



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE CIENCIAS

Análisis de las emisiones solares causantes de decrecimiento  
Forbush de la radiación cósmica durante el ciclo solar 24.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciado en Ciencias de la Tierra

PRESENTA:

Donovan Omar Villanueva Pineda

TUTOR

Dr. Luis Xavier González Méndez  
Ciudad de México, 2018





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

---

## Hoja de Datos del Jurado

1. Datos del alumno.  
Villanueva Pineda Donovan Omar  
55 68 65 84 20  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Ciencias de la Tierra con orientación a Ciencias Espaciales  
309120078
2. Datos del asesor.  
Dr  
Luis  
Xavier  
González  
Méndez
3. Datos del sinodal 1.  
Dra  
María  
Sargeeva
4. Datos del sinodal 2.  
Dr.  
Oscar  
Gustavo  
Morales  
Olivares
5. Datos del sinodal 3.  
Dr.  
Ernesto  
Ortíz  
Fragoso
6. Datos del sinodal 4.  
Dr.  
Julio  
César  
Mejía  
Ambriz
7. Datos del trabajo escrito  
Análisis de las emisiones solares causantes de decrecimientos Forbush de la radiación cósmica durante el ciclo solar 24.  
96 p.  
2018

---

## Agradecimientos

Estoy muy agradecido con mis familiares y amigos. Mi mamá, mi abuelita, Felipe y todos mis amigos. Yo no creo en Dios, pero en ocasiones me hacen desear que exista, nada más para agradecerle, porque es sólo a través de Dios que te puedes explicar tanta hermosura.

Esta tesis no contiene ni un miligramo de todos los sentimientos que ocurrieron mientras se realizaba, mucho menos de todos los que hubo durante el proceso del cual representa el final. Quizá porque los fotones no tienen masa y esta tesis es electrónica o quizá tal vez debido a que el lector no puede mirar un objeto y a partir de eso determinar su peso. Y apenas uno de esos sentimientos es el agradecimiento.

Realizar esta tesis me llevó más tiempo del que esperaba. Terminar esta carrera me llevó más tiempo del que esperaba, también me hizo aprender más de lo que esperaba, asumir más frustración de la que esperaba, conocer más lugares de los que esperaba y conocer más gente buena de la que esperaba. Esta carrera y sobre todo, esta universidad me demostró ser más de lo que esperaba y eso lo agradezco profundamente.

Sin embargo, tengo un subrepticio rincón en mi corazón lleno de agradecimiento que es aún más profundo y todavía más honesto. Se trata de un lugar para esa gente que fue más nefasta de lo que esperaba. No tanto porque me hayan hecho perder el tiempo o porque mi experiencia con ellos haya sido material para armar películas de terror, sino más bien por los obstáculos que me plantearon en la vida. De no haber sido por esas dificultades, yo no sería quien soy, no me habría movido de mi zona de seguridad en ninguna ocasión y tampoco tendría argumentos para decir que soy mejor. Gracias.

Finalmente agradezco al Mtro. Omar Octavio Musalem Ramírez, el cual me dió la estructura  $A+B=C$ . Suficiente para comenzar esta tesis.

---

## Resumen

Los decrecimientos Forbush (dF) son decrecimientos abruptos en la cuenta de la radiación cósmica detectada a nivel de tierra, los dF ocurren debido a que el Sol produce a lo largo de su ciclo perturbaciones en el Medio Interplanetario (MI) que se manifiestan como contrastes de las mediciones de los parámetros que conforman el Viento Solar (VS). Las líneas de campo magnético asociadas a las perturbaciones, desvían, en función de su energía a los rayos cósmicos en la órbita de la Tierra, produciendo caída en las cuentas detectadas por los observatorios. Dependiendo de la perturbación que provoca un dF, estos pueden recuperar las cuentas de forma gradual en algunos días e incluso hasta semanas. En este trabajo se analizan la relación de dos fenómenos que producen dF: las Regiones de Interacción de Corrientes (RIC) y las Eyecciones de Masa Coronal Interplanetaria (EMCI). Después de determinar al precursor del dF se elaboró un catálogo donde se establece a dicho precursor. Se analizan con detalle los 5 decrecimientos más intensos del ciclo solar 24.

**Palabras clave:** Decrecimiento Forbush, Ciclo Solar 24, Eyección de Masa Coronal y Región de Interacción de Corrientes.

# Índice general

<b>Introducción</b>	<b>3</b>
Objetivo general . . . . .	3
Objetivos específicos . . . . .	4
<b>1 El Sol y sus principales emisiones.</b>	<b>5</b>
1.1 La atmósfera solar . . . . .	5
1.1.1 Fotosfera . . . . .	6
1.1.2 Cromosfera . . . . .	7
1.1.3 Corona . . . . .	7
1.2 Magnetósfera . . . . .	10
1.2.1 Campo magnético interplanetario . . . . .	11
1.2.2 Espiral de Parker . . . . .	12
1.2.3 Viento solar . . . . .	13
1.3 Fenómenos solares . . . . .	13
1.3.1 Ráfagas solares . . . . .	14
1.3.2 Protuberancias solares . . . . .	15
1.3.3 Eyecciones de masa coronal EMC . . . . .	16
1.3.4 Eyecciones de Masa Coronal Interplanetaria (EMCI) . . . . .	17
1.3.5 Región de interacción de corrientes (RIC) . . . . .	19
1.4 El Ciclo Solar 24 . . . . .	20
1.5 Ondas de choque magnetohidrodinámicas . . . . .	21
<b>2 Rayos cósmicos</b>	<b>27</b>
2.1 Historia . . . . .	27
2.2 Origen y composición . . . . .	28
2.2.1 Espectro de energía . . . . .	29
2.3 Cascada atmosférica . . . . .	30
2.4 Variaciones de los rayos cósmicos . . . . .	32
2.4.1 Modulación solar . . . . .	32
2.4.2 Variación diurna . . . . .	34
2.4.3 Efecto Latitudinal y efecto este-oeste . . . . .	35
2.4.4 Decrecimiento Forbush (dF) . . . . .	36
<b>3 Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México (ORC-CDMX)</b>	<b>43</b>
3.1 Monitor de Neutrones de la Ciudad de México . . . . .	43
<b>4 Parámetros del medio interplanetario involucrados en el análisis de los decrecimientos Forbush</b>	<b>47</b>

4.1	Definición a considerar para un decrecimiento Forbush . . . . .	47
4.2	Parámetros del medio interplanetario . . . . .	47
4.2.1	Campo magnético . . . . .	48
4.2.2	Velocidad . . . . .	48
4.2.3	Densidad y temperatura . . . . .	48
4.2.4	Beta del plasma . . . . .	49
4.2.5	Índice Dst . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Análisis de decrecimientos Forbush</b>	<b>51</b>
5.1	Selección y análisis de los dF más intensos . . . . .	55
5.1.1	Evento 1 . . . . .	56
5.1.2	Evento 2 . . . . .	62
5.1.3	Evento 3 . . . . .	69
5.1.4	Evento 4 . . . . .	76
5.1.5	Evento 5 . . . . .	82
	Conclusiones . . . . .	91
	<b>Bibliografía</b>	<b>92</b>

# Índice de tablas

Tabla 1.2.1	Propiedades promedio del viento solar a 1 <i>UA</i> , cercano al mínimo del Ciclo Solar 23. Tomado de [25]. . . . .	14
Tabla 1.3.1	Clasificación de las ráfagas solares según su flujo de energía [16]. . . . .	14
Tabla 1.3.2	Combinación de los criterios de clasificación para protuberancias solares. l, bucles; f, embudo; a, lluvia coronal; b, troncos; c, árbol; d, seto ; e, nube suspendida; m monte; s, para la protuberancia solar con manchas solares y ascendente hacia la Corona, ola; p, exhalaciones; s, para protuberancias solares con plasma ascendente a la corona y sin manchas solares, espículas. . . . .	16
Tabla 2.2.1	Abundancias relativas de los elementos de la radiación cósmica [32]. . . . .	29
Tabla 4.2.1	Clasificación de la actividad geomagnética. . . . .	49
Tabla 5.0.1	Lista de los decrecimientos Forbush del 2009 . . . . .	51
Tabla 5.0.2	Lista de los decrecimientos Forbush del 2010 . . . . .	52
Tabla 5.0.3	Lista de los decrecimientos Forbush del 2011 . . . . .	52
Tabla 5.0.4	Lista de los decrecimientos Forbush del 2012 . . . . .	52
Tabla 5.0.5	Lista de los decrecimientos Forbush del 2013 . . . . .	53
Tabla 5.0.6	Lista de los decrecimientos Forbush del 2014 . . . . .	53
Tabla 5.0.7	Lista de los decrecimientos Forbush del 2015 . . . . .	54
Tabla 5.0.8	Lista de los decrecimientos Forbush del 2016 . . . . .	54

Tabla 5.0.9	Lista de los decrecimientos Forbush del 2017 . . . . .	54
Tabla 5.0.10	Lista del decrecimientos Forbush del 2018 . . . . .	54
Tabla 5.1.1	Lista del decrecimientos Forbush seleccionados para su análisis. . . . .	56

# Índice de figuras

Figura 1.1.1	Estructura del Sol. [2] . . . . .	5
Figura 1.1.2	La fotosfera consiste de un patrón granulado. Cada celda tiene en promedio 1800 km de diámetro [4] . . . . .	6
Figura 1.1.3	Las manchas solares son regiones con una luminosidad inferior que el resto de la fotosfera. En la figura se representa la Tierra para comparar sus dimensiones [6]. . . . .	7
Figura 1.1.4	La cromosfera, imagen creada a través de la línea espectral $H_{\alpha}$ 6562.8 Å. 15:50 hrs TU del 20 de octubre del 2017. Se observa una prominencia solar. . . . .	8
Figura 1.1.5	Fotografía de la Corona solar durante el eclipse del 21 de agosto del 2017. La imagen se compuso a través de 36 cuadros con 14 exposiciones fotográficas para capturar un rango más amplio de luminosidad de lo que puede capturar una cámara convencional. Lo rojo en el lado derecho del limbo son prominencias solares y los puntos blancos en la parte superior izquierda e inferior derecha son las estrellas Alfa Leonis y Nu Leonis respectivamente [7]. . . . .	9
Figura 1.1.6	Imagen construida en escala de grises tomada por el satélite SOHO con el instrumento EIT 171 (106K), el 21 de diciembre del 2014. Las zonas coloreadas con azul son los hoyos coronales. Las zonas que tienen el tono más claro corresponden con regiones activas. . . . .	10
Figura 1.2.1	Variación de la velocidad según la profundidad del Sol. En el eje de la izquierda, el periodo de rotación del sol en días, a la derecha se indica la velocidad angular en nHz, abajo se indica la profundidad en términos del radio del sol. Para cada porción de plasma a diferente latitud (0°, 30°, 45°, 60° y 70°) se calcula una velocidad diferente. Se aprecia la tacoclina aproximadamente a la altura de $0.6R_{\odot}$ [5]. . . . .	11
Figura 1.2.2	Comparación de las líneas de campo magnético entre el máximo y el mínimo de la actividad solar. En el cuadro de la izquierda está la configuración de campo magnético para enero del 2011 parecida a la del mínimo, a la derecha se encuentra la configuración de campo magnético para julio del 2014 que es la de máximo.[10] . . . . .	11
Figura 1.2.3	La forma que asume el Campo magnético interplanetario es la de una falda de bailarina. . . . .	12
Figura 1.3.1	Proceso de reconexión magnética en un par de manchas solares. Las líneas de campo magnético se energizan y posteriormente la energía es liberada. Las flechas indican la dirección en la cual el plasma se moverá [17]. . . . .	15
Figura 1.3.2	Ejemplo de una EMC vista por LASCO con el instrumento C2 el 7 de marzo del 2012 a las 00:36 (TU). Lo verde es la corona solar vista con el instrumento AIA, las regiones activas tienen un tono más brillante. . . . .	17
Figura 1.3.3	Dibujo de una EMC con una nube magnética apuntando en dirección a la Tierra y las líneas de campo magnético retorcidas [22]. . . . .	18



