



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

**ANÁLISIS DE LOS FENÓMENOS SOLARES E INTERPLANETARIOS CAUSANTES
DE LOS DECRECIMIENTOS FORBUSH EN LOS RAYOS CÓSMICOS.**

T E S I S

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

PRESENTA:

Fis. OMAR OCTAVIO MUSALEM RAMÍREZ

ASESOR: DR. JOSÉ FRANCISCO VALDÉS GALICIA (INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM)

COMITÉ TUTOR:

DR. JUAN AMÉRICO GONZÁLEZ ESPARZA (INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNIDAD MORELIA)

DR. LUIS XAVIER GONZÁLEZ MÉNDEZ (INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM)

DRA. VERÓNICA Z. ONTIVEROS HERNÁNDEZ (ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA, UNAM)

DR. LUIS MANUEL VILLASEÑOR CENDEJAS (PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA)

MÉXICO D.F. JUNIO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

Quiero agradecerle de manera muy especial a mi padre, que siempre ha estado conmigo, apoyándome en todo momento, ha sido el pilar más importante en mi vida, nunca terminare de agradecerte todo lo que has hecho por mí, te aprecio y te admiro demasiado. A mi madre, que no se encuentra físicamente pero la llevo en el corazón.

A mi familia, aunque no tenga mucho contacto con todos, pero siempre estamos apoyándonos.

A todos mis amigos, que en verdad puedo llamar amigos (no los nombro pero ustedes saben quienes son); han recorrido conmigo este camino de la vida, en verdad que es un placer vivir con ustedes, son mi segunda familia y aun falta mucho que recorrer, y a toda la gente que ha estado apoyándome de cualquier forma, un agradecimiento infinito.

A mi tutor, el Dr. José Francisco Valdés Galicia, que me ha apoyado con sus conocimientos, experiencia, consejos y amistad durante todo este tiempo que he comenzado mis primeros pasos en la física espacial, esperando poder contar con su sabiduría mucho tiempo más.

A los miembros de mi comité tutor, por sus revisiones, consejos y valiosos comentarios realizados a este trabajo, en verdad me ayudaron mucho. Espero poder contar con su presencia más adelante para seguir enriqueciendo mi camino.

A todos los miembros del grupo de rayos cósmicos del Instituto de Geofísica de la UNAM: Octavio Musalem, Alejandro Hurtado, Ernesto Ortiz, Luis Xavier González, Marco Barrantes, Marcos Anzorena, Rocío García, Roberto Taylor y a todos los que han pertenecido alguna vez a este grupo y que por alguna u otra razón, ya no estan.

A CONACYT que me brindo una beca para poder seguir mis estudios de posgrado.

Al Instituto de Geofísica, que me ha brindado un lugar en donde poder realizar mis actividades.

"Hay grandes hombres que hacen a todos los demás sentirse pequeños. Pero la verdadera grandeza consiste en hacer que todos se sientan grandes."

Charles Dickens

Índice general

1. Rayos cósmicos. Introducción	1
1.1. Antecedentes históricos.	1
1.2. Características de los rayos cósmicos.	4
1.2.1. Composición.	4
1.2.2. Espectro de energía.	5
1.2.3. Rigidez magnética.	6
1.2.4. Efecto Este-Oeste. Conos de Störmer.	6
1.2.5. Rigidez umbral y el efecto latitudinal.	7
1.3. Variaciones de la intensidad de los rayos cósmicos.	9
1.3.1. Variación diurna.	9
1.3.2. Variación de 11 y 22 años.	10
1.3.3. Decrecimientos Forbush.	12
2. El Sol, medio interplanetario: características y fenómenos importantes.	17
2.1. El Sol	17
2.1.1. Fotósfera	17
2.1.2. Cromósfera	18
2.1.3. Corona	18
2.1.4. Campo magnético	19
2.2. Medio interplanetario	20
2.2.1. Campo magnético interplanetario	20
2.2.2. Viento solar	24
2.3. Fenómenos Solares	25
2.3.1. Ráfagas solares	25
2.3.2. Prominencias solares.	27
2.4. Eyecciones de masa coronal	28
2.4.1. Propiedades	30
2.4.2. Eyecciones de masa coronal interplanetarias	31
2.5. Región de interacción de corrientes.	34
2.6. Ondas de choque.	40
2.6.1. Ondas de choque magnetohidrodinámicas.	42
3. Decrecimientos Forbush: definición y parámetros del medio interplanetario involucrados en su análisis.	45
3.1. Parametros del medio interplanetario.	45
3.1.1. Campo magnético.	45
3.1.2. Velocidad.	46

3.1.3.	Densidad y temperatura.	47
3.1.4.	Beta del plasma (β).	47
3.1.5.	Parámetro T_P/T_{exp}	48
3.1.6.	Presión total del plasma perpendicular al campo magnético.	49
3.1.7.	Identificación de EMCI's y RIC's.	53
3.2.	Índice Dst	53
4.	Análisis de decrecimientos Forbush	55
4.1.	Construcción de la base de datos.	55
4.2.	Análisis de eventos seleccionados	61
4.2.1.	Consideraciones previas	61
4.2.2.	Evento 1	62
4.2.3.	Evento 2	65
4.2.4.	Evento 3	68
4.2.5.	Evento 4	71
4.2.6.	Evento 5	74
4.2.7.	Evento 6	78
4.2.8.	Evento 7	81
4.2.9.	Evento 8	84
4.2.10.	Evento 9	87
4.3.	Conclusiones	91
	Bibliografía	93

1 Rayos cosmicos. Introducción

La radiación cósmica (o rayos cósmicos, como son mayormente conocidos) (RC) son un tipo de radiación extraterrestre, que proviene de distintas fuentes en el Universo. Lo que diferencia a este tipo de radiación de cualquier otra que llega del espacio, es su gran energía, que va desde 10^6 eV¹ hasta los 10^{21} eV. Llegan a la Tierra en todas direcciones y su composición primordial son núcleos atómicos totalmente despojados de sus electrones, la gran mayoría (90 %) son núcleos de Hidrógeno (protones).

Aunque el mayor porcentaje de los rayos cósmicos provienen de regiones fuera del sistema solar, también el Sol produce partículas, los denominados rayos cósmicos solares, que se producen en eventos energéticos en la atmósfera solar.

El estudio de los rayos cósmicos es muy importante, ya que son la única fuente de información material que el Universo nos brinda. Debido a que los rayos cósmicos primarios son partículas cargadas, se ven afectados por los campos electromagnéticos que se encuentran en su trayectoria; de este modo, la heliósfera (ver Cap.2) con sus distintos campos electromagnéticos asociados, interacciona con los rayos cósmicos primarios, por lo que al determinar la naturaleza de esta radiación y como interaccionaron podemos tener una idea de cómo se comporta el Sol.

1.1. Antecedentes históricos.

Entre 1898 y 1900 J. Elster y H. Geitel y C.T.R. Wilson realizaron experimentos para demostrar la pérdida de la carga en un electroscopio, que se colocó sobre un soporte aislante. Encontraron que la conductividad del aire en el interior del electroscopio era permanente, a pesar de que continuamente se extraían iones del interior (el electroscopio se encontraba conectado a un voltímetro para medir la intensidad de la descarga). Debido a que el electroscopio estaba aislado, no era el aire el que estaba descargándolo, por lo que atribuyeron la descarga a una “radiación extraña”.

Se pensó que la “radiación extraña” que descargaba a los electroscopios provenía del suelo (generada por la Tierra), ya que años antes se había descubierto la radioactividad, se atribuyeron a algunos elementos radiactivos presentes en la superficie terrestre como los causantes de la radiación ionizante; así que fue lógico el pensar que la ionización decrecería con la altura.

¹1 eV= 1.602×10^{-19} J.

En 1910 T. Wulf y A. Gockel realizaron experimentos para determinar la dependencia de la ionización de los electros copios con la altura: Wulf a 300 m (torre Eiffel) y Gockel a 4500 m (vuelo en globo), encontrando que la ionización decrecía con la altura, como era de esperarse.

En 1911 V.F. Hess realizó diez ascensos en globo llevando electros copios, encontrando que al principio la ionización decrecía con la altura como se había confirmado anteriormente; sin embargo, después de un punto crítico (≈ 1800 m.s.n.m.) las observaciones cambiaron drásticamente: la ionización empezaba a aumentar exponencialmente.

La conclusión derivada de los resultados de Hess fue contundente: existía una radiación muy penetrante, hasta ese entonces desconocida, que llegaba a la atmósfera desde afuera, no podía ser de origen solar dado que no se observaba diferencia alguna entre el día y la noche.

W. Kollhörster extendió dichas observaciones a alturas aún mayores, confirmando que la ionización continuaba aumentando a una altura de 9300 m, donde la ionización era aproximadamente de 50 veces con respecto a la encontrada al nivel del mar.

Tiempo más tarde, utilizando cohetes, se tuvieron datos sobre la variación de la ionización y el número de cuentas de la radiación cósmica conforme aumentaba la altura sobre la superficie terrestre. Se encontró que ciertamente, en un principio el número de coincidencias aumentaba gradualmente para después aumentar exponencialmente, pero esto no continúa indefinidamente, sino que existe una cierta altura en donde el número de cuentas llega a su máximo para después descender y mantenerse constante.

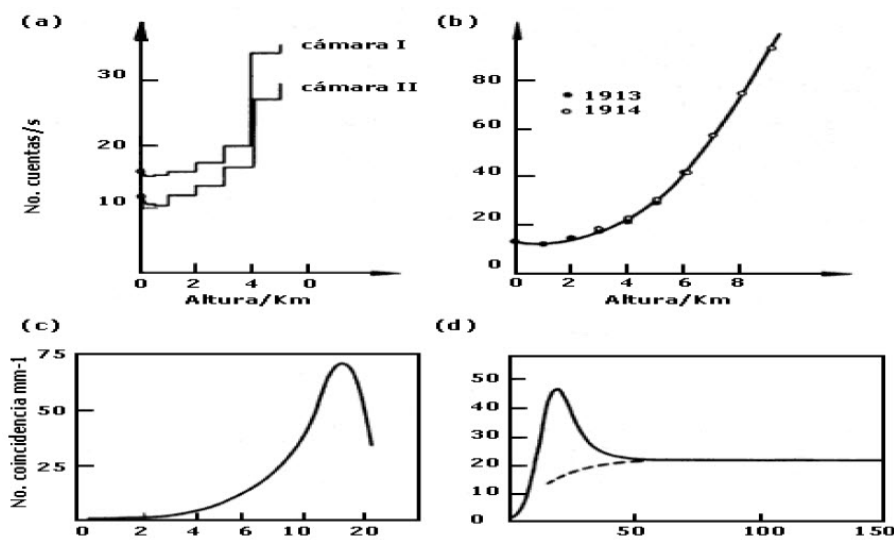


Figura 1.1: Gráficas del número de cuentas (o coincidencias) contra altura (en kilómetros) de las distintas mediciones hechas: a) realizadas por Hess en 1912; b) realizadas por Kollhörster en 1913 y 1914; c) realizada por Pfitzer (1936) y d) uno de los primeros vuelos en cohete. [OJA95]

En la Fig. 1.1 se tienen imágenes de las observaciones antes mencionadas; en particular la Fig.1.d) da una idea de cómo se comportan los rayos cósmicos primarios al interaccionar con la atmósfera terrestre: a grandes distancias (magnetosfera terrestre) el flujo de rayos cósmicos primarios es “constante”, conforme se van acercando más a la Tierra empiezan a encontrarse con la atmósfera, que cada vez se va haciendo más densa hasta llegar a la superficie terrestre; dichos rayos cósmicos primarios deberían seguir el patrón indicado con la línea punteada; sin embargo, debido a que tienen una gran energía son capaces tanto de ionizar a los átomos atmosféricos como de interaccionar con los núcleos atómicos, generando el fenómeno conocido como *chubascos atmosféricos*, por lo que hay una generación de partículas; de ahí que a una cierta altura las cuentas de radiación cósmica se eleven para después descender.

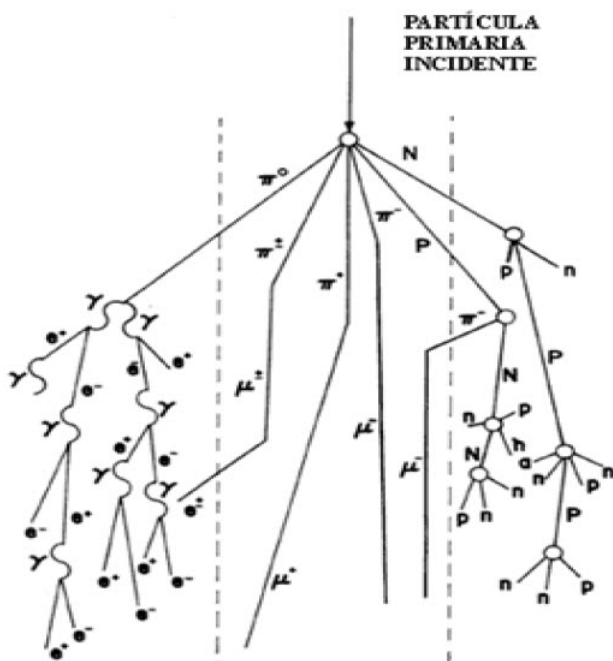


Figura 1.2: Chubasco atmosférico con sus 3 componentes: la nucleónica o nuclear-activa (derecha) la dura o muónica (en medio) y la blanda o electromagnética (izquierda).[OJA95]

En la Fig. 1.2 se muestra un diagrama de un chubasco atmosférico, dividido por componentes:

- La componente nucleónica se origina a partir de la interacción de partículas primarias de baja energía con átomos atmosféricos, desintegrando a estos últimos; los nucleones resultantes interaccionan con la materia que se encuentran, formando pequeñas cascadas. El flujo de esta componente decrece rápidamente con la profundidad atmosférica.
- La componente muónica se origina cuando las partículas primarias son de mayor energía, dando como resultado colisiones inelásticas en donde parte de

la energía se ha ido en la creación de piones (π). Los piones son partículas inestables, los que tienen carga positiva o negativa decaen en muones de la misma carga respectivamente. Los piones neutros decaen en rayos gamma.

- La componente electromagnética se origina de los rayos gamma, que pueden crear electrones y positrones que a su vez generan rayos gamma; produciéndose una cascada electromagnética.

1.2. Características de los rayos cósmicos.

1.2.1. Composición.

Como se mencionó anteriormente, los rayos cósmicos primarios son principalmente núcleos atómicos (partículas positivas), En la tabla 1 se muestra su composición.

Grupo	Elemento	Número atómico	Porcentaje Abundancia en los RC
Protón	H	1	93.00
Alfa	He	2	6.30
Ligeros	Li,Be,B	3-5	0.10
Medianos	C,N,O,F	6-9	0.42
Pesados	Ne-K	10-19	0.14
Muy pesados	Ca-Zn	20-30	0.04
Muy muy pesados	Ga-U	31-92	2×10^{-6}
Súper pesados	>U	110	¿?

Cuadro 1.1: Abundancia relativa de los rayos cósmicos primarios [OJA95]

1.2.2. Espectro de energía.

Los rayos cósmicos primarios presentan un espectro de energía como el que se presenta en la Fig. 1.3:

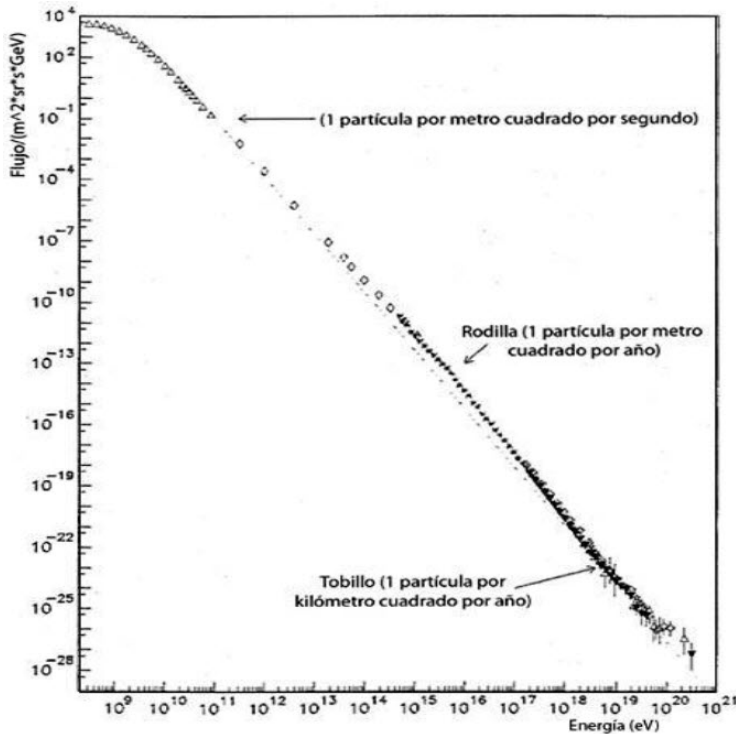


Figura 1.3: Espectro de energía de los rayos cósmicos. Se grafica el flujo de partículas con respecto a su energía asociada [OJA95]

El espectro de energía de la radiación cósmica primaria describe como están distribuidas las energías asociadas a cada una de las diferentes componentes de la radiación cósmica.

En la Fig.1.3. se puede observar que el espectro se aplanan hacia las bajas energías ($E \leq 10\text{GeV}$), esto refleja la influencia del Sol en el transporte de estos rayos cósmicos a través de la heliósfera. Los rayos cósmicos con energías de 10^9 eV o menores son susceptibles a variaciones del campo magnético del medio interplanetario, ya que su energía no es suficiente como para oponer resistencia a dichos cambios, por lo que el flujo detectado en la superficie terrestre depende de la fase del ciclo solar en que se produzcan: en el mínimo de la actividad solar el flujo es mayor, mientras que en el máximo el flujo es menor (ver Cap.1.3.2).

1.2.3. Rigidez magnética.

Sabemos que cuando una partícula cargada se mueve en presencia de un campo magnético experimenta una fuerza deflectora: la fuerza de Lorentz, que actúa perpendicularmente tanto a la dirección de propagación como a la dirección del campo magnético.

Se define el radio de Larmor r_L para una partícula moviéndose en un campo magnético homogéneo como:

$$r_L = \frac{V_p}{\omega_c} = \frac{mV_p}{qB}$$

Donde q es la carga de la partícula, m su masa, B la magnitud del campo magnético en el que la partícula se encuentra, V_p la magnitud de la componente perpendicular de la velocidad, con respecto a B y ω_c es la frecuencia de Larmor. Si definimos $q = Ze$ y $p = mv$ como la carga por el número atómico y el momento lineal de la partícula respectivamente, entonces se tiene:

$$Br_L = \frac{mV_p}{q} = \frac{p}{Ze}$$

Como el radio de curvatura dado por r_L es proporcional al momento lineal, la cantidad p/Ze puede ser considerada como una medida de la resistencia de la partícula a ser desviada por el campo. A esta cantidad se le conoce como *rigidez magnética*.

1.2.4. Efecto Este-Oeste. Conos de Störmer.

Si se posiciona en un punto sobre la Tierra y se coloca un detector, se observa que al detectar partículas con carga positiva y de una rigidez magnética dada, existe un cono de direcciones prohibidas, cuyo eje apunta hacia el este. Si los rayos cósmicos son partículas cargadas positivamente, llegarán a la Tierra en menor número desde el este del firmamento que de las regiones al oeste del punto en donde estamos posicionados; si por el contrario las partículas tienen carga negativa la situación es la opuesta (Fig.1.4.). Esta asimetría se conoce como efecto este-oeste.

En la Fig. 1.4. se tiene un esquema que representa los dos conos de direcciones prohibidas llamados conos de Störmer. En el esquema superior se observa el cono de direcciones prohibidas para partículas positivas y en el inferior el cono para partículas negativas.

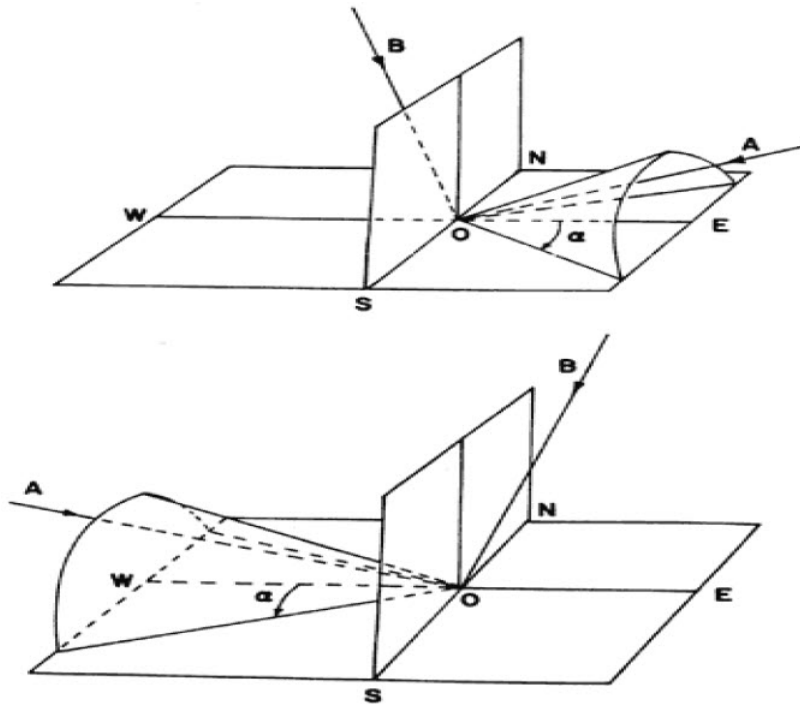


Figura 1.4: Conos de Störmer para partículas positivas (arriba) y para partículas negativas (abajo). [OJA95]

1.2.5. Rigidez umbral y el efecto latitudinal.

El campo magnético terrestre tiene, a grandes rasgos, una estructura muy parecida a la de un dipolo. Sin embargo, su estructura se encuentra en constante cambio debido a la contribución de corrientes externas; la componente externa más importante es la debida a la presencia del viento solar, que al interactuar con el campo geomagnético interno lo "comprime" del lado día y lo "estira" del lado noche, de esta manera se genera la magnetosfera.

Si se coloca un detector de rayos cósmicos apuntando hacia el cenit, se verá que el detector recibe todas las partículas de rigideces magnéticas altas. Si se mide cada vez el flujo de rigideces magnéticas menores, se observa que existe una rigidez por debajo de la cual no se detecta partícula alguna, a ésta se le conoce con el nombre de rigidez umbral.

Para cada punto de la Tierra, cada dirección de acercamiento, época del año y tiempo local existe una rigidez umbral. Si se desplaza el detector vertical, desde el ecuador hacia los polos, se observará que la rigidez umbral decrece; es decir, partículas con rigideces pequeñas, que no pueden alcanzar puntos sobre la Tierra a bajas latitudes, podrán llegar a ésta a latitudes mayores. A este fenómeno se conoce como efecto latitudinal.

En la Fig.1.5. se observa una gráfica de la intensidad de los rayos cósmicos con respecto a la latitud; el mínimo se encuentra aproximadamente a 0° (ecuador)², lo que indica que el flujo de rayos cósmicos que penetran a esta latitud es el menor, conforme se aleja hacia cualquiera de los polos, el flujo va aumentando hasta llegar aproximadamente a los 60° , donde se alcanza el máximo de intensidad, que se mantiene hasta llegar a los polos (90°).

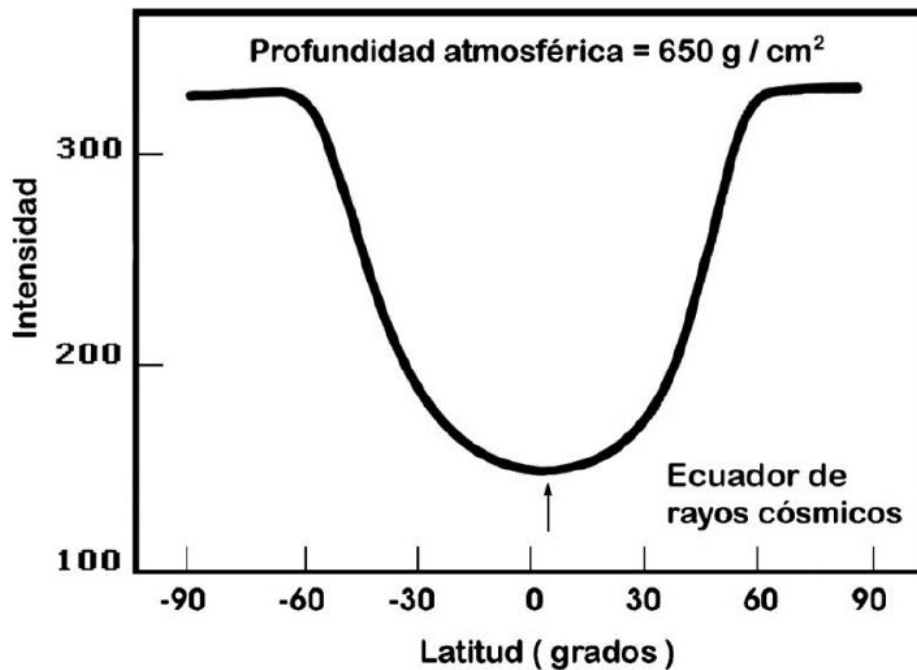


Figura 1.5: Intensidad de los rayos cósmicos con respecto a la latitud. [OJA95]

²El mínimo de intensidad realmente se encuentra en el ecuador magnético, que está desplazado con respecto al ecuador geográfico, de ahí que en la Fig.5, se observe ese pequeño desplazamiento del mínimo, con respecto al ecuador geográfico.

1.3. Variaciones de la intensidad de los rayos cósmicos.

Existen distintos fenómenos terrestres que afectan la intensidad de la radiación cósmica detectada en la superficie, como son las variaciones atmosféricas: presión, temperatura, humedad, viento, entre muchas otras. Sin embargo, existen variaciones que no dependen de las condiciones atmosféricas. Sólo se mencionarán las más representativas.

1.3.1. Variación diurna.

Esta variación se debe al transporte de los rayos cósmicos por el viento solar.

Básicamente los rayos cósmicos están influenciados por dos procesos en el medio interplanetario: el flujo difusivo hacia adentro de la heliósfera, a lo largo de las líneas de campo magnético interplanetario y el flujo convectivo, hacia afuera de la heliósfera, resultado de la expansión del viento solar (Fig. 1.6.).

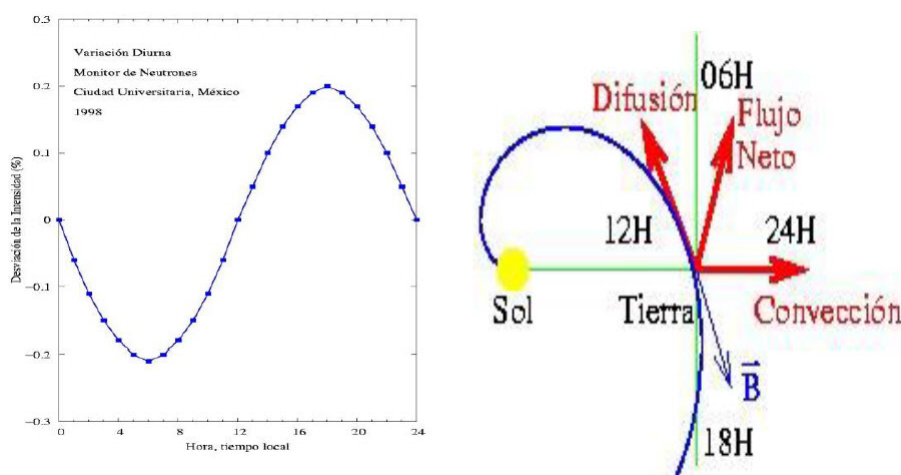


Figura 1.6: Variación diurna. A la derecha podemos observar un esquema vectorial de los procesos que se encuentran en el medio interplanetario y cuál es el flujo resultante de los rayos cósmicos debido a estas interacciones. A la izquierda una imagen de cómo se observa esta variación en el monitor de neutrones de CU.

El flujo difusivo se da cuando los rayos cósmicos que se propagan en la heliósfera son atrapados por las líneas de campo magnético interplanetario, esto favorece la propagación de los rayos cósmicos hacia adentro de la heliósfera.

El flujo convectivo se da debido a que las línea de campo magnético interplanetario (que guían los rayos cósmicos), son arrastradas hacia afuera de la heliósfera, por la expansión del viento solar, lo que resulta en una propagación o arrastre de los rayos

cósmicos hacia afuera de la heliósfera, esto es, mientras mayor sea la velocidad del viento solar, menor será el flujo de la radiación cósmica.

De la Fig.6 podemos apreciar que el flujo neto de la radiación cósmica debido a este proceso de difusión–convección, apunta a una dirección cercana a las 18 horas, por lo que un detector registrará mayor cantidad de partículas provenientes de esa dirección y la intensidad de la radiación cósmica tendrá un máximo alrededor de esa hora. Unas doce horas antes, el detector apuntaba en la dirección opuesta, desde donde es más difícil que provengan las partículas, por lo que la intensidad sería mínima.

1.3.2. Variación de 11 y 22 años.

Esta variación está estrechamente relacionada con el ciclo solar. Durante periodos de “Sol quieto” (mínimo solar), la estructura del viento solar es sencilla. A medida que el ciclo solar avanza y se va acercando a su máximo, dicha actividad se manifiesta de diversas maneras (ráfagas, eyecciones de masa coronal, etc.). Las irregularidades presentes en el medio interplanetario aumentarán, haciendo la estructura del viento solar cada vez más complicada (Ver capítulo 2).

Estos cambios van a afectar el transporte de rayos cósmicos hacia las regiones interiores de la heliósfera, a lo largo del ciclo solar de 11 años. Como podemos observar en la Fig. 1.7, la variación de 11 años en el flujo de rayos cósmicos es aproximadamente inversa al periodo de actividad solar.

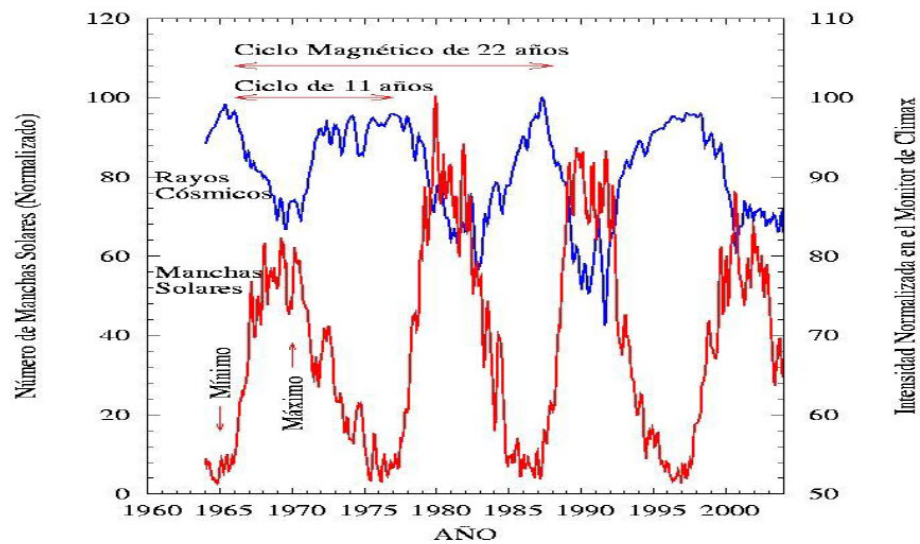


Figura 1.7: Variaciones de 11y 22 años. Se tiene una gráfica del número de manchas solares e intensidad normalizada de la radiación cósmica, detectada en el monitor de Climax, EUA, contra tiempo (años). Se observa como la variación de los rayos cósmicos (azul) es inversa al ciclo solar (rojo).

1.3 Variaciones de la intensidad de los rayos cósmicos.

Se sabe que las manchas solares son uno de los indicadores de la actividad solar. En el mínimo de actividad, el número de manchas es mínimo y conforme el Sol empieza a activarse, el número de manchas comienza a crecer hasta llegar a un máximo, cuando el Sol se encuentra en su máximo de actividad. A partir de éste punto, la actividad solar comienza a disminuir.

