términos de la zona de observación de una ICME. Es decir, cómo se modifica la respuesta de los elementos de la metodología cuando una nave observe la región frontal de una ICME o bien uno de los flancos. Esto, asociado a la posibilidad de poder rastrear e identificar un evento de ICME, visto con más de una nave. Esta situación se vuelve más factible cuando las naves STEREO y WIND (o ACE) se encuentran más cercanas entre sí, pero al mismo tiempo es menos probable debido a que el intervalo en el que las tres naves se ubican más cercanas entre sí es en los dos años posteriores al lanzamiento de las naves STEREO, el cual se dio en el 2007, año cercano a la fase de mínima actividad

solar dentro del ciclo 23, y en la que el número de eventos de ICME se reduce en consecuencia, a diferencia del número de eventos de CIR reportados el cual es elevado.

En resumen, la metodología permite ubicar eventos transitorios reportados como son ICMEs y SIRs/CIRs a partir de los datos de las naves STEREO y WIND ubicadas a una unidad astronómica, con relación a las firmas asociadas a las regiones de compresión que se encuentran dentro de dichos eventos. Sin embargo, es necesario un conjunto de criterios, construídos sobre la configuración de la metodología, que permita ubicar eventos sin tomar en cuenta otros catálogos ya compilados. El uso de un modelo de rotación angular más complejo que el usado podría mejorar los tiempos predichos para la observación de eventos de CIR, aunque como se mostró antes, los tiempos más relevantes son los que muestra la metodología. Por último, una interrogante que el trabajo genera y que al momento de redactar esta tesis queda abierta es la explicación de los resultados mostrados en las gráficas 5.7 a 5.10.

Apéndice A

Análisis de series de tiempo mediante el uso de la transformada *wavelet*

Para el desarrollo del presente trabajo se usaron dos herramientas fundamentales. La primera fue el concepto de las fluctuaciones globales y locales, así como del espacio que se puede generar con base a éstas. Mientras que la segunda es la transformada *wavelet*. Esta herramienta es adecuada para el estudio de procesos que muestran características específicas a diferentes escalas temporales y ha sido utilizada en campos tan diversos como el procesamiento de imágenes, mecánica cuántica, fenómenos de turbulencia, estudios asociados con el clima, etc. (Lau y Weng, 1995)

En el texto subsecuente, siguiendo el enfoque de Chui (1992) y de Gao & Yan (2010), tenemos que para el procesamiento de una señal o serie de tiempo de datos y extraer información de ésta, se lleva a cabo la transformación de la señal construída sobre un dominio de tiempo a una contraparte definida sobre otro dominio, relativo a otra variable, con el propósito de obtener información característica de dicha señal que de otro modo, no sería posible detectar. Sin embargo, desde una perspectiva matemática, el proceso de transformación puede verse como la representación de la serie de tiempo como un conjunto de coeficientes, los cuales se obtienen a partir de la comparación entre la serie, que podemos denotar por $x(t)$ y un conjunto específico de fun-

ciones complejas de prueba $\{\phi_n(t)\}$. Definimos entonces el coeficiente c_n de comparación de la siguiente manera:

$$c_n = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \phi_n^*(t) dt, \quad (\text{A.1})$$

donde el asterisco denota el conjugado de la función $\phi_n(t)$. También es posible denotar la integral anterior con la notación del producto interno y escribir el coeficiente de comparación como sigue:

$$c_n = \langle x, \phi_n \rangle, \quad (\text{A.2})$$

donde justamente, $\langle x, \phi_n \rangle = \int x(t) \phi_n^*(t) dt$. Son entonces las propiedades de la familia de funciones $\{\phi_n(t)\}$ las que definen las características de los coeficientes de comparación y por tanto, es posible definir diferentes tipos de comparativos (o de *transformadas integrales*) utilizando familias diferentes de funciones de prueba. El producto interno que se muestra en (A.2) cuantifica la “similitud” entre las funciones $x(t)$ y $\phi_n(t)$, de modo que entre más similares sean las funciones entre sí, el valor absoluto de c_n será mayor.

Una de las transformadas más utilizadas en el análisis de señales es la de Fourier, en honor a su creador, el matemático francés Joseph Fourier. En 1807, Fourier encontró que cualquier función periódica puede ser representada mediante una suma de funciones seno y coseno, pero no fue sino hasta 1822 que en su libro *Théorie analytique de la chaleur* (“La teoría analítica del calor”) donde publicó sus resultados, expandiendo esta noción de representación a funciones no periódicas, afirmando que cualquier función (que cumpla con ciertas características, como la de ser de cuadrado integrable) posee una representación integral asociada a funciones seno y coseno. Dicha integral se conoce ahora como *transformada de Fourier*.

Si $x(t)$ es una función que describe una señal o serie de tiempo, de cuadrado integrable, podemos definir su transformada de Fourier, usando también la noción del producto interno, del siguiente modo:

$$G(f) = \mathcal{F}[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt = \langle x, e^{i2\pi ft} \rangle, \quad (\text{A.3})$$

donde el *kernel* de la transformada utiliza las funciones de prueba

$\{e^{i2\pi ft}\}$, las cuales se relacionan con las funciones seno y coseno mediante la fórmula de Euler, $e^{iy} = \cos(y) + i\text{sen}(y)$.