Figura 1.4.1 El número de manchas solares es diferente para cada ciclo solar. Con línea punteada se indica el intervalo correspondiente al mínimo de Maunder. . . . .	21
Figura 1.5.1 Un choque en magnetohidrodinámica. . . . .	24
Figura 2.2.1 Abundancia relativa de los rayos cósmicos en la Tierra. Los puntos negros conectados con líneas más oscuras son para los elementos de los rayos cósmicos, los elementos con unidos con una línea más clara son para elementos que se encuentran en el sistema solar. Relativo al carbono = 100. [35]. . . . .	30
Figura 2.2.2 Espectro de energía de los rayos cósmicos. Se marca el flujo de rayos cósmicos según el telescopio con el que fueron observados desde $1\text{GeV}$ a $10^{20}\text{eV}$ . Para comparar, se presentan las energías de los aceleradores de partículas (LHC) y el Tevatrón del Fermilab (FNAL). [38]	31
Figura 2.3.1 Esquema que representa las partículas secundarias generadas en una cascada atmosférica provocada por un protón. Los productos que llegan a la tierra son: rayos $\gamma$ (80 %); electrones y positrones (18 %); hadrones (0.5 %) y muones (1.7 %) [42] . . . . .	33
Figura 2.4.1 Variación diurna de la intensidad de la radiación cósmica detectada en la superficie. La gráfica corresponde a la variación diurna promedio obtenida en México durante 1998 [43].	34
Figura 2.4.2 Representación de la variación diurna de los rayos cósmicos como una competencia entre los procesos difusión-convección [43]. . . . .	35
Figura 2.4.3 Representación geométrica de las regiones prohibidas y permitidas de los RC, la penumbra es la región donde se combinan las regiones permitidas y las prohibidas [45]. . . . .	36
Figura 2.4.4 Típico decrecimiento Forbush no recurrente de dos pasos, observado por el MN-CDMX el 23 de noviembre del 2012. El primer paso es por efecto de la onda de choque y el segundo paso es por el efecto de la eyecta. . . . .	37
Figura 2.4.5 dF no recurrente de un solo paso observado por el MN-CDMX, el de Roma y el de Oulu el 2 de octubre del 2013. Para efectos visuales, la gráfica de Oulu y la de México ha sido modificada por un escalar que no afecta los datos. . . . .	38
Figura 2.4.6 Una EMCI que provoque un dF no recurrente lo hace en dos formas. Cuadro A, en dos pasos; cuadro B, en un paso. [47] . . . . .	39
Figura 2.4.7 Ejemplo de dF recurrente observado por el MN-CDMX, el monitor de Roma y el de Oulu. Para efectos visuales, la gráfica de Oulu y la de México ha sido modificada por un escalar que no afecta los datos. . . . .	40
Figura 3.0.1 Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México [48]. . . . .	44
Figura 3.1.1 Esquema del Monitor de Neutrones 6-NM64 [51]. . . . .	45
Figura 4.2.1 Comparación de los perfiles de tormentas geomagnéticas. En a) la tormenta es generada por una EMCI, en b) es generada por una RIC. El comienzo súbito de una tormenta geomagnética es causado por una compresión abrupta de la magnetósfera [54]. . . . .	50
Figura 5.0.1 Decrecimiento Forbush observado el 16 de junio del 2012. Notar que la escala ha sido alterada para efectos visuales, se multiplica por un escalar el cual no afecta la variación de los decrecimientos Forbush. La variación de intensidad en los rayos cósmicos es mayor en Oulu que en México y Roma, pero la de Roma es mayor que la de México. . . . .	55
Figura 5.1.1 Decrecimiento Forbush observado el 8 de marzo del 2012. Para efectos visuales, se modifica la curva de Oulu y la de México, la primera se sube por un escalar 1.4 y la segunda se baja por un escalar 0.7 . . . . .	57

Figura 5.1.2 Promedio del campo magnético para el evento 1. . . . .	58
Figura 5.1.3 Componente $B_y$ del campo magnético para el evento 1. . . . .	58
Figura 5.1.4 Componente $B_x$ del campo magnético para el evento 1. . . . .	59
Figura 5.1.5 Velocidad del viento solar para el evento 1. . . . .	59
Figura 5.1.6 Densidad del viento solar para el evento 1, cc es por centímetro cúbico. . . . .	60
Figura 5.1.7 Temperatura del viento solar para el evento 1. . . . .	60
Figura 5.1.8 Intensidad del índice Dst para el evento 1. . . . .	61
Figura 5.1.9 Beta del viento solar para el evento 1. . . . .	61
Figura 5.1.10 Componente $B_z$ del campo magnético para el evento 1. . . . .	62
Figura 5.1.11 Decrecimiento Forbush observado el 14 de julio del 2012. Para efectos visuales, se modifica la curva de Oulu y la de México, la primera se sube por un escalar 1.4 y la segunda se baja por un escalar 0.7. Se indica con una línea vertical el incremento en la radiación cósmica. . . . .	64
Figura 5.1.12 Promedio del campo magnético para el evento 2. . . . .	65
Figura 5.1.13 Componente $B_x$ del campo magnético para el evento 2. . . . .	65
Figura 5.1.14 Componente $B_y$ del campo magnético para el evento 2. . . . .	66
Figura 5.1.15 Componente $B_z$ del campo magnético para el evento 2. . . . .	66
Figura 5.1.16 Velocidad del viento solar para el evento 2. . . . .	67
Figura 5.1.17 Densidad del plasma para el evento 2, cc es por centímetro cúbico. . . . .	67
Figura 5.1.18 Temperatura del viento solar para el evento 2. . . . .	68
Figura 5.1.19 Beta del viento solar para el evento 2. . . . .	68
Figura 5.1.20 Intensidad del índice Dst para el evento 2. . . . .	69
Figura 5.1.21 Decrecimiento Forbush, para efectos visuales, se multiplicó la curva que representa las cuentas de radiación para México por un escalar en 0.7 y para Oulu en un 1.4. Esto no afecta el comportamiento del dF. Se indica con una línea vertical el incremento de las cuentas de radiación como el inicio del dF. . . . .	71
Figura 5.1.22 Velocidad del viento solar para el evento 3. . . . .	72
Figura 5.1.23 Promedio del campo magnético para el evento 3. . . . .	72
Figura 5.1.24 Componente $B_x$ del campo magnético para el evento 3. . . . .	73
Figura 5.1.25 Componente $B_y$ del campo magnético para el evento 3. . . . .	73
Figura 5.1.26 Componente $B_z$ del campo magnético para el evento 3. . . . .	74
Figura 5.1.27 Temperatura del viento solar para el evento 3. . . . .	74
Figura 5.1.28 Beta del viento solar para el evento 3. . . . .	75
Figura 5.1.29 Densidad del viento solar para el evento 3, cc es por centímetro cúbico. . . . .	75
Figura 5.1.30 Intensidad del índice Dst para el evento 3. . . . .	76
Figura 5.1.31 Decrecimiento Forbush observado el 21 de diciembre del 2014. Para efectos visuales, se modifica la curva de Oulu y la de México, la primera se sube por un escalar 1.4 y la segunda se baja por un escalar 0.7 . . . . .	77
Figura 5.1.32 Promedio del campo magnético para el evento 4. . . . .	78
Figura 5.1.33 Beta del plasma para el evento 4. . . . .	78
Figura 5.1.34 Componente $B_x$ del campo magnético para el evento 4. . . . .	79
Figura 5.1.35 Componente $B_y$ del campo magnético para el evento 4. . . . .	79
Figura 5.1.36 Componente $B_z$ del campo magnético para el evento 4. . . . .	80
Figura 5.1.37 Intensidad del índice Dst para el evento 4. . . . .	80
Figura 5.1.38 Temperatura del viento solar para el evento 4. . . . .	81
Figura 5.1.39 Densidad del viento solar para el evento 4, cc es por centímetro cúbico. . . . .	81

---

Figura 5.1.40 Velocidad del viento solar para el evento 4. . . . .	82
Figura 5.1.41 Decrecimiento Forbush observado el 22 de junio del 2015. Para efectos visuales, se modifica la curva de Oulu y la de México, la primera se sube por un escalar 1.4 y la segunda se baja por un escalar 0.7. . . . .	84
Figura 5.1.42 Promedio del campo magnético para el evento 5. . . . .	85
Figura 5.1.43 Componente $B_x$ del campo magnético para el evento 5. . . . .	85
Figura 5.1.44 Componente $B_y$ del campo magnético para el evento 5. . . . .	86
Figura 5.1.45 Componente $B_z$ del campo magnético para el evento 5. . . . .	86
Figura 5.1.46 Velocidad del viento solar para el evento 5. . . . .	87
Figura 5.1.47 Beta del plasma para el evento 5. . . . .	87
Figura 5.1.48 Intensidad del índice Dst para el evento 5. . . . .	88
Figura 5.1.49 Temperatura del viento solar para el evento 5. . . . .	88
Figura 5.1.50 Densidad del viento solar para el evento 5, cc es por centímetro cúbico. . . . .	89



# Introducción

Uno de los fenómenos más asombrosos que hay en la naturaleza es al mismo tiempo uno que ocurre cotidianamente. Se trata del arribo de los rayos cósmicos a la Tierra. Los rayos cósmicos primarios son partículas que provienen de fuera del sistema solar. Cuando los rayos cósmicos llegan a la heliosfera, su comportamiento se ve modificado por el campo magnético del Sol que desvía su curso a través de la convección, difusión, desaceleración adiabática y derivas. El efecto de estos fenómenos se conoce como modulación solar. La modulación solar es mayor en épocas de máximo solar y es menor en épocas del mínimo solar.