1.3.3. Decrecimientos Forbush.

El Decrecimiento Forbush (dF) es, con seguridad, la variación temporal más espectacular que se conoce en la radiación cósmica. En el lapso de unas cuantas horas, la intensidad registrada en una estación particular, puede verse reducida desde 5% y hasta 20 o 30% en casos extremos. Después de llegar a un mínimo, la intensidad empieza a recuperarse lentamente, lo cual puede durar desde unos días hasta semanas. En contraste con la variación diurna, un dF se mide en forma casi simultánea en todo el mundo.

En 1938 S. Forbush, por medio de cámaras de ionización instaladas en la superficie terrestre, descubrió la existencia de grandes decrecimientos repentinos en la intensidad de la radiación cósmica. En un principio se pensó que los dF estaban asociados a fenómenos puramente terrestres (variaciones campo geomagnético, tormentas geomagnéticas, etc.). Sin embargo, Simpson (1954) y Fan (1960) fueron de los primeros en observar experimentalmente que los dF se originan en el medio interplanetario. Con observaciones efectuadas por las naves Pioneros 6 y 7, se mostró que los dF se producen en una gran región del espacio, comprobando que efectivamente los dF se deben a efectos del medio interplanetario, ya que sus datos indican claramente que los decrecimientos medidos por las naves coinciden con los registrados en la superficie terrestre. Como se verá posteriormente, los dF, en general, están asociados con el paso de estructuras transitorias que provienen del Sol. Muchas veces se le llama a este tipo como decrecimientos “no recurrentes”.



Figura 1.8: Decrecimiento Forbush que se presentó el 29 de Octubre del 2003 aproximadamente a las 06:00, observado por el monitor de neutrones de Oulu, Finlandia.

Podemos identificar tres etapas de un dF:

1. Comienzo.- Los comienzos son casi simultáneos en todo el mundo. Esta simultaneidad es también observada en las tormentas magnéticas de comienzo súbito SSC (del inglés Sudden Storm Commencement), que se producen un poco antes o alrededor del comienzo. Las estaciones que registran primeramente el dF, son aquellas que se observan al oeste de la línea Sol-Tierra. La disminución en la intensidad de la radiación cósmica al oeste de la línea Sol-Tierra puede, en ocasiones, presentarse antes de la tormenta geomagnética. En la región este de la línea Sol-Tierra, la disminución de la radiación cósmica ocurre siempre después del inicio de la tormenta geomagnética. Estas diferencias temporales en el comienzo del dF deben tomarse en cuenta al elaborar modelos de los mecanismos responsables de su producción.
2. Amplitud.- La amplitud de los dF está relacionada con la rigidez umbral, la profundidad atmosférica y del tipo de detector. La reducción registrada por un detector situado en una rigidez umbral de 1 GeV pudiera ser hasta el doble de aquella registrada por un detector similar en una región de rigidez umbral de 15 GeV. Su magnitud también varía con la época del ciclo solar: después del mínimo solar, los dF son generalmente débiles (no mayores a 5 %) para un detector a nivel del mar en una zona de rigidez umbral de 1 GeV. Durante los ciclos solares 19 y 20, los decrecimientos más grandes se produjeron alrededor de año y medio (18 meses) después del máximo.
3. Recuperación.- La etapa de la recuperación dura algunos días y algunas veces, semanas. Puede o no ser regular, dependiendo de si se presentan pequeñas variaciones. Para un mismo dF, la recuperación es más rápida a bajas latitudes, mostrando con ello la dependencia de la rigidez magnética de los rayos cósmicos. El que no exista un periodo “estable” de recuperación de los dF, es algo que aún no puede ser explicado detalladamente.

Uno de los modelos que explica el origen de los dF, es el que propone [Can00], donde menciona que son causados por dos mecanismos físicos presentes en el espacio: una eyección de masa coronal interplanetaria (EMCI) y su choque asociado. En el caso de este tipo de dF, se pueden observar dos casos: en el primero, el observador es atravesado por el choque y la EMCI, el segundo que solo sea atravesado por el choque, esto último como consecuencia de que los choques tienen una mayor extensión longitudinal que las EMCI. La Fig.1.9. ilustra lo antes mencionado (En el capítulo 2 se describirá más a fondo lo que es una EMCI y sus componentes).

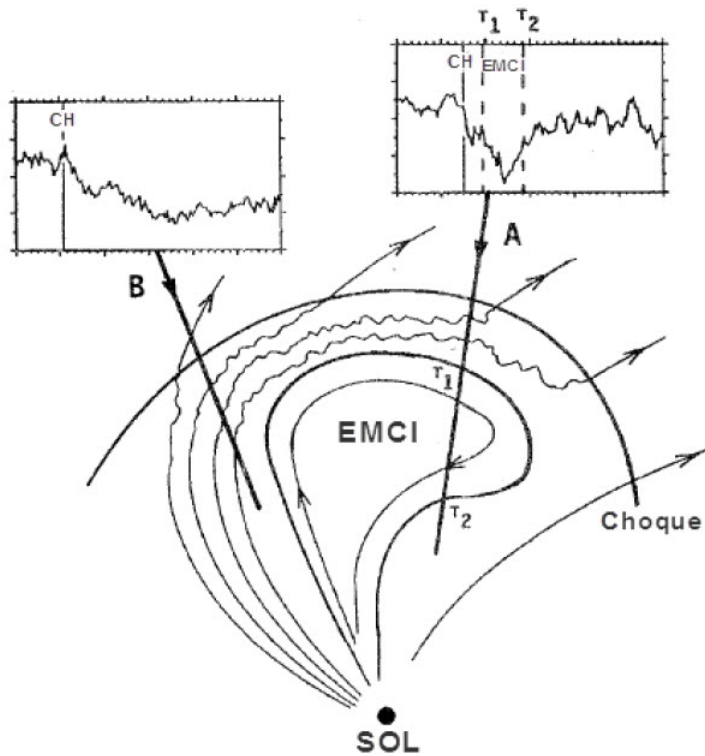


Figura 1.9: EMCI con su choque interplanetario asociado y los 2 casos: El observador es atravesado por el choque y la EMCI (A). El observador es solo atravesado por el choque (B). En ambos casos observamos la respuesta de un detector de rayos cósmicos con el paso del choque (CH), el inicio (T1) y fin (T2) de la EMCI. [Can00]

1.3.3.1. Características generales de los decrecimientos Forbush.

- **Magnitud.**- Los dF de mayor amplitud presentan caídas de entre 10 y 25 %, con respecto a la intensidad media detectada, para monitores de neutrones. Como se mencionó anteriormente, en zonas de rigidez umbral menor, los dF son más profundos pues los rayos cósmicos con rigideces magnéticas pequeñas son más susceptibles a cambios en el medio interplanetario y a tormentas geomagnéticas. En zonas donde la rigidez umbral es mayor, donde solo penetran rayos cósmicos más energéticos, las perturbaciones del medio interplanetario tienen un efecto menor.
- **Recuperación.**- Para dF aislados (es decir que tiempo después de que se presentan no hay grandes alteraciones tanto en el medio interplanetario como en la magnetósfera), el tiempo de recuperación se da en forma exponencial y con un tiempo promedio entre 3 y 10 días. Lockwood et al. (1986) encontraron que el tiempo de recuperación es independiente para rigideces magnéticas que van desde ≈ 2 a ≈ 5 GeV; tampoco existe alguna dependencia en la polaridad magnética ni en la fase de actividad solar.

- Asociaciones con el Sol.- La mayoría de los fenómenos físicos que ocurren en el medio interplanetario, son ocasionados por la actividad solar (fulguraciones, EMC, RIC, etc.). Aún se encuentra en discusión la relación específica de cada uno de estos fenómenos con la actividad en la magnetosfera terrestre y el medio interplanetario. Hasta hace algunos años, se creía que las fulguraciones solares eran las causantes de la gran mayoría de los fenómenos interplanetarios a gran escala y de las tormentas geomagnéticas en la Tierra. Sin embargo, estudios más recientes encontraron que pocas veces existía la relación ráfaga-tormenta geomagnética; tiempo después se encontró otro fenómeno solar aún más sorprendente, que emitía grandes cantidades de materia y energía al espacio: las EMC. Se observó que las EMC muy energéticas y rápidas pueden estar relacionadas con otros fenómenos solares (aunque no existe relación 1-1); éstas pueden también generar una onda de choque interplanetaria; si esta EMC está dirigida hacia la Tierra, es muy probable que genere una fuerte tormenta geomagnética y un dF.

Existen trabajos [Can11] donde se realizan análisis de la respuesta de la intensidad de los rayos cósmicos galácticos a la presencia de EMC/nubes magnéticas; indicando que $\approx 80\%$ de los casos, la intensidad de los rayos cósmicos galácticos decreció durante el paso de alguna de estas estructuras (un dF), mientras que en $\approx 10\%$ de los casos no hubo un cambio significativo; en el resto de los casos, la intensidad de los rayos cósmicos galácticos se incrementó.

2 El Sol, medio interplanetario: características y fenómenos importantes.

2.1. El Sol

Para poder estudiar al Sol se ha dividido su estructura interna y externa en varias zonas. Del interior al exterior son: núcleo, zona radiativa, zona convectiva, fotosfera, cromósfera y corona. En este trabajo solo se describirán a grandes rasgos las capas externas del Sol, por los fenómenos que se presentan en ella y alteran el medio interplanetario.

2.1.1. Fotosfera

La fotosfera es la “superficie” del Sol y la capa visible para nosotros, emite casi toda su radiación en la región visible del espectro electromagnético. Las capas superiores de esta capa también absorben radiación, produciendo un espectro de líneas de absorción. La mayor parte de la energía solar que recibe la Tierra proviene de esta capa.

Su estructura se conforma de gránulos y supergránulos; los primeros tienen una vida media aproximada de 10 minutos y un diámetro de 2000 km, mientras que los segundos presentan una vida media de un día y diámetros de 30000 km.

Su temperatura es variable, en las regiones más calientes se tienen temperaturas de 6,400 K y en las más frías de 4300 K, tiene un grosor aproximado de 500 km, lo que equivale al 0.1 % del radio solar. Su superficie no es uniforme, ya que está formada por “gránulos” de plasma solar que se acumulan en toda la superficie.

En esta región es donde se originan las manchas solares, que es uno de los fenómenos más importantes que se presentan en la fotosfera. Son el resultado de campos magnéticos locales muy intensos que impiden la convección, de ahí que sean regiones “frías” en la fotosfera, que se encuentran a una temperatura menor (aproximadamente 1000 K) que la temperatura promedio. El que parezcan negras es un efecto de contraste, debido a su diferencia de luminosidad con el resto de la fotosfera. Presentan fuertes campos magnéticos, tienen diámetros muy variables que van desde los 100 hasta los

100,000 km. Se caracterizan por tener una zona interna muy oscura llamada umbra, y rodeándola una zona un poco más clara llamada penumbra.

Existen otro tipo de fenómenos que se presentan en la fotosfera, como las espículas y las “playas”, sin embargo, no se discutirán estos fenómenos, ya que no son relevantes para el trabajo realizado en esta tesis.

2.1.2. Cromósfera

Debe su nombre a que la mayoría de la luz emitida es “rojiza” debido a que los fotones, provenientes de la fotosfera, son absorbidos por el hidrogeno presente en la cromósfera y vueltos a emitir en el rango correspondiente al rojo en la línea espectral, conocida como H_{α} cuya longitud de onda es 656.28 nm.

Es una capa menos densa que la fotosfera, su espesor es aproximadamente de 2500 km. Su temperatura varía desde los 4,500 K en su parte más baja, hasta los 25,000 K en su parte más alta. Debido a que es una capa poco densa, sólo es posible observarla en eclipses o con el uso de coronógrafos. Una de las características más importantes, es que en esta capa domina la presión magnética y no la térmica. Es la zona donde se forman las prominencias solares.

El fin de la cromosfera está marcado por una región que se conoce como la “zona de transición”. Es una zona bastante compleja, una de sus características más importantes, es que la temperatura aumenta drásticamente, de 25,000 K en promedio, hasta 10^6 K.

2.1.3. Corona

La corona es la última capa y la más extensa del Sol (ya que llega a una distancia aproximada de 100 UA^1), tiene una temperatura aproximada de 2×10^6 K, que desciende a medida que se aleja uno del Sol.

Debido a la gran temperatura de esta región, se presentan líneas de emisión en vez de líneas de absorción. Los procesos que aumentan la temperatura a la que se encuentra, aun no son del todo claros.

Por la gran temperatura que presenta y su baja densidad, permiten la ionización de elementos pesados, por ejemplo el Fe XIII (Fierro 13 veces ionizado).

Al observar la corona en rayos X, se encuentran regiones “oscuras” llamadas hoyos coronales; en dichas regiones el campo magnético es “abierto”, de tal manera que el material coronal es eyectado a una mayor velocidad (esto se discutirá mas adelante) que de otras regiones coronales.

De la dinámica de esta región, se tiene la formación del viento solar y las eyecciones de masa coronal, que se discutirán mas adelante.

¹1 Unidad astronómica (UA) = 149597870.7 km [?]

2.1.4. Campo magnético

El Sol presenta una rotación diferencial; debido a que es un cuerpo no homogéneo, donde las distintas “parcelas” de plasma que lo conforman rotan a distintas velocidades, su periodo de rotación no es el mismo para distintas latitudes.

El periodo de rotación en el ecuador solar es aproximadamente 25 días, mientras que en zonas cercanas al ecuador ($\pm 75^\circ$ latitud solar) el periodo de rotación es aproximadamente de 34 días [Lan09].

El Sol tiene un periodo de actividad promedio de 11 años. Se pueden identificar cuatro fases de un ciclo solar: un estado de mínima actividad, una fase ascendente, el máximo de actividad y la fase descendente, el mejor indicador para identificar un ciclo es el número de manchas solares. Sin embargo, entre cada mínimo, existe una inversión de los polos magnéticos, es decir, en el segundo mínimo los hemisferios magnéticos están totalmente invertidos.

El Sol tiene un campo magnético muy complejo, se puede aproximar su magnitud y forma con ayuda de los armónicos esféricos, obtenidos de resolver la ecuación de Laplace $\nabla^2 u=0$, suponiendo que no hay corrientes eléctricas sobre la superficie del Sol. Las soluciones de la ecuación anterior, están dadas por los armónicos esféricos, tomando los primeros 3 armónicos se tienen las componentes dipolar, cuadripolar y hexapolar (Fig. 2.1.).

El campo magnético del Sol tiene su origen en el interior del Sol, en la zona convectiva, donde los diferentes procesos que ocurren en los movimientos de los flujos, dan origen al dínamo solar. Particularmente existe una región en el interior del Sol, llamada tacoclina (Fig. 2.1), donde ocurre la transición de la “rígida” rotación de la zona radiativa, a la rotación diferencial que se observa en la superficie solar. [JZ03]

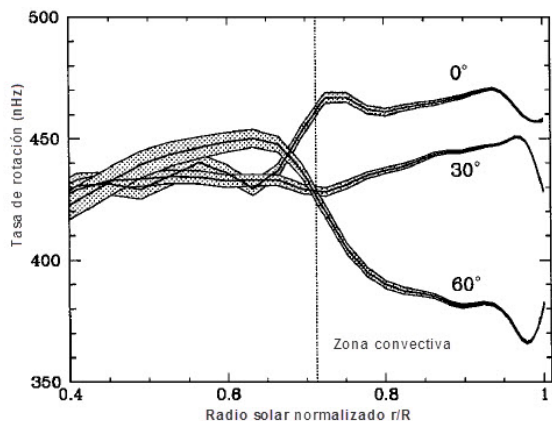


Figura 2.1: Rotación interna del Sol, se muestra la tacoclina (línea que atraviesa la gráfica) y tres curvas representando perfiles de rotación de corrientes internas a 0° , 30° y 60° . [JZ03]

En este trabajo no se va a profundizar en la topología y dinámica del campo magnético del Sol en sus cercanías.

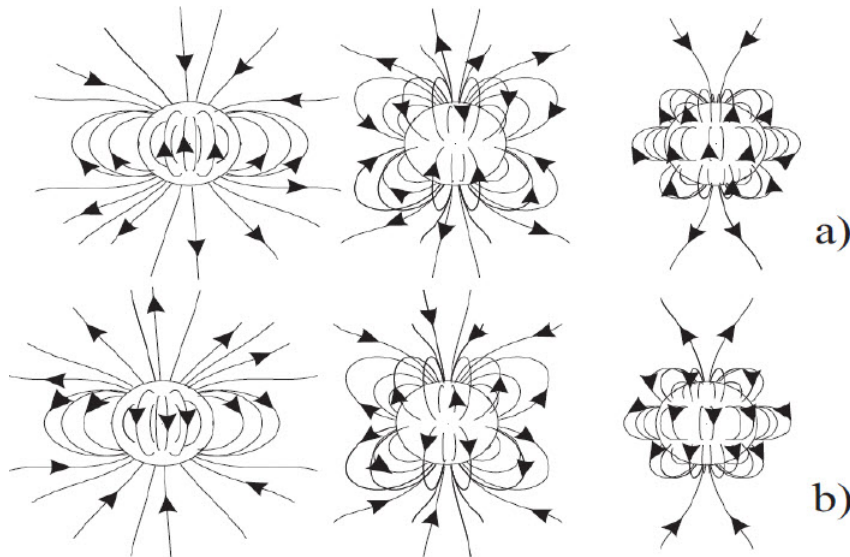


Figura 2.2: Estructura de las líneas magnéticas durante dos mínimos consecutivos marcados con a) y b) respectivamente. Las imágenes de la izquierda representan a la componente dipolar, las de en medio a la cuadripolar y las de la derecha a la hexapolar.[BS00]

En la Fig. 2.2 se presenta un modelo de cómo se observan las líneas magnéticas del Sol en sus cercanías, sin embargo, como se verá más adelante, el campo del Sol permea todo el medio interplanetario. Considerando la componente dipolar, es lógico pensar que debe existir una región de transición entre una polaridad y otra, una región neutra. El campo magnético del Sol se encuentra permeando todo el medio interplanetario, entonces esta región neutra debe hacerlo también. La evolución del campo magnético del Sol y esta región neutra se discutirán mas adelante.

2.2. Medio interplanetario

2.2.1. Campo magnético interplanetario

El campo magnético del Sol se extiende por todo el medio interplanetario (MIP), a varios radios solares de distancia, presenta una topología distinta, denominado campo magnético interplanetario (CMI).

El campo magnético del Sol (y por ende el CMI) se encuentra alineado a un eje magnético, que no coincide con el eje de rotación geográfico, por lo que no rota en forma simétrica (Fig. 2.4).

El CMI se encuentra permeando toda la heliósfera (la región de influencia del Sol).

En la Fig. 2.2 se presenta un modelo de cómo se observan las líneas magnéticas del Sol en sus cercanías, se pueden observar líneas de campo magnético que pareciera

que están “abiertas” y no se cierran, en realidad si lo hacen pero a muy grandes distancias. Al tener dos polaridades, es lógico pensar que debe existir una región neutra, esta región neutra de manera similar se difunde por la heliósfera.

Debido al ciclo de actividad solar y a la diferencia en la rotación geográfica y magnética, dicha región neutra, que se le conoce como *hoja neutra u hoja de corriente*, durante el mínimo de actividad tiene una forma similar a la falda de una bailarina (Fig. 2.3).

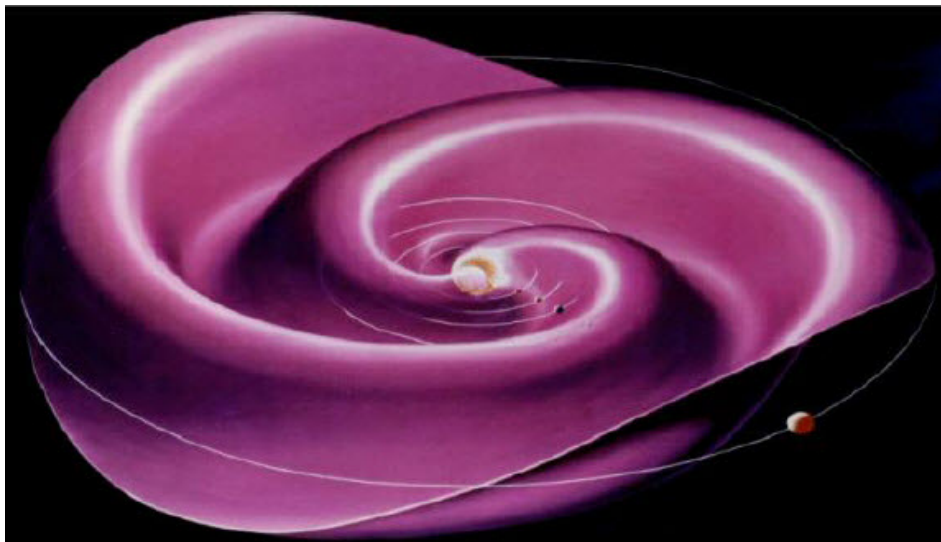


Figura 2.3: Imagen artística de cómo rota la hoja de corriente neutra, mostrando un movimiento similar al de la falda de una bailarina.

2.2.1.1. Espiral de Parker.

El CMI posee una forma muy peculiar: debido a que el Sol se encuentra rotando y el viento solar sale radialmente de él, las líneas de campo siguen todo el tiempo ligadas al Sol, debido a estos dos fenómenos se forma una estructura en espiral, llamada espiral de Parker, que se describe mediante coordenadas esféricas[Bur95]:

$$B_R = B_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2$$

$$B_\Theta = 0$$

$$B_\Phi = B_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \left(\frac{\Omega}{V_{vs}} \right) (r - r_0) \text{sen}\theta$$

Donde B_0 es la intensidad del campo magnético a una distancia r_0 del sol, Ω es la velocidad angular media del sol ($2.7 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$), V_{vs} es la velocidad del viento solar (se supone constante) y ϑ es el ángulo con respecto al ecuador solar (latitud heliográfica).

El vector magnético forma un ángulo χ respecto a la dirección radial dado por:

$$\tan\chi = \frac{B_\Phi}{B_R} = \left(\frac{\Omega}{V_{vs}} \right) (r - r_0) \operatorname{sen}\theta$$

El ángulo χ aumenta conforme se incrementa la distancia al Sol (radio heliocéntrico); además, el campo magnético es esencialmente radial a la altura de la órbita de la Tierra ($\chi \approx 45^\circ$ para $V_{vs} = 400 \text{ km/s}$) y casi azimutal a la altura de la órbita de Júpiter ($\chi \approx 80^\circ$ para $V_{vs} = 400 \text{ km/s}$).

Debido a que el Sol y el viento solar son fluidos magnetohidrodinámicos² y poseen una conductividad eléctrica muy alta (conductor perfecto), se cumple el teorema de Alfvén³. En la Fig. 2.4 se muestra un esquema representando el flujo del viento solar en forma radial y la forma en espiral que adquieren las líneas de campo magnético del Sol.

²La magnetohidrodinámica es la parte de la física que estudia la dinámica de fluidos conductores en presencia de campos electromagnéticos, un ejemplo de este tipo de fluidos son los plasmas. El Sol y el viento solar son plasmas.

³El teorema de Alfvén menciona que en fluidos con una conductividad eléctrica muy grande (infinita), las líneas de campo magnético viajan congeladas en él [Alf43].

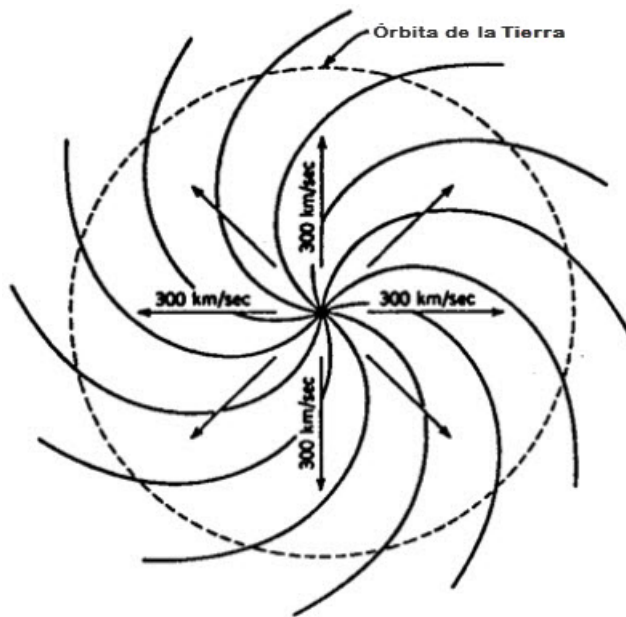


Figura 2.4: Representación de la espiral de Parker. El círculo central es el Sol, se muestra como sale el viento solar (flechas) con un $v=300$ km/s. Las líneas de campo magnético se representan en forma espiral. La circunferencia pintada representa la órbita de la Tierra.

2.2.2. Viento solar

El Sol constantemente se encuentra expulsando material coronal hacia el MIP, lo que se conoce como *viento solar* (VS).

De los primeros indicios de que el Sol pudiera encontrarse emitiendo un “viento”, provino de la observación de las colas de los cometas, viendo que estas colas apuntan en dirección contraria al Sol, tanto si se aproximan como si se alejan de él.

El aumento drástico de la temperatura de la corona, provoca que el gas se expanda, ya que el campo gravitacional del Sol es incapaz de retenerlo, este desprendimiento de material coronal no es uniforme.

Debido a la topología del campo magnético del Sol (Fig. 2.2), existen regiones en donde las líneas de campo se cierran cerca del él, estas regiones son denominadas *regiones de campo cerrado*; por otra parte, las regiones donde las líneas de campo se consideran abiertas (ya que se cierran a grandes distancias) se denominan *hoyos coronales*.

La Fig. 2.5, tomada por el satélite SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), nos muestra tanto las zonas activas, como los hoyos coronales.

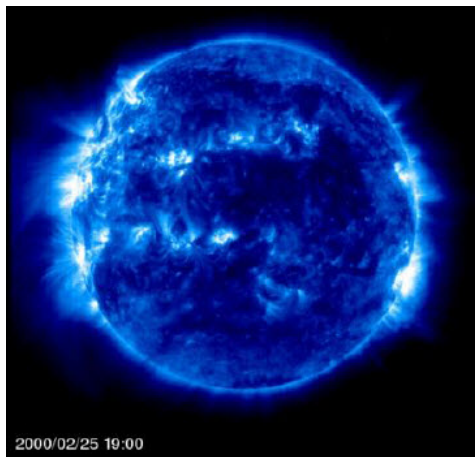


Figura 2.5: Imagen del satélite SOHO, tomada por el instrumento EIT 171 (106 K) donde se ve la corona solar. Se observan las zonas activas como las zonas de mayor brillo y los hoyos coronales con tonos más oscuros.[?]

El viento solar proveniente de regiones con campo magnético cerrado o en sus fronteras suele ser lento, denso y poco caliente; mientras que el viento solar proveniente de hoyos coronales suele ser rápido, poco denso y más caliente. Se pueden observar algunas características de estos dos tipos de corrientes en la tabla 1.

Parámetro	Viento lento	Viento rápido
Velocidad (km/s)	250-400	400-800
Densidad protones (n_p/cm^3)	10.7	3

Cuadro 2.1: Valores promedio de parámetros del viento solar durante un mínimo de actividad.[Sch06b]

Estas zonas activas y los hoyos coronales se encuentran rotando constantemente. En la Fig. 2.6 podemos observar que el punto rojo es permeado por viento solar lento. Sin embargo, en media rotación del Sol, ese mismo punto va a estar permeado por viento solar rápido.

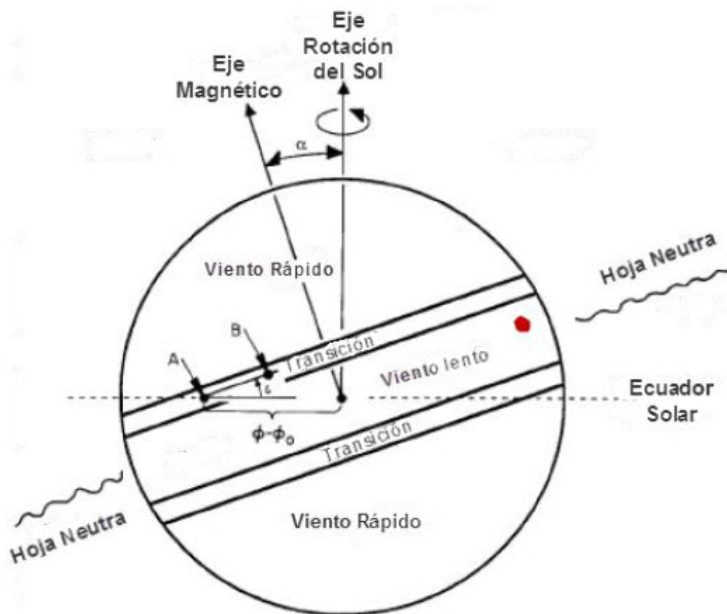


Figura 2.6: Esquema del Sol, que muestra la diferencia del eje geográfico y el eje magnético, así como las regiones de las que salen tanto viento solar lento como rápido

2.3. Fenómenos Solares

2.3.1. Ráfagas solares

Las ráfagas son explosiones en la atmósfera solar, donde el plasma del Sol es calentado a millones de grados Kelvin y se aceleran partículas, se observan principalmente en la región del espectro correspondiente a $H\alpha$, que es característica de ráfagas en la cromosfera. La duración de una ráfaga puede ser entre unos cuantos segundos hasta unas cuantas horas.

Las ráfagas se generan, principalmente, en lo que se conoce como las regiones activas, donde un grupo de flujos magnéticos con polaridades opuestas se encuentran y generan el proceso conocido como reconexión magnética, que básicamente consiste en que líneas magnéticas antiparalelas se “entrecruzan” (Fig. 2.6).

Una ráfaga emite radiación en todo el espectro electromagnético, pero la más importante es en rayos X. Los rayos X se dividen en suaves (con energías de 0.1 a 10 keV) y duros (con energías de 10 a 100 keV). La principal clasificación es conforme al flujo, se agrupan en 5 categorías, como se muestra en la tabla 2. Cada una de estas categorías se dividen en 9 subdivisiones (X1 a X9 por ejemplo).

Tipo	Flujo (I) (W/m^2)
B	$I < 10^{-6}$
C	$10^{-6} \leq I < 10^{-5}$
M	$10^{-5} \leq I < 10^{-4}$
X	$I \geq 10^{-4}$

Cuadro 2.2: Clasificación de las ráfagas solares. [?]

En la Fig. 2.7 se tiene un esquema de cómo se produce una ráfaga mediante el proceso de reconexión magnética: En la Fig.2.7, panel 1, se presenta una típica configuración de campo magnético cerrada llamada *bucle coronal* (coronal loop, en inglés), que empieza a cambiar de tal manera que se observa como una banda elástica que se “jala” hacia arriba (Fig.2.7, panel 2). A medida que el campo se extiende (Fig.2.7, panel 3) y llega a un punto crítico, donde el campo magnético está apuntando en direcciones opuestas, a este punto se le llama *punto X* (ya que la forma del campo magnético en este punto tiene la forma de una X) y es donde se da la reconexión magnética (Fig.2.7, panel 4). En este lugar, la forma del campo magnético cambia súbitamente, el plasma se ve forzado a moverse hacia el punto X, acelerándose tanto hacia arriba como hacia debajo de las líneas magnéticas (Fig.2.7, panel 5), por arriba del punto X se forma una burbuja magnética. Cuando el plasma choca con la cromosfera (región más densa), este se calienta y libera una gran cantidad de radiación, emitiendo rayos X duros por el proceso de *Bremstrahlung*⁴. Frecuentemente al final del proceso, la burbuja magnética que se genero, es eyectada hacia afuera del Sol a grandes velocidades (Fig.2.7, panel 6). El bucle regresa a una forma más sencilla, como resultado de toda la energía que se libero en el proceso.