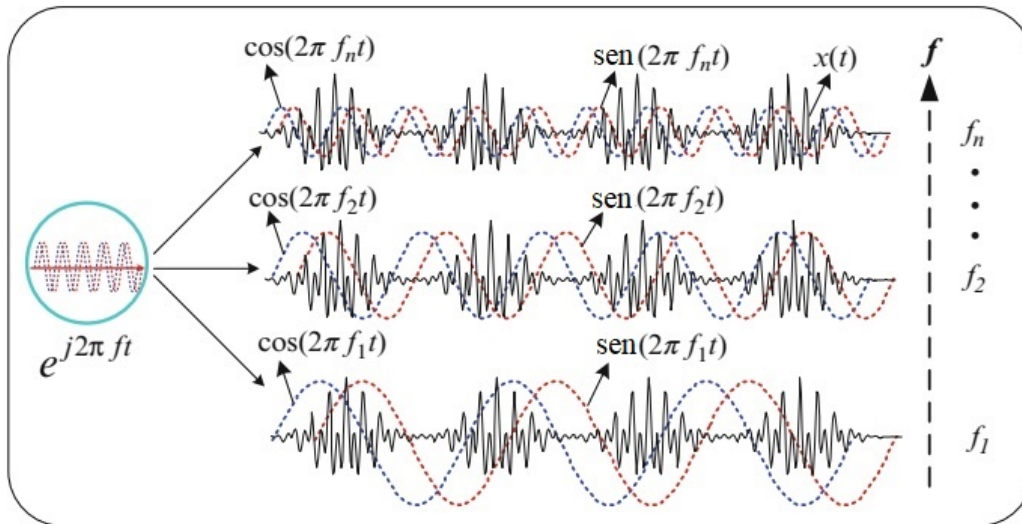


Figura A.1: Ejemplo simple del uso de la transformada de Fourier en una serie de tiempo $x(t)$. Las funciones del conjunto $e^{j2\pi ft}$, donde j es la unidad imaginaria, se comparan con la serie de tiempo, tomando en cuenta todas las frecuencias admisibles y la contribución de cada frecuencia a la serie de tiempo original. Adaptado de Gao & Yan (2010)

No obstante, se debe recordar que las funciones seno y coseno son continuas y se extienden por todo el dominio de definición de la función original de forma uniforme. Lo anterior puede llegar a ser un problema si se desea obtener información acerca de una región específica en el espacio y/o en el tiempo, es decir, información a escala *local* de una señal *finita*. Debemos notar también que la transformada de Fourier, por definición, no posee información sobre la dependencia temporal de la señal original, por lo que no es posible obtener datos específicos a escala *local* acerca de la evolución temporal de la señal ni de su distribución de frecuencias, además de que la representación de un sector específico de la señal, depende de una gran cantidad de coeficientes de Fourier, incluso podrían ser necesarios una cantidad infinita, si se desean representar casos como el de una función delta en el tiempo (Lau y Weng, 1995).

Una alternativa para el análisis de componentes y sectores específicos de una señal, manteniendo el esquema de uso de la transformada

de Fourier, es la *transformada de Fourier por intervalos*¹.

En este caso, la transformación se aplica no a la función original $x(t)$, sino al producto de ésta por una función fija de intervalo o de ventana $u(t)$, centrada en el tiempo τ , de modo en que para un τ específico, se calcula la transformada de Fourier al producto $x(t)u(t - \tau)$, luego, se recorre la ventana un tiempo τ posterior y se calcula la transformada ahora sobre la ventana centrada en el tiempo posterior. Lo anterior puede ser repetido hasta cubrir la transformada de Fourier de la señal en su totalidad. Retomando la notación anterior, la transformada de Fourier por intervalos de $x(t)$ se denota de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} V(\tau, f) &= \langle x, u_{\tau, f} \rangle \\ &= \int x(t) u_{\tau, f}^*(t) dt = \int x(t) u(t - \tau) e^{-i2\pi ft} dt, \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

donde es posible ver la relación anterior como una que compara las similitudes entre las funciones de prueba de la transformada de Fourier con la señal, multiplicada por la función de ventana $u(t)$.

No obstante, esta representación posee algunas desventajas, como son el hecho de que la resolución temporal y de frecuencias están directamente afectadas por la función de ventana que se utilice en la transformada. Además de que esta representación, puede guardar información detallada de las componentes con alta frecuencia, asociadas a la señal original, pero un pobre contenido de las componentes con baja frecuencia. Por lo que no es adecuada para el análisis de estas últimas. Y por último, las resoluciones espectral y temporal no pueden ser elegidas de manera arbitraria pues se sabe que existe una relación entre éstas que se asemeja a la que se presenta en las desigualdades de Heisenberg (véase por ejemplo a Cohen, 1989).

Es en este punto donde entra la transformada *wavelet*². Es posible encontrar aportes asociados con este tipo de transformada desde prin-

¹Este nombre se eligió como traducción para la frase en lengua inglesa *Windowed Fourier Transform*, el cual también puede ser traducido como *transformada de Fourier de tiempo (o término) reducido*. El concepto de esta clase de transformada de Fourier fue desarrollada por Dennis Gabor en su artículo *Theory of communication* (“*Teoría de la comunicación*”) publicado en 1946.

²La palabra “*wavelet*” suele traducirse como “ondeleta”. Sin embargo, a lo largo de este texto se ha optado el uso del término en lengua inglesa.

cipios del siglo XX, con los trabajos de Alfred Haar en 1910, pero no es sino hasta la década de los setenta, cuando Jean Morlet, usando impulsos acústicos en sus labores de prospección y analizando los ecos que mandaban de regreso con la transformada de Fourier por intervalos, experimentó usando funciones de ventana que mantenían constante la frecuencia y dejando libre el ancho temporal de la misma, ajustándola a voluntad. Dichas funciones de ancho variable fueron nombradas por Morlet como “wavelets”. No fue sino hasta 1984 que junto con Alex Grossmann, formalizaron el concepto y generaron lo que hoy se conoce como la transformada *wavelet*.

A diferencia de las dos clases de representación anteriores, la transformada *wavelet* usa un conjunto de funciones base que tienen la propiedad de adaptarse con una resolución flexible tanto en frecuencia como en el tiempo; mientras que en el caso de la transformada de Fourier por intervalos, el tamaño de la ventana es fijo, la transformada *wavelet* acepta ventanas con dimensiones variables que permiten el análisis de las contribuciones asociadas con diversas frecuencias. Además de que dicha flexibilidad puede aplicarse a todo el dominio de definición de la función original y de que puede contraerse para estudiar las componentes de alta frecuencia y expandirse con respecto a las de baja frecuencia, aunque esta versatilidad no puede ser aplicada de manera arbitraria pues una alta precisión para la banda de altas frecuencias sólo es posible sacrificando la resolución del intervalo de frecuencias y tomando el caso contrario para la banda de bajas frecuencias (Lau y Weng, 1995).