Además de la modulación solar, existen otros fenómenos provocados por el Sol que son capaces de alterar las cuentas de la radiación cósmica. Por ejemplo, las eyecciones de masa coronal (EMC) y las regiones de interacción de corrientes (RIC). Estos fenómenos son estructuras de naturaleza electromagnética que se propagan a través del medio interplanetario, cambiando los valores típicos del viento solar a su paso.

El viento solar alterado, es capaz de influir en el campo magnético de la Tierra provocando lo que conocemos como un decrecimiento Forbush [1]. Un decrecimiento Forbush (dF) es un decrecimiento de la componente secundaria de la radiación cósmica. Sus efectos son una consecuencia global de la perturbación solar y se diferencia de la modulación solar en el sentido de que ocurre en un lapso de días (en promedio suele durar 7 días) aunque en ocasiones intensas puede durar más de una semana.

En el capítulo 1 se expone la estructura de la atmósfera solar, así como las principales emisiones solares capaces de perturbar el medio interplanetario. En el capítulo 2 se expone qué son los rayos cósmicos (RC), de dónde vienen y su composición. En el capítulo 3, se expone el Monitor de Neutrones de la Ciudad de México (MN-CDMX). En el capítulo 4 se definen los parámetros del medio interplanetario. En el capítulo 4 se presenta una lista de los dF más intensos para el Ciclo Solar 24. Los parámetros que se definieron con anterioridad darán evidencia de alguna emisión solar. Posteriormente se presenta un análisis de los parámetros del viento solar que fueron los precursores del dF. Se encontraron 70 dF para el Ciclo Solar 24, de estos 54 corresponden a los dF generados por una EMCI, 11 corresponden a dF generados por una RIC y 5 son debidos a la suma de los dos efectos.

## Objetivo general

Relacionar los dF con las emisiones de la actividad solar, donde se analizarán los procesos físicos implícitos en las variaciones de la intensidad de la radiación cósmica galáctica detectada por el MN-CDMX y los monitores de neutrones de Roma y Oulu.

## **Objetivos específicos**

- Estudiar los fenómenos físicos que producen los decrecimientos Forbush y su relación con las distintas manifestaciones de la actividad solar.
- Estudiar y comprender la generación, interacción y detección de los rayos cósmicos galácticos a nivel de tierra.
- Estudiar y comprender el proceso de detección de rayos cósmicos secundarios realizado por el MN-CDMX.

# Capítulo 1

## El Sol y sus principales emisiones.

### 1.1. La atmósfera solar

En la Figura 1.1.1 se muestra un esquema de la estructura interna y externa del Sol. La estructura interna consta de núcleo, zona radiativa y zona convectiva. Mientras que la estructura externa consta de fotosfera, cromosfera y corona.

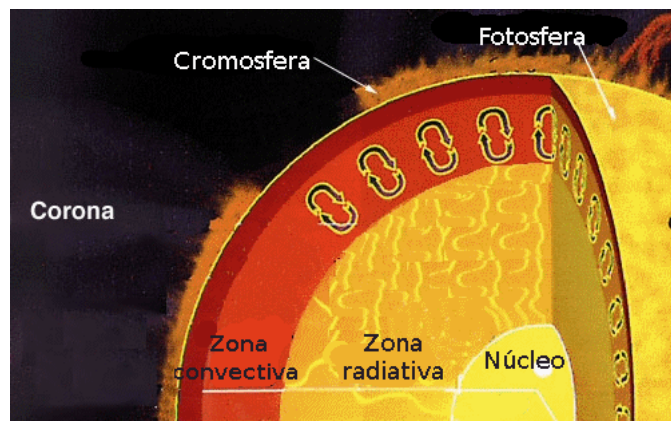


Figura 1.1.1: Estructura del Sol. [2]

En el núcleo del Sol es donde ocurren las reacciones nucleares, estas reacciones producen energía a través de fusionar hidrógeno en helio. La energía producida, se transfiere a la capa siguiente que está encima: la zona radiativa. En la zona radiativa, la energía se transfiere a través de radiación. Cuando pasa un cierto intervalo de tiempo, la energía pasa a la siguiente capa del Sol: la zona convectiva. En la zona convectiva, el transporte de energía se da a través de la convección. En este trabajo se retoma la estructura del Sol como si fuera un cuerpo quieto, la zona externa del Sol, es decir, la atmósfera solar es la responsable de los principales fenómenos que perturban el medio interplanetario.

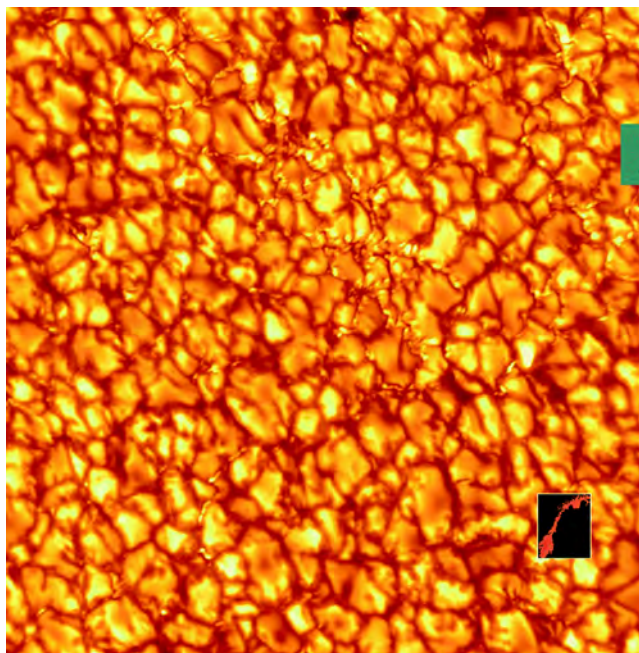


Figura 1.1.2: La fotosfera consiste de un patrón granulado. Cada celda tiene en promedio 1800 km de diámetro [4]

### 1.1.1. Fotosfera

Esfera de luz. Los fotones que provienen de la zona convectiva viajan hacia la fotosfera. En esta la probabilidad de que un fotón se libere aumenta porque la fotosfera tiene menor densidad.

La fotosfera está a  $6.96 \times 10^5$  km del centro del Sol, tiene 100 km de ancho y constituye el 0.014 % del radio solar. En esta zona, el Sol se encuentra en equilibrio hidrostático, por lo que tiene una escala de altura baja y la densidad disminuye con la altura muy rápidamente. La temperatura de 5780 K.

La mayoría de la energía que emite el Sol, es en la fotosfera y está centrada en el espectro visible. Aunque la atmósfera solar es esencialmente transparente, existen regiones en el espectro de energía del Sol que tienen valles abruptos, estos valles son las líneas de Fraunhofer. Las líneas son provocadas por los elementos que habitan en la atmósfera solar en capas superiores a la fotosfera cuando un fotón se absorbe.

El fenómeno característico que ocurre en la fotosfera es la granulación. La granulación es evidencia de que en la zona subyacente a la fotosfera ocurre convección como transporte de energía. Plasma que proviene de la zona convectiva emerge a la superficie y libera su energía, mientras que plasma más frío fluye de vuelta en los bordes de la celda, formando celdas convectivas. En promedio cada gránulo tiene 1800 km de radio, dura 10 minutos y tiene una diferencia de temperatura entre el centro y el borde de 100 K [3].

Existen también los supergránulos, los cuales son estructuras similares en forma a los gránulos, pero son 18 veces más grandes que los gránulos y duran aproximadamente 120 veces más tiempo [3]. Además, se ha observado un interesante movimiento periódico estacionario del plasma en la superficie provocado por ondas sonoras que atraviesan el Sol y que agitan todo el plasma con periodo de 5 minutos. Estas ondas permiten dilucidar la estructura interna del Sol, pues las ondas sonoras adquieren diversas velocidades dependiendo de la densidad del material que atraviesan [5].



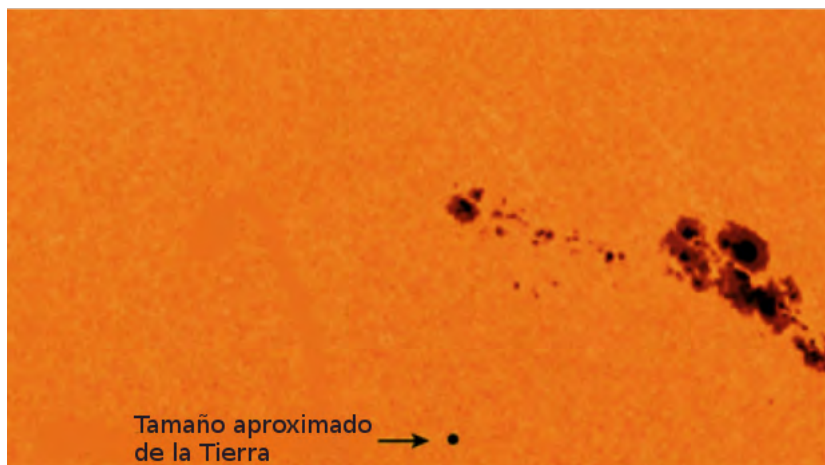


Figura 1.1.3: Las manchas solares son regiones con una luminosidad inferior que el resto de la fotosfera. En la figura se representa la Tierra para comparar sus dimensiones [6].

En la fotosfera se observan las manchas solares, las cuales son el resultado de fuertes campos magnéticos que inhiben la convección. Son regiones más frías ( $3700\text{ K}$ ) que el promedio de la fotosfera y con una luminosidad inferior, las manchas solares a menudo aparecen en pares de polaridad opuesta. Su número varía en función del Ciclo Solar (Figura 1.1.3).

### 1.1.2. Cromosfera

Esfera de color. Durante unos cuantos segundos antes y después de un eclipse total, en el limbo aparece un destello rosa. El color es debido a la predominancia de la línea espectral roja  $H_{\alpha}$  en el espectro de emisión. La cromosfera es la capa que sigue a la fotosfera y debido a que la base de la cromosfera está en su mínimo de temperatura, la densidad es menor en esta capa y continúa descendiendo conforme se incrementa la altura. Su profundidad es aproximadamente de  $3000$  a  $5000\text{ km}$  [3] como se muestra en la Figura 1.1.4.

La densidad de la cromosfera decrece con la distancia al centro del Sol. Este decrecimiento es logarítmico, desde  $10^7$  partículas por centímetro cúbico o aproximadamente  $2 \times 10^{-4}\text{ kg/cm}^3$  a  $1.6 \times 10^{-11}\text{ kg/m}^3$  en el borde. La temperatura decrece de el borde interior a  $6000\text{ K}$  a un mínimo de aproximadamente  $3800\text{ K}$ , antes de incrementar hacia  $35000\text{ K}$  en el borde superior que está en la transición con la corona.