⁴Bremstrahlung: “radiación de frenado”. Este proceso se da cuando un electrón libre (no asociado a algún átomo) se mueve cerca de una partícula positiva: se produce una atracción eléctrica que desvía al electrón, cambiando su velocidad, emitiendo radiación electromagnética.

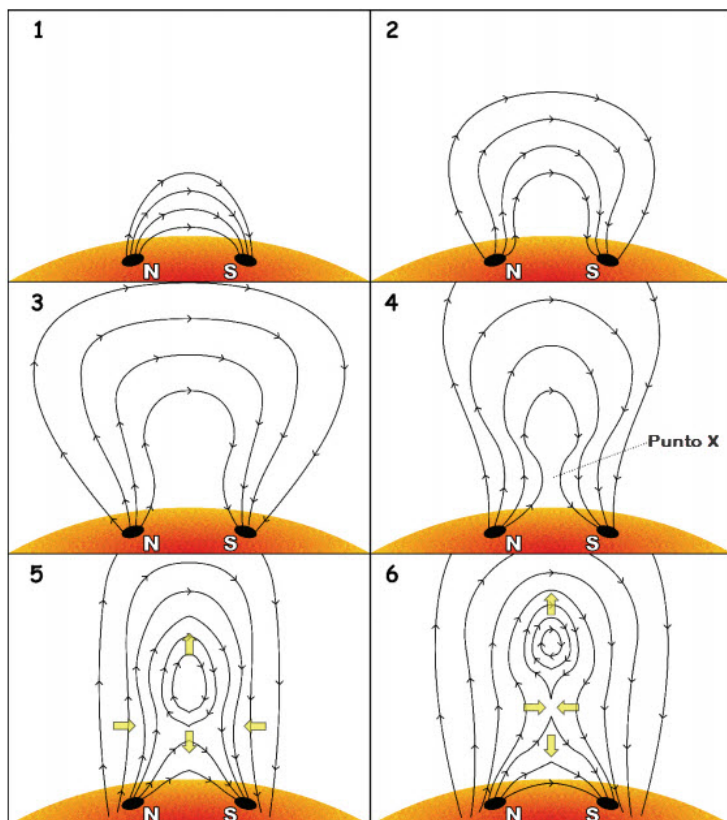


Figura 2.7: Esquema de cómo se produce una ráfaga solar. Las flechas amarillas indican las direcciones en las que se mueve el plasma. El semicírculo inferior corresponde a la cromosfera [Men05]

2.3.2. Prominencias solares.

Las prominencias solares son estructuras que se forman en lazos magnéticos y que mantienen plasma solar “frio” y denso, con respecto al que se encuentra en la corona. Generalmente se presentan en las regiones entre manchas solares de polaridad opuesta, colapsan cuando el campo magnético que se encuentra en su vecindad se vuelve inestable.

Se observaron por primera vez durante los eclipses totales de Sol, en la actualidad se registran por medio de coronógrafos.

Las prominencias pueden elevarse sobre la superficie del Sol por varios miles de kilómetros (Fig. 2.8).



Figura 2.8: Prominencia solar del 23 de septiembre de 1999 obtenida por el aparato EIT 304 del satélite SOHO. [?]

2.4. Eyecciones de masa coronal

Las eyecciones de masa coronal (EMC) son el evento más espectacular de la atmósfera solar, con repercusiones en toda la heliósfera; ya que se emite una gran cantidad de masa ($\sim 1.7 \times 10^{15}$ g), energía ($\sim 10^{30}$ erg), partículas y traen consigo líneas de campo magnético “congeladas” dentro de ellas, por lo que interactúan y modifican la estructura del medio interplanetario [Vou02].

Las EMC se originan principalmente en la baja y media corona solar, comúnmente se asocian a eventos eruptivos como ráfagas, prominencias activas, filamentos, cascos coronales con cavidades poco densas. [Asc06]

Entre 30 % y 50 % de las EMC no se asocian con prominencias [Can00]. Aun grandes ráfagas (al menos tipo M), no tienen EMC asociadas en 40 % de los casos [Asc06].

En resumen, una EMC es una estructura dinámica transitoria relacionada con el plasma solar, que se propaga hacia el medio interplanetario, expandiéndose en tamaño conforme se aleja del Sol.

En la Fig. 2.9 se tiene una imagen tomada por uno de los coronógrafos de SOHO, se observa como la corona se encuentra emitiendo plasma continuamente hacia el exterior; sin embargo, en la parte superior derecha del disco solar, se ve una gran “nube” brillante emitida fuera del Sol en forma explosiva; se observa como esta gran nube se desplaza radialmente, al mismo tiempo que se expande lateralmente.

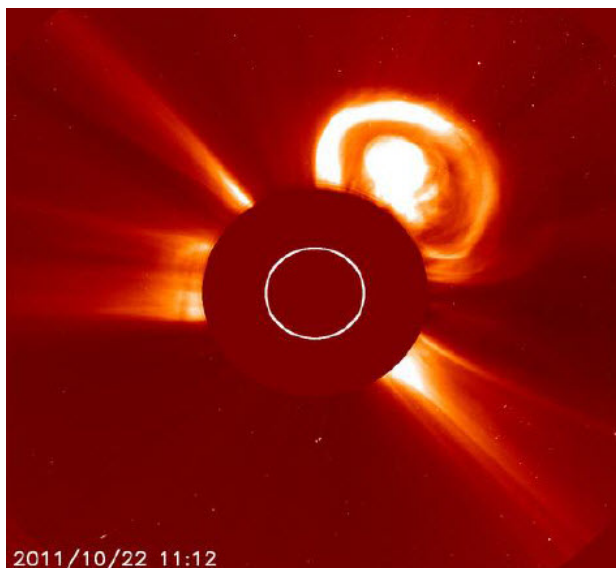


Figura 2.9: Eyección de masa coronal observada por el coronógrafo LASCO C2 de SOHO el 22 de octubre del 2011 a las 11:12.[?]

Como se menciono anteriormente, las EMC (también llamadas nubes de plasma por otros autores) llevan consigo campo magnético solar. Las líneas magnéticas dentro de una EMC se encuentran con una topología distinta a la del CMI en el que se encuentran, dicha topología se le conoce como “*cuerda*” magnética (magnetic flux rope en inglés); la “*cuerda*” magnética, la mayoría de las veces, se encuentra de manera muy desordenada. [Bur95]

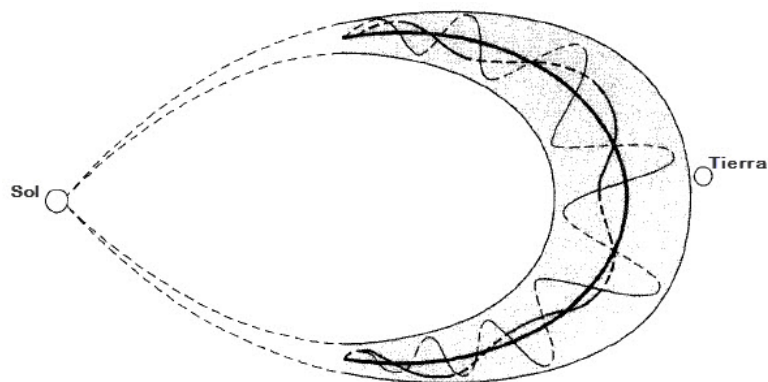


Figura 2.10: Esquema de una nube de plasma con una configuración magnética dentro de ella en forma de cuerda magnética. [Bur95]

Las EMC tienden a generarse cerca de líneas magnéticas neutras y frecuentemente son precedidas por el “hinchazón” de un casco coronal [Can00]. La tasa de aparición

de una EMC varía dependiendo en que parte del ciclo solar se encuentre. Webb y Howard (1994) encontraron una tasa de 0.25 EMC por día en el mínimo solar y 2.5-3 en el máximo.

Las EMC usualmente viajan a una velocidad constante con una menor aceleración o desaceleración. Las EMC más lentas tienden a presentar aceleración positiva, mientras que las más rápidas se desaceleran en las últimas regiones de la corona.

Zhang, et al (2001) describen la evolución cinemática de una EMC en 3 pasos: la fase inicial, la fase impulsiva o de mayor aceleración y la fase de propagación. La fase inicial se caracteriza por presentar una duración de algunas decenas de minutos, con velocidades de la EMC por debajo de las decenas de km/s. La fase impulsiva presenta una duración entre algunos minutos hasta 40-50, llegando la EMC a tener aceleraciones de algunos cientos a miles de m/s^2 . La última fase se presenta cuando la EMC ya se encuentra totalmente desarrollada. [Sch06a]

2.4.1. Propiedades

En la Tabla 2.3 se muestra una lista de algunas propiedades promedio de las EMC, observadas con coronógrafos, a lo largo del tiempo.

	MK3	SMM	Skylab	Solwind	LASCO
Periodo de observación	1980-99	1980. 1984-89	1973-1974	1979-1980. 1984-85	1996-presente
Rango de visión (radios solares)	1.15-2.24	1.8- ~ 5	2-6	3-10	1.1-32
Tamaño angular EMC (deg)	37	47	42	43	72
Velocidad (km/s)	390	349	470	460	424
Masa (g)		3.3×10^{15}	4.7×10^{15}	4.0×10^{15}	1.7×10^{15}
Energía cinética (erg)		6.7×10^{30}	3.1×10^{30}	3.4×10^{30}	4.3×10^{30}

Cuadro 2.3: Propiedades promedio de las EMC observadas por cinco coronógrafos. [Hud06]

Las EMC se pueden clasificar en dos tipos, referentes a su origen en el disco solar:

- **Eyecciones tipo halo.** Son EMC que se caracterizan por tener un halo de exceso de brillo alrededor del disco solar, que se propaga radialmente en todas direcciones [Can00]. La mejor manera de identificar este tipo de eyecciones, es que su imagen proyectada en el coronógrafo es de un “halo” casi circular. Un evento tipo halo se origina de cara a la Tierra, por lo tanto se propaga en dirección hacia ella.
- **Eyecciones tipo limbo.** Este tipo de EMC se observan sobre el perímetro del disco solar, en el plano del cielo del coronógrafo, en el limbo, de ahí su nombre. Este tipo de EMC proporcionan información de los valores de algunos de sus parámetros, por lo que son de gran utilidad para determinar sus características.

Aunque las EMC no tienen una estructura definida, de manera visual se puede identificar un tipo de EMC, llamada EMC de tres partes [Vrn07]: un borde frontal, una cavidad y un núcleo brillante. El borde frontal se debe a consecuencia de una condensación de materia coronal, por el movimiento hacia el exterior de la EMC. La cavidad se observa oscura debido a su baja densidad. El núcleo es la parte central de la EMC y típicamente es más brillante que el borde frontal. En las Figs. 2.9 y 2.11 se pueden apreciar EMC's con una estructura de tres partes.

Cabe recordar que esto es solo un efecto de como se observa a la EMC, esto es, de que dirección esta uno observando el fenómeno.

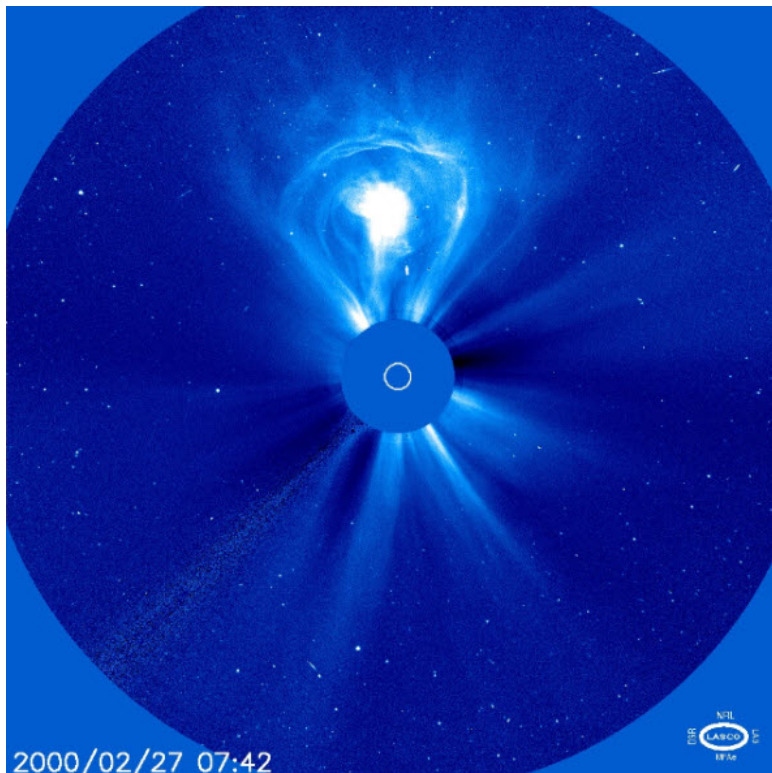


Figura 2.11: Una EMC observada el 27 de Febrero del 2000 a las 07:42 por el coronógrafo LASCO [?]

2.4.2. Eyecciones de masa coronal interplanetarias

Las eyecciones de masa coronal interplanetarias (EMCI) son la contraparte de una EMC en el MIP. El significado que tiene esta definición para el mismo fenómeno, es que las características detectadas in situ de las EMC (en el MIP) son de un fenómeno ya evolucionado. Dado que no se pueden tener datos de las EMC cuando se forman en el Sol, sólo se tienen modelos que describen su formación y composición; se tiende a tratar el mismo fenómeno en dos partes distintas para evitar confusión y buscar una relación exitosa.

Idealmente la observación de EMC y como se da su evolución en EMCI, debería ser a una distancia de pocos radios solares, donde las interacciones con el MIP aun no tengan tanta oportunidad de modificar el plasma dentro de la EMC; desgraciadamente aun no se cuenta con esta información, solo contando con datos de vecindades cercanas a la Tierra.

Como se menciono anteriormente, la mejor manera de detectar la llegada de una EMCI, es midiendo los datos in situ. Por ejemplo, una EMCI rápida, tendera a llevar un choque, que no es una firma tal cual de la presencia de una EMCI, pero frecuentemente al observar un choque, tiempo después se observa la presencia de una EMCI.[WS06]

Entre el choque y la EMCI, se forma una región conocida como funda, es una zona de plasma turbulento.

Las firmas a observar en los parámetros del viento solar, para identificar el paso de una EMCI son [Ric10, WS06]:

- Aumento de iones pesados (y/o aumento de la carga iónica). Observaciones de iones pesados en el MIP, por ejemplo hierro u oxígeno altamente ionizados, proveen de información de que tan “rico” en estos iones se encuentra el VS. Se conoce que en la corona solar, se forman elementos pesados altamente ionizados, debido a la gran temperatura de esta región. Si las EMCI se encuentran ancladas al Sol, se forma una estructura de botella magnética (Fig. 11), de tal manera que el plasma coronal permanece confinado dentro de la EMCI, por lo que la abundancia de estos elementos altamente ionizados es mayor que en el MIP. Particularmente se ha demostrado que la tasa de O^{+7}/O^{+6} y la carga iónica del hierro (Fe), es mayor dentro de una EMCI, comparados con el MIP de su vecindad [WS06, Ric04].
- La estructura magnética dentro de una EMCI es variada, pero típicamente la intensidad magnética es mayor en magnitud que la intensidad del CMI de las vecindades. Como una EMCI es una región de plasma diferenciada del MIP, su orientación magnética difiere de la que posee el CMI.
- Anormal baja de temperatura de protones, se ha demostrado que varias EMCI poseen una baja temperatura de protones [Ric04, Ric95].

Un ejemplo de cómo se identifica una EMCI es observando la Fig.2.12: se detecta el choque asociado (22:00 del 26 de Julio), observándose un aumento abrupto en la intensidad del campo magnético (primer recuadro), velocidad (quinto recuadro), presión (octavo recuadro), temperatura (séptimo recuadro), densidad (sexto recuadro). Inmediatamente después se tiene la funda, que es una región bastante turbulenta como se observa en la intensidad del campo magnético y sus tres componentes. Finalmente la EMCI se presenta a las 04:00 del 27 de Julio; se observa como la intensidad del campo magnético se estabiliza, aumenta ligeramente y después decae gradualmente, lo mismo que la velocidad; se presenta una rotación gradual en B_z y una baja temperatura de protones. La EMCI finaliza su paso a las 03:00 del 28 de Julio.

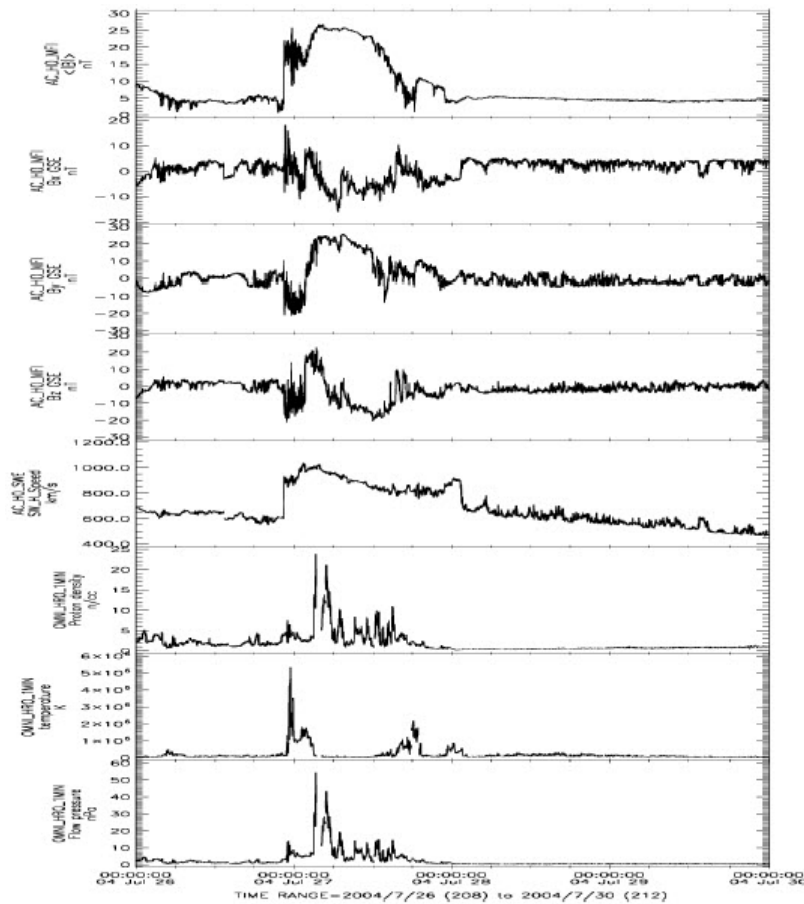


Figura 2.12: Imagen de ACE del paso de una EMC con su onda de choque asociada el 27 de julio del 2004. Se observan los siguientes parámetros en los recuadros (de arriba hacia abajo): magnitud del campo magnético, Bx, By y Bz (en coordenadas GSE), velocidad de protones, densidad de protones, temperatura y presión. [?]

2.4.2.1. Nubes Magnéticas

Dentro de las EMCs podemos encontrar un tipo especial de ellas, conocidas como nubes magnéticas (NM). Una NM se define principalmente por tres características [Kle82]:

- Un aumento en la intensidad del campo magnético.
- La rotación “suave” de al menos una componente del campo magnético, con respecto a un plano.
- Baja temperatura de protones.

Las NM's en las observaciones in-situ, presentan una topología magnética bien definida y de manera ordenada, se observa cómo hay una inversión gradual en al menos una de las componentes del campo magnético.

En la Fig.2.13 se observa un esquema donde se muestra como en este tipo especial de EMCI, la “cuerda” magnética presenta una topología magnética muy ordenada, de estructura helicoidal, lo que genera que las partículas que viajan dentro de la nube tengan un movimiento oscilatorio.

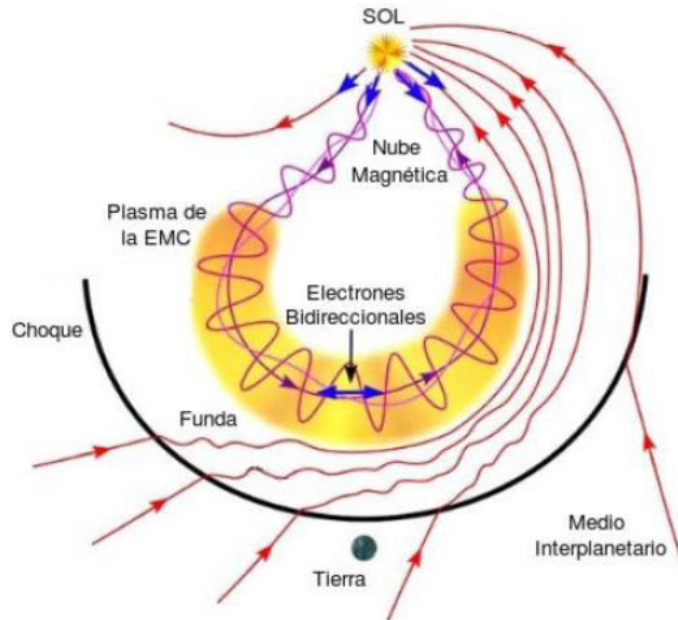


Figura 2.13: Esquema de una nube magnética.

2.5. Región de interacción de corrientes.

Una región de interacción de corrientes (RIC) se forma, cuando en el medio interplanetario, una corriente de viento solar lenta es alcanzada por una corriente de viento solar rápido. Inicialmente los dos flujos emitidos radialmente se dispersan sin considerar al otro; sin embargo, la corriente rápida empieza a embestir a la corriente lenta que fue emitida anteriormente.

Esto lleva a la creación de una región de compresión, que se forma debido a la diferencia de velocidades y en función que la corriente de viento rápido sea suficiente como para formarla.

Dicha región de interacción se encuentra bordeada por un par de choques que, al posicionarse en el marco de referencia de la RIC, se observan de la siguiente manera: uno frontal que se mueve en dirección contraria al Sol, que comprime y acelera al viento lento que está delante de él; otro reverso que se mueve en dirección al Sol, comprimiendo y desacelerando al viento solar rápido.

En la Fig. 2.14 podemos apreciar una RIC con sus dos choques.

Como las fuentes de las corrientes rápidas y lentas de viento solar se encuentran rotando con el Sol, la proyección de la región de interacción en el plano de la eclíptica tiene la forma de una espiral; si estas fuentes de corrientes son estables, tales que duran algunas rotaciones solares, observamos que la región de interacción aparece recurrentemente en la misma localización heliográfica, con un período de aproximadamente 28 días, de ahí que la región de interacción se encuentra rotando con el Sol; por lo que se le llama RIC.

Dentro de esta región de compresión se encuentra una discontinuidad llamada *interfase de corriente*. Dicha discontinuidad divide a las 2 regiones de viento perturbado, que se encuentran dentro de la región de compresión: la región de viento lento comprimido, que se caracteriza por tener una densidad mayor, y la región de viento rápido comprimido, que tiene una mayor temperatura; por lo que la interfase de corriente se identifica como una discontinuidad en los parámetros de densidad y temperatura, en las mediciones in-situ, en esta discontinuidad se establece un equilibrio de las presiones totales entre el viento lento y el viento rápido.

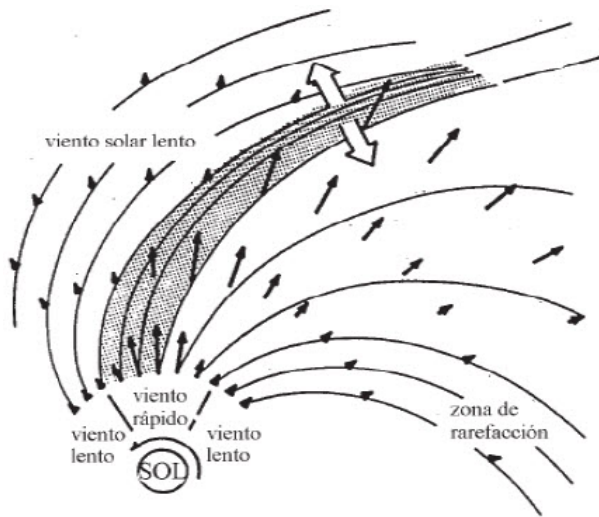


Figura 2.14: Esquema de una RIC (región gris) en donde podemos observar la dispersión radial del viento solar, la dispersión que sigue el campo magnético. Las flechas blancas gruesas indican los 2 choques que se generan. [GE01]

Dado que los choques que bordean a la región de compresión se mueven en direcciones opuestas, en el sistema de referencia de la RIC se observa que se expanden conforme se van alejando del Sol. Como ejemplo, una RIC a 1 UA que tiene un ancho radial de 0.2 UA, a una distancia de 5 UA su ancho radial será de 1 UA, en el plano de la eclíptica.

Como se mencionó anteriormente, las corrientes de viento solar rápido se originan principalmente en los hoyos coronales. Para que exista un flujo continuo de viento solar rápido, deben existir hoyos coronales de tamaño considerable, que duren al-

gunas rotaciones solares. En el máximo de actividad solar, se sabe que el Sol está en su configuración más compleja, se forman y deshacen hoyos coronales muy rápidamente, aunque estos pueden formarse a latitudes bajas, no son del todo estables, por lo que es difícil ver una RIC. Durante el mínimo de actividad solar, se encuentran dos grandes hoyos coronales en los polos, la hoja de corriente heliosférica tiene una pequeña inclinación con respecto al ecuador geográfico, siendo débilmente deformada. Cuando nos encontramos en la fase descendente y/o ascendente, es decir, cuando empieza a existir mayor o menor actividad, la hoja de corriente heliosférica comienza a inclinarse más, en el caso de la fase ascendente, o a estabilizarse; pero con una inclinación considerable en el caso de la fase descendente, produciendo RIC en un rango de latitudes más grande. Por lo que se forman más RIC en las fases intermedias de actividad solar, particularmente se forman más en la fase descendente (Tabla 2.4).

Fase del ciclo solar	Hoyos Coronales	Hoja de Corriente	Nave	RIC	Corrientes de viento solar de 1 a 5 UA
Ascendente	Hoyos polares se encogen y desaparecen, pero los hoyos evolucionan en una manera diferente, desapareciendo en tiempos distintos	La extensión latitudinal se incrementa, interrumpiendo la configuración que se tenía en el mínimo (configuración más simple)	Viajeros 1 y 2	25	Valor medio de las corrientes rápidas asociadas con RIC: 480 km/s Valor medio de las corrientes lentas asociadas con RIC: 350 km/s
Post Máximo	No hay hoyos polares, pero pequeños hoyos en latitudes medias	Estructura muy compleja, la hoja de corriente principal se extiende casi de polo a polo, en latitudes medias aparecen pequeñas hojas de corriente aisladas.	Ulysses	14	Valor medio de las corrientes rápidas asociadas con RIC: 575 km/s Valor medio de las corrientes lentas asociadas con RIC: 412 km/s
Descendente	Después de la inversión en polaridad, los hoyos polares reaparecen y crecen en tamaño con grandes extensiones ecuatoriales	La estructura es simple y la hoja de corriente tiene una forma sinusoidal, que se extiende sobre un gran rango de latitudes	Pionero 11	36	Valor medio de las corrientes rápidas asociadas con RIC: 592 km/s Valor medio de las corrientes lentas asociadas con RIC: 386 km/s
Mínimo	Hoyos polares tienen una extensión máxima, se encuentran lejos del ecuador	La hoja de corriente es muy estable, permaneciendo sobre el ecuador solar		—	No hay observaciones

Cuadro 2.4: Características de la estructura coronal magnética a través de un ciclo solar, junto con observaciones de flujos de viento solar rápido y lento asociados con RIC.[GE00]

Anteriormente se mencionó que la interfase de corriente es una discontinuidad pero, ¿Qué tipo de discontinuidad es? Se parte de la Fig. 2.15:

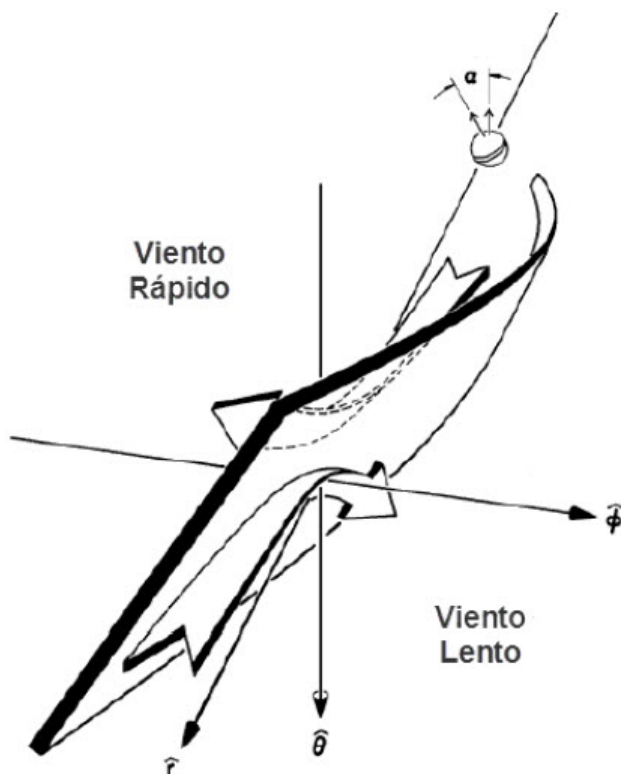


Figura 2.15: Representación de una interfase de corriente y su interacción con el viento solar rápido perturbado y el viento solar lento perturbado. Podemos observar como en la discontinuidad los dos flujos son tangenciales a ella. La discontinuidad esta curvada en dirección al Sol (esfera del fondo). [GE01]

Se observa viento solar rápido que se aproxima por la izquierda y viento solar lento que se aproxima por la derecha, separados por la interfase de corriente. Las dos corrientes son deflectadas, ya que no pueden cruzar la interfase y mezclarse, por lo que se forma una discontinuidad tipo tangencial. En la Fig.2.16 se observan algunas características de una discontinuidad tangencial.

Discontinuidad Tangencial

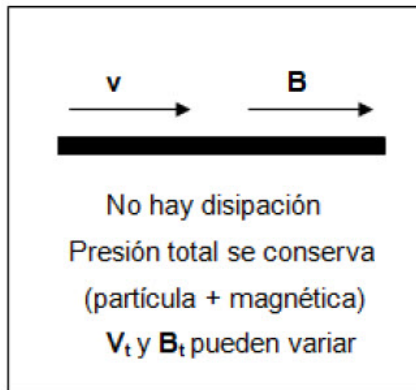


Figura 2.16: Propiedades de una discontinuidad tangencial. [GE01]

Como se mencionó anteriormente, las RIC toman forma a grandes distancias del Sol. Con base en observaciones realizadas por distintas naves, se sabe que la mayoría tienen una forma bien definida alrededor de ≈ 5 UA; sin embargo, a la distancia de la Tierra (1 UA), algunas veces es posible detectarlas. Las firmas características de una RIC en las observaciones in situ son: compresión de las líneas de campo magnético (campo magnético intenso), observación de viento solar lento, el choque frontal, la región de interacción de corrientes (velocidad media), choque reverso y viento solar rápido, flujo de partículas energéticas más intenso en los dos choques; aunque cabe aclarar que no necesariamente deben presentarse todas estas firmas para que se presente una RIC. En la Fig. 2.17 se tienen datos del MIP del paso de una RIC.