El análisis de múltiples contribuciones en frecuencias es posible mediante la comparación de la señal original con un conjunto de funciones de prueba que se obtienen mediante el *corrimiento* (que no es otra cosa más que una traslación a lo largo del eje temporal) y el *escalamiento* (el “estiramiento” o “compresión”) de una función *wavelet* base. Usando la notación del producto interno, la transformada *wavelet* de una señal $x(t)$ se denota de la siguiente manera:

$$WV(s, \tau) = \langle x, \xi_{s,\tau} \rangle = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \xi^* \left(\frac{t - \tau}{s} \right) dt, \quad (\text{A.5})$$

donde s es el *parámetro de escalamiento* o simplemente, la *escala* del *wavelet*. Notemos que en el caso de la transformada *wavelet*, se sustituye el kernel de la transformada de Fourier por un conjunto de funciones $\xi_{s,\tau}$ generadas por un *wavelet* base. Una de las más usadas es, precisamente, la de Morlet:

$$\xi(t) = e^{i2\pi f_0 t} e^{-\alpha t^2/\beta^2}, \quad (\text{A.6})$$

la cual corresponde a una función del *kernel* de la transformada de Fourier, modulada por una función gaussiana en el tiempo, donde los parámetros f_0 , α y β son constantes. Si se considera el *wavelet* de Morlet como generatriz, sus versiones *escaladas* son las siguientes:

$$\xi\left(\frac{t - \tau}{s}\right) = e^{i2\pi f_0 \frac{t-\tau}{s}} e^{-\alpha \frac{(t-\tau)^2}{s^2\beta^2}}, \quad (\text{A.7})$$

donde las resoluciones temporal y de frecuencias dependen del parámetro de escalamiento de la siguiente manera:

$$\Delta t = \frac{s\beta}{2\sqrt{\alpha}}, \quad \Delta f = \frac{\sqrt{\alpha}}{2\pi s\beta}. \quad (\text{A.8})$$

Al utilizar diferentes valores de la escala s y del tiempo de referencia τ , en la función *wavelet* escalada de (A.7), es posible estudiar las componentes de una señal sobre todo el espectro de frecuencias que ésta abarque, usando valores pequeños de la escala para analizar las contribuciones de las componentes de alta frecuencia y valores altos de la escala para las componentes de baja frecuencia.

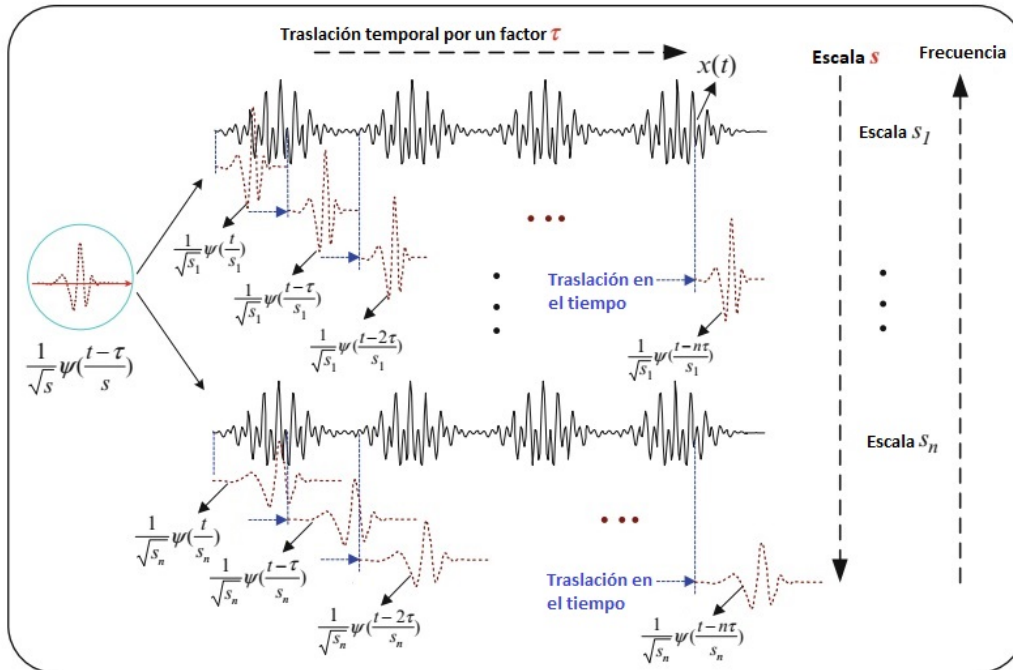


Figura A.2: Representación esquemática de una transformada “wavelet”, vista desde el punto de vista de dos contribuciones, que proceden de una función “wavelet” generatriz, ejemplificada a la izquierda. Dependiendo del factor de escalamiento (o simplemente, la escala) que se utilice, la función “wavelet” generatriz puede adaptarse a determinados sectores de una serie de tiempo de forma adecuada, donde la escala está relacionada con una componente característica de frecuencia. Variando las escalas y trasladando la función generatriz es posible abarcar la totalidad de la señal de tiempo sin importar que no sea periódica y finita. Adaptado de Gao & Yan (2010)

A.1. Consideraciones prácticas y técnicas de la transformada wavelet usada en este trabajo

Para la presente tesis, se usó la plataforma de trabajo *IDL*, la cual es a la vez un lenguaje de programación. Dentro de este espacio, se utilizó un programa desarrollado por C. Torrence y G. P. Compo, que calcula la transformada *wavelet* para una serie de datos que el usuario usa como información de entrada. Al final de este apartado, se presenta el código del programa.

Como se podrá observar más adelante, los datos básicos de entrada del programa, son la serie de tiempo para la cual se desea obtener la transformada, así como el intervalo de tiempo δt entre dos valores con-

secutivos dentro de la serie. Para este caso, las series de tiempo usadas fueron las normas calculadas con base a las fluctuaciones globales y locales de los datos de la magnitud de velocidad, magnitud de campo magnético, densidad y temperatura medidos por los instrumentos de las naves STEREO y WIND, así como el valor de resolución temporal δt de dichos instrumentos, es decir, un minuto.