En la cromosfera, la presión magnética se impone por encima de la presión térmica y es el campo magnético el que domina y confina el movimiento del plasma ( $\beta < 1$ ).

### 1.1.3. Corona

La Corona solar se extiende millones de kilómetros en el sistema solar y es más fácil verla durante un eclipse total de Sol, como se muestra en la Figura 1.1.5, aunque es posible observarla a través de un coronógrafo en cualquier otro momento.

La intensidad luminosa de la corona es  $10^{-6}$  relativo a la intensidad luminosa del Sol, esta luminosidad es equivalente a la de la Luna llena. La radiación que emite la corona se divide en tres partes, las cuales se distinguen entre sí por su proceso de emisión.



Figura 1.1.4: La cromosfera, imagen creada a través de la línea espectral  $H_{\alpha}$  6562.8 Å. 15:50 hrs TU del 20 de octubre del 2017. Se observa una prominencia solar.

- K-corona (por alemán *Kontinuierlich*, continuo). Se emite de forma continua en el espectro electromagnético y ocurre por fotones que se dispersan por causa de electrones libres en la corona. Es dominante desde  $1 R_{\odot}$  hasta  $2.3 R_{\odot}$ .
- F-corona. Se encuentran las líneas espectrales de Fraunhofer, las cuales son las mismas que se encontrarían en la radiación solar. Las líneas aparecen debido a que los fotones son dispersados por partículas pesadas, de movimiento relativo lento que se encuentran en el plano de la eclíptica. Es dominante desde  $2.3 R_{\odot}$  en adelante.
- E-corona. Es provocada por iones en la corona.

La temperatura en la corona no está bien definida, debido a que no se trata de un sistema cerrado por la transparencia de sus partículas en casi todo el espectro de emisión; sin embargo, se puede inferir el estado de energía de la corona a través de diversos métodos. Todos ellos concuerdan con aproximadamente el mismo valor y con que la energía promedio de las partículas de la corona se encuentra en un estado de energía elevado.

El primer método es a través de la escala hidrostática de altura del cambio en la densidad radial que es proporcional a la energía promedio por partícula (temperatura). Otro método consiste en observar la intensidad de la radiación en ondas de radio, pues la nube de los electrones en la corona es lo suficientemente opaca y emite lo suficientemente bien para analizar su temperatura, la longitud de onda de los electrones a esta temperatura es de 2 metros aproximadamente. Además se puede asumir que la temperatura de todo el plasma es la misma que la temperatura de los electrones solamente.

Un tercer mecanismo consiste en observar las líneas de emisión de la E-corona y deducir el elevado estado de ionización de especies en la corona. Se calcula la energía promedio por partícula como la diferencia de energía necesaria para llevar ese átomo a el estado ionizado. Por ejemplo, en la E-corona se encuentra el Fe XVII, es decir, iones de hierro que se les han quitado 16 electrones de los 26 que tenían. Por último, una temperatura se puede



Figura 1.1.5: Fotografía de la Corona solar durante el eclipse del 21 de agosto del 2017. La imagen se compuso a través de 36 cuadros con 14 exposiciones fotográficas para capturar un rango más amplio de luminosidad de lo que puede capturar una cámara convencional. Lo rojo en el lado derecho del limbo son prominencias solares y los puntos blancos en la parte superior izquierda e inferior derecha son las estrellas Alfa Leonis y Nu Leonis respectivamente [7].

obtener a través de la velocidad promedio de un ion, esto es a través de la diferencia que marcan las líneas de emisión por el ensanchamiento Doppler. Estos 4 métodos confirman un valor estimado de la temperatura efectiva de  $1.5 \times 10^6 K$ .

La corona se encuentra en expansión por su propio gradiente de presión que se opone a la gravedad del Sol. Este flujo se denomina "viento solar", llega a la Tierra con una velocidad supersónica de  $400 \text{ km/s}$ , una densidad de  $10^5 \text{ partículas/cm}^3$ , y una temperatura de  $10^5 K$ . El tiempo que tarda el viento solar en llegar a la Tierra a una altura aproximada de  $215R_{\odot}$  es 5 días, a diferencia de la luz que tarda sólo 8 minutos en llegar. A menos de  $3R_{\odot}$  la geometría del flujo es gobernada por el campo magnético, pero después, la presión dinámica del plasma gobierna sobre la presión magnética y el plasma se mueve por inercia sobre la espiral de Parker [3].

Unas estructuras comunes en la corona son los hoyos coronales, los cuales son visibles en los rayos X. Los hoyos coronales se muestran en las imágenes como áreas oscuras debido a que son sitios en donde la cantidad de material que hay es aproximadamente un décimo que en el resto de la corona. La diferencia de temperatura es lo suficientemente marcada para diferenciar las líneas espectrales con temperatura diferente de la corona y de la cromosfera. Durante el mínimo solar se encuentra la configuración más estable de los hoyos coronales, en los polos del Sol [8], como se muestra en la Figura 1.1.6.

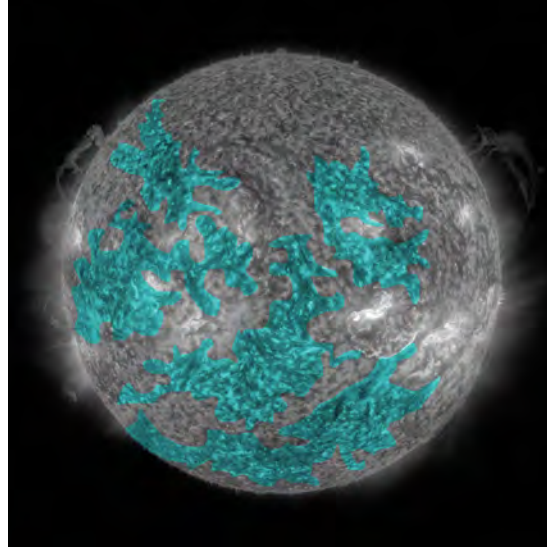


Figura 1.1.6: Imagen construida en escala de grises tomada por el satélite SOHO con el instrumento EIT 171 (106K), el 21 de diciembre del 2014. Las zonas coloreadas con azul son los hoyos coronales. Las zonas que tienen el tono más claro corresponden con regiones activas.

## 1.2. Magnetósfera

El Sol rota de forma diferencial. Porciones distintas de plasma tienen diferentes velocidades según la distancia que tengan al eje de rotación del Sol. En el ecuador solar la velocidad tangencial es máxima, pero es mínima en los polos. Por lo tanto, la velocidad es función de la latitud, por ejemplo, una porción de plasma en el ecuador tarda 25.7 días en dar una vuelta y a  $\pm 45^\circ$  tarda 28 días. Del mismo modo, la velocidad que adquiere el plasma varía conforme a la profundidad. En la Figura 1.2.1 se grafica la velocidad del plasma según la profundidad, se indica también la taoclina como una línea horizontal, en el Sol representa la zona en donde el plasma cambia de régimen, es decir, conforme rota de forma diferencial, a una profundidad mayor, la rotación es como la de un cuerpo rígido. En otras palabras, a partir de la capa superior de la zona radiativa y hasta el centro, todo el plasma que está ahí rota junto independiente de la latitud. Según observaciones heliosísmicas la taoclina está ubicada exactamente a  $0.69R_\odot$ , se cree que debajo de la taoclina es el lugar donde ocurre el dínamo solar, el responsable del campo magnético del Sol.

Esencialmente, el dínamo solar consiste de gas conductor que circula dentro del Sol. El movimiento del gas cargado es una corriente que genera un campo magnético, tal variación de los campos magnéticos generados ocasiona corrientes eléctricas que a su vez generan campo magnético. El proceso se sostiene a sí mismo de tal manera que energía mecánica es transformada en energía magnética.

La intensidad del campo magnético varía a lo largo del Ciclo Solar que en promedio dura 11 años. Al inicio del ciclo aparecen regiones de actividad bipolares en zonas cercanas a los  $\pm 30^\circ$  de latitud. Conforme el ciclo avanza, estas estructuras se dispersan y nuevas estructuras aparecen en latitudes más bajas, esto se repite, llegando progresivamente al ecuador en aproximadamente 11 años. Cuando el ciclo avanza, hay un momento en donde la actividad solar disminuye y dejan de surgir nuevas estructuras, dicho momento es el mínimo solar y se caracteriza porque la estructura de la fotosfera y corona es relativamente simple y la contribución al campo magnético en general es parecida a la de un dipolo magnético, [9].

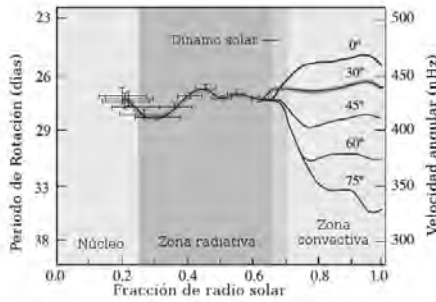


Figura 1.2.1: Variación de la velocidad según la profundidad del Sol. En el eje de la izquierda, el periodo de rotación del sol en días, a la derecha se indica la velocidad angular en nHz, abajo se indica la profundidad en términos del radio del sol. Para cada porción de plasma a diferente latitud ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $70^\circ$ ) se calcula una velocidad diferente. Se aprecia la tacoclina aproximadamente a la altura de  $0.6R_\odot$  [5].

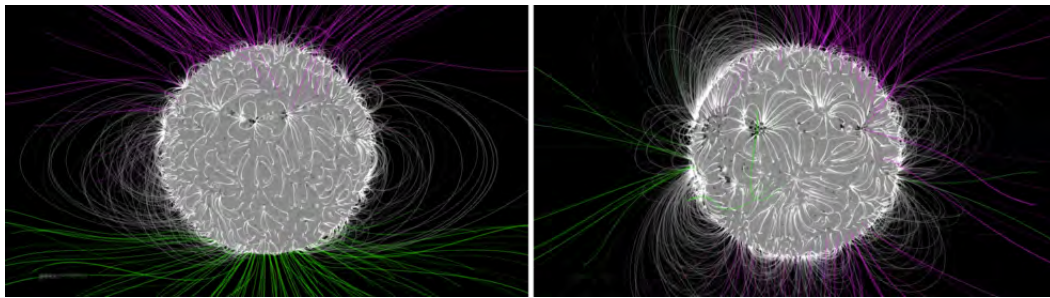


Figura 1.2.2: Comparación de las líneas de campo magnético entre el máximo y el mínimo de la actividad solar. En el cuadro de la izquierda está la configuración de campo magnético para enero del 2011 parecida a la del mínimo, a la derecha se encuentra la configuración de campo magnético para julio del 2014 que es la de máximo.[10]

Entre mínimo y mínimo solar, se cumple un ciclo de aproximadamente 11 años y hay una inversión en la polaridad del campo magnético solar. Para el siguiente mínimo solar, la polaridad regresa a ser la misma que la del primer mínimo considerado; por lo tanto, un ciclo magnético solar consta de 22 años en promedio. En la Figura 1.2.2 se encuentra la disposición de la configuración de campo magnético para tres años después del mínimo del Ciclo Solar 24; 2011. Las líneas de campo magnético están concentradas en las regiones cercanas a los polos, mientras que en las regiones ecuatoriales están más dispersas. Pero durante el máximo las líneas de campo magnético están más enredadas y dispersas, dando las condiciones idóneas para la generación de explosiones solares [10].