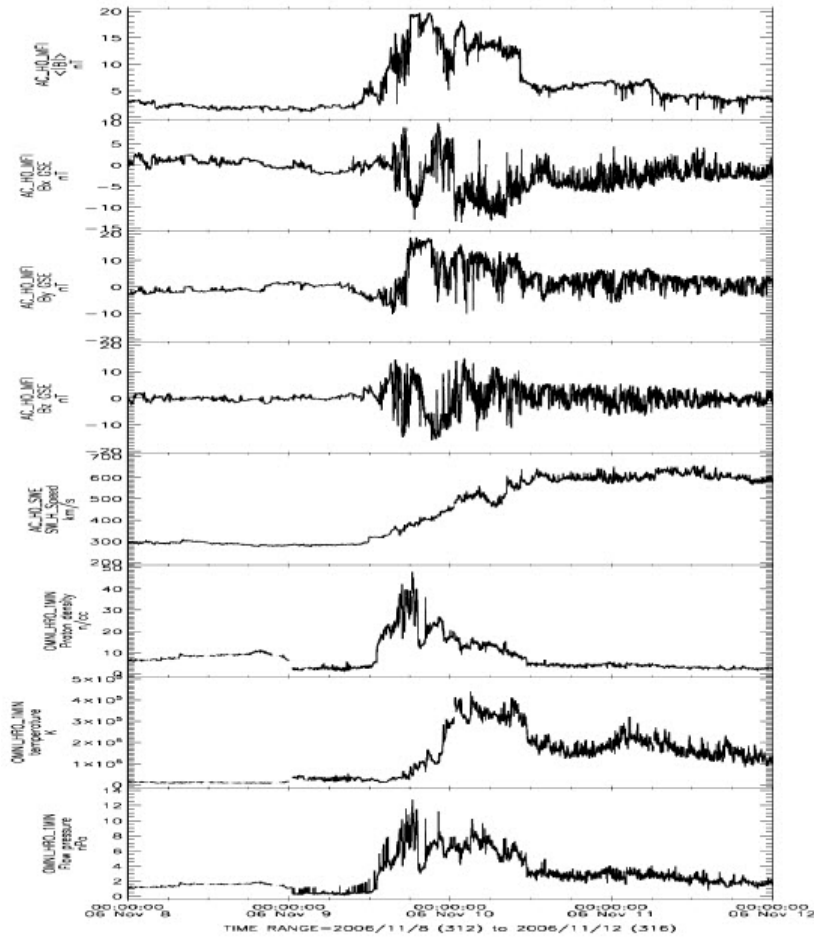


Figura 2.17: Observación in-situ de una RIC por la nave ACE, para el 9 de noviembre del 2006. Se observan los siguientes parámetros en los recuadros (de arriba hacia abajo): magnitud del campo magnético, Bx, By y Bz (en coordenadas GSE), velocidad de protones, densidad de protones, temperatura y presión. [?]

En la figura 2.17 se presenta una RIC, observada aproximadamente a las 13:00 del 9 de noviembre del 2006, con un choque frontal claramente visible: aumento rápido en la intensidad del campo magnético (primer recuadro) y rotando en sus componentes X y Z (segundo y cuarto recuadros) rápidamente. De un viento solar lento (≈ 300 km/s), empieza a incrementarse (quinto recuadro). La densidad se eleva drásticamente (sexto recuadro) mientras que la temperatura lo hace más gradual (séptimo recuadro). La presión total también se intensifica (octavo recuadro). Al existir un aumento en casi todos los parámetros, vemos que se está presentando una región de compresión.

La interfase de corriente no es muy notoria, pero se presenta a las 19:00 del mismo día, las firmas más claras son: decrecimiento violento en la densidad y la transición de un aumento gradual a un aumento rápido en la temperatura, la presión total también disminuye muy rápido.

El choque reverso de una RIC no está tan marcado como el frontal, se presenta a las 10:00 del 10 de noviembre. Se observa una discontinuidad en la intensidad del campo magnético (decrece), una estabilización en la velocidad (se empieza a detectar el viento solar rápido que lleva una velocidad constante de ≈ 600 km/s), una pequeña discontinuidad en la densidad y la presión total (decaen), una ligera caída en la temperatura. La RIC se encontró marcada, porque dentro de ella la intensidad del campo magnético fue grande y no estable; la presión total fue máxima, con lo que se observa que la RIC es una región de compresión.

2.6. Ondas de choque.

Una onda de choque es una perturbación no lineal que cambia, de manera irreversible, las propiedades del medio en el que se está propagando. Los cambios espaciales y temporales producidos por la onda de choque, son mucho menores que las escalas características del medio, por esto se puede considerar como una discontinuidad. En un tipo característico de ondas de choque (ondas no lineales), puede darse el caso que el frente de la perturbación se comprime y aumenta la temperatura del medio de manera irreversible; al aumentar la temperatura del medio, la parte trasera de la onda puede tener mayor velocidad (en magnitud) que la parte delantera; si esto sigue produciéndose, se puede llegar a que la parte trasera de la onda finalmente alcance a la delantera, produciéndose una onda de choque; al anterior proceso se le conoce como “*empinamiento de una onda*” (Fig. 2.18).

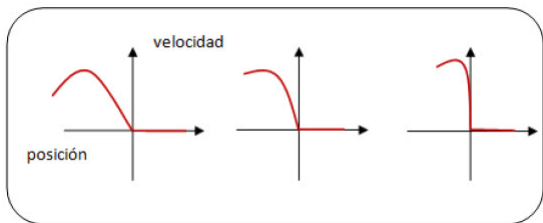


Figura 2.18: Formación del “empinamiento de una onda”. [GE01]

La velocidad de una onda compresiva, y en particular la velocidad del sonido en un gas ideal, está dada por la siguiente ecuación:

$$V_s^2 = \gamma \frac{P_0}{\rho_0} = \frac{\gamma K}{m} T_0$$

Donde P_0 es la presión del medio, ρ_0 la densidad del medio, K es la constante de Boltzmann y T_0 la temperatura del medio. De esta ecuación, se puede observar que la velocidad de propagación de una onda depende solamente de las propiedades del

medio en donde se propaga. La velocidad es proporcional a la presión y temperatura del medio. En una onda de choque, podemos ver como la parte trasera de la onda alcanza a la delantera, la parte delantera perturba al medio, lo comprime (aumenta presión y temperatura); la parte trasera va a viajar en este medio comprimido, por lo que su velocidad va a ser mayor que la parte delantera. Finalmente, la parte trasera alcanza por completo a la parte delantera, formándose lo que conocemos como onda de choque.

En resumen, una onda de choque ocurre cuando la velocidad de una perturbación en un medio, excede la velocidad característica de propagación. Entonces, la propagación normal no puede transportar toda la energía inyectada, se produce un cambio abrupto de los parámetros físicos del medio en el frente de la onda. Por ejemplo, si un objeto se mueve en el aire a una velocidad mayor que la de las moléculas, entonces éstas se acumulan delante de él; una onda de choque se propaga apartándose del objeto.

2.6.1. Ondas de choque magnetohidrodinámicas.

Las ondas de choque magnetohidrodinámicas (MHD) son un tipo de onda características de los plasmas, que se mueven en medios con presencia de un campo magnético. Separan dos plasmas con propiedades distintas (distintos campos magnéticos, velocidades, etc.).

Las ondas de choque se estudian mejor en un sistema de coordenadas en el cual, el frente de choque permanezca en reposo y el gas o el campo magnético fluyan a través de él (Fig. 2.19). Estas ondas pueden ocurrir en casi cualquier modo de propagación de ondas, mientras la onda macroscópica se mueva más rápidamente que los elementos microscópicos.

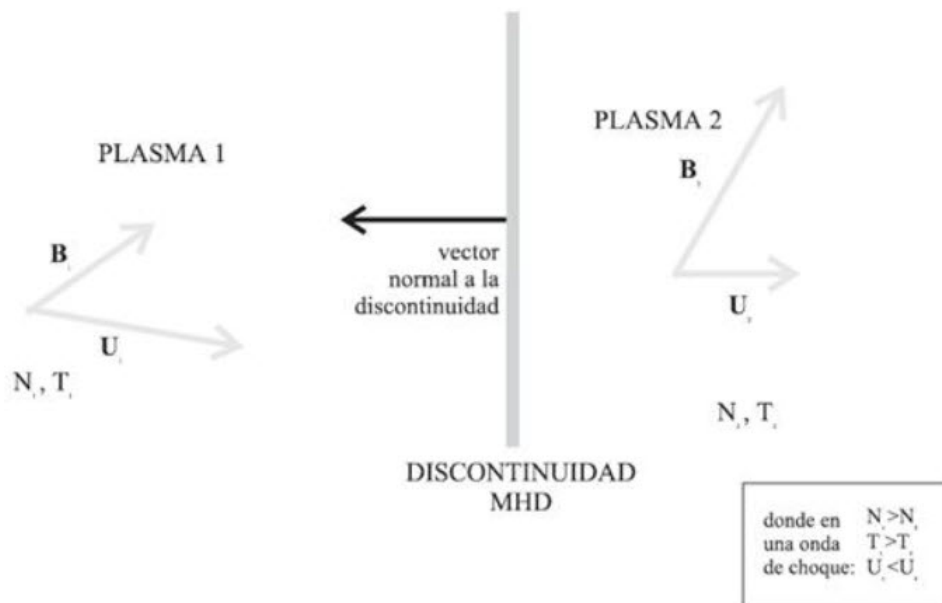


Figura 2.19: Discontinuidad MHD (Onda de choque). [GE01]

De la Fig. 2.19, se observa que si se está posicionado en la onda de choque, se verá un plasma que se aleja de nosotros (plasma 2) ya perturbado, a este plasma se le conoce como *corriente abajo*. De manera análoga podemos observar a un plasma que se acerca hacia nosotros sin perturbar, a este plasma se le conoce como *corriente arriba*.

Las condiciones de igualdad en la discontinuidad están dadas por las relaciones de Rankine-Hugoniot:

$$[\rho u_n] = 0 \quad (2.1)$$

$$\left[\rho u_n^2 + P + \frac{B^2}{2\mu_0} \right] = 0 \quad (2.2)$$

$$\left[\rho u_n \mathbf{u}_t - \frac{B_n}{\mu_0} \mathbf{B}_t \right] = 0 \quad (2.3)$$

$$\left[\rho u_n \left(\frac{1}{2} u^2 + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P}{\rho} \right) + u_n \frac{B^2}{\mu_0} - \mathbf{u} \cdot \mathbf{B} \frac{B_n}{\mu_0} \right] = 0 \quad (2.4)$$

Donde (2.1) es la ecuación de la conservación del flujo de masa (el subíndice n indica que se está tomando la componente normal del flujo con respecto al plano de la discontinuidad). (2.2) nos dice que la componente normal de la velocidad con respecto a la discontinuidad debe ser menor corriente abajo. (2.3) nos dice que el cambio en el momento lineal del plasma antes y después de ser perturbado, dependen de los cambios en la presión térmica y magnética (el subíndice t indica la componente tangencial al plano de la discontinuidad). (2.4) es la ecuación de conservación de energía.

La solución de las ecuaciones de Rankine-Hugoniot determina las propiedades detrás del frente de choque, dadas las propiedades adelante del mismo y la velocidad del choque. Para las ondas de choque compresivas, la densidad y la presión, así como la velocidad, se incrementan adelante del frente.

Como se mencionó anteriormente, la onda de choque perturba al medio comprimiéndolo; de este modo, aumenta su temperatura y densidad. En el caso de un medio hidrodinámico, donde las líneas de campo magnético vengán “congeladas” dentro de él, el choque también las comprime, por lo que el campo magnético se perturba, aumentando en magnitud y variando en sus componentes direccionales.

3 Decrecimientos Forbush: definición y parámetros del medio interplanetario involucrados en su análisis.

¿Qué es un decrecimiento Forbush?

Existen diversas interpretaciones sobre lo que es un decrecimiento Forbush (dF), en general se establece como un evento de la radiación cósmica secundaria a nivel global en la Tierra, varias estaciones lo observan, sin embargo, en este trabajo se define un dF como el fenómeno que cumple lo siguiente:

1. Su caída, en el porcentaje de la intensidad de la radiación cósmica secundaria, es de por lo menos 1.5%; esto con el fin de diferenciarse claramente de la variación diurna (amplitud aprox. de 0.7%). El intervalo entre el inicio y el punto mínimo se da en menos de 24 horas.
2. El tiempo de recuperación es de 7 días, en promedio.

Con esta definición, se procede a realizar el análisis de los datos que proporcionan los monitores de neutrones que se van a utilizar.

Anteriormente se describió a grandes rasgos al MIP y algunos fenómenos solares que evolucionan en él, y afectan a la Tierra y al paso de la radiación cósmica. A continuación se mencionaran algunos parámetros del MIP, que nos ayudaran al estudio de los decrecimientos Forbush.

Se intentara dar un enfoque general a estos parámetros, sin embargo, se describen mas para el caso de EMCI's, ya que los resultados obtenidos (ver capítulo 4), indican que son las que más afectan.

3.1. Parametros del medio interplanetario.

3.1.1. Campo magnético.

En el capitulo anterior se abordó el tema de cómo el campo magnético del Sol es arrastrado hacia el medio interplanetario. Las líneas de campo magnético viajan

«congeladas» en el viento solar, por lo que a la altura de la Tierra puede ser medida la magnitud de dicho campo: un incremento indica que las líneas de campo se encuentran juntas (campo comprimido) mientras que una caída muestra que se están separando (campo descomprimido).

Dado que el campo magnético es vectorial, se analiza también su dirección, utilizando coordenadas GSE (del inglés Geocentric Solar Ecliptic). Estas coordenadas toman como eje X la línea imaginaria Tierra-Sol, considerando sentido positivo de la Tierra hacia el Sol; el eje Z paralelo al polo eclíptico, donde el sentido positivo apunta hacia el polo norte geomagnético; finalmente el eje Y en el plano de la eclíptica, apuntando hacia el polvo, en sentido opuesto al movimiento de la Tierra [?].

Es de vital importancia el análisis del campo magnético, ya que las estructuras a gran escala presentes en el MIP traen su propia configuración magnética, desenvolviéndose conforme se alejan del Sol; al medir tanto la intensidad magnética como la dirección de sus componentes, se puede dar una idea del fenómeno observado.

La intensidad promedio del campo magnético a la altura de la Tierra es 6 nT [Bru05].

En el caso de las EMCI, son regiones que se diferencian del viento solar ordinario, poseen su propia topología magnética, al alejarse del Sol, su intensidad magnética disminuye. Con esto en mente, se pueden observar sus límites. La mayoría de las EMCI traen asociado un choque interplanetario por delante de ellas, este se puede observar fácilmente como una discontinuidad (salto) en las mediciones de la intensidad magnética y algunas veces en sus componentes, si la EMCI es una nube magnética, se observara una suave rotación en por lo menos una de las componentes del campo magnético interplanetario.

En el caso de las regiones de interacción corrotantes (RIC), la identificación es más compleja, debido a que estas estructuras no se encuentran totalmente desarrolladas a la altura de la Tierra. Poseen choques delanteros y reversos que se observan como discontinuidades, se observan de la misma forma que los asociados a EMCI. Dado que son corrientes rápidas y lentas limitadas por dos choques, se presenta una compresión del campo magnético; en la interfase de corriente se puede observar un pico en la intensidad magnética, pero sobretodo el cambio de rotación en las componentes del campo magnético, ya que es en esta región en la que se diferencian el viento rápido del lento.

3.1.2. Velocidad.

El viento solar *ordinario* tiene una velocidad aproximada de 350 km/s[Bru05]. Al existir variaciones en la velocidad, se pueden detectar regiones que estén viajando más rápido o lento.

Al observar una EMCI, como se menciono anteriormente, traen asociado un choque, dicho choque se observa como una discontinuidad en la velocidad. En el cuerpo de

la EMCI, se observa una gradual caída en la velocidad, teniendo la parte delantera una mayor velocidad que la trasera, indicativo de que se encuentra en expansión.

Para el caso de las RIC, de igual forma se observan los choques delantero y trasero como discontinuidades. Dentro una corriente lenta que es embestida por una corriente rápida, diferenciadas por la interfase de corriente, esto se observa como un aumento gradual o rápido en las mediciones de la velocidad, no necesariamente se observa una discontinuidad en la interfase de corriente.

El medir la velocidad de cualquier estructura, además de que nos indica una medida de su rapidez, nos ayuda a determinar su tamaño, como se verá en el capítulo 4.

3.1.3. Densidad y temperatura.

La densidad promedio del viento solar, a la altura de la Tierra, es $15 \text{ Partículas/cm}^3$, se considera libre de colisiones [Bru05]. La temperatura promedio de protones es $5 \times 10^4\text{K}$ y de electrones de $2 \times 10^5\text{K}$ [Bru05].

En el caso de las EMCI, que son regiones diferenciadas y tienen su propia dinámica, la composición de partículas dentro de la EMCI, observada a la altura de la Tierra, debe ser la misma que la que tenía cuando se origina en el Sol. [How11]

Como se menciona en el capítulo anterior, la mayoría de las EMCI tienen su origen en la corona solar donde existe una mayor abundancia de iones pesados; por lo que las EMCI pueden asociarse con algunas anomalías, por ejemplo un aumento en los estados de ionización del oxígeno y hierro [Ric10]; de ahí que dentro de una EMCI exista un mayor número de iones pesados, con respecto al viento solar [Ric10]. Debido a que la velocidad a la que viajan los iones es supersónica, no pueden «comunicarse» de vuelta con el Sol, por lo que los iones dentro de una EMCI deben enfriarse a medida que se expande [Rus03].

Juntando esto, una EMCI se identifica como una región más fría, menos densa, y con una tasa mayor de iones pesados que el viento solar ordinario.

En el caso de las RIC, se tiene una corriente de viento lento, de mayor densidad y menor temperatura; que es alcanzada por una corriente rápida, menos densa y más caliente. En los choques se pueden observar discontinuidades en ambos parámetros; sin embargo donde es más claro es en la interfase de corriente, se presenta una clara discontinuidad así como una anti coincidencia: de observar una región «fría» y densa, se pasa a una más caliente y poco densa.

3.1.4. Beta del plasma (β).

Es uno de los parámetros que se pueden medir dentro de un plasma, el viento solar al ser uno, se puede obtener. Es la razón entre la presión cinética y la presión magnética del plasma. se determina como:

$$\beta = \frac{\text{presión cinética}}{\text{presión magnética}} = \frac{nk_B T}{B^2/2\mu_0}$$

Donde μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío, n el número de partículas, k es la constante de Boltzmann. Cuando $\beta > 1$, entonces la presión del gas domina sobre la presión magnética, esto es común obsérvalo en el MIP, donde el campo magnético es dominado por el viento solar, llevándose consigo. Si $\beta < 1$ esto implica que la presión magnética es la que está dominando.

Es un parámetro adimensional, básicamente nos indica si las fuerzas magnéticas o cinéticas están dominando al plasma.

En el caso de las EMCI la presión magnética domina (mayor intensidad magnética), por lo que se cumple que $\beta < 1$ dentro de la estructura. Considerando esto, una de las maneras de identificar una EMCI es a través de la determinación de β [How11, Jia06].

3.1.5. Parámetro T_P/T_{exp} .

Es un parámetro construido a través de mediciones de la temperatura de protones y de un modelo físico [Lop87]. Construido especialmente para observar regiones diferenciadas del MIP, en este caso EMCI.

Si en el MIP se presentan zonas con baja temperatura de protones, estas zonas se asocian a regiones de plasma que se encuentran térmicamente aisladas de los alrededores, por lo que es uno de los indicadores más confiables de la presencia de las EMCI [Jia06]. Para poder determinar estas regiones, se hace la comparación de la temperatura de protones (T_P) con la temperatura esperada (T_{exp}).

La temperatura esperada (T_{exp}) proviene de un modelo empírico, donde se construye a través de datos de la velocidad del viento solar (V_{vs}) [Lop87], con base en datos recolectados de varias naves (Explorer 43 y 34, Pioneer 6, Helios 1 e IMP 8) durante varios años. En dicho modelo, se encontró que la distribución de T_P - V_{vs} tiene un cambio de pendiente cuando $V_{vs} = 500 \text{ km/s}$, ajustándose una distribución lineal cuando la velocidad es igual o mayor y una distribución cuadrática cuando es menor.

La temperatura de protones se obtiene de datos de naves como ACE, WIND, OMNI, etc.

La temperatura esperada se construye de la siguiente manera, considerando datos de OMNI [Ric95]:

$$T_{exp} = (0.031V_{vs} - 5.1)^2 \quad Si \quad V_{vs} < 500 \text{ km/s}$$

$$T_{exp} = (0.51V_{vs} - 142) \quad Si \quad V_{vs} \geq 500 \text{ km/s}$$

Como se puede observar, T_{exp} proviene de un modelo donde se considera la correlación con V_{vs} , por lo que se puede considerar como un punto de referencia para determinar que tan drásticos pueden ser los cambios de temperatura.

Al construir $\frac{T_p}{T_{exp}}$, se tiene un parámetro adimensional, que nos indica que tanto se diferencian T_p y T_{exp} , de ahí que si se presenta una anomalía (una región de muy baja temperatura), esta pueda detectarse con mayor facilidad.

Se define dicha anomalía en la temperatura cuando se cumple que $\frac{T_p}{T_{exp}} \leq 0.5$, si se cumple esto, se puede decir que se está en presencia de una EMCI [Ric95].

3.1.6. Presión total del plasma perpendicular al campo magnético.

La presión total del plasma perpendicular al campo magnético (P_T), es un parámetro que combina la información de múltiples componentes del plasma, consiste en la suma de la presión magnética y la energía cinética del plasma o presión térmica. Es un parámetro complementario, ya que provee una manera de clasificar la trayectoria del encuentro de la EMCI con el satélite, relativa a su meridiano central y, en algunos casos, una manera de identificar el inicio y fin del evento [Rus05]. La presión total se define como:

$$P_T = \frac{B^2}{2\mu_0} + \sum_j n_j k T_{perp,j}$$

Donde B es la intensidad del campo magnético, μ_0 la permeabilidad magnética del vacío, n el numero de partículas, k es la constante de Boltzmann, T_{perp} la temperatura perpendicular al campo magnético y el subíndice j representa a los protones, electrones y partículas α .

Se pueden dividir las firmas de una EMCI en aquellas que son parámetros del fluido, y aquellas que involucran tanto la composición del plasma o distribuciones de partículas energéticas.

Se examina P_T dentro de la aproximación de campo magnético de líneas rectas, en la que las fuerzas de curvatura magnética no juegan un papel importante en el cálculo.

Si una nave atraviesa directamente el centro de una EMCI, ella vera el aumento de la intensidad del campo magnético y su rotación, esto se relaciona a la naturaleza de una “cuerda” magnética que puede estarse auto-balanceando o está libre de fuerzas, de tal forma que la fuerza de curvatura magnética balancea parcial o totalmente el gradiente de presión magnética; esta región central de *gran intensidad* puede también estar magnéticamente quieta, ya que corresponde a una región donde la beta del plasma es baja (la presión magnética domina sobre la presión cinética del plasma); también la “cuerda” podría estarse expandiendo en su sección transversal a medida que se aleja del Sol. Esta expansión puede ser detectada como un decremento de la

velocidad del viento solar a través de la EMCI, con la parte delantera moviéndose más rápido que la parte trasera.

Si se ve a cada uno de los elementos que contribuyen a P_T por separado, se observa que cada parámetro cambia en tiempos y maneras distintas cada uno. Sin embargo, si observamos P_T tal cual, se observa un patrón coherente cuando la nave cruce el choque, viaja a través de la “*cuerda*” magnética y finalmente por la parte trasera de la EMCI, para adentrarse en el viento solar al final de esta.

Al identificar una EMCI, las mediciones de la nave deben mostrar primero un aumento rápido en P_T a medida que atraviesa el choque; detrás del choque, se espera, en general, un gradiente pequeño en la presión a medida que la nave atraviesa a través de la funda de la EMCI; después la nave se adentra en el obstáculo magnético, aquí P_T se incrementa como si lo hiciera en la magnetosfera terrestre, ya que no se toman en cuenta las fuerzas que *auto-balancean*. Eventualmente cuando la nave pasa el centro de la “*cuerda*”, la presión decae, si la “*cuerda*” se está expandiendo, se espera que la presión perpendicular tenga una caída abrupta al final de la estructura, similar a como sucede al frente.

En base a P_T , se definen 3 grupos de interacción entre una EMCI y la Tierra, según se muestra en la Fig. 3.1:

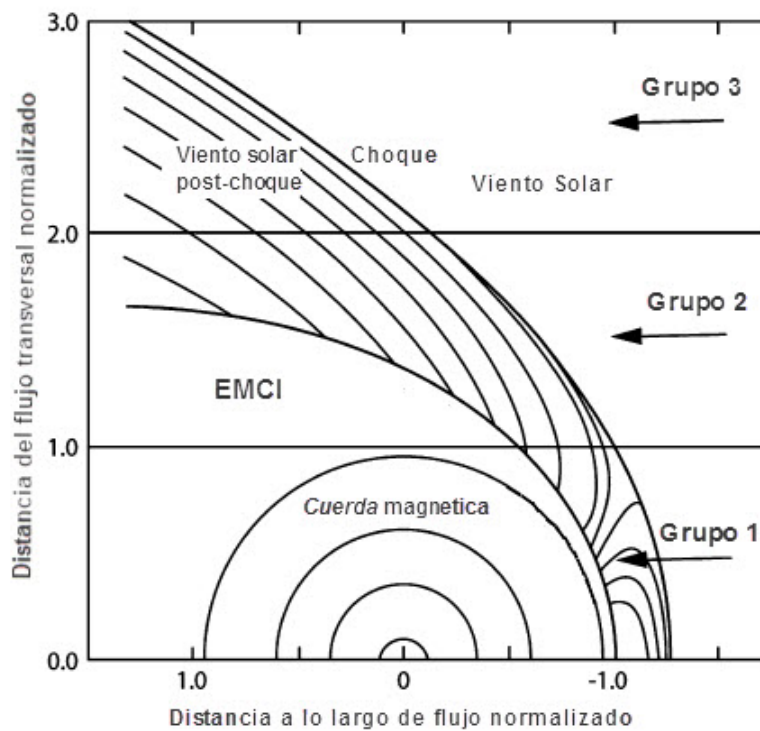


Figura 3.1: Diagrama interpretativo de los grupos de interacción entre la EMCI y la Tierra [Rus05].

- Grupo 1.- Eventos que parecen ser interpretables en términos del paradigma estándar de una EMCI/“*cuerva*” magnética. Existe un salto en la presión cuando se presenta el choque, una meseta y un pico de presión máxima en el centro, generalmente; empieza a decaer lentamente y finalmente una caída repentina en la presión. Se interpretan como encuentros donde la trayectoria toma a la Tierra a través de la EMCI completamente: Choque, funda, «*cuerva*» magnética, cuerpo restante de la EMCI (Fig. 3.2).

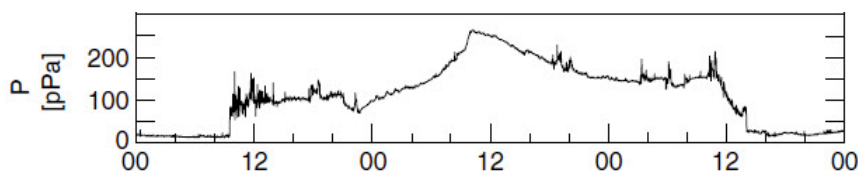


Figura 3.2: Perfil de P_T perteneciente al grupo 1. Se grafica del 6 al 8 de Noviembre del 2000. [Rus05]

- Grupo 2.- Eventos donde el perfil de presión no siempre exhibe un máximo central; algunas veces la región central tiene una presión constante, otras veces un mínimo en presión y en unas otras hay un máximo al final del evento; esto puede deberse a una corriente rápida alcanzando a una EMCI, comprimiéndola, también puede deberse a una “*cuerva*” magnética que continúa expandiéndose, después de que su pico máximo de presión central ha desaparecido. Se interpretan como encuentros parciales con la EMCI (Fig. 3.3).

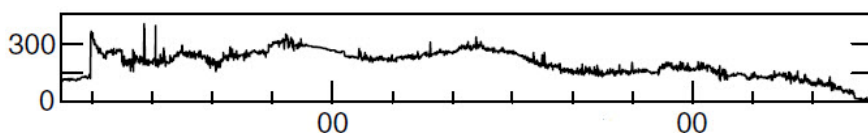


Figura 3.3: Perfil de P_T perteneciente al grupo 2. Se grafica el 1 de Octubre del 2002. [Rus05]

- Grupo 3.- Eventos que tienen una rápida subida en la presión al inicio del evento, y un decaimiento monótono. Estos eventos sugieren el paso de una onda de choque pero sin la llegada de una EMCI. Se interpretan como eventos donde solo hay interacción con la onda de choque: la temperatura y densidad se elevan en el choque, pero detrás del choque no hay *obstáculo* magnético (EMCI), el plasma se expande, se presenta una zona de rarefacción, se acelera y se enfría; por lo que la presión decae monótonamente (Fig. 3.4).

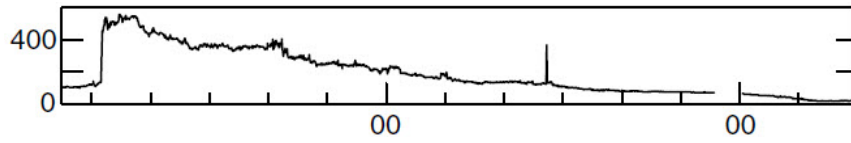


Figura 3.4: Perfil de P_T perteneciente al grupo 3. Se grafica del 8 al 9 de Noviembre de 1998.
[Rus05]

3.1.7. Identificación de EMCI's y RIC's.

Como conclusión, se van a utilizar todos estos parámetros para la identificación de las EMCI, los criterios que se van a utilizar para identificarlas son:

- Discontinuidades en la intensidad del campo magnético y sus componentes, en velocidad, temperatura y densidad.
- Aumento en la intensidad campo magnetico.
- Aumento en la velocidad para después disminuir gradualmente.
- Baja temperatura de protones.
- Baja densidad.
- $\beta < 1$.
- $\frac{T_p}{T_{exp}} \leq 0.5$.

En el caso de las RIC, se van a considerar lo siguiente:

- Discontinuidad delantera y trasera, así como la interfase de corriente.
- Dentro de la RIC, una mayor intensidad magnética, al encontrarse comprimido el campo por los choques.
- Viento lento que aumenta conforme la estructura va pasando.
- Una región de alta densidad y baja temperatura, que cambia en la interfase de corriente, pasando a una región de baja densidad y mayor temperatura.

3.2. Índice Dst

El índice Dst (del inglés Disturbance storm time) mide el grado de la perturbación del campo magnético de la Tierra. Es operado por la universidad de Kyoto, Japón, que obtiene información de observatorios geomagnéticos localizados a latitudes medias y ecuatoriales, a diferentes longitudes.

El índice Dst considera la desviación de la componente horizontal del campo geomagnético (BH), con respecto a una línea base, que se calcula con valores promedio de días quietos, esto define el valor cero de dicho índice [Ont].

El nivel de actividad geomagnética se clasifica en quieto, débil, moderado o intenso según lo establecido por [GV94]:

Nivel actividad geomagnética	Índice Dst (nT)
Quietos	Dst > -30
Débil	-30 ≥ Dst ≥ -50
Moderado	-50 ≥ Dst ≥ -100
Intenso	-100 ≥ Dst

Cuadro 3.1: Clasificación de la actividad geomagnética. [Ont]

Cuando el índice Dst sufre una caída drástica, es un indicador de una tormenta geomagnética, dicha tormenta geomagnética puede venir acompañada de un SSC (del inglés, Sudden storm Commencement), que se caracteriza por un abrupto incremento en el índice Dst, que puede durar algunos minutos u horas [OGE10].

Este índice nos va a ayudar a identificar la presencia de una tormenta geomagnética, de un SSC, y si existe una relación con los decrecimientos Forbush.

4 Análisis de decrecimientos Forbush

4.1. Construcción de la base de datos.

Como se mencionó en el resumen, el trabajo de investigación que se presenta, consistió en elaborar una base de datos de los dF acontecidos durante el periodo del 2007 al 2013, que comprende la parte ascendente del ciclo solar 24. Se escogieron tres observatorios:

- Monitor de neutrones 9-NM-64, localizado en Oulu, Finlandia; con una localización geográfica de 65.05°N , 25.47°E y una rigidez umbral de 0.8 GeV.
- Observatorio de Moscú, Rusia, con una localización geográfica de 55.47°N 37.32°E y una rigidez umbral de 2.43 GeV.
- Observatorio “Dr. Javier Otaola Lizarzaburu”, localizado en Ciudad Universitaria, México D.F. con una localización geográfica de 19.19°N y 99.11°O y una rigidez umbral de 8.2 GeV.