El programa también presenta una serie de opciones adicionales de entrada que el usuario puede ajustar. Dentro de éstas, destacan la opción de seleccionar la función generatriz para el cálculo de la transformada, dentro de tres funciones disponibles. La que se usó para este caso fue la función generatriz de Morlet, la cual Torrence & Compo (1998) definen del siguiente modo:

$$\xi(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2}, \quad (\text{A.9})$$

donde, a diferencia de la definición que se presentó anteriormente, los autores presentan la función generatriz en términos de un tiempo *adimensional* η y con una frecuencia *adimensional* característica $\omega_0 = 6$.

También, señalan, es necesario establecer un conjunto discreto de escalas, para las versiones escaladas de la función de Morlet. Uno de los valores de entrada para el programa es el valor mínimo de la escala y la separación entre los valores de las escalas, las cuales a su vez se calculan de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$s_j = s_0 2^{j\delta j}, \quad j = 0, 1, \dots, J, \quad (\text{A.10})$$

donde la escala mínima s_0 se mantiene con el valor definido por Torrence & Compo, esto es, $s_0 = 2\delta t$, es decir, la escala mínima es de 2 minutos. La separación entre escalas, $\delta j = 0.4$, se estableció con el objeto de mantener un conjunto específico de escalas, cuyo valor máximo cercano a las tres horas, consistente con el intervalo de tiempo en el que se calcula la desviación estándar para las fluctuaciones globales y locales.

Los autores mencionan que el número máximo de escalas J que pueden utilizarse para la transformada, dependen del número de elementos

N que constituyen a la serie de tiempo:

$$J = \log_2(N\delta t/s_0)/\delta j, \quad (\text{A.11})$$

sin embargo, el usuario puede establecer un valor $J_{opc} < J$ para la cantidad de escalas que el programa puede considerar. Para este caso se consideraron un total de 18 escalas, de modo en que se abarcasen escalas cercanas a las tres horas de la desviación estándar de las fluctuaciones.

Por último, es relevante mencionar que la definición dada para la transformada wavelet, ec. A.5, en relación con su aplicación práctica, depende de la transformada de Fourier de la función escalada, en este caso la de Morlet. Por lo que, si bien la función generatriz tiene una *frecuencia* característica asociada ($\omega_0 = 6$), cada versión escalada posee también su frecuencia o período característico ó central. La cuales, señalan Torrence & Compo (1998), no son iguales a $1/s$. Los autores señalan la relación entre los períodos λ centrales de las funciones escaladas (asociados con la transformada de Fourier de éstas) y las correspondientes escalas calculadas, para cada generatriz considerada en el programa. En el caso de la función de Morlet:

$$\lambda(s) = \frac{4\pi s}{\omega_0 + \sqrt{2 + \omega_0^2}}. \quad (\text{A.12})$$

Para el caso $\omega_0 = 6$, se tiene que $\lambda(s) \approx 1.033 s$, lo que indica que para el caso de la función de Morlet, los períodos característicos de cada función escalada que se calcula para la transformada es del orden de las escalas que se establecen como entrada para el programa, con un error del orden del 3%.

A continuación se muestra el código completo del programa generado por Torrence & Compo para la transformada wavelet, usado en este trabajo³.

³El cual aparece en la página web paos.colorado.edu/research/wavelets/wave_idl/wavelet.pro.

*APÉNDICE A. ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO MEDIANTE EL USO DE
LA TRANSFORMADA WAVELET*

```
; NAME:    WAVELET
;
; PURPOSE:  Compute the WAVELET transform of a 1D time series.
;
;
; CALLING SEQUENCE:
;
;         wave = WAVELET(Y,DT)
;
;
; INPUTS:
;
;     Y = the time series of length N.
;
;     DT = amount of time between each Y value, i.e. the sampling time.
;
;
; OUTPUTS:
;
;     WAVE is the WAVELET transform of Y. This is a complex array
;     of dimensions (N,J+1). FLOAT(WAVE) gives the WAVELET amplitude,
;     ATAN(IMAGINARY(WAVE),FLOAT(WAVE)) gives the WAVELET phase.
;     The WAVELET power spectrum is ABS(WAVE)^2.
;
;
; OPTIONAL KEYWORD INPUTS:
;
;     S0 = the smallest scale of the wavelet.  Default is 2*DT.
;
;     DJ = the spacing between discrete scales. Default is 0.125.
;         A smaller # will give better scale resolution, but be slower to plot.
;
;     J = the # of scales minus one. Scales range from S0 up to S0*2^(J*DJ),
;         to give a total of (J+1) scales. Default is J = (LOG2(N DT/S0))/DJ.
;
;     MOTHER = A string giving the mother wavelet to use.
;         Currently, 'Morlet', 'Paul', 'DOG' (derivative of Gaussian)
;         are available. Default is 'Morlet'.
;
;     PARAM = optional mother wavelet parameter.
;         For 'Morlet' this is k0 (wavenumber), default is 6.
;         For 'Paul' this is m (order), default is 4.
;         For 'DOG' this is m (m-th derivative), default is 2.
;
;     PAD = if set, then pad the time series with enough zeroes to get
;         N up to the next higher power of 2. This prevents wraparound
;         from the end of the time series to the beginning, and also
;         speeds up the FFT's used to do the wavelet transform.
;         This will not eliminate all edge effects (see COI below).
;
;     LAG1 = LAG 1 Autocorrelation, used for SIGNIF levels. Default is 0.0
```