### 1.2.1. Campo magnético interplanetario

El campo magnético interplanetario (CMI), es la componente del campo magnético del Sol que es arrastrado por la corona a través del viento solar para llenar el sistema solar. Del mismo modo que en la Tierra, el campo magnético solar no coincide con el eje de rotación. Además el Sol rota. La suma de estos efectos, da como resultado que el plasma se expanda al estilo de una espiral de Arquímedes que puede ser modelada; la espiral de Parker.

Si el Sol fuera un dipolo, la zona donde el campo magnético cambia de polaridad se denomina hoja neutra de corriente, la cual es una superficie con una corriente de  $10^{-10}A/m^2$ . A consecuencia de que el eje de rotación está inclinado y de que el plasma rota en forma diferencial, la hoja neutra de corriente asume la forma de una falda de bailarina, como se observa en la Figura 1.2.3.

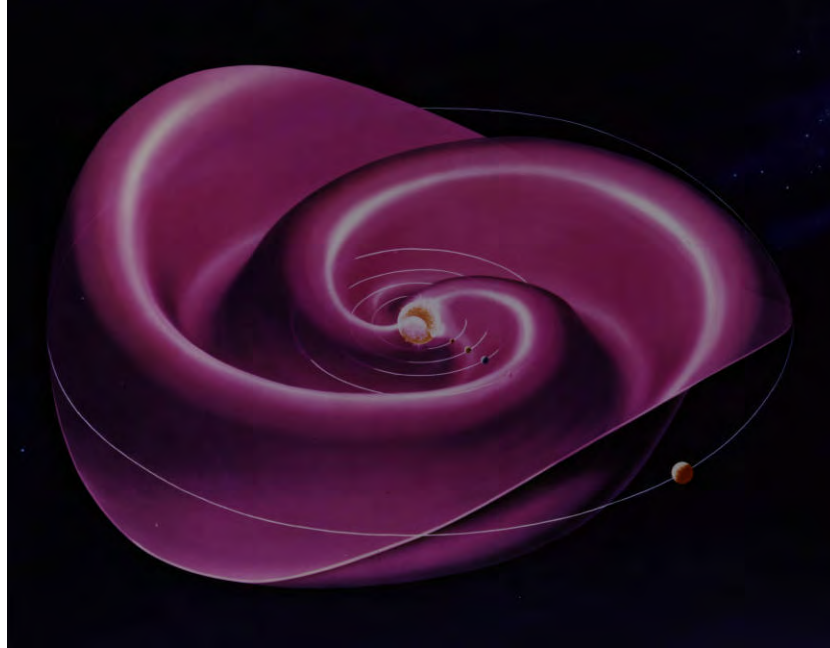


Figura 1.2.3: La forma que asume el Campo magnético interplanetario es la de una falda de bailarina.

### 1.2.2. Espiral de Parker

Suponiendo que el Sol es una fuente puntual de campo magnético y partículas, además de observar que después de cierta distancia, el plasma deja de ser acelerado por el campo magnético y su expansión en la corona se debe a su presión interna. Entonces la velocidad radial es  $V_r = \text{constante}$ , mientras que la velocidad tangencial está dada por la rotación del Sol  $V_\phi$  que es la misma a su velocidad angular  $\Omega_\odot$ . Además, se asume que el teorema de Alfvén se cumple, esto es que, dado que las partículas que habitan el viento solar son partículas cargadas, son conductores ideales, entonces, las interacciones entre las partículas son despreciables comparadas con la interacción con el campo magnético. Es decir, que las líneas de campo magnético obedecerán el movimiento del plasma y las líneas de flujo entonces serán las mismas.

$$\frac{B_\phi}{B_r} = \frac{V_\phi}{V_r} = -\frac{\Omega_\odot r}{V_r} \quad (1.1)$$

Como  $V_r = dr/dt$  y  $V_\phi = r d\phi/dt$ . Entonces la ecuación (1.1) se lee como la ecuación (1.2):

$$\frac{d\phi}{dr} = -\frac{\Omega_\odot}{V_r} \quad (1.2)$$

La solución de la ecuación diferencial de primer orden (1.2) es (1.3):

$$r = R - \frac{V_r}{\Omega_\odot} (\phi - \phi_0) \quad (1.3)$$

Para encontrar las líneas de campo, se cumple que  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ , en coordenadas cilíndricas. A su vez se asume simetría esférica en la propagación del viento, entonces, la derivada satisface la condición ??:

$$\nabla \cdot \vec{B} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 B_r) \quad (1.4)$$

De esta manera, tomando como un punto de referencia  $r_0$ , se encuentra (1.5) y (1.6).

$$B_r = B_r(r_0) \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \quad (1.5)$$

$$B_\phi = -\frac{\Omega_\odot}{V_r} B_r(r_0) \frac{r_0^2}{r} \quad (1.6)$$

Si el ángulo que se forma entre las líneas de campo magnético y la línea Sol-Tierra es  $\psi$ , entonces se obtiene el ángulo a través de la siguiente ecuación (1.7):

$$\tan \psi = -\frac{B_\phi}{B_r} = \frac{\Omega_\odot r}{V_r} \quad (1.7)$$

A la altura de la órbita de la Tierra  $\psi$  es aproximadamente  $45^\circ$  y crece conforme se aleja de la Tierra, a la altura de Júpiter es aproximadamente  $80^\circ$ .  $\Omega_\odot$  es la velocidad angular media del Sol,  $\Omega_\odot \approx 2.7 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$ .

### 1.2.3. Viento solar

El viento solar se presenta en dos estados diferentes. El primero es un flujo irregular lento y más denso, con velocidades que rondan los  $(300 - 500) \text{ km/s}$  y densidad de protones de  $10.7 \text{ p/cm}^3$ ; el segundo es un viento solar regular, rápido y menos denso, con  $750 \text{ km/s}$  y  $3 \text{ p/cm}^3$ . La bimodalidad del viento solar es más evidente durante el mínimo solar. El viento rápido proviene de los hoyos coronales mientras que los flujos lentos provienen de regiones de campo cerrado [11].

El viento lento está enriquecido con elementos ionizados,  $He$ ,  $Ne$ ,  $Ar$  y la razón  ${}^3He/{}^4He$  es más grande y más variable comparada con la del viento rápido [12]. Lo cual es evidencia de que existen procesos de enriquecimiento en la atmósfera solar. La temperatura es  $1.4-1.6 \times 10^6 \text{ K}$ . La turbulencia magnetohidrodinámica se presenta con mayor frecuencia que en el viento lento que en el rápido [13].

El viento rápido, es relativamente estacionario y simple en composición. La composición elemental es más parecida a la composición elemental de la fotosfera porque no hay tantos elementos ionizados. La temperatura es  $8 \times 10^5 \text{ K}$ . El viento rápido permite una evolución bien desarrollada de la turbulencia magnetohidrodinámica, la cual podría ser un remanente del mecanismo de aceleración de partículas en la corona.

Los flujos rápidos en el viento solar tienden a ser unipolares, esto es que el campo magnético del fluido apunta en la dirección directa al Sol o en la opuesta a lo largo de la espiral. La polaridad magnética del flujo está determinada por la región en la corona a partir de donde dicho flujo se originó. En el flujo de viento lento, pueden ocurrir reversiones del campo magnético, pero sólo si atraviesan la hoja neutra de corriente [14].

## 1.3. Fenómenos solares

El Sol constantemente está liberando energía al espacio, esta tasa de liberación no es una constante; sin embargo, en su superficie ocurren eventos de súbita liberación de energía (ráfagas solares) o de plasma (Eyecciones de Masa Coronal).

	Viento lento	Viento rápido
Velocidad del flujo $v_p$	$< 400 \text{ kms}^{-1}$	$400 - 800 \text{ kms}^{-1}$
Densidad de protones $n_p$	$7 - 10 \text{ cm}^{-3}$	$3 \text{ cm}^{-3}$
Densidad de flujo de protones $v_p n_p$	$3.7 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$2.0 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Temperatura de protón $T_p$	$4 \times 10^4 \text{ K}$	$2 \times 10^5 \text{ K}$
Temperatura de electrón $T_e$	$1.3 \times 10^5 \text{ K}$	$1.2 \times 10^5 \text{ K}$
Densidad de flujo de momento	$2.12 \times 10^8 \text{ dyn cm}^{-2}$	$2.26 \times 10^8 \text{ dyn cm}^{-2}$
Flujo de densidad de energía total	$1.55 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$1.43 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Contenido de Helio	2.5 % variable	3.6 % estacionario
Fuentes	Cinturón de corriente.	Hoyos coronales.

Tabla 1.2.1: Propiedades promedio del viento solar a 1 UA, cercano al mínimo del Ciclo Solar 23. Tomado de [25].

### 1.3.1. Ráfagas solares

Las ráfagas solares son incrementos repentinos en la luminosidad del sol, en ocasiones son acompañadas por eyecciones de masa coronal. El espectro de energía en que emite la corona durante una ráfaga solar es prácticamente todo el espectro electromagnético; además de que emite partículas.

La clasificación de las fulguraciones solares va de acuerdo a su emisión en rayos X, donde A representa al grupo de las fulguraciones solares más ligeras, B es por las fulguraciones solares que son 10 veces más intensas, después está la C, M y X. Cada grupo satisface una sub gradación que va del 1 al 9, pero para el grupo de las X esta puede ir arriba de 10. Como por ejemplo la fulguración solar que ocurrió el 4 de noviembre del 2003, durante el máximo del Ciclo Solar 23, la que fue una ráfaga X28. Esta fulguración es la más intensa registrada.

Tipo	Flujo (I) ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
A	$I < 10^{-7}$
B	$10^{-7} < I < 10^{-6}$
C	$10^{-6} < I < 10^{-5}$
M	$10^{-5} < I < 10^{-4}$
X	$10^{-4}$

Tabla 1.3.1: Clasificación de las ráfagas solares según su flujo de energía [16].