La razón de tomar estos tres observatorios fue su distinta latitud geográfica, el considerar una estación de baja rigidez umbral (Oulu), una de mediana (Moscú) y una de alta (México) y que dichas estaciones reciben radiación cósmica de regiones del cielo distintas, debido a sus conos asintóticos; por lo que se capta un fenómeno de escala mundial.

Se procedió a analizar las gráficas que presentan en internet estos tres observatorios, tomando como base el observatorio de Oulu, el de menor rigidez umbral, por ser el más sensible. Se analizó día por día desde 2007 hasta 2013 y se recabó información de los decrecimientos encontrados, sus tiempos de inicio, magnitud del decrecimiento y su tiempo de recuperación aproximados. Al terminar este análisis, se obtuvo una primera base de datos que sirvió de guía.

Una parte importante de esta etapa fue encontrar la manera de graficar los datos de las 3 estaciones con las mismas escalas para poder comparar su comportamiento de una manera más efectiva. Para realizar esto se llevó a cabo lo siguiente:

- Para cada uno de los dF, se descargaron los datos de cuentas horarias de cada uno de los observatorios corregidos por efectos de presión atmosférica.
- Teniendo todos los datos, se normalizaron a la intensidad promedio de los datos corregidos por variaciones atmosféricas durante el mes de junio de 1989.

Dichos valores son:

1. Oulu: 5445.65 a 101497.2 Pa.
2. Moscú: 7810.33 a 98893.2 Pa.
3. México: 76487 a 77817.6 Pa.

Para proceder con el análisis, se utilizó el protocolo IDL para desarrollar graficas donde se incluyan las 3 estaciones a una misma escala y con una mejor visualización. Con este programa se obtienen gráficas similares a la siguiente:

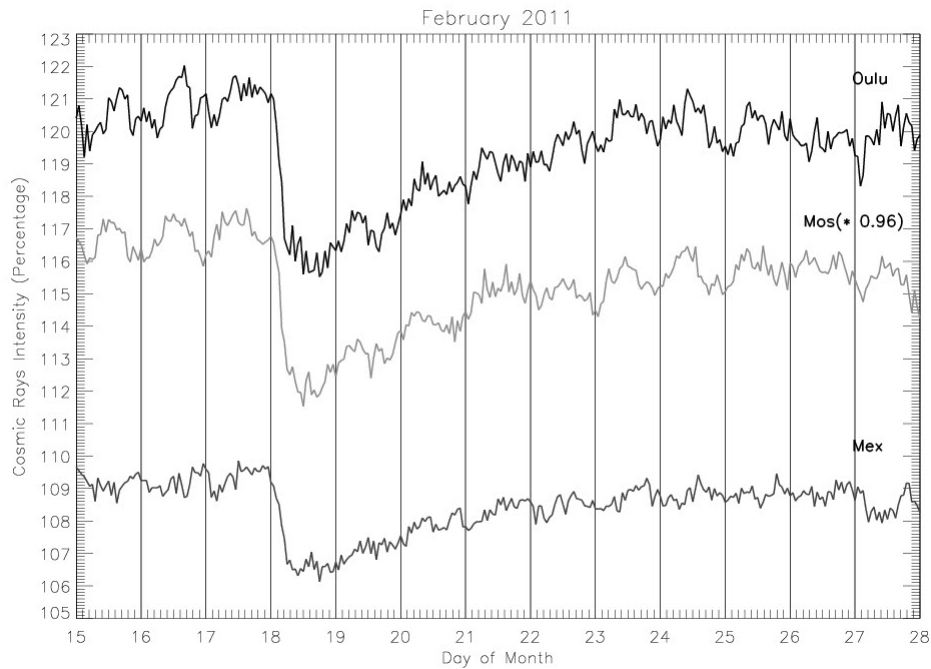


Figura 4.1: dF que se presenta el 18 de Febrero del 2011. Se multiplican los datos de Moscú, principalmente, por un factor (0.97 en la mayoría de las veces); esto con el fin de evitar que se traslape con las otras graficas. Esto no afecta la intensidad de las caidas.

Con esta primera base de datos, el segundo paso fue obtener información del comportamiento del medio interplanetario en los días anteriores y posteriores a los dF, con el fin de identificar los fenómenos físicos que pudieron producirlos. Además, se obtuvo información del comportamiento de la magnetosfera terrestre a través del índice Dst. Se buscó si se presentaron tormentas geomagnéticas con inicios repentinos (SSC), para estudiar la relación de estos fenómenos con los dF.

4.1 Construcción de la base de datos.

Se presentaron 60 eventos en el periodo mencionado anteriormente (Fig. 4.2).

FD, Oulu	mag	FD, Moscow	mag	FD, Mexico	mag
2007					
29/01/2007 12:00	3	29/01/2007 10:00	2	No dF	0
18/05/2007 12:00	3	18/05/2007 14:00	2	18/05/2007 19:00	1.5
19/11/2007 17:00	2.7	19/11/2007 15:00	2.5	19/11/2007 17:00	1.8
2008					
14/06/2008 17:00	3	14/06/2008 17:00	2	No dF	0
25/06/2008 12:00	2.5	25/06/2008 12:00	2.7	25/06/2008 15:00	1.6
12/07/2008 14:00	2.2	12/07/2008 10:00	2	No dF	0
02/09/2008 20:00	3	02/09/2008 20:00	3	03/09/2008 00:00	1.5
2009					
05/08/2009 08:00	2	05/08/2009 08:00	2	05/08/2009 05:00	1.7
2010					
20/01/2010 10:00	2.5	20/01/2010 10:00	3.1	21/01/2010 00:00	1.5
05/04/2010 10:00	4.5	05/04/2010 10:00	2.8	05/04/2010 10:00	1.7
28/05/2010 15:00	4.4	28/05/2010 15:00	3.5	28/05/2010 16:00	1.5
03/08/2010 18:00	5.4	03/08/2010 18:00	4.2	03/08/2010 17:00	2.2
15/09/2010 04:00	2.5	15/09/2010 04:00	3	15/09/2010 04:00	2.5
05/10/2010 12:00	2.7	05/10/2010 10:00	2.5	05/10/2010 15:00	1.6
2011					
18/02/2011 00:00	5	18/02/2011 00:00	5	18/02/2011 00:00	3.2
29/03/2011 17:00	3.8	29/03/2011 17:00	4.4	29/03/2011 20:00	2.4
02/04/2011 04:00	3.2	02/04/2011 04:00	3.2	02/04/2011 02:00	1.9
05/04/2011 14:00	4	05/04/2011 14:00	3	05/04/2011 21:00	2.7
04/06/2011 22:00	4	04/06/2011 22:00	4.8	05/06/2011 02:00	1.8
16/06/2011 11:00	4	16/06/2011 11:00	4	16/06/2011 19:00	3
22/06/2011 12:00	4.5	22/06/2011 12:00	4.2	22/06/2011 12:00	2.7
10/07/2011 13:00	3.9	10/07/2011 13:00	3.5	10/07/2011 22:00	2.6
05/08/2011 10:00	5.7	05/08/2011 10:00	5.3	05/08/2011 17:00	2.5
10/09/2011 00:00	3.2	10/09/2011 02:00	3	10/09/2011 04:00	2
17/09/2011 14:00	3.3	17/09/2011 14:00	3.5	No dF	0
26/09/2011 14:00	5.7	26/09/2011 14:00	5	26/09/2011 15:00	2.2
24/10/2011 18:00	6.8	24/10/2011 19:00	5	24/10/2011 19:00	3.5
28/11/2011 19:00	4.7	28/11/2011 19:00	4	No dF	0
2012					
01/01/2012 17:00	2	01/01/2012 17:00	2	No dF	0
22/01/2012 05:00	3.6	22/01/2012 05:00	3	22/01/2012 05:00	1.9
24/01/2012 12:00	4.7	24/01/2012 12:00	4.5	24/01/2012 11:00	2.5
30/01/2012 19:00	4.6	30/01/2012 19:00	3.8	30/01/2012 21:00	3.5
26/02/2012 19:00	5.3	No data	0	26/02/2012 20:00	2.6
08/03/2012 11:00	12	08/03/2012 11:00	10.5	08/03/2012 02:00	7.5
05/04/2012 10:00	4.3	05/04/2012 07:00	4.2	05/04/2012 10:00	3.5
25/04/2012 00:00	2.7	25/04/2012 00:00	2.7	25/04/2012 00:00	1.8
03/05/2012 12:00	2.5	03/05/2012 12:00	2.7	03/05/2012 14:00	1.8
17/05/2012 10:00	3.5	17/05/2012 10:00	3	17/05/2012 17:00	2.2
16/06/2012 18:00	5.5	16/06/2012 18:00	4	16/06/2012 20:00	4
04/07/2012 12:00	4	04/07/2012 12:00	4.4	04/07/2012 14:00	2.7
14/07/2012 18:00	7.3	14/07/2012 18:00	6.8	14/07/2012 18:00	4
20/07/2012 00:00	3.3	20/07/2012 00:00	2.6	20/07/2012 00:00	2.5
27/07/2012 17:00	3.4	27/07/2012 17:00	2.2	No dF	0
03/09/2012 11:00	6.5	03/09/2012 11:00	5.7	03/09/2012 11:00	3
07/10/2012 07:00	4.8	07/10/2012 11:00	4.5	No dF	0
13/11/2012 00:00	4	13/11/2012 00:00	4	13/11/2012 00:00	2.6
23/11/2012 22:00	3.8	23/11/2012 22:00	3.8	23/11/2012 22:00	2.8
2013					
18/01/2013 03:00	3.8	18/01/2013 00:00	3.5	No dF	0
14/03/2013 11:00	3.8	14/03/2013 11:00	4.5	14/03/2013 17:00	2.4
17/03/2013 03:00	4	17/03/2013 00:00	3.6	17/03/2013 00:00	2.4
13/04/2013 22:00	5.6	13/04/2013 22:00	5.5	14/04/2013 00:00	4
06/05/2013 01:00	2.8	06/05/2013 01:00	1.5	06/05/2013 00:00	1.5
15/05/2013 05:00	3.5	15/05/2013 05:00	2	No dF	0
24/05/2013 19:00	3	24/05/2013 19:00	2.3	25/05/2013 05:00	2.1
23/06/2013 10:00	4.7	23/06/2013 10:00	4.4	23/06/2013 06:00	3.3
04/08/2013 08:00	2.5	04/08/2013 09:00	2	No dF	0
03/09/2013 07:00	2.9	03/09/2013 07:00	2.8	03/09/2013 00:00	3.2
02/10/2013 05:00	3	02/10/2013 05:00	2.5	02/10/2013 00:00	1.7
11/11/2013 00:00	2.2	11/11/2013 00:00	2	No data	0
14/12/2013 20:00	5.6	14/12/2013 20:00	5.5	14/12/2013 19:00	2.8

Figura 4.2: Lista de los 60 decrecimientos Forbush encontrados en el periodo 2007-2013. De izquierda a derecha se enlistan los decrecimientos en Oulu, Moscú y México con sus respectivos porcentajes de caída.

Se realizaron histogramas de los eventos en cada estación y uno en conjunto (Figs 4.3-4.6):

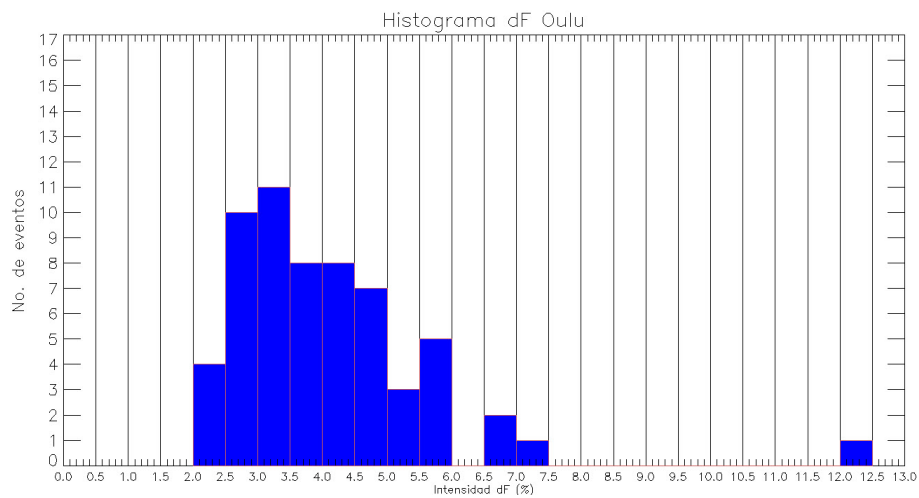


Figura 4.3: Histograma de eventos en Oulu.

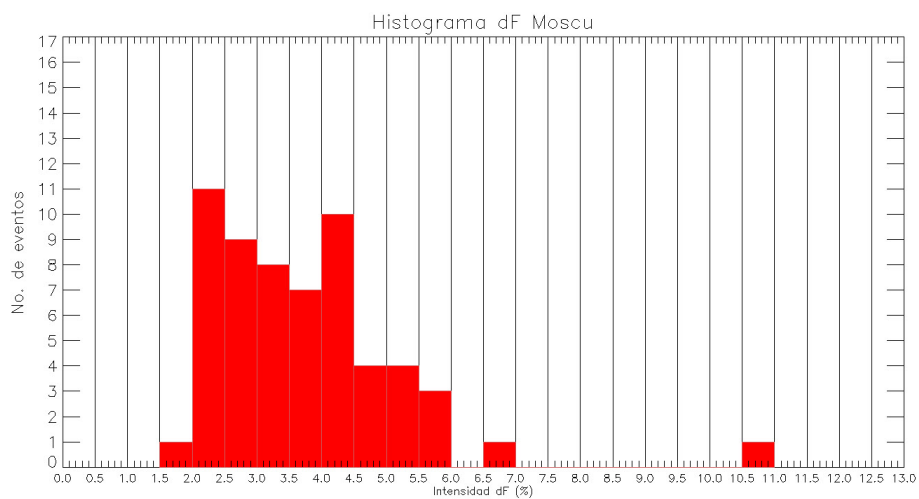


Figura 4.4: Histograma de eventos en Moscú

4.1 Construcción de la base de datos.

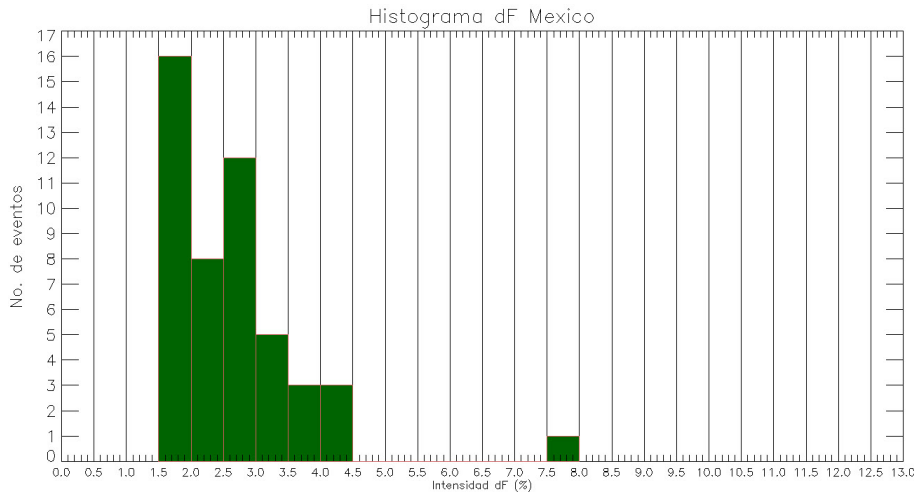


Figura 4.5: Histograma de eventos en México

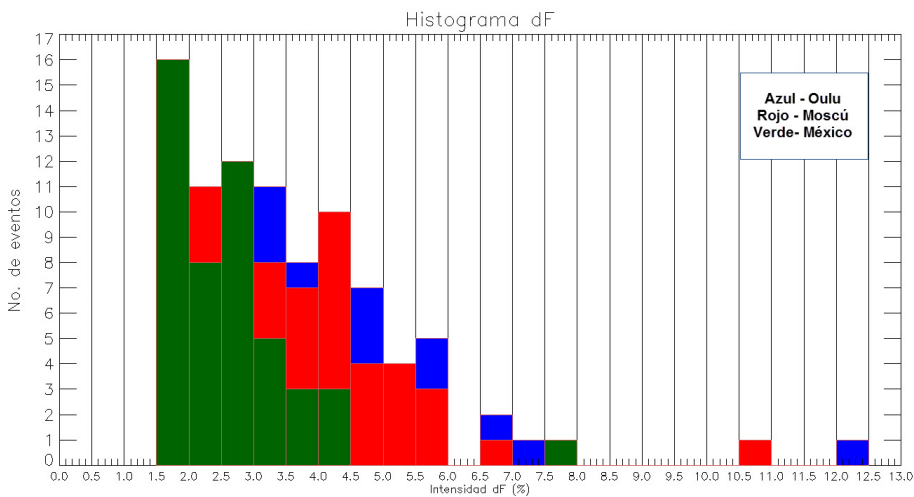


Figura 4.6: Histograma de eventos en total

Los histogramas nos ayudaron a observar la distribución de los eventos dependiendo de su intensidad (porcentaje de caída). Como se observa, se realizó un corte de intensidad cada 0.5%, todos los eventos dentro de los límites son contados en ese periodo.

Se observa que en Oulu se presenta el mayor número de eventos entre 3.0 y 3.5%, en Moscú entre 2.0 y 2.5% y en México entre 1.5 y 2.0%, lo que nos indica una mayor probabilidad de encontrar un evento intenso en Oulu.

La segunda función de los histogramas, es establecer un límite inferior de intensidad, que es 5.5% en Oulu, de tal manera que se asegura que los eventos aparecen en las 3 estaciones.

Tomando esto en cuenta, son 9 eventos los que quedan seleccionados para analizarlos:

Evento	Comienzo Oulu (TU)	Caida (%)	Comienzo Moscu (TU)	Caida (%)	Comienzo Mexico (TU)	Caida (%)
1	05/Ago/2011 11:00	5.7	05/Ago/2011 11:00	5.3	05/Ago/2011 17:00	2.5
2	26/Sep/2011 14:00	5.7	26/Sep/2011 14:00	5	26/Sep/2011 15:00	2.2
3	24/Oct/2011 19:00	6.8	24/Oct/2011 19:00	5	24/Oct/2011 18:00	3.5
4	08/Mar/2012 11:00	12	08/Mar/2012 11:00	10.5	08/Mar/2012 00:00	7.5
5	16/Jun/2012 10:00	5.5	16/Jun/2012 10:00	4	16/Jun/2012 18:00	4
6	14/Jul/2012 18:00	7.3	14/Jul/2012 18:00	6.8	14/Jul/2012 17:00	4
7	03/Sep/2012 12:00	6.5	03/Sep/2012 12:00	5.7	03/Sep/2012 11:00	3
8	13/Abr/2013 23:00	5.6	13/Abr/2013 23:00	5.5	14/Abr/2013 00:00	4
9	14/Dic/2013 17:00	5.6	14/Dic/2013 17:00	5.5	14/Dic/2013 19:00	2.8

Cuadro 4.1: Decrecimientos Forbush seleccionados para su análisis.

4.2. Análisis de eventos seleccionados

4.2.1. Consideraciones previas

En el análisis de los fenómenos interplanetarios, se va a considerar lo siguiente:

- En el caso de la velocidad de las Eyecciones de Masa Coronal (EMC), se utilizará la información dada por [Wea]; si no hay información, se considera la velocidad como aquella observada a 20 radios solares [lisa]. En cualquier caso, se asume que dicha velocidad no cambia (constante).
- Se considera el inicio del dF en Oulu.
- Para todas las horas, se considera la hora universal.
- Para el calculo de la velocidad promedio de las EMCI, se consideran los tiempos iniciales y finales del catalogo de Richardson y Cane , esto para tener mas precision. <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm> [oc].
- Se toma el promedio aritmetico de todos los datos en el rango de tiempo. Esta velocidad es puramente informativa, mas adelante se menciona un metodo mas eficaz para calcular el «tamaño» de la EMCI.
- Los tiempos en cada evento se toman en horas.
- Para la probable asociación con el origen solar de las EMCI, se toma informacion de <http://www.spaceweather.com> y de http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/ ([Wea, lisa])
- La identificación de las SSC, se tomo de una base de datos en internet, elaborada por el Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences <http://www.wdcb.ru/stp/data/sudden.com/ssc.dat> [Lisb].
- Para determinar el «grosor radial» de las EMCI, se utiliza la informacion del catalogo de Richardson y Cane (para una mayor precision) . Se considera la hora cero en el instante en que empieza a detectarse, de ahí hasta que finaliza su paso. Se toman datos de 5 minutos de la base de datos de OMNI-Web. Tomando los datos de la velocidad, se realiza una integracion por bloques de 300 segundos (5 minutos); utilizando la ecuación $d = vt$ se obtiene el “tamaño”, dicho tamaño es lo que se le llama el grosor radial de la EMCI (en km); por practicidad transformamos la cantidad en UA.
- Se considera que una nube magnética (NM) está presente si cumple con los siguientes parámetros [Kle82]:
 - Aumento de la intensidad del campo magnético.
 - Rotación suave de al menos una componente del campo magnético con respecto a un plano.
 - Baja temperatura de protones.

4.2.2. Evento 1

El inicio del decrecimiento Forbush (dF) se presenta a las 11:00 del 5 de Agosto del 2011, su intensidad en Oulu es 5.7%. Este evento probablemente está asociado a una interacción de dos EMCI que llegaron a la Tierra ese mismo día.

La primera de las EMCI probablemente se asocie a una eyección de masa coronal (EMC) que salió del Sol el 2 de Agosto a las 06:35, probablemente asociada con una ráfaga tipo M1; dicha EMC viaja con una velocidad de 596 km/s, llegando a la tierra a las 22:00 del 04 de Agosto.

El 5 de Agosto se origina una ráfaga con una EMC asociada, dicha EMC se movió a una velocidad aproximada de 1208km/s, es muy probable que esta EMC sea la segunda EMCI registrada en la Fig. 4.7.

De la Fig.4.7, se puede observar como la primera EMCI se asocia con el inicio del dF en Oulu, para dicha EMCI son claros sus límites; observando el parámetro $\frac{T_p}{T_{exp}}$ y el parámetro β , se establecieron las fronteras de la EMCI.

La segunda EMCI es más clara, el choque de esta EMCI perturba mucho más al campo geomagnético, produciéndose un SSC a las 17:51 del 5/Ago. Esta EMCI, junto con su choque asociado, afectan aun más el paso de la radiación cósmica: rayos cósmicos de mayor energía son bloqueados, el dF se acentúa más, se observa el inicio del dF en México (la primera EMCI no provocó disminución de la intensidad de la radiación cósmica en esta estación, ver Fig.4.8).

Se presenta un SSC a las 21:54 del 4 de Agosto. La segunda EMCI genera una tormenta geomagnética, el índice Dst llegó hasta -110nT.

El dF está asociado a las dos EMCI: la primera perturba los rayos cósmicos de baja energía mientras que la segunda a los de mayor energía.

La interacción de la primera EMCI y la Tierra pertenece al grupo 2 de acuerdo con la clasificación obtenida a partir del parámetro P_T (ver Cap. 3.1.6), como se observa en la Fig. 4.8.

La segunda EMCI es más intensa, vista en los perfiles de viento solar y campo magnético, agudiza los efectos de la primera, su funda dura casi 28 horas; es en su choque y funda donde se producen caídas más drásticas en Oulu y Moscú e inicia el dF en México; en la funda se produce una tormenta geomagnética. La interacción de esta EMCI es del grupo 3, con respecto al parámetro P_T .

Es un evento complejo, dado que las dos EMCI contribuyen a que el dF sea de mayor magnitud, si solo fuera por la primera EMCI, el evento no tendría una intensidad considerable. La primera EMCI impacta parcialmente a la Tierra, mientras que la segunda solo el viento perturbado por la EMCI es el que interactúa, sin embargo, tomando los grosores radiales de las regiones de interacción, de la primera es 0.09 UA y de la segunda 0.31 UA. En este evento la primera, chica y débil EMCI sirve como impulsor, mientras que la segunda de mayor tamaño e intensidad agudiza drásticamente los efectos sobre los rayos cósmicos (Fig. 4.9).

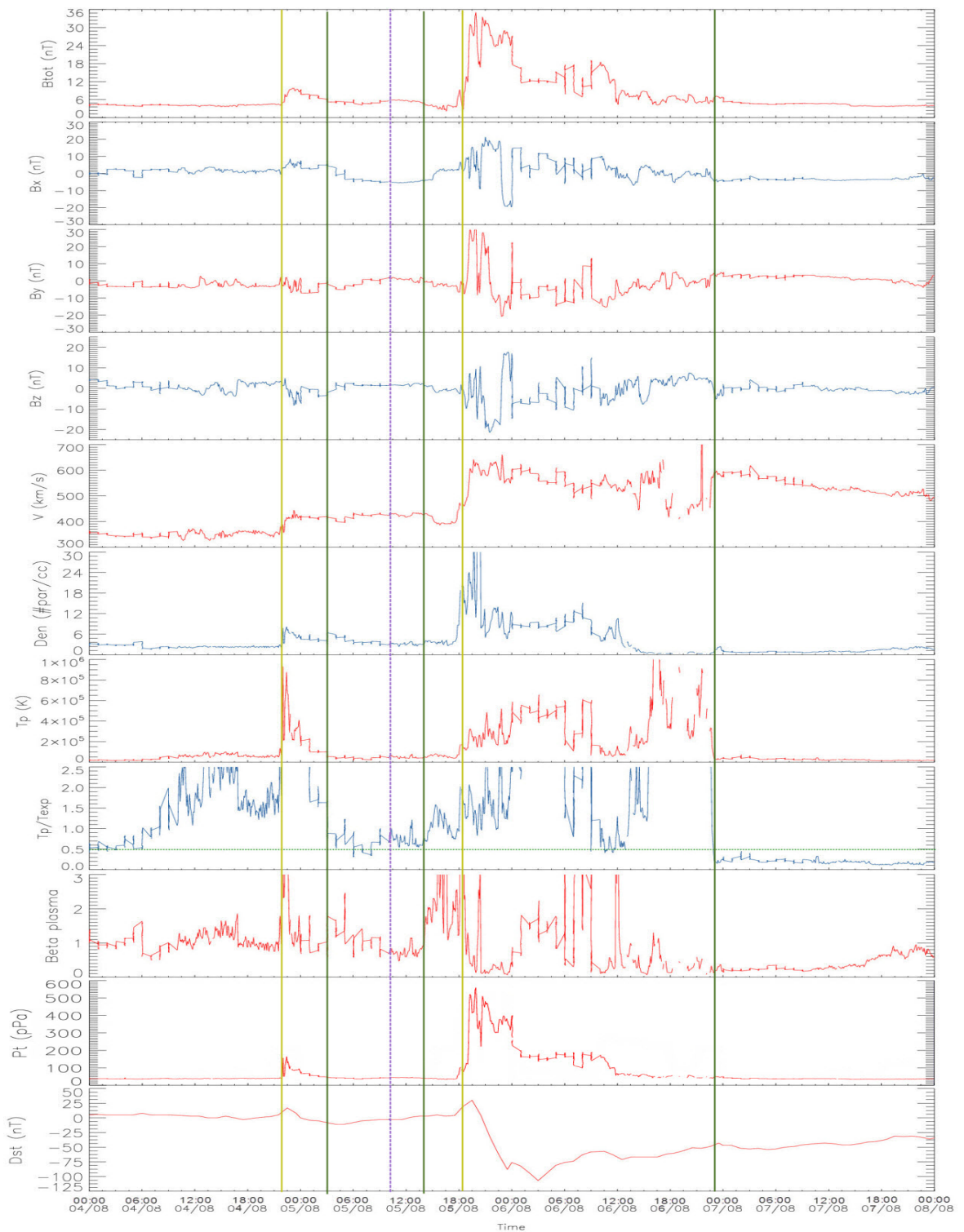


Figura 4.7: Parámetros del MIP. De arriba para abajo: Intensidad campo magnetico, tres componentes del campo magnetico, velocidad, densidad y temperatura del viento solar, parametro $\frac{T_p}{T_{exp}}$, beta plasma, parametro P_T , indice Dst. Se indican con distintas líneas lo siguiente: inicio dF (morada rallada), choque (amarilla continua), inicio y fin de la EMCI (verde continua), rango aceptación parametro $\frac{T_p}{T_{exp}}$ (verde claro punteada). Se grafica del 4 al 8 de Agosto del 2011.

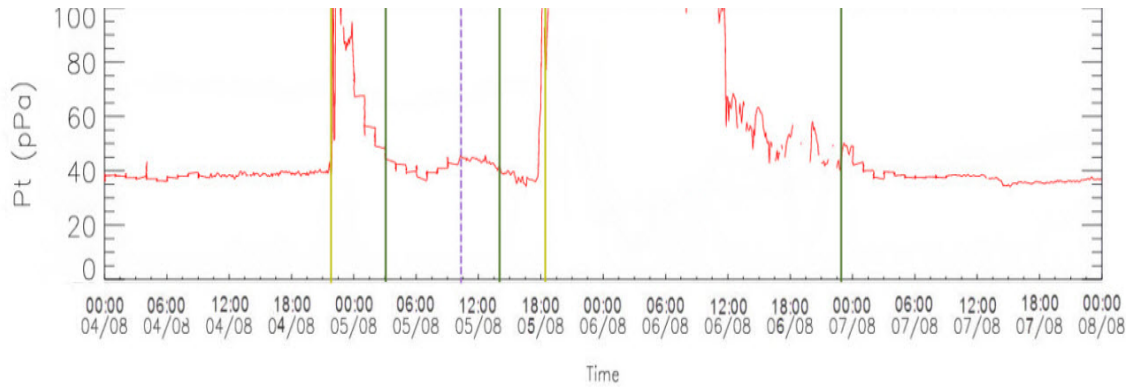


Figura 4.8: Parametro P_T con menor rango en eje Y. Misma simbología y fecha que la Fig. 4.7. Se observa el incremento debido al choque, una caída en la funda y en la EMCI, una meseta que aumenta muy poco casi al final.