*APÉNDICE A. ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO MEDIANTE EL USO DE
LA TRANSFORMADA WAVELET*

```

;
;   SIGLVL = significance level to use. Default is 0.95
;
;   VERBOSE = if set, then print out info for each analyzed scale.
;
;   RECON = if set, then reconstruct the time series, and store in Y.
;           Note that this will destroy the original time series,
;           so be sure to input a dummy copy of Y.
;
;   FFT_THEOR = theoretical background spectrum as a function of
;              Fourier frequency. This will be smoothed by the
;              wavelet function and returned as a function of PERIOD.
;
;
; OPTIONAL KEYWORD OUTPUTS:
;
;   PERIOD = the vector of "Fourier" periods (in time units) that corresponds
;            to the SCALEs.
;
;   SCALE = the vector of scale indices, given by  $S0 * 2^{(j * DJ)}$ ,  $j = 0 \dots J$ 
;           where  $J + 1$  is the total # of scales.
;
;   COI = if specified, then return the Cone-of-Influence, which is a vector
;         of N points that contains the maximum period of useful information
;         at that particular time.
;         Periods greater than this are subject to edge effects.
;         This can be used to plot COI lines on a contour plot by doing:
;           IDL> CONTOUR, wavelet, time, period
;           IDL> PLOTS, time, coi, NOCLIP=0
;
;   YPAD = returns the padded time series that was actually used in the
;         wavelet transform.
;
;   DAUGHTER = if initially set to 1, then return the daughter wavelets.
;             This is a complex array of the same size as WAVELET. At each scale
;             the daughter wavelet is located in the center of the array.
;
;   SIGNIF = output significance levels as a function of PERIOD
;
;   FFT_THEOR = output theoretical background spectrum (smoothed by the
;              wavelet function), as a function of PERIOD.
;
;
; [ Defunct INPUTS:
; [   OCT = the # of octaves to analyze over. ]
; [   Largest scale will be  $S0 * 2^{OCT}$ . ]
; [   Default is  $(\text{LOG2}(N) - 1)$ . ]
; [   VOICE = # of voices in each octave. Default is 8. ]
; [   Higher # gives better scale resolution, ]
; [   but is slower to plot. ]
; ]
;
;

```


*APÉNDICE A. ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO MEDIANTE EL USO DE
LA TRANSFORMADA WAVELET*

```

n = N_ELEMENTS(k)
expnt = -(scale*k - k0)^2/2d*(k GT 0.)
dt = 2*!PI/(n*k(1))
norm = SQRT(2*!PI*scale/dt)*(!PI^(-0.25)) ; total energy=N [Eqn(7)]
morlet = norm*EXP(expnt > (-100d))
morlet = morlet*(expnt GT -100) ; avoid underflow errors
morlet = morlet*(k GT 0.) ; Heaviside step function (Morlet is complex)
fourier_factor = (4*!PI)/(k0 + SQRT(2+k0^2)) ; Scale—>Fourier [Sec.3h]
period = scale*fourier_factor
coi = fourier_factor/SQRT(2) ; Cone-of-influence [Sec.3g]
dofmin = 2 ; Degrees of freedom with no smoothing
Cdelta = -1
IF (k0 EQ 6) THEN Cdelta = 0.776 ; reconstruction factor
psi0 = !PI^(-0.25)
; PRINT, scale , n, SQRT(TOTAL(ABS(morlet)^2, /DOUBLE))
RETURN, morlet
END

```

```

FUNCTION paul, $ ;***** PAUL
m, scale , k, period , coi , dofmin , Cdelta , psi0

```

```

IF (m EQ -1) THEN m = 4d
n = N_ELEMENTS(k)
expnt = -(scale*k)*(k GT 0.)
dt = 2d*!PI/(n*k(1))
norm = SQRT(2*!PI*scale/dt)*(2^m/SQRT(m*FACTORIAL(2*m-1)))
paul = norm*((scale*k)^m)*EXP(expnt > (-100d))*(expnt GT -100)
paul = paul*(k GT 0.)
fourier_factor = 4*!PI/(2*m+1)
period = scale*fourier_factor
coi = fourier_factor*SQRT(2)
dofmin = 2 ; Degrees of freedom with no smoothing
Cdelta = -1
IF (m EQ 4) THEN Cdelta = 1.132 ; reconstruction factor
psi0 = 2.^m*FACTORIAL(m)/SQRT(!PI*FACTORIAL(2*m))
; PRINT, scale , n, norm, SQRT(TOTAL(paul^2, /DOUBLE))*SQRT(n)
RETURN, paul
END

```

```

FUNCTION dog, $ ;***** DOG
m, scale , k, period , coi , dofmin , Cdelta , psi0

```

```

IF (m EQ -1) THEN m = 2
n = N_ELEMENTS(k)
expnt = -(scale*k)^2/2d
dt = 2d*!PI/(n*k(1))
norm = SQRT(2*!PI*scale/dt)*SQRT(1d/GAMMA(m+0.5))
I = DCOMPLEX(0,1)
gauss = -norm*(I^m)*(scale*k)^m*EXP(expnt > (-100d))*(expnt GT -100)
fourier_factor = 2*!PI*SQRT(2./(2*m+1))
period = scale*fourier_factor
coi = fourier_factor/SQRT(2)