La causa de las ráfagas solares más comunes subyace en las reconexiones magnéticas que suceden en regiones de campo magnético asociado a manchas solares. El plasma confinado a las líneas de campo en la corona, cambia súbitamente de tal manera que la energía almacenada por el campo es transformada en otras formas de energía. En la Figura 1.3.1 se ilustra un esquema de cómo sucede una reconexión magnética típica en un par de manchas solares. En el cuadro uno y dos se encuentra una región de campo magnético que se conecta a las polaridades N y S de un par de manchas solares, posteriormente el campo se extiende. En el cuadro 3, las líneas de campo están tan extendidas que hay líneas de campo magnético adyacentes que están apuntando en direcciones opuestas, si las líneas se extienden un poco más, ellas se retuercen y forman una X, como está indicado en el cuadro 4. En el cuadro 5 ocurre la reconexión magnética, las líneas de campo cercanas a las polaridades N y S se conectan de tal manera que es la configuración con menor energía, al mismo tiempo, plasma que rondaba las vecindades de las líneas cerca del punto X es confinado y no puede completar el recorrido en la línea que le correspondía, por lo que queda atrapado en una burbuja magnética. En el cuadro 6, la burbuja choca con la cromosfera y el plasma es recalentado liberando



una gran cantidad de energía, las flechas indican las direcciones en la cual el plasma es empujado. Finalmente, la burbuja magnética es expulsada junto con su energía y la configuración del campo regresa a ser la misma que la del cuadro 1.

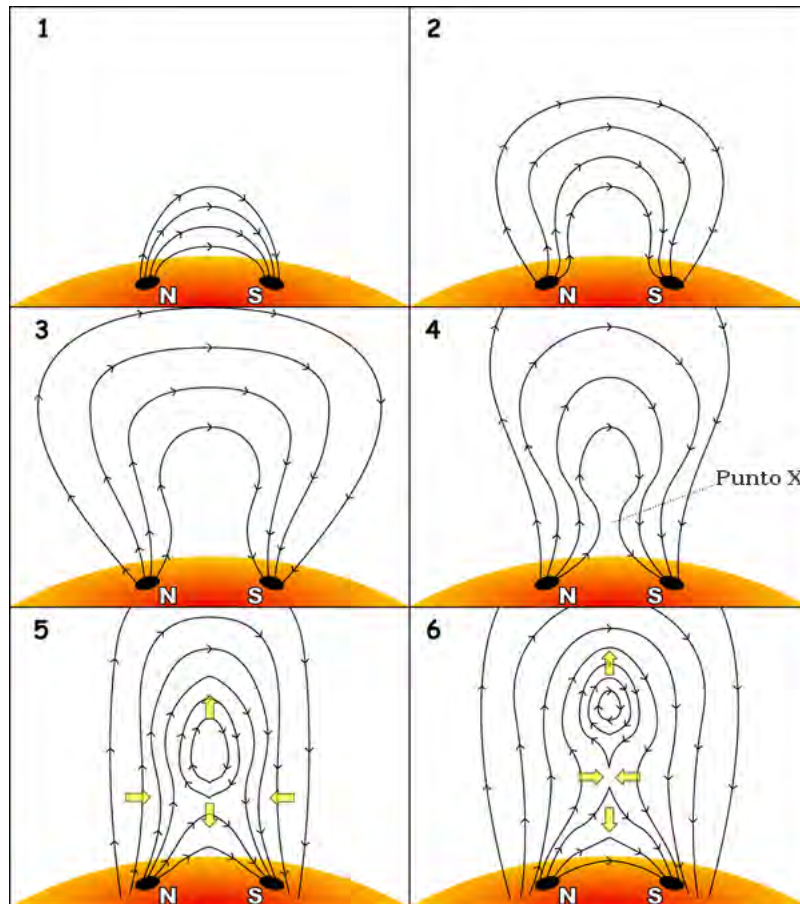


Figura 1.3.1: Proceso de reconexión magnética en un par de manchas solares. Las líneas de campo magnético se energizan y posteriormente la energía es liberada. Las flechas indican la dirección en la cual el plasma se moverá [17].

### 1.3.2. Protuberancias solares

Son estructuras que asemejan la forma de nubes, cuya composición es de plasma que está más frío respecto al plasma típico de la corona. Las líneas de emisión típicas de los iones de las protuberancias resultan ser desde SiII  $\lambda = 1259 \text{ \AA}$  y CII  $\lambda = 1037 \text{ \AA}$  que son  $13\text{-}25 \times 10^3 \text{ K}$ , hasta OIV  $\lambda = 554 \text{ \AA}$  y OIV  $\lambda 1037 \text{ \AA}$ , que representa  $2 \times 10^5 \text{ K}$  y  $4 \times 10^5 \text{ K}$  respectivamente. La protuberancia solar se encuentra envuelta en una región de plasma más caliente denominada Región de Transición Corona Protuberancia (PCTR por sus siglas en inglés) [18], que es una capa límite. La protuberancia solar es 100 veces más fría que la corona y 100 veces más densa [18].

La  $\beta$  magnética tiene un valor de 0.01, por lo tanto la fuerza magnética es la que dicta la estructura de la protuberancia solar y el movimiento del plasma.

La clasificación de protuberancias solares obedece distintos niveles de profundidad. Desde notar que las composiciones de los iones son diferentes para algunas líneas espectrales en el nivel más detallado hasta clasificarlas de

forma cualitativa en el nivel más burdo. En [19], por ejemplo, se clasificó las protuberancias solares en inactivas y activas según la línea espectral del Helio ionizado notando que  $I(\text{HeII } \lambda 4686 \text{ \AA}) \ll I(\text{HeI } \lambda 4713 \text{ \AA})$  en la cromosfera baja y en las protuberancias inactivas, pero estas líneas son igual de luminosas en protuberancias activas y en la corona superior.

En la Tabla 1.3.2, se muestra una clasificación más escueta que no se sigue de una región del espectro electromagnético en particular [20]. Muestra la forma de las protuberancias si están acompañadas de manchas solares o no, y si el flujo de plasma es ascendente o descendente, Se pone A si el flujo es hacia abajo y se pone B si el flujo sube hacia la Corona.

	A	B
S	l,f	s,p
N	a,b,c,d,e,m	s

Tabla 1.3.2: Combinación de los criterios de clasificación para protuberancias solares. l, bucles; f, embudo; a, lluvia coronal; b, troncos; c, árbol; d, seto ; e, nube suspendida; m monte; s, para la protuberancia solar con manchas solares y ascendente hacia la Corona, ola; p, exhalaciones; s, para protuberancias solares con plasma ascendente a la corona y sin manchas solares, espículas.

Aunque esta forma de clasificación toma en cuenta cualidades puramente cualitativas, es posible dilucidar características importantes de los procesos involucrados en la formación de la prominencia. Por ejemplo, si el material que forma la prominencia es reabsorbido por el Sol o si escapa hacia el MI.

### 1.3.3. Eyecciones de masa coronal EMC

Se trata de una erupción de material de la corona. Durante la EMC se expulsa plasma y campo magnético. Una erupción típica expulsa del orden de  $10^{11}$ - $10^{12}$  kg y acelera partículas a velocidades entre 400 km/s y 1000 km/s. Las EMC pueden ocurrir en cualquier región de la corona; sin embargo, es más común que ocurran cerca de la hoja neutra de corriente, justo donde el campo magnético del Sol cambia de polaridad. La frecuencia con la que ocurren varía según el periodo de actividad solar; en el mínimo, ocurre una eyección a la semana; en el máximo, ocurren 2 ó 3 al día [21]. Sólo un pequeño porcentaje está dirigido hacia la Tierra.

La composición de la EMC puede variar; sin embargo, probablemente se trata de material que proviene de capas de la atmósfera más profundas como la cromosfera y la fotosfera. Por esa razón algunos autores simplemente les dicen: Eyecciones de Masa Solar.

El estado natural de la corona es de expansión. Viento solar fluye a través de ella continuamente, mientras que al mismo tiempo, líneas de campo magnético se cierran, confinando y dificultando la expansión del plasma. La resistencia que oponga el campo magnético a la expansión del plasma puede ser el factor detonante para que ocurra una EMC. De tal forma que la EMC es un cambio súbito en el balance de energía que tiene la configuración del campo magnético con la corona [22].

Las EMC se observan a través de un coronógrafo, que consiste en un dispositivo que bloquea el disco solar y se observa únicamente la corona, como en un eclipse. A bordo de SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory* por sus siglas en inglés) se hubica uno de los coronógrafos más exitosos: (*Large Angle Spectroscopic Coronagraph*) LASCO. Éste ha detectado del orden de  $10^4$  EMC desde su lanzamiento en 1995. LASCO detecta la luz blanca a través de la dispersión de los electrones que hay en la EMC. Otro dispositivo con el mismo principio son los coronógrafos COR a bordo de la nave STEREO, como se muestra en la Figura 1.3.2.

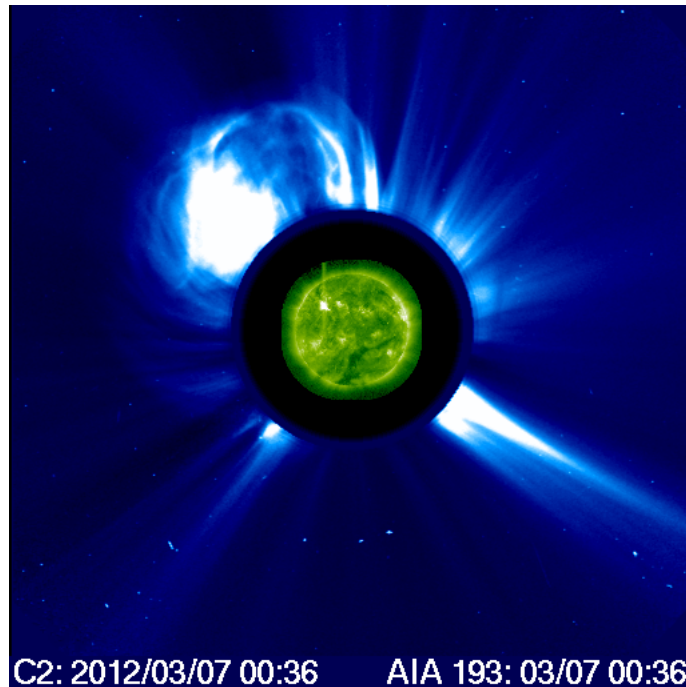


Figura 1.3.2: Ejemplo de una EMC vista por LASCO con el instrumento C2 el 7 de marzo del 2012 a las 00:36 (TU). Lo verde es la corona solar vista con el instrumento AIA, las regiones activas tienen un tono más brillante.

En la Figura 1.3.2 se colocó adicionalmente una imagen capturada con el instrumento AIA (*Atmospheric Imagi-nary Assembly*), el cual captura imágenes en el espectro de la luz visible, ultravioleta y ultravioleta extremo. AIA se encuentra a bordo de la nave SDO (*Solar Dynamics Observatory*), la cual se lanzó en febrero del 2010 para monitorear al Sol con imágenes.