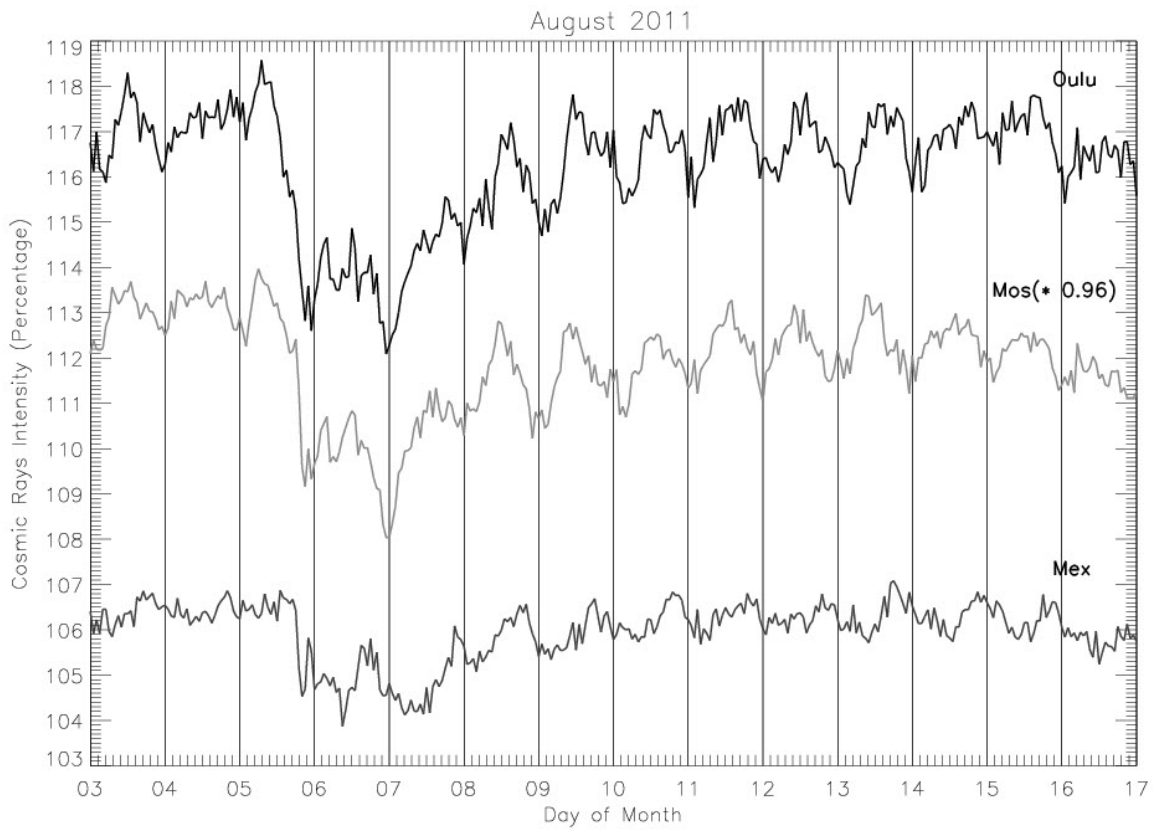


Figura 4.9: Decrecimiento Forbush del 5 de Agosto del 2011

4.2.3. Evento 2

La EMCI asociada a este dF probablemente se asocia a una EMC generada el 24 de Septiembre del 2011 a las 09:48, observada junto con una ráfaga X1.9. Viajando a una probable velocidad de 800 km/s, llega a la Tierra a las 12:00 del 26 de Septiembre, esto concuerda con la hora y velocidad registradas en la Fig. 4.10.

El inicio del dF se presenta en la interacción choque-funda asociados a la EMCI. El choque se presenta a las 12:30 del 26 de Septiembre. La funda presenta un campo magnético intenso, incluso más que la EMCI.

Hay una pequeña NM en la funda, desde las 19:00 del 26 de Septiembre, hasta las 21:00 del mismo día, cuando inicia la EMCI.

Se presenta un SSC el 26 de Septiembre a las 12:35 y se genera una tormenta geomagnética, llegando hasta -100nT en el índice Dst.

Es un evento donde claramente se observa la llegada de la EMCI y como comprime a la magnetosfera terrestre, bloqueando la llegada de la radiación cósmica e iniciando una tormenta geomagnética.

En el perfil de P_T el choque presenta un salto, la funda se mantiene intensa y su final se marca con una drástica caída. En el paso de la EMCI se observa una caída lenta y uniforme.

Tanto en las estaciones de Oulu como en Moscú, la caída es bastante rápida; en México se presenta un par de horas después, confirmando que el paso de la EMCI fue bastante efectivo al bloquear los rayos cósmicos. Al ser una interacción del grupo 2 según P_T (Fig. 4.11), gran parte del cuerpo de la EMCI impactó a la Tierra. P_T no pasa de 50pPa en la EMCI (en la funda llega hasta 500 pPa).

El grosor radial de la EMCI es de 0.58 UA.

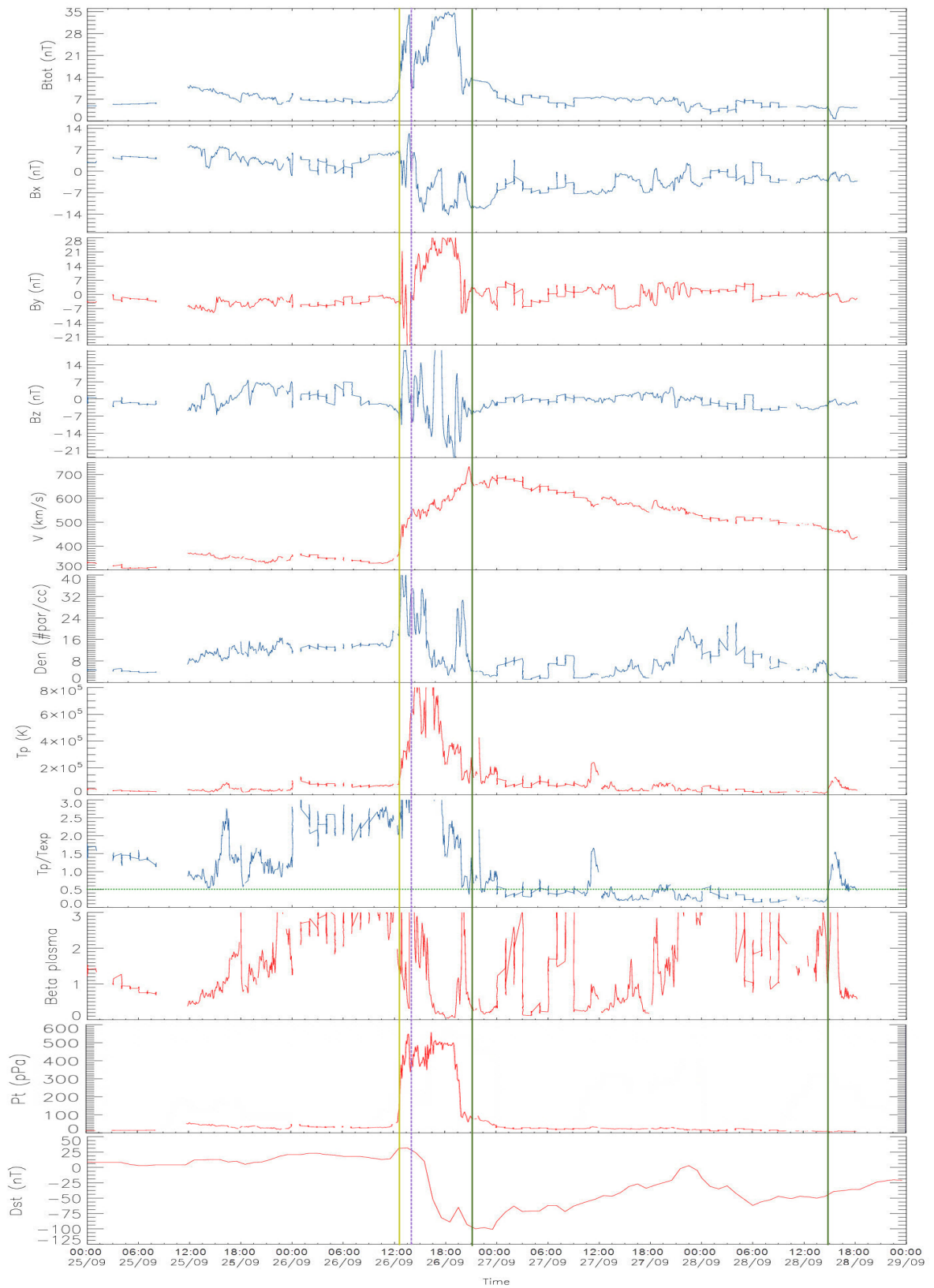


Figura 4.10: Parámetros del MIP. Misma simbología que la de la Fig.4.7. Se grafica del 25 al 29 de Septiembre del 2011.

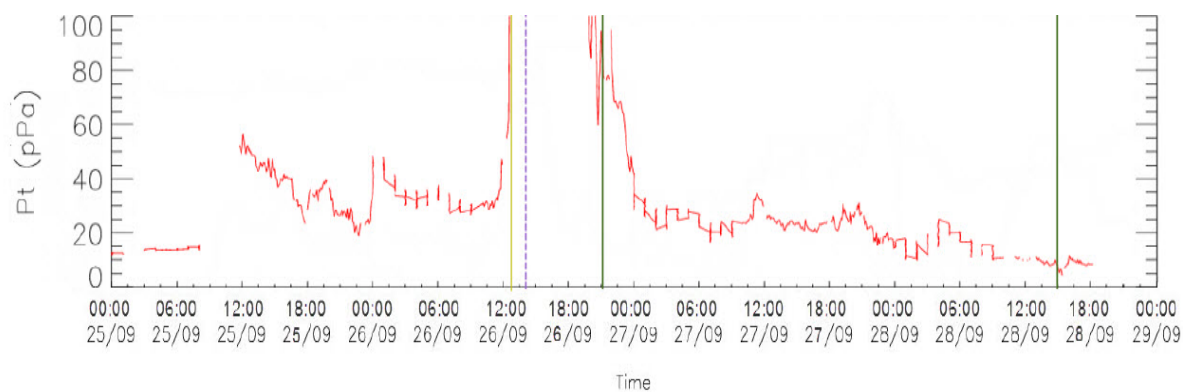


Figura 4.11: Parametro P_T . Misma simbología y fecha que la Fig. 4.10.

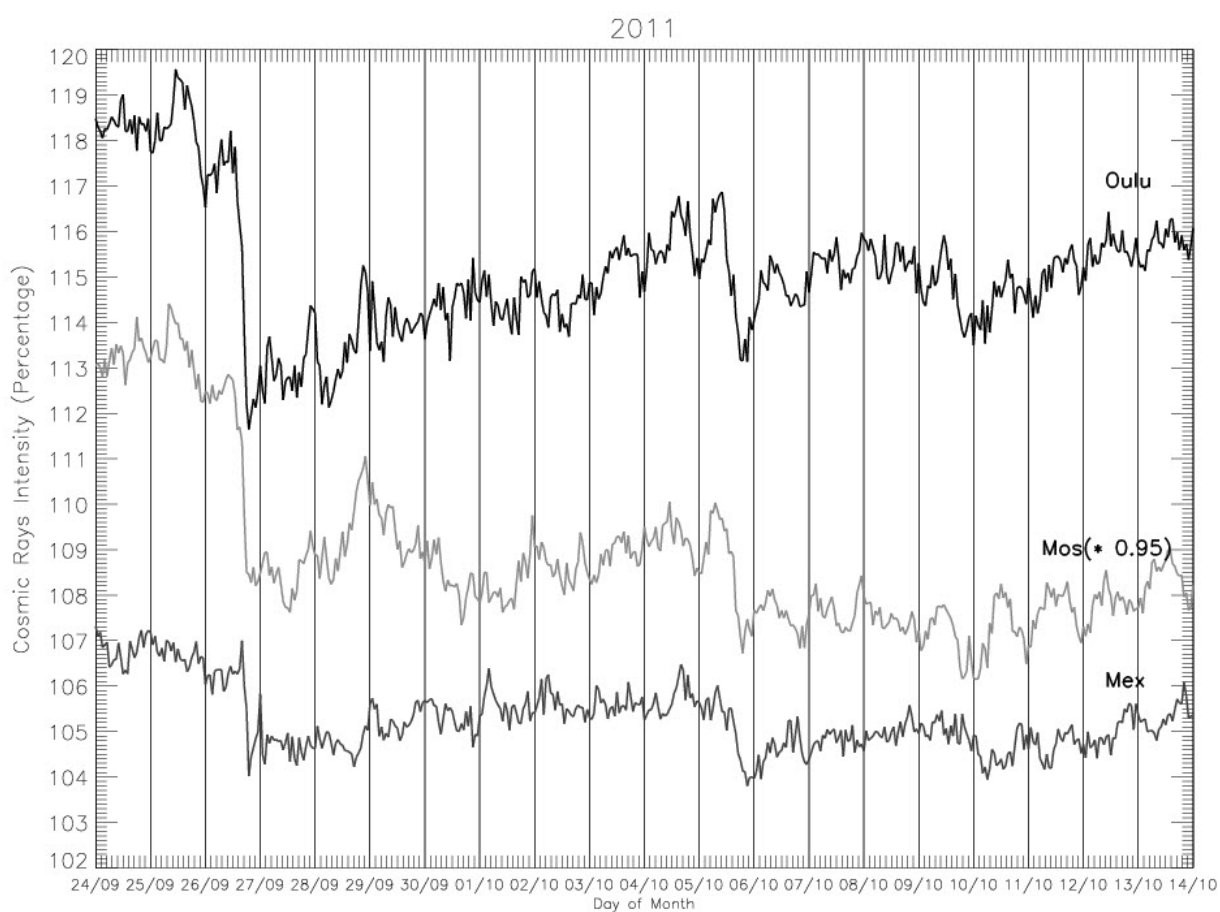


Figura 4.12: Decrecimiento Forbush del 26 de Septiembre del 2011

4.2.4. Evento 3

La EMCI asociada a este dF probablemente fue una EMC generada por un filamento, el 22 de Octubre a la 01:25. Posiblemente la EMC viajó con una velocidad de 663 km/s, llegando a la Tierra aproximadamente a las 18:00 del 24 de Octubre.

El inicio del dF coincide con la llegada del choque asociado a la EMCI (Fig. 4.13). La EMCI tiene un campo magnético intenso; en la parte inicial de la EMCI se presenta una rotación en B_z , que se mantuvo en sentido sur en la mayor parte de la funda, lo cual provocó una tormenta geomagnética de consideración. El índice Dst llegó hasta -135nT.

Se presenta un SSC el 24 de Octubre a las 18:31.

La magnitud del campo magnético se mantiene alta en casi toda la EMCI, al final decae gradualmente, dada la rotación en al menos una de sus componentes (B_z) y una baja temperatura de protones, se considera que la EMCI posee estructura de NM.

En la velocidad, se observa un chorro de viento rápido (500 km/s) que está a punto de alcanzar a la parte trasera de la EMCI (430 km/s), esta interacción se observa en la temperatura, densidad y parámetro β , que presentan una subida aproximadamente a las 13:00 del 25 de Octubre, regresando a sus valores anteriores a las 18:00 del mismo día. Dicha región no altera apreciablemente al flujo de rayos cósmicos (Fig. 4.14).

De acuerdo al perfil de P_T , es una interacción del grupo 2: se observa una discontinuidad cuando se presenta el choque, en la funda decae lentamente con algunas fluctuaciones, al paso de la EMCI se mantiene en una meseta que aumenta ligeramente al final para decaer gradualmente en la parte trasera, hasta regresar a los valores que se tenían antes del evento.

Es una EMCI pequeña, con un grosor radial de 0.20 UA.

Más que por su tamaño, el evento es bastante efectivo, observando la diferencia de los valores de P_T , estando en 50 pPa aproximadamente en el MIP «normal» (antes del choque), llegando hasta 250 pPa en el cuerpo de la EMCI; considerándolo un parámetro que nos indica la geometría del evento, los valores mencionados nos indican una fuerte interacción, llegando a ser 5 veces mayor al paso de la EMCI (Fig. 4.13).

4.2 Análisis de eventos seleccionados

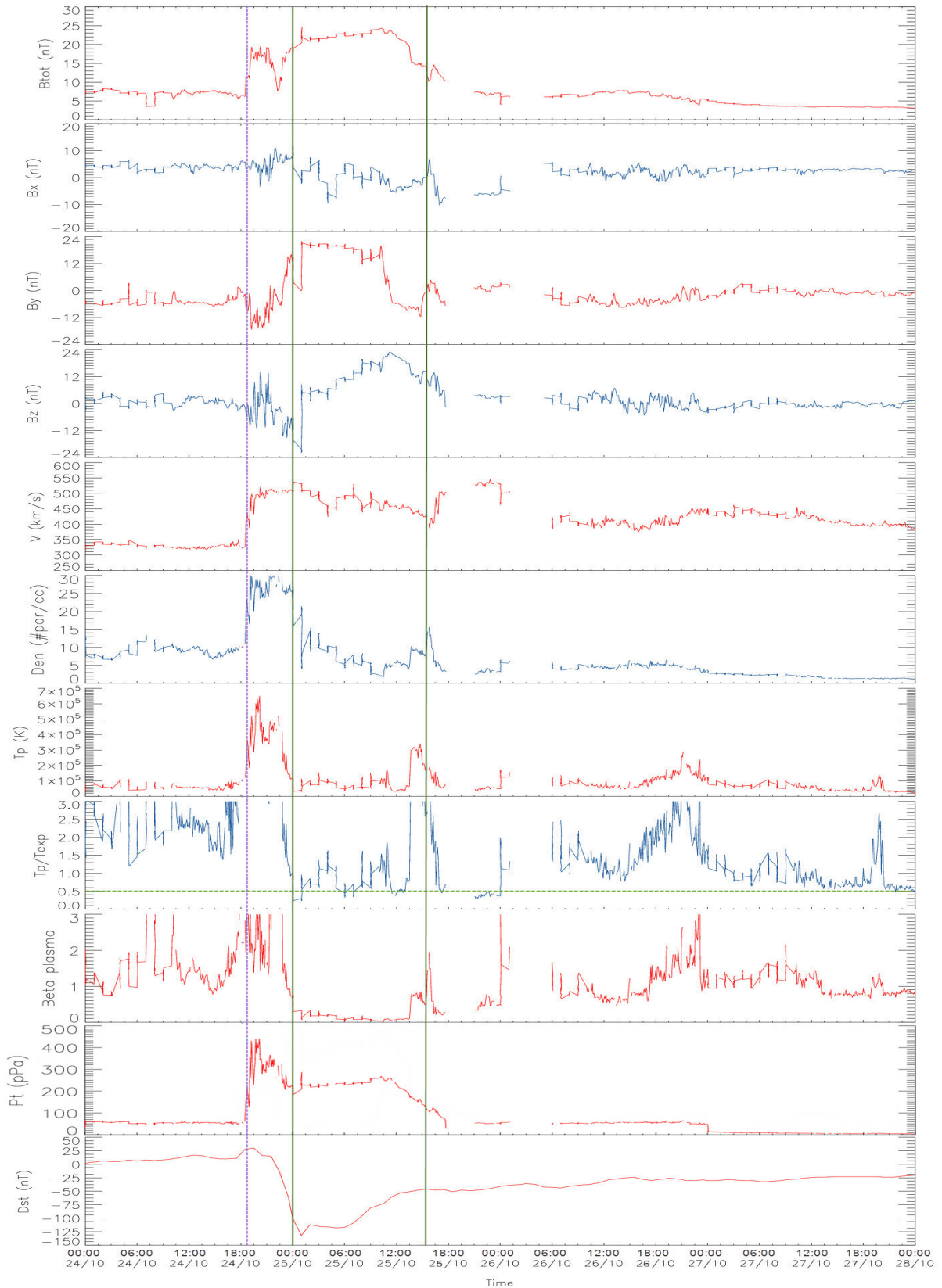


Figura 4.13: Parámetros del MIP. Misma simbología que la de la Fig.7. Como coinciden el choque y el inicio del dF, solo se indica este último. Se grafica del 24 al 28 de Octubre del 2011.

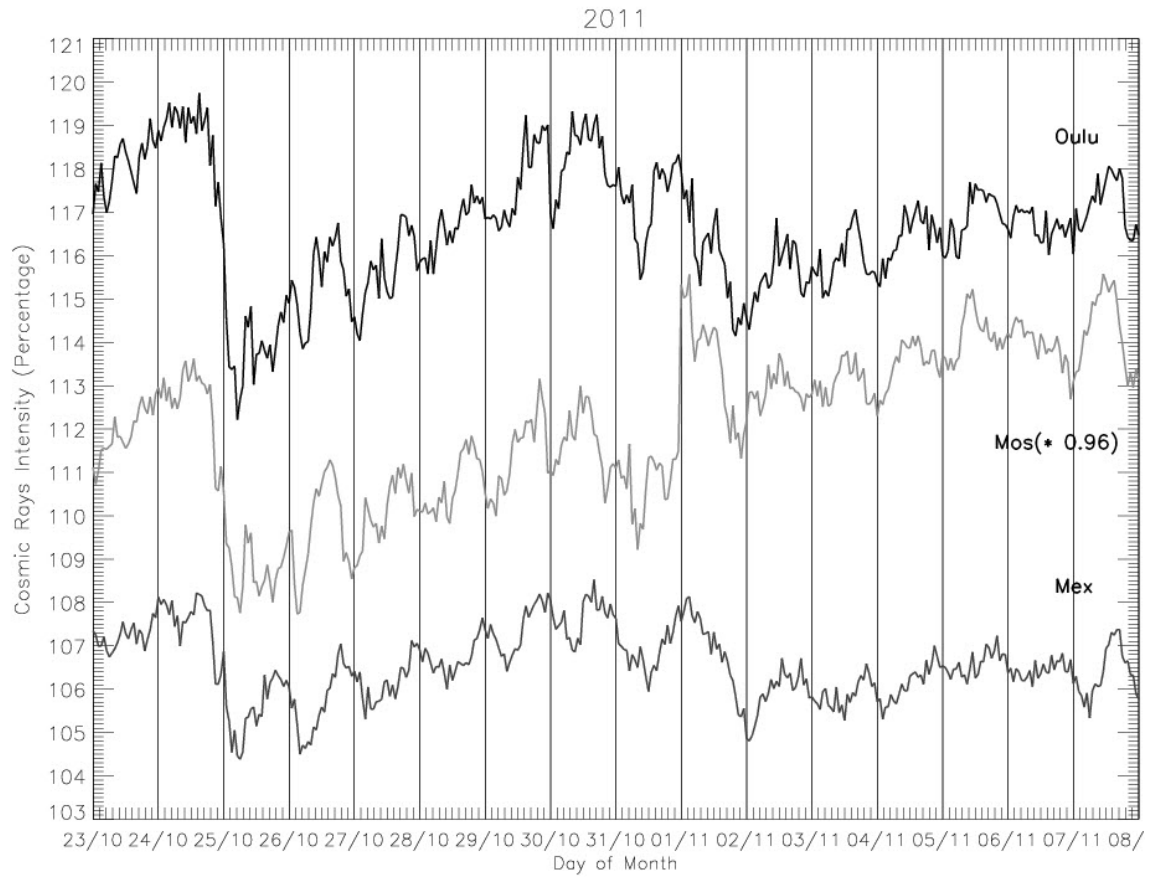


Figura 4.14: Decrecimiento Forbush del 24 de Octubre del 2011

4.2.5. Evento 4

La EMCI asociada a este dF posiblemente provino de una EMC generada el 07 de Marzo a las 00:24, vista junto con una ráfaga X5. Esta EMC fue observada con una velocidad de 2594 km/s a 20 radios solares, se previó que llegaría el 8 de Marzo a las 06:25 (+/- 7 horas) . Posiblemente en su trayecto hacia la Tierra, se desaceleró hasta alcanzar una probable velocidad de 700 km/s.

La estructura completa (choque-funda-EMCI) se encuentra bien delimitada (Fig. 4.15). Aunque la EMCI posee las características necesarias para ser considerada NM (un campo magnético intenso que decae lentamente, baja temperatura de protones), no existe rotación en alguna dirección del campo magnético.

Se presenta un SSC el 08 de Marzo a las 11:03, coincidiendo con el choque e inicio del dF. Como se puede observar en la Fig. 4.15, en la funda se presenta un B_z negativo, que se mantiene durante la EMCI. En el perfil del índice Dst se observa una tormenta geomagnética, que llega hasta -150 nT.

Por el perfil de P_T , la interacción de la EMCI con la tierra pertenece al grupo 2; aunque pareciera que después del gran salto inicial, producido por el paso del choque, la P_T decae gradualmente hasta el final;

La funda presenta un perfil muy interesante, podemos definir dos partes dentro de ella: la primera desde el choque hasta las 19:00 del 08 de Marzo, a lo que le podríamos llamar la primera mitad de la funda. La segunda parte, que comprende desde el final de la primera parte hasta el inicio de la EMCI, presenta una estructura de NM, se observa como P_T aumenta, se mantiene en una pequeña meseta para después decaer gradualmente, continuando esta caída gradual en la EMCI. Si consideramos esta pequeña NM dentro de la funda, la interacción incluso pertenece al grupo 1, sin embargo, se debe ser consistente en la definición de las interacciones que se menciono en el capítulo 3, por lo que se mantiene en el grupo 2.

La EMCI se encuentra muy bien definida; en la funda, en promedio, la intensidad magnética es mayor, que en la propia EMCI.

El grosor radial de la EMCI es de 0.68 UA.

El gran «tamaño» de la EMCI, junto con la compleja interacción entre funda-EMCI y la Tierra, que es del grupo 2, contribuyeron a que este evento fuera el más intenso de este periodo.

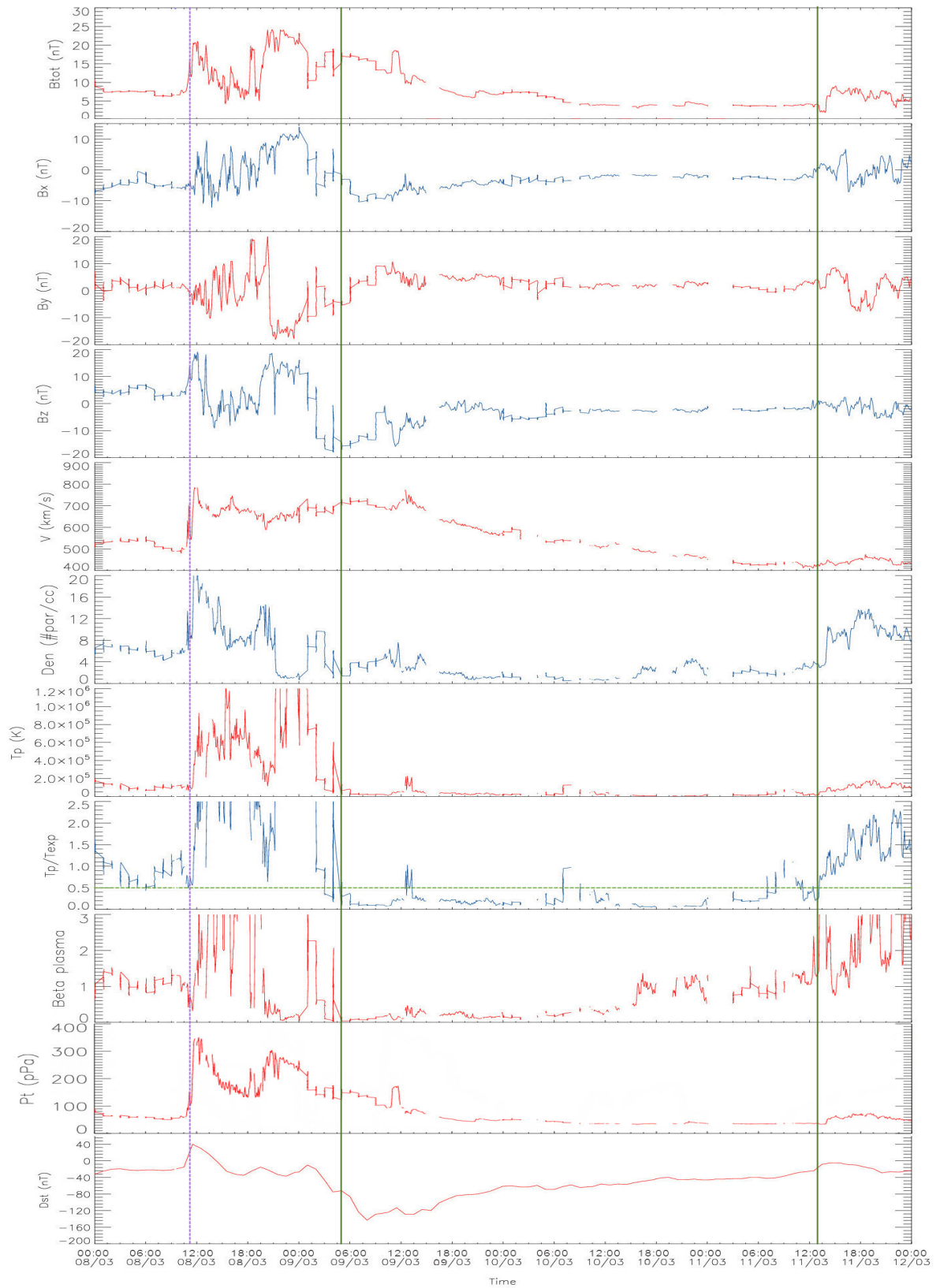


Figura 4.15: Parametros del MIP. Misma simbología que la de la Fig.4.13. Se grafica del 08 al 12 de Marzo del 2012.

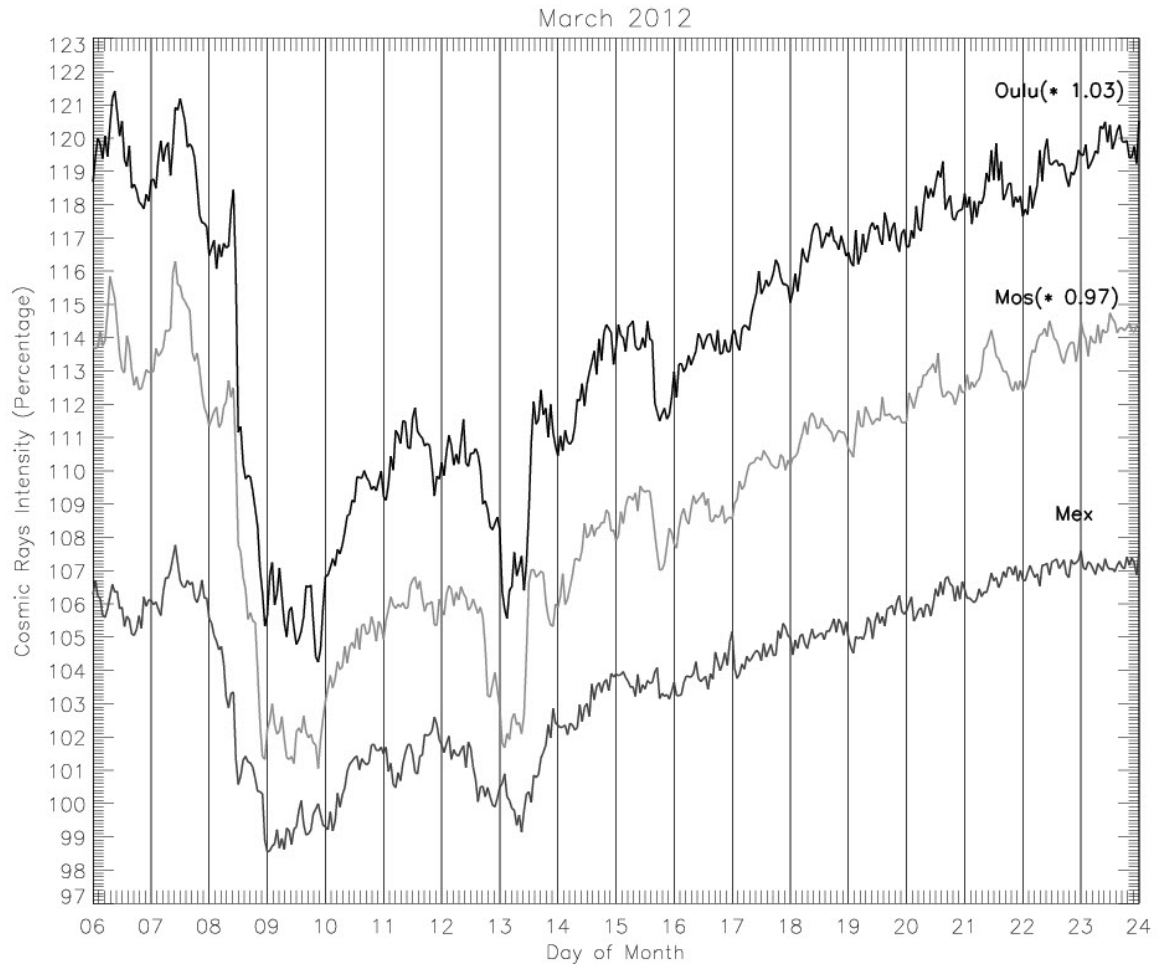


Figura 4.16: Decrecimiento Forbush del 8 de Marzo del 2012

4.2.6. Evento 5

Este evento posiblemente está asociado con una interacción de 2 EMCI. El choque asociado a este fenómeno se registró en la Tierra el 16 de Junio del 2012 a las 10:00, coincidiendo con el inicio del dF. El 13 de junio a las 13:19, se produjo una ráfaga M1 junto con una EMC, viajando a 637 km/s [lisa, Wea].