```


*APÉNDICE A. ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO MEDIANTE EL USO DE
LA TRANSFORMADA WAVELET*

```

dofmin = 1    ; Degrees of freedom with no smoothing
Cdelta = -1
psi0 = -1
IF (m EQ 2) THEN BEGIN
Cdelta = 3.541 ; reconstruction factor
psi0 = 0.867325
ENDIF
IF (m EQ 6) THEN BEGIN
Cdelta = 1.966 ; reconstruction factor
psi0 = 0.88406
ENDIF
;      PRINT, scale ,n ,norm ,SQRT(TOTAL(ABS(gauss)^2 ,/DOUBLE))*SQRT(n)
RETURN, gauss
END

;***** WAVELET
FUNCTION wavelet ,y1 ,dt , $    ;*** required inputs
S0=s0 ,DJ=dj ,J=j , $    ;*** optional inputs
PAD=pad ,MOTHER=mother ,PARAM=param , $
VERBOSE=verbose ,NO_WAVE=no_wave ,RECON=recon , $
LAG1=lag1 ,SIGLVL=siglvl ,DOF=dof ,GLOBAL=global , $    ;*** optional inputs
SCALE=scale ,PERIOD=period ,YPAD=ypad , $    ;*** optional outputs
DAUGHTER=daughter ,COI=coi , $
SIGNIF=signif ,FFT_THEOR=fft_theor , $
OCT=oct ,VOICE=voice    ;*** defunct inputs

ON_ERROR,2
r = CHECK_MATH(0,1)
n = N_ELEMENTS(y1)
n1 = n
base2 = FIX(ALOG(n)/ALOG(2) + 0.4999)    ; power of 2 nearest to N

;...check keywords & optional inputs
IF (N_ELEMENTS(s0) LT 1) THEN s0 = 2.0*dt
IF (N_ELEMENTS(voice) EQ 1) THEN dj = 1./voice
IF (N_ELEMENTS(dj) LT 1) THEN dj = 1./8
IF (N_ELEMENTS(oct) EQ 1) THEN J = FLOAT(oct)/dj
IF (N_ELEMENTS(J) LT 1) THEN J=FIX(((ALOG(FLOAT(n)*dt/s0)/ALOG(2))/dj)    ;[Eqn(10)]
IF (N_ELEMENTS(mother) LT 1) THEN mother = 'MORLET'
IF (N_ELEMENTS(param) LT 1) THEN param = -1
IF (N_ELEMENTS(siglvl) LT 1) THEN siglvl = 0.95
IF (N_ELEMENTS(lag1) LT 1) THEN lag1 = 0.0
lag1 = lag1(0)
verbose = KEYWORD_SET(verbose)
do_daughter = KEYWORD_SET(daughter)
do_wave = NOT KEYWORD_SET(no_wave)
recon = KEYWORD_SET(recon)
IF KEYWORD_SET(global) THEN MESSAGE, $
'Please use WAVE_SIGNIF for global significance tests'

;...construct time series to analyze, pad if necessary

```

*APÉNDICE A. ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO MEDIANTE EL USO DE
LA TRANSFORMADA WAVELET*

```

ypad = y1 - TOTAL(y1)/n      ; remove mean
IF KEYWORD_SET(pad) THEN BEGIN  ; pad with extra zeroes, up to power of 2
ypad = [ypad,FLTARR(2L^(base2 + 1) - n)]
n = N_ELEMENTS(ypad)
ENDIF

;...construct SCALE array & empty PERIOD & WAVE arrays
na = J + 1                    ; # of scales
scale = DINDGEN(na)*dj        ; array of j-values
scale = 2d0^(scale)*s0        ; array of scales 2^j [Eqn(9)]
period = FLTARR(na,/NOZERO)  ; empty period array (filled in below)
wave = COMPLEXARR(n,na,/NOZERO) ; empty wavelet array
IF (do_daughter) THEN daughter = wave ; empty daughter array

;...construct wavenumber array used in transform [Eqn(5)]
k = (DINDGEN(n/2) + 1)*(2*!PI)/(DOUBLE(n)*dt)
k = [0d,k,-REVERSE(k(0:(n-1)/2 - 1))]

;...compute FFT of the (padded) time series
yfft = FFT(ypad,-1,/DOUBLE) ; [Eqn(3)]

IF (verbose) THEN BEGIN ;verbose
PRINT
PRINT,mother
PRINT,'# points=',n1,' s0=',s0,' dj=',dj,' J=',FIX(J)
IF (n1 NE n) THEN PRINT,'(padded with ',n-n1,' zeroes)'
PRINT,['j','scale','period','variance','mathflag'], $
FORMAT='(/,A3,3A11,A10)'
ENDIF ;verbose
IF (N_ELEMENTS(fft_theor) EQ n) THEN fft_theor_k = fft_theor ELSE $
fft_theor_k = (1-lag1^2)/(1-2*lag1*COS(k*dt)+lag1^2) ; [Eqn(16)]
fft_theor = FLTARR(na)

;...loop thru each SCALE
FOR a1=0,na-1 DO BEGIN ;scale
psi_fft=CALL FUNCTION(mother, $
param, scale(a1),k,period1,coi,dofmin,Cdelta,psi0)
IF (do_wave) THEN $
wave(*,a1) = FFT(yfft*psi_fft,1,/DOUBLE) ;wavelet transform [Eqn(4)]
period(a1) = period1 ; save period
fft_theor(a1) = TOTAL((ABS(psi_fft)^2)*fft_theor_k)/n
IF (do_daughter) THEN $
daughter(*,a1) = FFT(psi_fft,1,/DOUBLE) ; save daughter
IF (verbose) THEN PRINT,a1,scale(a1),period(a1), $
TOTAL(ABS(wave(*,a1))^2),CHECK_MATH(0), $
FORMAT='(I3,3F11.3,I6)'
ENDFOR ;scale

coi = coi*[FINDGEN((n1+1)/2),REVERSE(FINDGEN(n1/2))]*dt ; COI [Sec.3g]

IF (do_daughter) THEN $ ; shift so DAUGHTERS are in middle of array
daughter = [daughter(n-n1/2:*,*),daughter(0:n1/2-1,*)]

```

*APÉNDICE A. ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO MEDIANTE EL USO DE
LA TRANSFORMADA WAVELET*

```
;... significance levels [Sec.4]
sdev = (MOMENT(y1))(1)
fft_theor = sdev*fft_theor ; include time-series variance
dof = dofmin
signif = fft_theor*CHISQR_CVF(1. - siglvl ,dof)/dof ; [Eqn(18)]

IF (recon) THEN BEGIN ; Reconstruction [Eqn(11)]
IF (Cdelta EQ -1) THEN BEGIN
y1 = -1
MESSAGE,/INFO, $
'Cdelta undefined, cannot reconstruct with this wavelet'
ENDIF ELSE BEGIN
y1=dj*SQRT(dt)/(Cdelta*psi0)*(FLOAT(wave) # (1./SQRT(scale)))
y1 = y1 [0:n1-1]
ENDELSE
ENDIF

RETURN,wave(0:n1-1,*) ; get rid of padding before returning

END
```