Las imágenes capturadas son objetos 2-dimensionales que son proyecciones de un objeto en 3-dimensiones. Enton-ces, la perspectiva induce que la EMC se vea diferente, según el ángulo respecto a la EMC que se toma. Se dice que una EMC es de tipo halo si la imagen que se toma de ella está dirigida hacia el objeto que captura la imagen, mientras que será de tipo limbo si la imagen satisface un ángulo respecto al Sol y el observador. De frente la EMC se verá como un exceso de brillo en el disco coronal, mientras que si la EMC es de tipo limbo, la EMC se verá como un exceso de brillo en el perímetro del disco solar [22].

#### 1.3.4. Eyecciones de Masa Coronal Interplanetaria (EMCI)

Una EMCI es la contraparte heliosférica de una EMC, es decir, es la EMC cuando se encuentra a mayores distancias del Sol ( $50R_{\odot}$ ).

La diferencia entre una EMC y una EMCI es la forma con la cual se detecta el fenómeno. Mientras que los datos de las EMC son colectados a través de coronógrafos y de la luz blanca, los datos con los que se estudian las EMCI tiene un rango más amplio de dispositivos. Por ejemplo, se observa la luz blanca que se emite por dispersión de los electrones libres y por el análisis de las ondas de radio [22].

Las EMCI no suelen ser tan rápidas como las EMC debido al frenado que impone el viento solar; sin embar-go, muchas EMCI tienen velocidades supersónicas (es decir, superiores a la velocidad del sonido en el medio

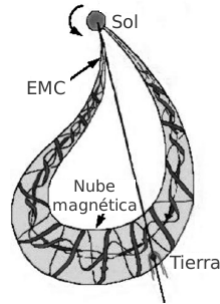


Figura 1.3.3: Dibujo de una EMC con una nube magnética apuntando en dirección a la Tierra y las líneas de campo magnético retorcidas [22].

interplanetario). Esto significa que las EMCI suelen ocasionar choques en el medio interplanetario con sistemas relativamente estacionarios, por ejemplo una magnetósfera planetaria.

El campo magnético dentro de una EMCI es variable; sin embargo, suele ser mayor en magnitud respecto a el campo magnético del medio circundante. Muchas veces, en la EMCI se suele observar un campo magnético helicoidal que se denomina nube magnética. La forma espiral de la nube es evidencia de el retorcimiento que sufre la nube magnética conforme se expande por el medio interplanetario. La estructura dentro de la nube se denomina helicidad y puede ser considerada como una medida de la complejidad del campo magnético [22]. En la Figura 1.3.3 se muestra una imagen de una EMC con las líneas de campo retorcidas en su interior.

Los siguientes variables son alteradas durante el avence de una EMCI por el medio interplanetario [16] y [15]:

- Enriquecimiento de iones pesados. Aumento en el número de iones que se encuentran respecto a la corona. En particular la tasa  $O^{+7}/O^{+6}$  y la carga iónica de Fe.
- Aumento en el campo magnético. Aumento en el campo magnético, producto de la nube magnética.
- Anomalía en la temperatura de protones.
- Ondas de choque transitorias interplanetarias.
- Enriquecimiento en la abundancia de relativa de  $He$
- Estados ionizados inusuales, como  $He^+$
- Incrementos súbitos de la densidad del plasma y decrecimientos de mayor duración.
- Decrecimiento de la temperatura de protón y de electrón.
- Alineamiento bidireccional del flujo de electrones de halo o baja energía de protones.
- Variaciones en el campo magnético asociadas con cuerdas magnéticas o nubes magnéticas.
- Campo magnético fortalecido.
- Rotación suave del campo magnético.
- $\beta < 1$
- Invariación del campo magnético.

Para reconstruir la nube magnética, se puede sostener dos tipos de modelos empíricos con base en observar la estructura helicoidal del campo magnético. Los modelos se pueden clasificar en dos tipos, los que están libres de fuerzas y los que no están libres de fuerzas.

La reconstrucción de los modelos libres de fuerza, se basan en las soluciones  $\alpha$  de Lundquist. La solución tiene simetría cilíndrica y puede escribirse en coordenadas cilíndricas .

$$B_r = 0 \quad (1.8)$$

$$B_t = B_0 J_0(\alpha R) \quad (1.9)$$

$$B_p = H B_0 J_1(\alpha R) \quad (1.10)$$

Donde  $B_r$ ,  $B_t$  y  $B_p$  son las componentes, radial, toroidal y poloidal del campo magnético.  $B_0$  es la componente del campo magnético a lo largo del eje de simetría del cilindro.  $H = \pm 1$  es la dirección hacia donde se dirige el flujo de la cuerda magnética (+1 hacia la derecha, -1 hacia la izquierda). Y  $J_0$  y  $J_1$  son las funciones de Bessel de orden cero y primer orden. Estas pueden resolverse empíricamente comparando con la información in situ.

El campo libre de fuerza, se le conoce como el método de Grad-Shafranov asume que el campo magnético varía con la distancia de acuerdo a un campo magnético  $A$  cuyos valores de contorno corresponden a líneas de campo magnético transversales. En coordenadas cartesianas, las estructuras de plasma en 2D ( $\partial/\partial z = 0$ ) están dadas por:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu_0 \frac{dP_t}{dA} \quad (1.11)$$

Donde el vector de campo magnético es:

$$\vec{B} = \left( \frac{\partial A}{\partial y}, -\frac{\partial A}{\partial x}, B_z(A) \right) \quad (1.12)$$

Que satisface,  $\nabla_t A \cdot \vec{B}_t = 0$ , con  $B_t$  siendo el campo transversal ( $B_x, B_y$ ).  $P(A)_t$  es la suma de la presión del plasma y la presión magnética a lo largo del eje. Asumiendo el marco de referencia de la EMCI , uno puede obtener  $P_t(x, 0)$  y  $A(x, 0)$ , para resolver y obtener  $A(x, y)$  [22].

### 1.3.5. Región de interacción de corrientes (RIC)

Las Regiones de Interacción de Corriente (RIC) son estructuras que se forman cuando viento solar rápido (que viaja a 800 km/s) embiste viento solar lento (que se encuentra viajando a 400 km/s). Como los hoyos coronales son los responsables de emitir viento solar rápido, las RIC son estructuras que causan una actividad recurrente en el espacio interplanetario que se caracteriza por el periodo de rotación solar de 27 días. A distancias heliocéntricas de aproximadamente 1 UA, las RIC están envueltas en dos ondas magnetohidrodinámicas, una de frente y otra reversa. A distancias de 2 UA, estas estructuras evolucionan a ser dos ondas de choque magnetohidrodinámicas una de frente y la otra reversa, respectivamente. Sin embargo, existen ocasiones donde estos pares de onda se encuentran a una altura de 1 UA [23].

A 1 UA, la estructura de la RIC se caracteriza por una región de compresión asociada a una interfase de flujo lento a rápido. En la región de compresión, que dura típicamente un día, la densidad del plasma, el campo magnético y la temperatura se incrementan. El total de la región se caracteriza por fuertes fluctuaciones, así que siempre se encuentra una componente z del campo magnético. El viento rápido, que dura típicamente varios días, satisface velocidades de flujo que en ocasiones son incluso más grandes que 800 km/s, ocasionalmente también se encuentra una prominente actividad de las ondas de Alfvén.

El viento solar rápido que alcanza al viento solar lento tiene la forma esencialmente de una espiral de Parker que sigue la curva dada por la ecuación 1.3. donde el ángulo que forma una partícula con la componente de la línea Sol-Tierra está dado por la ecuación 1.13:

$$\phi = \arctan\left(\frac{\Omega_{\odot} r}{V_r}\right) \quad (1.13)$$

Entonces se deduce que una partícula de viento solar rápido tendrá un ángulo más pequeño que una partícula de viento solar lento respecto de la componente radial. El resultado es que en los puntos en donde ocurre la inflexión de mayor ángulo para el viento solar lento, el viento solar rápido embustirá ahí, generando una onda de choque directo y una onda de choque reverso que puede verse a través de los parámetros del viento solar [24].

La componente z del campo magnético de una RIC no perdura como lo hace la componente z del campo que se origina durante la transición de una EMC. Por lo tanto, la generación de las tormentas geomagnéticas provocadas por una RIC, no suelen ser tan intensas como las tormentas geomagnéticas generadas por una EMCI. Sin embargo, las RIC son eventos más persistentes que se encuentran siempre a lo largo del ciclo de actividad solar y es posible que su influencia en la Tierra sea más significativa a largo plazo.

En el medio interplanetario, la RIC se caracteriza por ser una zona de transición, viento solar lento cambia a viento solar rápido. La densidad de los protones se ve alterada, alta densidad pasa a ser una densidad rarefactada y baja. La temperatura pasa de ser una temperatura baja a una temperatura mayor. Ocurre una rotación del campo magnético, de una región de menor magnitud a una de mayor magnitud. En cuanto al campo magnético de la Tierra, el índice Dst indica un descenso de dos pasos. El primer paso es una compresión del campo magnético de la Tierra, posteriormente se presenta un descenso del mismo, el segundo paso consiste de una fase de recuperación que transcurre en algunos días.

En la Figura 4.2.1 se muestra una comparación de las firmas que generan los distintos tipos de perturbación electromagnética tomando como parámetro el Dst [25].

## 1.4. El Ciclo Solar 24

El ciclo de actividad solar dura 11 años en promedio. El máximo solar se refiere al periodo donde el conteo de manchas solares es el mayor, mientras que el mínimo es el correspondiente al periodo donde el conteo es el mínimo. Las manchas solares se forman en regiones de campo magnético intenso. Se puede relacionar la cantidad de manchas solares con otros fenómenos de la actividad solar.

El ciclo solar se descubrió en 1843 por Samuel Heinric Schwabe, quien después de 17 años de observaciones noto una variación periódica en el numero de manchas solares. Rudolf Wolf registró y estudió estas y otras observaciones y reconstruyó el ciclo hasta 1745. Posteriormente se regresó hasta las primeras observaciones de las manchas solares por Galileo y sus contemporáneos a principios del siglo XVI. El ciclo de 1755-1766 tradicionalmente es numerado

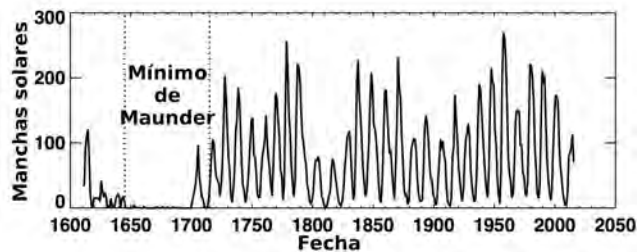


Figura 1.4.1: El número de manchas solares es diferente para cada ciclo solar. Con línea punteada se indica el intervalo correspondiente al mínimo de Maunder.

como el 1. Wolf creó una numeración índice estándar para las manchas solares, el índice de Wolf, el cual se usa en la actualidad. El periodo entre 1645 y 1715 se caracteriza por tener pocas manchas solares y se le conoce como el mínimo de Maunder. Edward Maunder estudió este fenómeno y se ilustra dicho mínimo en la Figura 1.4.1. En la segunda mitad del siglo XIX, Richard Carrington y Sporer notaron que las manchas solares aparecen a diferentes latitudes en parejas, de acuerdo con diferentes partes del ciclo. Las bases físicas del ciclo se elucidaron por Hale y sus colaboradores quienes en 1908 demostraron que las manchas solares son influenciadas fuertemente por el campo magnético [26].