El 14 de junio, se produjo otra EMC, que viajó a una velocidad de 1360 km/s [lisa], por lo que muy probablemente interaccionó con la EMC del 13 de junio antes de llegar a la Tierra.

Al observar la Fig. 4.17, no se encuentra una evidencia clara de la presencia de las dos EMCI, esto podría deberse a un efecto combinado donde una de ellas posiblemente viene sumergida dentro de la otra; o simplemente solo una de las EMCI tuvo interacción con la Tierra. Si se observa la densidad, está muy por arriba de valores «promedio» para una EMCI, en todos los demás eventos no llega a pasar de 20 *partículas/cm³*, en este se llegan a registrar hasta 40 *partículas/cm³*, incluso se puede observar que la densidad es mucho mayor durante el paso del fenómeno, que en el MIP, lo que favorece la hipótesis de que una EMCI viene dentro de la otra. El parámetro $\frac{T_p}{T_{exp}}$ no cumple con lo que teóricamente se espera, no es confiable en determinar la presencia de una EMCI. Observando el parámetro β y la intensidad del campo magnético, el evento está fuertemente regido por la presión magnética.

Se observa una rotación gradual en B_z , alta intensidad magnética que decae conforme va pasando, por lo que la este evento presenta un perfil de NM, posiblemente la EMCI que viene sumergida es una NM mientras que la otra no, o la conjunción de ambas dio origen a ello.

Se generan tres SSC, el primero a las 09:56, el segundo a las 20:20 y el tercero a las 21:15 del 16 de Junio. El primero coincide con el inicio del dF. La rotación de B_z , de positivo a negativo, aproximadamente a la mitad de la EMCI, pudiera inducir una leve tormenta geomagnética, marcando -80 nT el índice Dst.

Para el perfil de P_T , se da un *leve* incremento cuando se presenta el choque, mientras que al paso de la(s) EMCI(s) hay un aumento muy grande, que después de 6 horas aproximadamente, empieza a decaer, la interacción pertenece al grupo 1 ya que existe un aumento al inicio de la EMCI, manteniéndose como una meseta que después decae gradualmente, por la complejidad del evento, P_T llega hasta 700 pPa (Ya que en [Rus05] se menciona que esto es más común para eventos del grupo 2 o 3).

Se puede observar en la Fig. 4.18 la intensidad de la interacción utilizando el parámetro P_T : en el viento solar «ordinario» (antes del choque y después de la EMCI) P_T está por debajo de 100 pPa, mientras que al inicio de la EMCI P_T llega hasta 670 pPa.

El grosor radial de la EMCI es de 0.14 UA.

Para este evento la interacción, al ser del grupo 1, se relaciona «de lleno» con la Tierra, esto junto con el campo magnético muy intenso de la EMCI, son los factores

principales del origen del dF (Fig. 4.19), ya que el tamaño de la EMCI es muy chica.

En este evento, particularmente considero que la llegada del choque asociado a la EMCI que presentan [oc]no es el correcto, aunque es muy pequeño, pero considero que el 16/Jun/2012 a las 10:00 TU existe un choque.

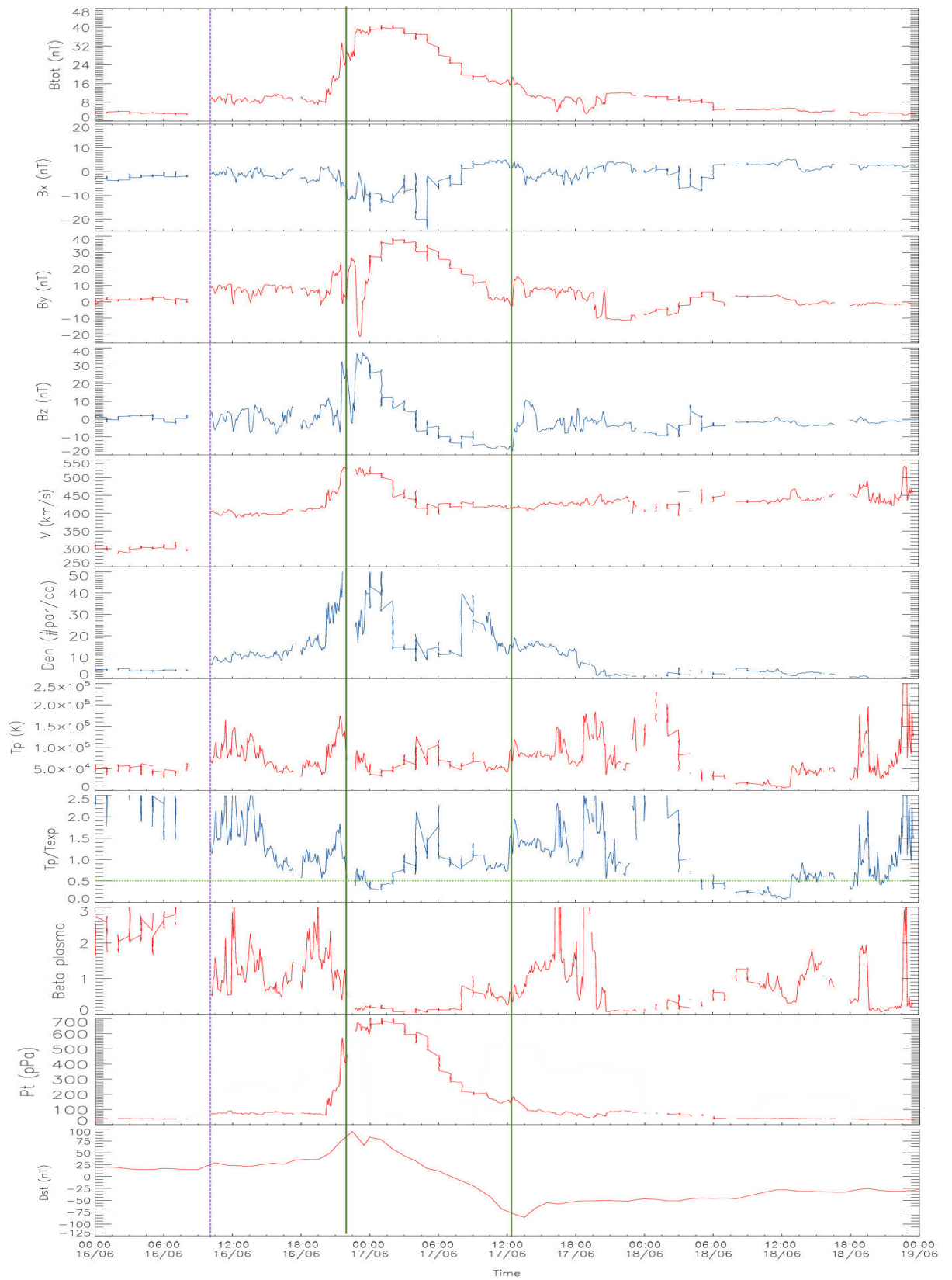


Figura 4.17: Parametros del MIP. Misma simbologia que la de la Fig.4.13. Se grafica del 16 al 19 de Junio del 2012.

4.2 Análisis de eventos seleccionados

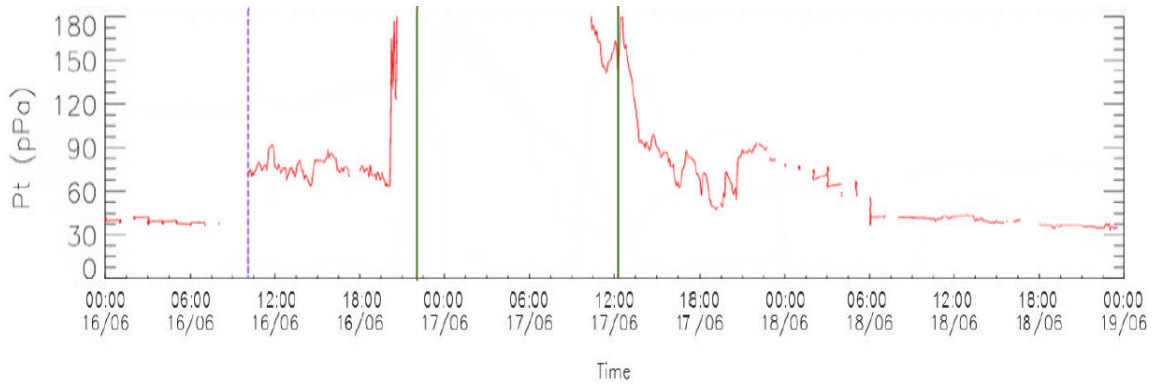


Figura 4.18: Parametro P_T . Misma simbología y fecha que la Fig. 4.17

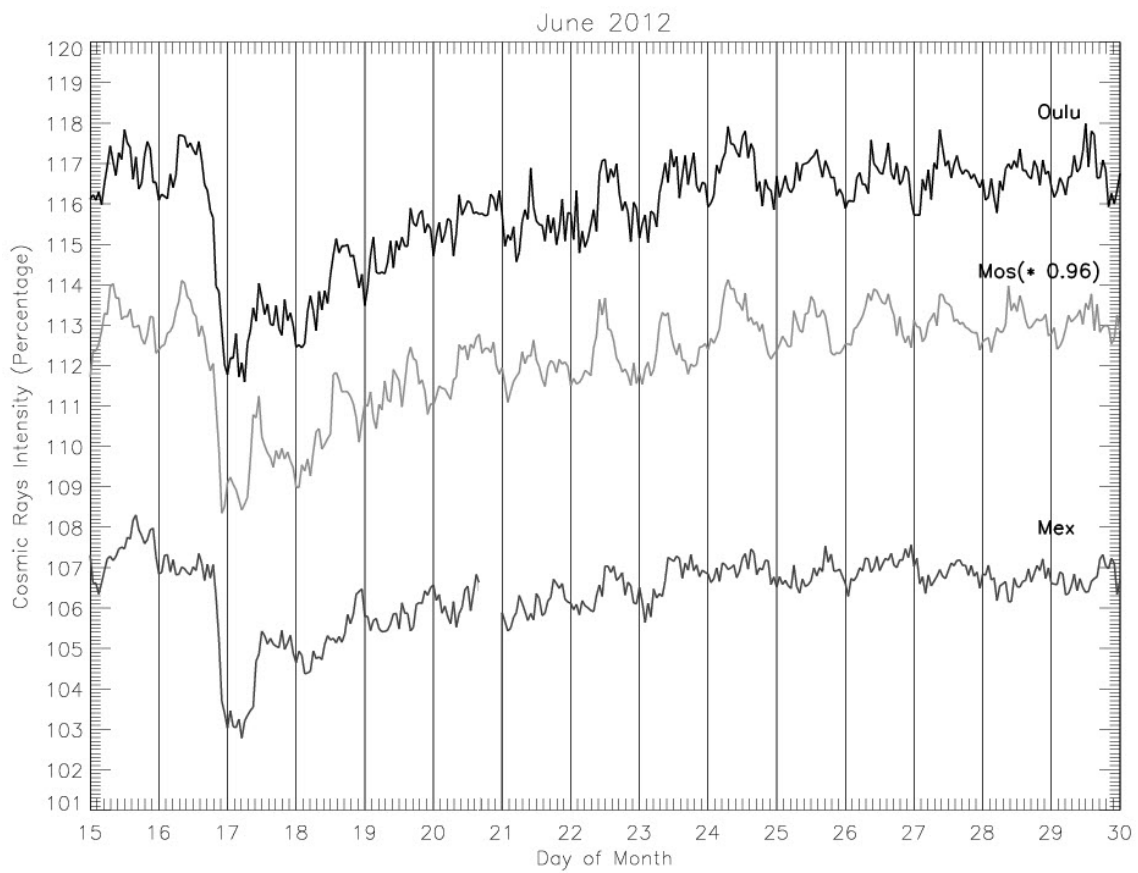


Figura 4.19: Decrecimiento Forbush del 16 de Junio del 2012

4.2.7. Evento 6

La EMCI asociada a este dF posiblemente provino de una EMC generada el 12 de Julio a las 16:53, vista junto con una ráfaga X1.4. Esta EMC fue observada con un velocidad de 2265 km/s a 20 radios solares [lisa], se previó que llegaría a la Tierra el 14 de Julio a las 10:20 (+/- 7 horas).

La EMCI es identificada fácilmente (Fig. 4.20), el arribo a la Tierra del choque asociado coincide con el inicio del dF. La identificación de la EMCI es clara en todos los parámetros; por como se observa el perfil de la magnitud del campo magnético, rotación gradual en B_X , B_Z presenta una rotacion de negativo a positivo y luego de regreso, se tiene una NM.

La EMCI inicia su tránsito por la Tierra a las 06:00 del 15 de Julio y finaliza a las 04:00 del 17 de Julio, aproximadamente a la mitad del paso de la EMCI (02:00 del 16 de Julio) se presenta una región donde aumenta la temperatura, por consiguiente se deja de cumplir la condición del parámetro $\frac{T_p}{T_{exp}}$, la densidad siempre se mantiene baja, no hay presencia de cambios drásticos en la velocidad, unas horas después (15:00 del 16 de Julio) se presenta un cambio en B_Y y B_Z . Estas anomalías no afectan para determinar las fronteras de la EMCI.

Se presenta un SSC el 14 de Julio a las 18:09, que coincide con la llegada del choque y el inicio del dF. El índice Dst llega hasta -140 nT.

El perfil de P_T indica una interacción del grupo 1: un aumento súbito en el choque, se mantiene fluctuando en niveles altos, en comparación del viento solar no perturbado, cuando llega la EMCI se presenta otra discontinuidad, aumentando súbitamente la presión, para decaer gradualmente a su paso hasta llegar a los niveles que presentaba anteriormente al finalizar la EMCI.

La región dentro de la EMCI que presenta un cambio en la temperatura, no afecta al flujo de rayos cósmicos (Fig. 4.21).

El grosor radial de la EMCI es 0.55 UA.

En este evento, tanto el tamaño como la geometría de la interacción influyeron al origen del dF, este es el segundo evento con la caída más grande del periodo analizado.

4.2 Análisis de eventos seleccionados

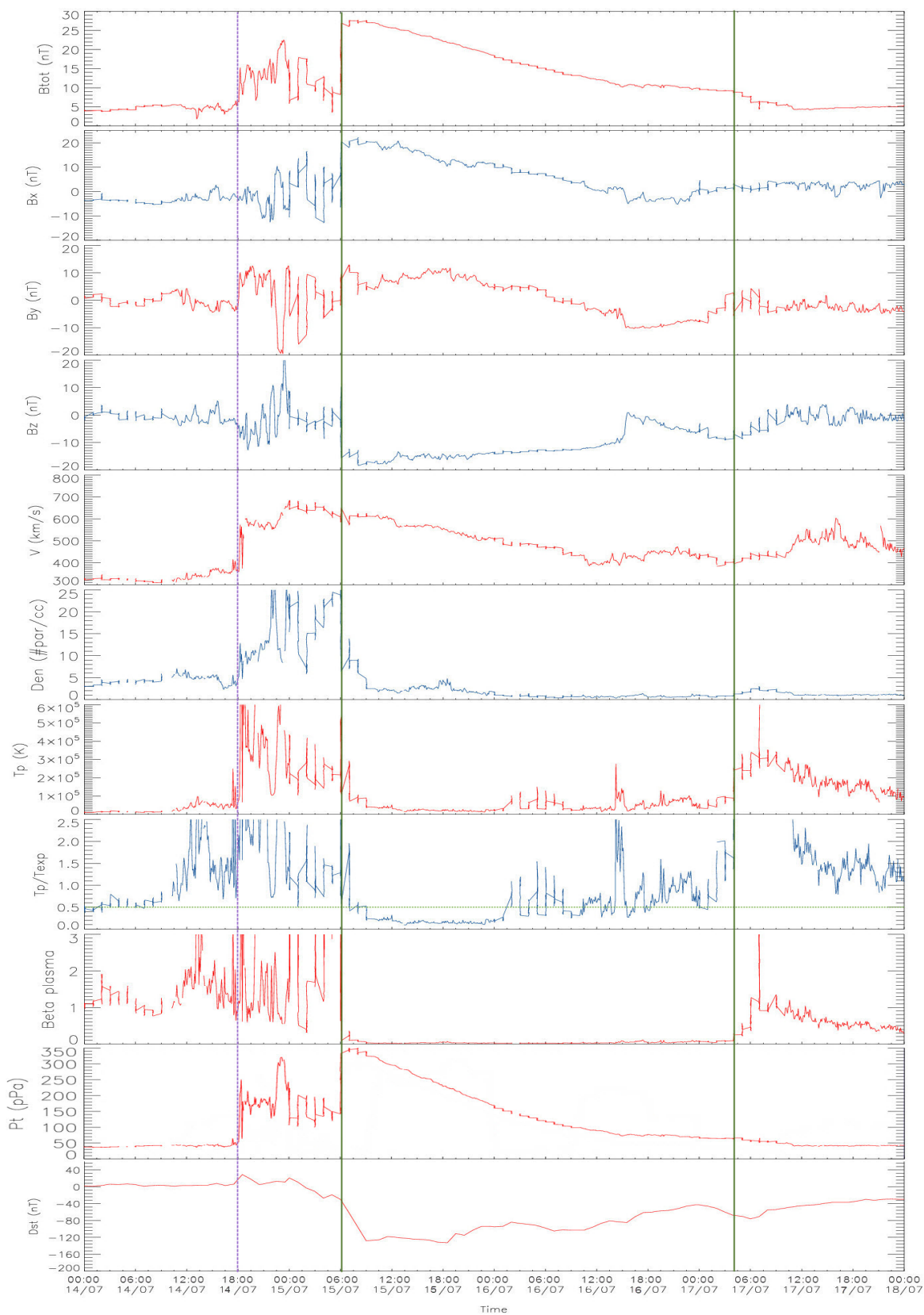


Figura 4.20: Parametros del MIP. Misma simbología que la de la Fig.4.13. Se grafica del 14 al 18 de Julio del 2012.

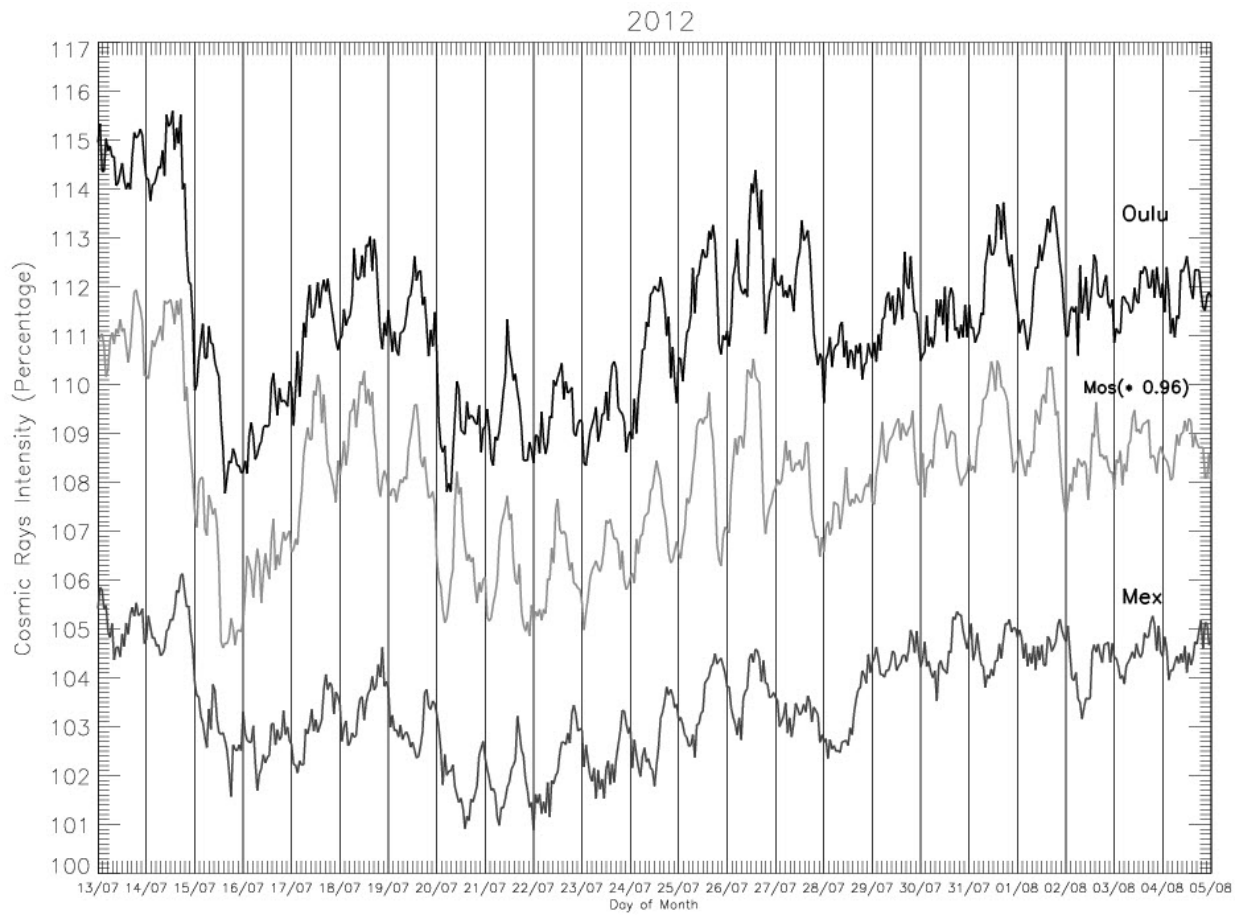


Figura 4.21: Decrecimiento Forbush del 14 de Julio del 2012

4.2.8. Evento 7

La EMCI asociada a este dF probablemente provino de un filamento que tuvo una erupción el 31 de Agosto a las 20:00, posiblemente propulsando una EMC y una ráfaga C8. Esta EMC fue observada con una velocidad de 1446 km/s a 20 radios solares [lisa].

El inicio del dF y la llegada del choque coinciden (Fig. 4.22). Es una EMCI con un campo magnético poco intenso y no muy rápida. Existe una ligera rotación de B_X y B_Z , baja temperatura de protones, y aunque la intensidad del campo magnético no pasa de los 15 nT, se infiere que es una NM que parcialmente interactuó con la Tierra.

Se presenta un SSC el 03 de Septiembre a las 12:13, coincidiendo con el inicio del evento y el choque; sin embargo, no se genera una tormenta geomagnética intensa, la magnetosfera terrestre ya se encontraba ligeramente perturbada antes de la llegada de la EMCI, el nivel más bajo que se alcanza en el índice Dst es -75 nT.

De acuerdo con P_T , es una interacción perteneciente al grupo 2: en el choque hay una discontinuidad, aumentando de 60 a 200 pPa, en la funda decrece gradualmente; al presentarse la EMCI, se tiene una meseta que se eleva al final, debido a la presencia de un viento rápido y más caliente, que viene detrás de la EMCI.

Esta corriente caliente, que se presenta entre las 0:00 y las 07:00 del 05 de Septiembre, afecta al flujo de rayos cósmicos, ocasionando una segunda caída en la intensidad de rayos cósmicos, agudizando los efectos ocasionados por la EMCI (Fig. 4.22).

El grosor radial de la EMCI es 0.13 UA.

Aunque la EMCI es pequeña, su funda asociada tiene un tamaño aproximado de 0.24 UA (considerando una velocidad promedio de 420 km/s y una duración de 24 horas), casi el doble que la propia EMCI. Es en la funda donde se presenta la discontinuidad en P_T .

El choque y funda asociados a la EMCI, junto con la geometría de la interacción, son las mayores contribuyentes del evento. Como se observa en la Fig. 4.23, el dF presenta una doble caída.

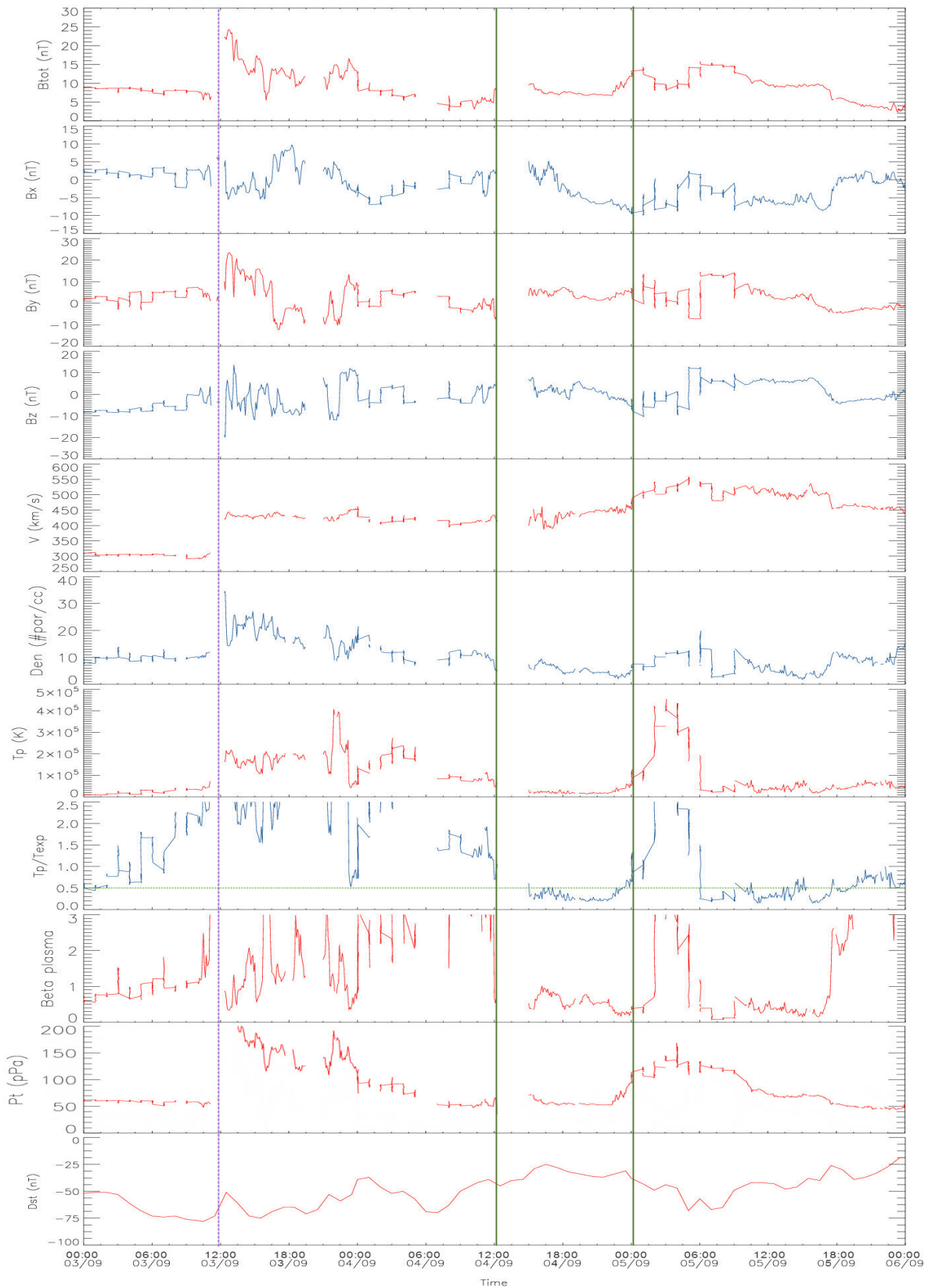


Figura 4.22: Parametros del MIP. Misma simbologia que la de la Fig.4.13. Se grafica del 03 al 06 de Septiembre del 2012.

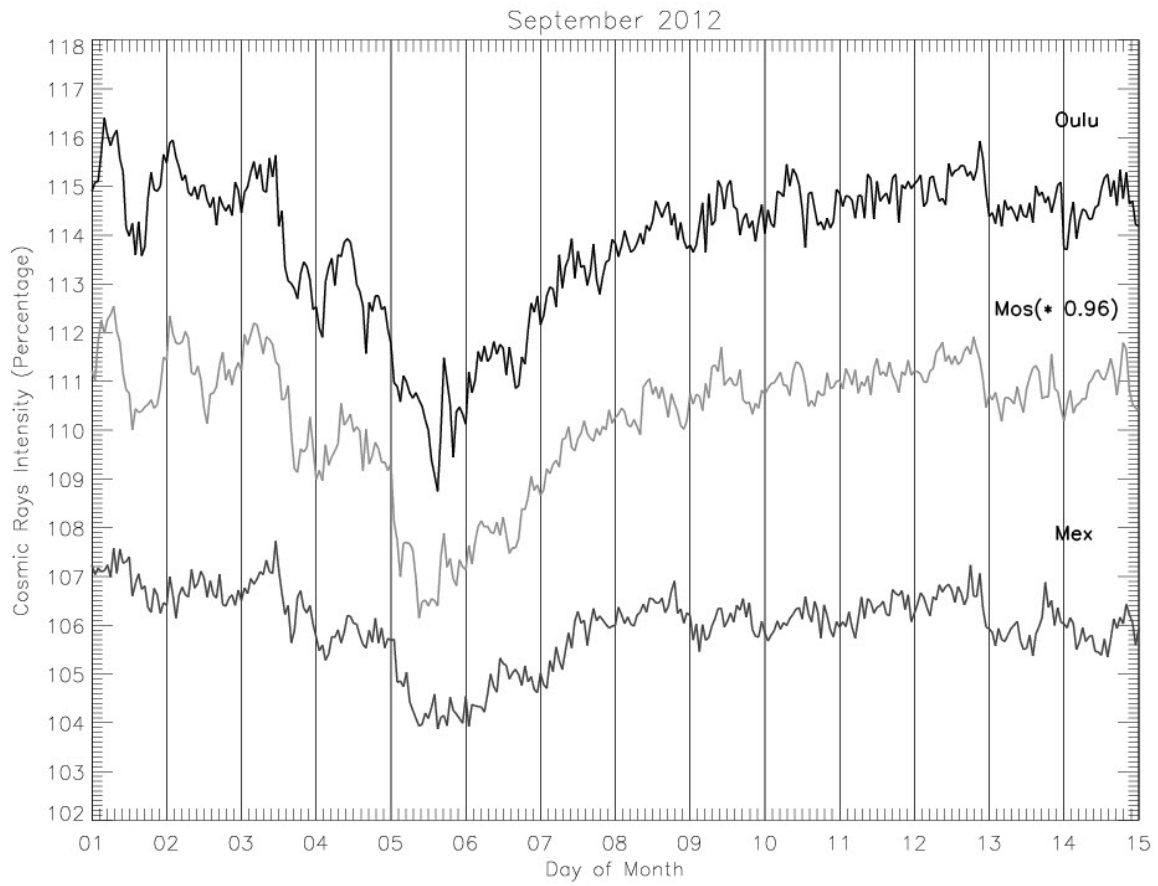


Figura 4.23: Decrecimiento Forbush del 03 de Septiembre del 2012

4.2.9. Evento 8

La EMCI asociada a este dF posiblemente provino de la EMC registrada el 11 de Abril a las 07:16, observada junto con una ráfaga M6. Esta EMC fue vista con una velocidad de 819 km/s a 20 radios solares [lisa].

La llegada del choque asociado a la EMCI y el inicio del dF coinciden (Fig.4.24). Es fácil identificar a la EMCI en el parámetro β , cumple con la condición del parámetro $\frac{T_p}{T_{exp}}$ y tiene una intensidad de campo magnético que decae gradualmente conforme va pasando.

Aunque presenta una intensidad de campo magnético, mayor que el viento solar antes y después del paso de la EMCI, y una baja temperatura de protones, no hay indicios claros de rotación en alguna componente del campo magnético, por lo que no hay estructura de NM.

La componente B_Z se mantiene positiva en toda la EMCI. Observando el índice Dst, no existe una tormenta geomagnética; sin embargo, existe un SSC el 13 de Abril a las 22:55, que coincide con el inicio del dF y la llegada del choque.

El perfil de P_T indica que la interacción es del grupo 1: aumento en el choque, se mantiene en un nivel alto y fluctuando en el paso de la funda, que al final decae un poco; en la EMCI aumenta un poco, se mantiene en una meseta por 4 horas aproximadamente, para después decaer gradualmente, hasta llegar a un nivel similar al que estaba antes de la EMCI.