Referencias

- Bavassano, B. y Bruno, R.: Large-scale solar wind fluctuations in the inner heliosphere at low solar activity, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 94, 168–176, 1989.
- Bavassano, B. y Bruno, R.: Solar wind fluctuations at large scale: A comparison between low and high solar activity conditions, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 96, 1737–1744, 1991.
- Bittencourt, J. A.: *Fundamentals of plasma physics*, Springer Science & Business Media, 2013.
- Borovsky, J. E.: Contribution of strong discontinuities to the power spectrum of the solar wind, *Physical review letters*, 105, 111102, 2010.
- Borovsky, J. E. y Denton, M. H.: Solar wind turbulence and shear: A superposed-epoch analysis of corotating interaction regions at 1 AU, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115, 2010.
- Bougeret, J., Kaiser, M., Kellogg, P., Manning, R., Goetz, K., et al.: Waves: The radio and plasma wave investigation on the Wind spacecraft, *Space Science Reviews*, 71, 231–263, 1995.
- Bougeret, J. L., Goetz, K., Kaiser, M., Bale, S., et al.: S/WAVES: The radio and plasma wave investigation on the STEREO mission, *Space Science Reviews*, 136, 487–528, 2008.
- Burlaga, L., Sittler, E., Mariani, F., y Schwenn, R.: Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observa-

- tions, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* (1978–2012), 86, 6673–6684, 1981.
- Burlaga, L. F.: Micro-scale structures in the interplanetary medium, *Solar Physics*, 4, 67–92, 1968.
- Chen, J.: Physics of erupting solar flux ropes: Coronal mass ejections (CMEs)—Recent advances in theory and observation, *Physics of Plasmas*, 24, 090 501, 2017.
- Chui, C. K.: *An introduction to wavelets*, Academic Press, 1992.
- Cohen, L.: Time-frequency distributions: a review, *Proceedings of the IEEE*, 77, 941–981, 1989.
- Cravens, T. E.: *Physics of solar system plasmas*, Cambridge University Press, 2004.
- Crooker, N., Shodhan, S., Gosling, J., Simmerer, J., Lepping, R., Steinberg, J., y Kahler, S.: Density extremes in the solar wind, *Geophysical research letters*, 27, 3769–3772, 2000.
- Dasso, S., Démoulin, P., y Gulisano, A. M.: Magnetic clouds along the solar cycle: expansion and magnetic helicity, *Proceedings of the International Astronomical Union*, 7, 139–148, 2011.
- Démoulin, P.: A review of the quantitative links between CMEs and magnetic clouds, in: *Annales geophysicae: atmospheres, hydrospheres and space sciences*, vol. 26, p. 3113, 2008.
- Driesman, A., Hynes, S., y Cancro, G.: The STEREO observatory, *Space Science Reviews*, 136, 17–44, 2008.
- Galvin, A., Kistler, L., Popecki, M., Farrugia, C., et al.: The Plasma and Suprathermal Ion Composition (PLASTIC) investigation on the STEREO observatories, in: *The STEREO Mission*, pp. 437–486, Springer, 2008.
- Gao, R. X. y Yan, R.: *Wavelets: Theory and applications for manufacturing*, Springer Science & Business Media, 2010.

- Gloeckler, G., Balsiger, H., Bürgi, A., Bochsler, P., Fisk, L. A., Galvin, A., Geiss, J., et al.: The solar wind and suprathermal ion composition investigation on the WIND spacecraft, *Space Science Reviews*, 71, 79–124, 1995.
- Gopalswamy, N., Yashiro, S., Michalek, G., Xie, H., Mäkelä, P., Vourlidas, A., y Howard, R.: A catalog of halo coronal mass ejections from SOHO, *Sun and Geosphere*, 5, 7–16, 2010.
- Gosling, J. y Pizzo, V.: Formation and evolution of corotating interaction regions and their three dimensional structure, in: *Corotating Interaction Regions*, pp. 21–52, Springer, 1999.
- Guo, J., Feng, X., Zhang, J., Zuo, P., y Xiang, C.: Statistical properties and geoefficiency of interplanetary coronal mass ejections and their sheaths during intense geomagnetic storms, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115, 2010.
- Harten, R. y Clark, K.: The design features of the GGS Wind and Polar spacecraft, *Space Science Reviews*, 71, 23–40, 1995.
- Howard, R. A., Moses, J. D., Vourlidas, A., Newmark, J., Socker, D., Plunkett, S., Korendyke, C., Cook, J., Hurley, A., Davila, J., et al.: Sun Earth connection coronal and heliospheric investigation (SECCHI), *Space Science Reviews*, 136, 67, 2008.
- Howard, T.: *Coronal mass ejections: An introduction*, vol. 376, Springer, 2011.
- Huang, Y., Song, Q.-W., y Li, D.: Statistical study of co-rotating interaction region properties with STEREO and ACE observations, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 17, 111, 2017.
- Hundhausen, A., Sawyer, C., House, L., Illing, R., y Wagner, W.: Coronal mass ejections observed during the Solar Maximum Mission: Latitude distribution and rate of occurrence, *Journal of Geophysical Research: Space Physics (1978–2012)*, 89, 2639–2646, 1984.

- Illing, R. y Hundhausen, A.: Observation of a coronal transient from 1.2 to 6 solar radii, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* (1978–2012), 90, 275–282, 1985.
- Jian, L., Russell, C., Luhmann, J., y Skoug, R.: Properties of stream interactions at one AU during 1995–2004, *Solar Physics*, 239, 337–392, 2006.
- Jian, L., Russell, C., Luhmann, J., Galvin, A., y Simunac, K.: Solar wind observations at STEREO: 2007–2011, in: *AIP Conference Proceedings*, vol. 1539, pp. 191–194, AIP, 2013.
- Jian, L., Russell, C., Luhmann, J., y Galvin, A.: STEREO Observations of Interplanetary Coronal Mass Ejections in 2007–2016, *The Astrophysical Journal*, 855, 114, 2018.
- Kallenrode, M.-B.: *Space Physics: An Introduction to Plasmas and Particles in the Heliosphere and Magnetospheres*, Springer Science & Business Media, 2004.
- Kivelson, M. G. y Russell, C. T.: *Introduction to space physics*, Cambridge University Press, 1995.
- Kompaneyets, A.: *Theoretical Physics*, Dover Publications, 1962.
- Landau, L. y Lifshitz, E.: *Statistical Physics 3ra Ed. (Parte 1)*, Oxford Pergamon Press., 1980.
- Lau, K. y Weng, H.: Climate signal detection using wavelet transform: How to make a time series sing, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76, 2391–2402, 1995.
- Lee, M. A.: An analytical theory of the morphology, flows, and shock compressions at corotating interaction regions in the solar wind, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 105, 10 491–10 500, 2000.
- Lepping, R., Acuña, M., Burlaga, L., Farrell, W., Slavin, J., Schatten, K., Mariani, F., Ness, N., Neubauer, F., Whang, Y., et al.: The

- WIND magnetic field investigation, *Space Science Reviews*, 71, 207–229, 1995.
- Lin, R., Anderson, K., Ashford, S., Carlson, C., Curtis, D., Ergun, R., Larson, D., McFadden, J., McCarthy, M., Parks, G., et al.: A three-dimensional plasma and energetic particle investigation for the Wind spacecraft, *Space Science Reviews*, 71, 125–153, 1995.
- Luhmann, J., Curtis, D., Schroeder, P., McCauley, J., Lin, R., et al.: STEREO IMPACT investigation goals, measurements, and data products overview, *Space Science Reviews*, 136, 117–184, 2008.
- Manchester, W., Kilpua, E. K., Liu, Y. D., Lugaz, N., Riley, P., Török, T., y Vršnak, B.: The physical processes of CME/ICME evolution, *Space Science Reviews*, pp. 1–61, 2017.
- Manoharan, P., Gopalswamy, N., Yashiro, S., Lara, A., Michalek, G., y Howard, R.: Influence of coronal mass ejection interaction on propagation of interplanetary shocks, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 109, 2004.
- Mitsakou, E. y Moussas, X.: Statistical study of ICMEs and their sheaths during solar cycle 23 (1996–2008), *Solar Physics*, 289, 3137–3157, 2014.
- Niembro, T. y Lara, A.: Identifying large scale structures at 1 AU using fluctuations and wavelets, in: *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2016.
- Niembro-Hernández, R. T.: Identificación de eyecciones de masa coronal y su interacción con otras estructuras de gran escala en el medio interplanetario (Tesis de Doctorado), UNAM, 2018.
- Nieves-Chinchilla, T., Vourlidas, A., Raymond, J., et al.: Understanding the Internal Magnetic Field Configurations of ICMEs Using More than 20 Years of Wind Observations, *Solar Physics*, 293, 25, 2018.
- Ogilvie, K., Chornay, D., Fritzenreiter, R., Hunsaker, F., Keller, J., Lobell, J., Miller, G., Scudder, J., Sittler, E., Torbert, R., et al.:

- SWE, a comprehensive plasma instrument for the Wind spacecraft, *Space Science Reviews*, 71, 55–77, 1995.
- Ogilvie, K. W. y Parks, G. K.: First results from WIND spacecraft: An introduction, *Geophysical research letters*, 23, 1179–1181, 1996.
- Owens, M., Cargill, P., Pagel, C., Siscoe, G., y Crooker, N.: Characteristic magnetic field and speed properties of interplanetary coronal mass ejections and their sheath regions, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110, 2005.
- Robbrecht, E., Berghmans, D., y Van der Linden, R.: Automated LASCO CME catalog for solar cycle 23: are CMEs scale invariant?, *The Astrophysical Journal*, 691, 1222, 2009.
- Rouillard, A.: Relating white light and in situ observations of coronal mass ejections: A review, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73, 1201–1213, 2011.
- Shodhan, S., Crooker, N., Fitzenreiter, R., Lepping, R., y Steinberg, J.: Density enhancements in the solar wind, in: *AIP Conference Proceedings*, vol. 471, pp. 601–604, AIP, 1999.
- Siscoe, G. y Intriligator, D.: Three views of two giant streams: Aligned observations at 1 AU, 4.6 AU, and 5.9 AU, *Geophysical research letters*, 20, 2267–2270, 1993.
- Tappin, S. y Howard, T.: Direct observation of a corotating interaction region by three spacecraft, *The Astrophysical Journal*, 702, 862, 2009.
- Torrence, C. y Compo, G. P.: A practical guide to wavelet analysis, *Bulletin of the American Meteorological society*, 79, 61–78, 1998.
- Tu, C.-Y. y Marsch, E.: On the nature of compressive fluctuations in the solar wind, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 99, 21 481–21 509, 1994.
- Von Rosenvinge, T., Barbier, L., Karsch, J., Liberman, R., Madden, M., Nolan, T., Reames, D., Ryan, L., Singh, S., Trexel, H., et al.:

-
- The energetic particles: acceleration, composition, and transport (EPACT) investigation on the Wind spacecraft, *Space Science Reviews*, 71, 155–206, 1995.
- Vourlidas, A., Howard, R. A., Esfandiari, E., Patsourakos, S., Yashiro, S., y Michalek, G.: ERRATUM: Comprehensive analysis of coronal mass ejection mass and energy properties over a full solar cycle, *The Astrophysical Journal*, 730, 2011.
- Vourlidas, A., Lynch, B. J., Howard, R. A., y Li, Y.: How many CMEs have flux ropes? Deciphering the signatures of shocks, flux ropes, and prominences in coronagraph observations of CMEs, *Solar Physics*, 284, 179–201, 2013.
- Webb, D. F. y Howard, T. A.: Coronal mass ejections: Observations, *Living Reviews in Solar Physics*, 9, 3–83, 2012.
- Zhang, J., Poomvises, W., y Richardson, I.: Sizes and relative geoeffectiveness of interplanetary coronal mass ejections and the preceding shock sheaths during intense storms in 1996–2005, *Geophysical Research Letters*, 35, 2008.
- Zhang, J., Cheng, X., y Ding, M.-D.: Observation of An Evolving Magnetic Flux Rope Prior To and During A Solar Eruption, arXiv preprint arXiv:1203.4859, 2012.
- Zhang, J., Hess, P., y Poomvises, W.: A Comparative Study of Coronal Mass Ejections with and Without Magnetic Cloud Structure near the Earth: Are All Interplanetary CMEs Flux Ropes?, *Solar Physics*, 284, 89–104, 2013.