El grosor radial de la EMCI es 0.28 UA.

La funda asociada a la EMCI se puede dividir en 2 regiones: la primera desde que se presenta el choque hasta las 10:00 del 14 de Abril, la segunda de ahí hasta donde inicia la EMCI (Fig. 4.24); esta división es perceptible en la temperatura y en la densidad. La segunda región muestra una funda más densa y mas «fría» que la primera, esta región ocasiona un pequeño pico en los datos de rayos cósmicos (Fig. 4.25) que se observa casi inmediatamente en Oulu y Moscú y aproximadamente 3 horas después en México.

Para este evento, tanto el tamaño de la EMCI, como la geometría de su interacción con la Tierra, son las mayores contribuyentes, ya que no es una EMCI muy rápida ni con campo magnético muy intenso.

4.2 Análisis de eventos seleccionados

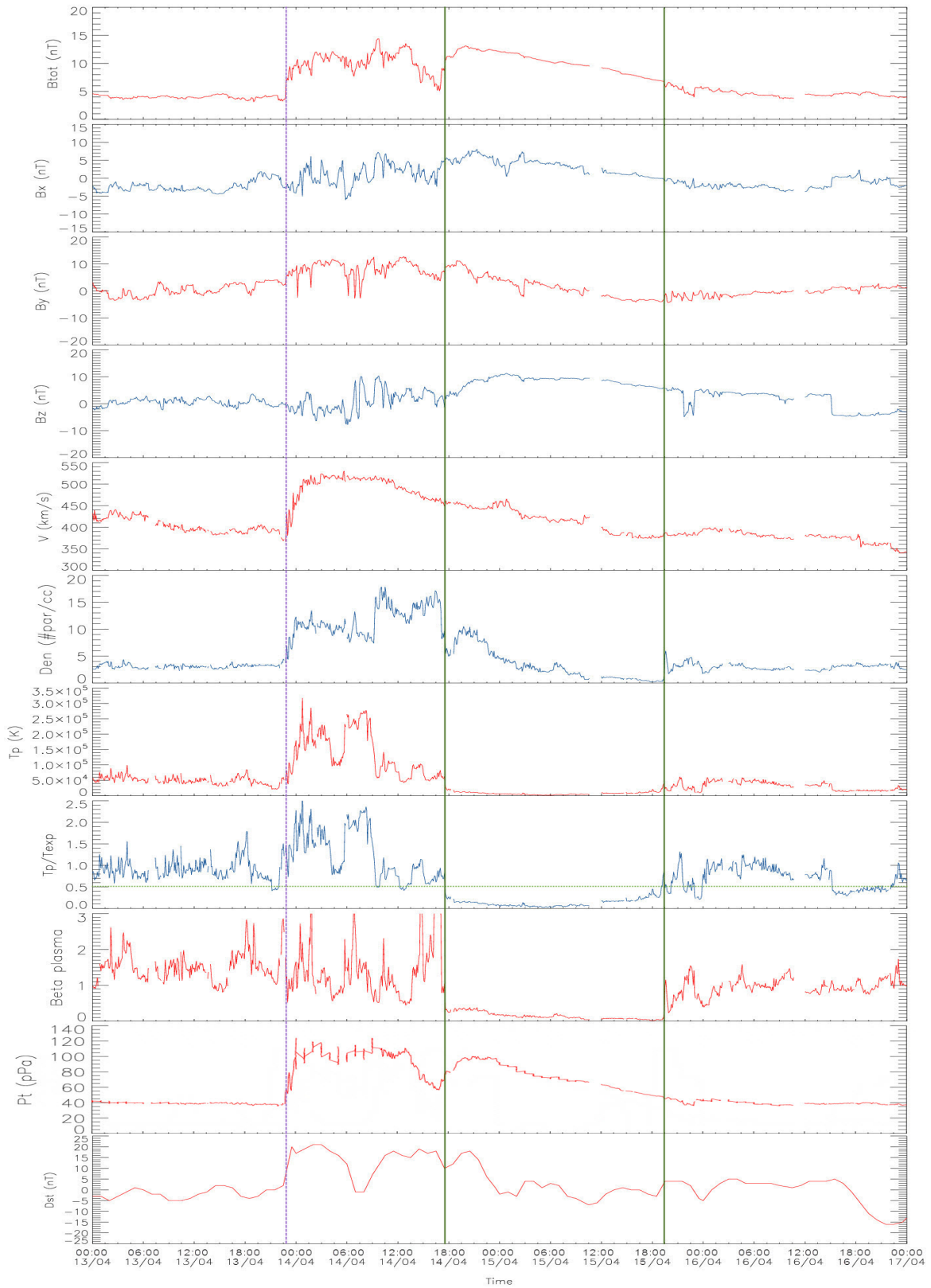


Figura 4.24: Parametros del MIP. Misma simbologia que la de la Fig.4.13. Se grafica del 13 al 17 de Abril del 2013

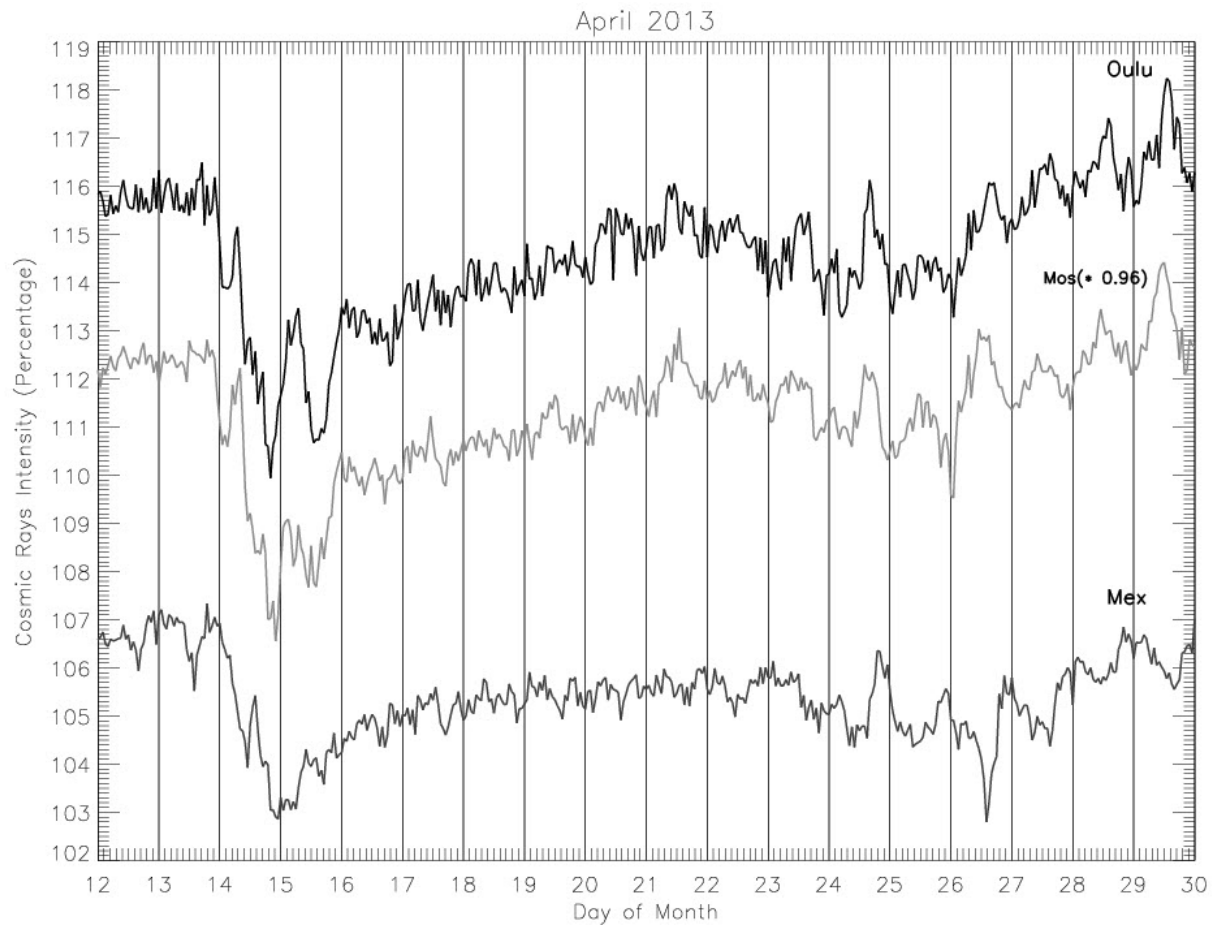


Figura 4.25: Decrecimiento Forbush que se presenta el 14 de Abril del 2013

4.2.10. Evento 9

Este evento está asociado a una posible interacción de 2 EMCI. El 12 de Diciembre un par de filamentos hicieron erupción entre las 03:00 y las 06:30, arrojando dos EMC, ambas con velocidades aproximadas de 500 km/s [lisa, Wea].

El choque más probablemente asociado a este fenómeno se registró el 13 de Diciembre a las 14:00, el dF inicia a las 17:00 del 14 de Diciembre.

Es un evento muy complejo, la interacción de las 2 EMCI, antes de llegar a la tierra, ocasionaron que se generara una especie de región de interacción de corrientes (SIR por sus siglas en ingles)¹: justo después del choque se presenta una región lenta, muy densa y con una baja temperatura, característica de un viento lento (13/Dic 14:00 – 14/Dic 01:00); la discontinuidad (interfase de corrientes) el 14/Dic a la 01:00; después un viento rápido, más caliente y menos denso (14/Dic 01:00 - ¿?), para esta última región no se aprecia el choque trasero. Es durante el paso de esta estructura, que el dF da inicio.

Existe una EMCI, delimitada por líneas verdes (Fig. 4.26), que inicia su tránsito por la Tierra a las 17:00 del 15 de Diciembre.

Se genera un par de SSC, la primera el 13 de Diciembre a las 13:22 y la segunda el 15 de Diciembre a las 17:27.

Este es el evento más complejo de todos los analizados, ya que no hay un fenómeno interplanetario a gran escala que se pueda asociar fácilmente.

La P_T no solo es útil para identificar EMCI, como se menciona en el capítulo anterior también sirve para poder examinar el comportamiento del viento solar, como RIC's, choques interplanetarios, etc. Una diferencia que existe al analizar EMCI's y RIC's con P_T , es que las primeras se encuentran en constante expansión, su perfil de velocidad está disminuyendo; mientras que en las segundas, siempre hay un incremento en el perfil de la velocidad [Jia06].

Teniendo en mente esto, se observa que P_T , entre las 14:00 del 13 de Diciembre y las 16:00 del 15 de Diciembre, tiene un perfil de SIR: se presenta un pico (14/Dic-08:00) con un incremento y decremento graduales en ambos lados, el dF inicia después del pico máximo y un par de horas antes de que el viento rápido llegue a la Tierra.

Para la EMCI que se presenta después, la interacción pertenece al grupo 2.

Se concluye que el dF es ocasionado por la SIR. La EMCI detectada es bastante pequeña (su grosor radial es de 0.14 UA), posiblemente un remanente de aquella interacción de las 2 EMCI, se asocia a la segunda caída que se observa en los datos de rayos cósmicos (Fig. 4.27), que se da aproximadamente a las 15:00 del 15 de Diciembre.

¹Una SIR es una estructura similar a una RIC, la diferencia es que no presenta una periodicidad de +/-27 días, en promedio.

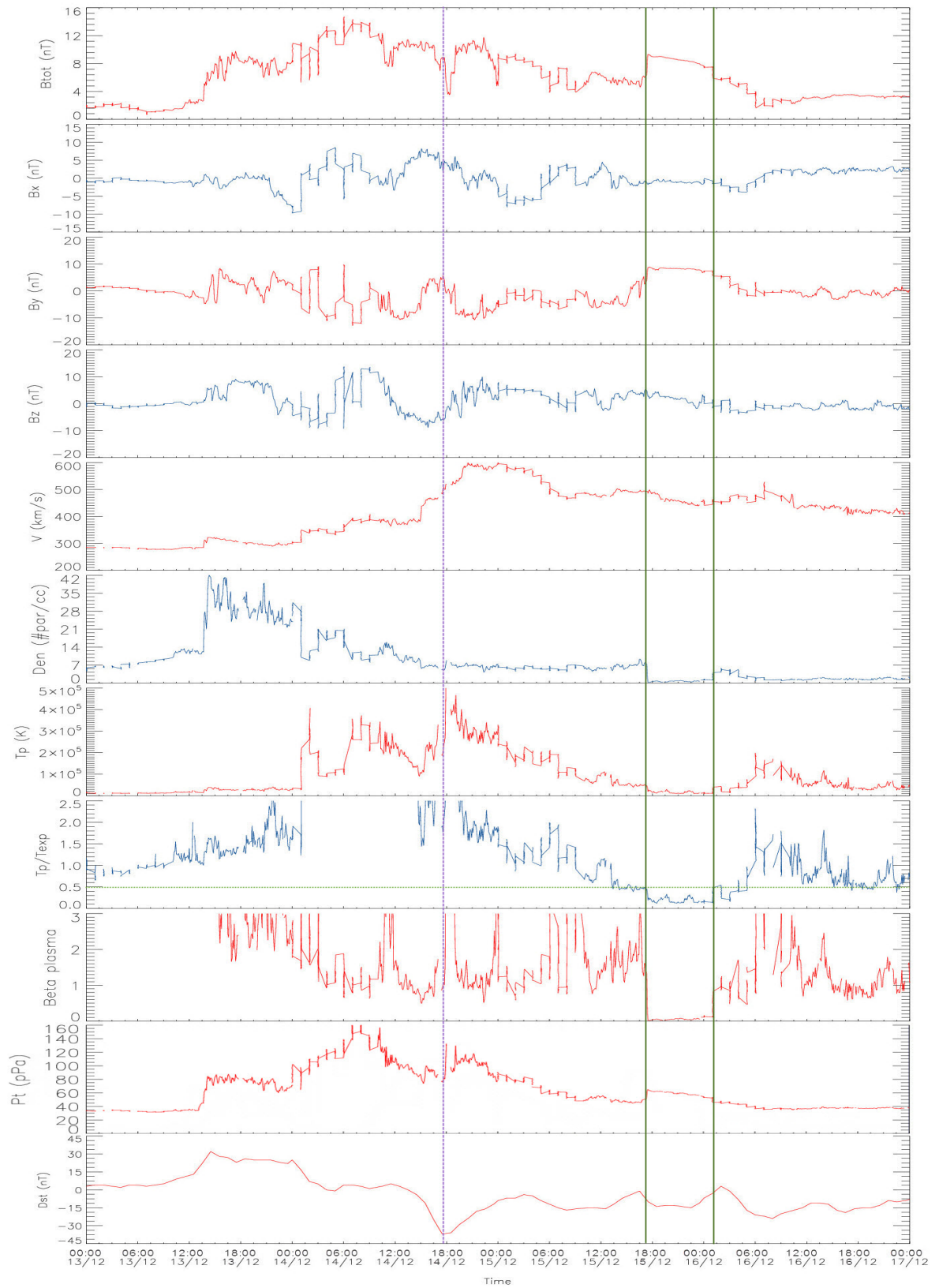


Figura 4.26: Parametros del MIP. Misma simbologia que la de la Fig.4.13. Se grafica del 13 al 17 de Diciembre del 2013

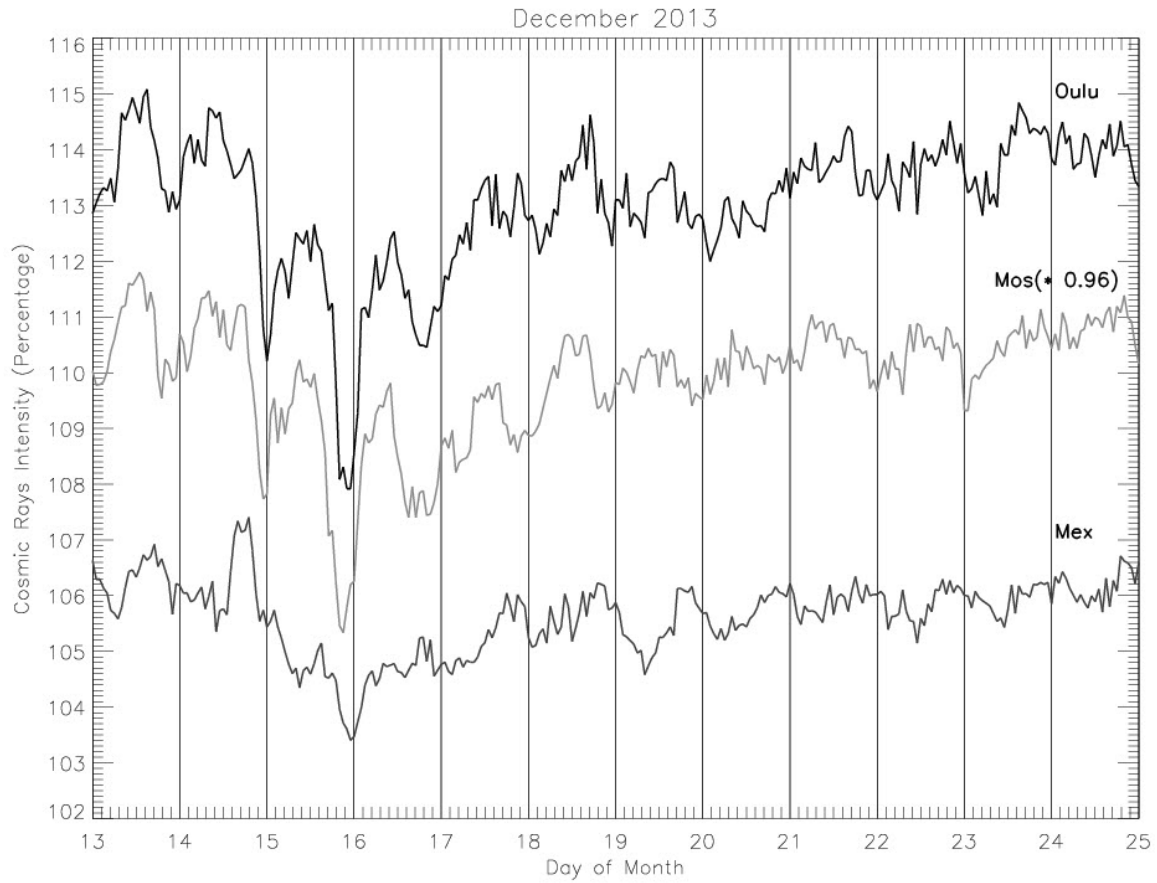


Figura 4.27: Decrecimiento Forbush del 14 de Diciembre del 2013.

A continuación se presenta una tabla en donde se resumen algunas características de los nueve eventos:

Evento	Inicio DF	Choque	Inicio EMCI	Fin EMCI	Grosor radial (UA)	V. Prom (Km/s)	Índice Confabilidad	Grupo Pr.
1	05/Ago/11 11:00	04/Ago/11 22:00	05/Ago/11 03:00 (05:00)	05/Ago/11 14:00	0.09	424	1	2
		05/Ago/11 19:00 (17:51)	06/Ago/11 23:00	08/Ago/11 03:00 (07/Ago 22:00)	0.31	542	2	3
2	26/Sep/11 14:00	26/Sep/11 12:30	26/Sep/11 21:00(NM-F)	28/Sep/11 15:00	0.58	562	2	2
3	24/Oct/11 19:00	24/Oct/11 19:00	25/Oct/11 00:00 (NM) (22:00)	25/Oct/11 16:00	0.20	474	2	2
4	08/Mar/12 11:00	08/Mar/12 11:00	09/Mar/12 05:00 (NM-F)	11/Mar/12 13:00 (07:00)	0.68	560	2	2
5	16/Jun/12 10:00	16/Jun/12 10:00 (20:20)	16/Jun/12 22:00(NM)	17/Jun/12 13:00	0.14	448	1	1
6	14/Jul/12 18:00	14/Jul/12 18:00	15/Jul/12 06:00(NM)	17/Jul/12 04:00	0.55	489	2	1
7	03/Sep/12 12:00	03/Sep/12 12:00	04/Sep/12 12:00(NM)	05/Sep/12 10:00 (02:00)	0.13	364	1	2
8	13/Abr/13 23:00	13/Abr/13 23:00	14/Abr/13 17:00	15/Abr/13 19:00	0.28	396	2	1
9	14/Dic/13 17:00	-	15/Dic/13 17:00	16/Dic/13 01:00	0.14	463	1	2

Cuadro 4.2: Propiedades de los nueve decrecimientos Forbush. NM-nube magnética. NM-F-nube magnética en la funda. El índice de confiabilidad se refiere a la identificación de la EMCI: 2-muy clara, 1-medianamente clara, 0- pobre. En las fechas se indica, entre parentesis, la fecha y hora registradas por [oc] , en dado caso que existiera un lapso mayor a +/- 2 horas.

4.3. Conclusiones

Considerando que el ciclo solar 24, inició el 4 de Enero del 2008 [24]; el periodo analizado (2007-2013), corresponde al último año del ciclo 23 y el inicio y parte ascendente del ciclo solar 24, se tienen las siguientes conclusiones:

- Se identificaron 60 dF's en el periodo 2007-2013.
- Se tomaron los nueve eventos con las mayores caídas del periodo, para un análisis detallado. Los nueve eventos están claramente identificados en los tres detectores de rayos cósmicos utilizados.
- Todos están asociados con el paso de una EMCI (o dos, como es el caso de los eventos 1 y 5); aun el noveno, que se origina por una SIR más una EMCI. Por lo que se concluye que los dF de mayor caída en el periodo 2007-2013, son ocasionados por EMCI's.
- Como complemento a la identificación de las EMCI's, todas están listadas en la base de datos elaborada por Ian Richardson y Hilary Cane, que se encuentra en internet [oc]. Aun existiendo algunas diferencias entre las horas registradas por ellos y las identificadas en este trabajo, en general se considera que coinciden bastante bien.
- No existe un parámetro (o varios) del medio interplanetario, presente en las EMCI's, que pueda relacionarse directamente con los dF's; se encontró que en gran parte depende de la geometría de la interacción EMCI-Tierra, siendo los del grupo 2 los más comunes (6 de 9). Esto nos indica que es más probable que una EMCI provoque un dF cuando interacciona por más tiempo con la Tierra, impactándola parcialmente, de tal manera que su región de influencia sea mayor. Por ejemplo, el evento 5, asociado a una EMCI de 0.16 UA de grosor radial y perteneciente al grupo 1 en su interacción, es el evento de menor caída en Oulu (Para entender de mejor manera lo antes mencionado sobre un impacto parcial, observar la Fig. 1 del Cap. 3).
- De todas las EMCI's, su velocidad promedio no paso de los 600 km/s .
- Sin considerar los eventos complejos (1 y 9), en 6 de los 7 eventos, el inicio del dF coincide con la llegada del choque asociado a la EMCI.
- En 6 de los 7 eventos, el dF coincide con un SSC. En los eventos complejos, el inicio del dF esta «enmarcado» por 2 SSC.
- Se encontraron 3 dF en el 2007, 4 en el 2008, 1 en el 2009, 6 en el 2010, 14 en el 2011, 19 en el 2012 y 13 en el 2013.
- En la Fig. 4.28 se grafica el numero de manchas solares en el periodo analizado; se puede observar que los nueve eventos analizados se encuentran en la parte ascendente del ciclo solar 24.

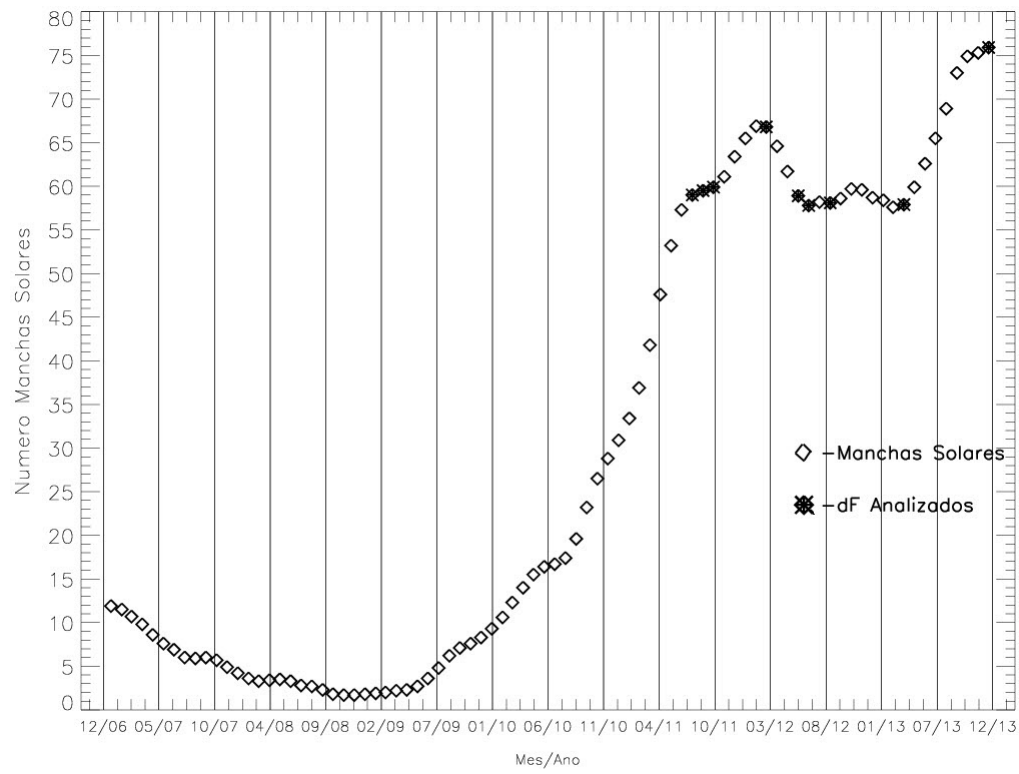


Figura 4.28: Numero de manchas solares en el periodo 2007-2013. Se grafica el numero de manchas solares por mes y se indican los 9 dF analizados.

Bibliografía

- [24] Sol Cycl 24.
- [Alf43] H Alfven. On the existence of electromagnetic-hydrodynamic waves. *Ark. Mat. Astron. Fys*, 29(2): 1–7, 1943.
- [Asc06] Markus J Aschwanden. *Physics of the solar corona, An introduction with problems and solutions*. Springer., 2006.
- [Bru05] Vincenzo C. Bruno, R. The solar wind as a turbulence laboratory. *Solar Phys*, 2005.
- [BS00] J.A. Bravo S., González-Esparza. The north-south asymmetry of the solar and heliospheric magnetic field during activity minima. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 27(NO. 6): PP. 847–849, 2000.
- [Bur95] L.F. Burlanga. *Interplanetary Magnetohydrodynamics*. Oxford University Press, 1995.
- [Can00] Hilary Cane. Coronal mass ejections and forbush decreases. *Space Science Reviews*, 93: 55–77, 2000.
- [Can11] I.G Cane, H.V. Richardson. Galactic cosmic ray response to interplanetary coronal mass ejections/magnetic clouds in 1995-2009. *Solar Phys*, 2011.
- [GE00] J. Americo Gonzalez-Esparza. Solar-cycle variations of interaction regions: in-ecliptic observations from 1 to 5 au. *Geofísica Internacional*, 39(1): 41–46, 2000.
- [GE01] Juan Américo. González Esparza. *Introducción a la Dinámica de gran escala del Medio Interplanetario*. Instituto de Geofísica UNAM., 2001.
- [GV94] J. A. Kamide Y. Kroehl H. W. Rostoker G. Tsurutani B. T. Gonzalez, W.D. Joselyn and V.M. Vasyliunas. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.*, 99: 5771–5792, 1994.
- [How11] Timothy Howard. *Coronal mass ejections an introduction*. Springer., 2011.
- [Hud06] J.L. Burkepile J Hudson, H.S. Bougeret. Coronal mass ejections: overview of observations. *Space Science Reviews*, (123): 13–30, 2006.
- [Jia06] C.T. Luhmann J.G. Skoug R. M Jian, L. Russell. Properties of interplanetary coronal mass ejections at one au during 1995-2004. *Sol. Physics*, (239): 393–436, 2006.

- [JZ03] Carolus J.Schrijver and Cornelis Zwaan. *Solar and Stellar Magnetic Activity*. Cambridge University Press, 2003.
- [Kle82] L.F Klein, L.W. Burlanga. Interplanetary magnetic clouds at 1 au. *J. Geophys. Res*, 87(A2): 613–624, 1982.
- [Lan09] Kenneth Lang. *The sun from space*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [lisa] CME list.
- [Lisb] SSC List.
- [Lop87] R.E Lopez. Solar cycle invariance in solar wind proton temperature relationships. *J. Geophys. Res*, 92(10): 11,189–11,194, 1987.
- [Men05] Peticolas L. Craig N Mendez, B. Exploring magnetism in solar flares. a teacher’s magnetism activity guide. University of California, Berkeley’s Space Science Laboratory., 2005.
- [oc] Richardson & Cane online catalog.
- [OGE10] V. Ontiveros and J.A. Gonzalez-Esparza. Geomagnetic storms caused by shocks and icmes. *J. Geophys. Res*, 115(A10244), 2010.
- [OJA95] Valdés Galicia José F Otaola Javier A. *Los rayos cósmicos: mensajeros de las estrellas*. Serie la ciencia desde México (108), 1995.
- [Ont] V. Ontiveros. ¿? Tesis de maestría, Instituto de Geofísica, UNAM, ¿?
- [Ric95] H.V Richardson, I.G. & Cane. Regions of abnormally low proton temperature in the solar wind (1965-1991) and their association with ejecta. *J. Geophys. Res*, 100(A12): 23,397–23,412., 1995.
- [Ric04] H.V Richardson, I.G. & Cane. Identification of interplanetary coronal mass ejections at 1 au using multiple solar wind plasma composition anomalies. *J. Geophys. Res*, 109(A09104), 2004.
- [Ric10] H.V. Richardson, I.G. & Cane. Near-earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996-2009): Catalog and summary of properties. *Sol. Phys.*, (264): 189–237, 2010.
- [Rus03] A.A Russell, C.T. Shinde. Icme identification from solar wind ion measurements. *Solar Phys.*, 216: 285–294, 2003.
- [Rus05] A.A. Jian L Russell, C.T. Shinde. A new parameter to define interplanetary coronal mass ejections. *Adv. Space Res*, 35: 2178–2184, 2005.
- [Sch06a] J.C. Alexander D. Ciaravella A. Gopalswamy N. Howard R. Hudson H. Kaufmann P. Klassen A. Maia D. Munoz-Martinez G. Pick M. Reiner M. Srivastava N. Tripathi D. Vourlidas A. Wang Y.-M. Zhang J Schwenn, R. Raymond. Coronal observations of cmes. *Space Science Reviews*, (123): 127–176, 2006.

- [Sch06b] R Schwenn. Solar wind sources and their variations over the solar cycle. *Space Science Reviews*, V. 124: p. 51–76, 2006.
- [Vou02] D. Howard R.A. & Esfandiari E Vourlidas, A. Buzasi. Mass and energy properties of lasco cmes. *ESA SP-506: Solar Variability From Core to Outer Frontiers*, pages 91–94, 2002.
- [Vrn07] Bein B. Kienreich I. Muhr N. Stoiser S Vrnak, B. *Physics of solar flares and coronal mass ejections*. Institute of Geophysics, astrophysics and meteorology Karl-Franzens, University of Graz, Austria, 2007.
- [Wea] Space Weather.
- [WS06] N.U. Balogh A. Bothmer V. Forsyth R.J. Gazis P. Gosling J.T. Horbury T. Kilchenmann A. Richardson I.G. Richardson J.D. Riley P. Rodriguez L. Von Steiger R. Wurz P. & Zurbuchen T.H Wimmer-Schweingruber, R.F. Crooker. Understanding interplanetary coronal mass ejections signatures. *Space Science Reviews*, (123): 177–216, 2006.