En 1919 Hale y sus colaboradores demostraron que la polaridad magnética de las parejas de manchas solares es constante a lo largo del ciclo. También que se oponen al ecuador a lo largo del ciclo. Se retuercen a sí mismas de un ciclo solar al siguiente. Las observaciones de Hale, revelaron que un ciclo magnético completo se extiende por dos ciclos solares, o uno de 22 años. Antes de regresar a su estado original. Pero, debido a que casi todas las manifestaciones que ocurren son insensibles a la polaridad, el ciclo de 11 años sigue siendo la causa principal de investigación [27].

El Ciclo Solar 24, es la cuenta consecutiva de la actividad solar a partir de 1755, cuando comenzó una observación exhaustiva de las manchas solares. El Ciclo Solar actual comenzó en diciembre del 2008. Hubo actividad insignificante hasta comienzos del 2010 donde alcanzó el máximo en abril del 2014.

## 1.5. Ondas de choque magnetohidrodinámicas

Cuando una EMCI se propaga por el medio interplanetario, suele generar una onda de choque. Una onda de choque es una compresión delgada y abrupta en el frente de una onda. Es provocada cuando se libera energía de forma súbita. Las ondas de choque viajan a velocidades supersónicas y cuando se propagan, la temperatura, densidad y presión del medio en donde viajan se incrementan.

Cuando se forma una onda de choque, la fuente que la produce está excediendo a la onda que creó. Por lo tanto, cuando la fuente está viajando a la velocidad del sonido en su medio, las ondas que emite al frente se enciman inmediatamente. Cuando la fuente se mueve a velocidades supersónicas, las ondas se enciman nuevamente; pero, en esta ocasión los frentes de onda se superponen unos con otros y forman una única cresta más grande. Las ondas de choque pierden energía a través de la disipación viscosa y son reducidas a ondas sonoras, por ejemplo, el trueno es generado por un rayo o las explosiones sónicas generadas por aviones [28].

Para plasmas en el medio interplanetario, las ondas de choque que describen el cambio y propagación de sus propiedades son las magnetohidrodinámicas.

Las ecuaciones magnetohidrodinámicas (MHD) son:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1.14)$$

$$\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} = 0 \quad (1.15)$$

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} + \nabla p - \vec{j} \times \vec{B} = 0 \quad (1.16)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{p}{\rho^\Gamma} \right) = 0 \quad (1.17)$$

La densidad de masa del plasma  $\rho \approx m_i n$ ,  $\Gamma = 5/3$  es la razón de calores específicos.  $p$  es la presión,  $\vec{v}$  la velocidad,  $\vec{E}$  es el campo eléctrico y  $\vec{B}$  es el magnético. Las ecuaciones de la magnetohidrodinámica son análogas a las ecuaciones de un fluido no viscoso, adiabático, perfectamente conductor y eléctricamente neutro [29]. Las ecuaciones de MHD son válidas cuando:

$$\delta^{-1} v_t \gg V \gg \delta v_t \quad (1.18)$$

La velocidad  $V$  es la velocidad del plasma,  $\delta$  es la razón del radio de Larmor de la partícula con la longitud de escala de movimiento y  $v_t$  es la velocidad térmica. En un plasma altamente magnetizado, las ecuaciones se satisfacen pues  $\delta \rightarrow 0$ . Si el plasma se vuelve muy rápido, entonces  $V \sim \delta^{-1} v_t$  entonces ocurren resonancias en el movimiento de partículas individuales dentro del plasma, estos movimientos invalidan las ecuaciones MHD [29].

Si el plasma se mueve muy lento  $V \sim \delta v_t$ , entonces el flujo de los electrones y de los iones se vuelve lo suficientemente diferente y se distinguen dos fluidos. Esto ocurre siempre que las velocidades diamagnéticas, que son bastante diferentes de las especies del plasma, se vuelven comparables con la velocidad:  $\vec{E} \times \vec{B}$  [29].

Las ecuaciones de MHD no son válidas en plasmas colisionales, es decir, plasmas en donde el camino libre medio, es mucho menor que la variación típica de la longitud de escala de movimiento. Sin embargo, las ecuaciones de MHD describen bastante bien el movimiento perpendicular del plasma no colisional.

En fluidos MHD, la información de las ondas se transmite en tres tipos diferentes de onda: Ondas de Alfvén compresionales o rápidas, ondas intermedias u ondas de Alfvén de corte y ondas lentas o magnetosónicas. La MHD predice que para estos tres tipos de ondas, se producen tres tipos diferentes de choques que corresponden con las perturbaciones que viajan más rápido una que otra [29].

En general, una propagación del choque a través de un fluido MHD produce una diferencia significativa en el plasma, sea del lado del frente del choque o detrás. El grosor del frente es determinado por un balance entre los efectos disipativos y convectivos. Sin embargo, los efectos disipativos en un plasma de alta temperatura son los únicos comparables con los efectos convectivos cuando los gradientes espaciales en variables de plasma se vuelven extremadamente grandes. Por lo tanto, los choques MHD en tales plasmas tienden a ser extremadamente agudos y son aproximados por cambios discontinuos en los parámetros del plasma. Las ecuaciones MHD y las ecuaciones de Maxwell se pueden integrar a través de un choque para dar un conjunto de condiciones de saltos que relacionan las propiedades del plasma de cada lado de la discontinuidad que es el frente de choque.



Combinando las ecuaciones de MHD con las ecuaciones de Maxwell, se obtienen las siguientes ecuaciones, para una onda que se propaga en un medio como es el plasma [29].

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.19)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \nabla \times (\vec{V} \times \vec{B}) = 0 \quad (1.20)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1.21)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{T} = 0 \quad (1.22)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} \nabla \cdot \vec{T} = 0 \quad (1.23)$$

Donde la letra  $\vec{T}$  es para el tensor de esfuerzos total dado por

$$\vec{T} = \rho \vec{V} \vec{V} + \left( p + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) \vec{I} - \frac{\vec{B} \vec{B}}{\mu_0} \quad (1.24)$$

$\vec{I}$  Es el tensor identidad.

$$U = \frac{1}{2} \rho V^2 + \frac{p}{\Gamma - 1} + \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (1.25)$$

$U$  es el flujo de densidad de energía total.

$$\vec{u} = \left( \frac{1}{2} \rho V^2 + \frac{\Gamma}{\Gamma - 1} p \right) \vec{V} + \frac{\vec{B} \times (\vec{V} \times \vec{B})}{\mu_0} \quad (1.26)$$

Si nos movemos en el sistema de referencia del frente de choque, se puede suponer que el frente del choque coincide con el plano  $yz$ . Sean dos regiones dentro del plasma la región 1 y la región 2 denominadas “corriente arriba” y “corriente abajo” respectivamente, estas regiones no variarán en el tiempo y son espacialmente uniformes. Se sigue entonces que  $\partial/\partial t = \partial/\partial y = \partial/\partial z = 0$ . Pero  $\partial/\partial x = 0$  y es diferente de cero sólo inmediatamente después de las vecindades del frente de choque. Además, sean, la velocidad y el campo magnético corriente abajo y corriente arriba del choque tales que descansan en el plano  $x-z$ . La situación descrita se encuentra en la imagen de la siguiente Figura 1.5.1:

En la Figura 1.5.1,  $\rho_1$ ,  $p_1$ ,  $\vec{V}_1$  y  $\vec{B}_1$  son la densidad de masa, la presión, la velocidad y el campo magnético de la corriente arriba, respectivamente. Mientras que  $\rho$ ,  $p_2$ ,  $\vec{V}_2$  y  $\vec{B}_2$  corresponden con la densidad de masa, la presión, la velocidad y el campo magnético de la corriente abajo de la vecindad inmediata al choque. Las ecuaciones se reducen a lo siguiente:

$$\frac{dB_x}{dx} = 0 \quad (1.27)$$

$$\frac{\rho V_x}{dx} = 0 \quad (1.28)$$

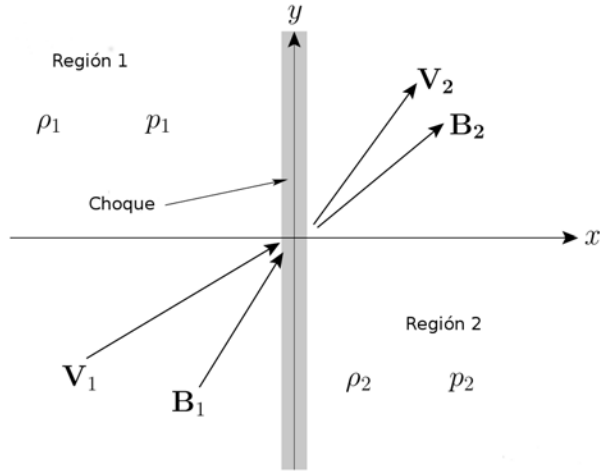


Figura 1.5.1: Un choque en magnetohidrodinámica.

$$\frac{dT_{xy}}{dx} = 0 \quad (1.29)$$

$$\frac{d}{dx}(V_x B_y - V_y B_x) = 0 \quad (1.30)$$

$$\frac{T_{xx}}{dx} \quad (1.31)$$

$$\frac{du_x}{dx} = 0 \quad (1.32)$$

Integrando a lo largo del choque resultan las siguientes condiciones de salto en el choque:

$$[B_x]_1^2 = 0 \quad (1.33)$$

$$[V_x B_y - V_y B_x]_1^2 = 0 \quad (1.34)$$

$$[\rho V_x]_1^2 = 0 \quad (1.35)$$

$$[\rho V_x^2 + p + B_y^2/2\mu_0]_1^2 \quad (1.36)$$

$$[\rho V_x V_y - B_x B_y / \mu_0]_1^2 \quad (1.37)$$

$$\left[ \frac{1}{2} \rho V^2 V_x + \frac{\Gamma}{\Gamma - 1} p V_x + \frac{B_y (V_x B_y - V_y B_x)}{\mu_0} \right]_1^2 \quad (1.38)$$

Donde el paréntesis representa lo siguiente:  $[A]_1^2 \equiv A_2 - A_1$ . Estas relaciones se conocen como las relaciones de Rankine Hogoniot para la magnetohidrodinámica. Asumiendo que todas las variables para la corriente arriba del plasma se conocen, existen 6 variables incógnitas en el problema.



## Capítulo 2

# Rayos cósmicos

La Tierra se encuentra bombardeada todo el tiempo por los rayos cósmicos; son la única información material que nos llega del universo. Como los rayos cósmicos son en su mayoría partículas cargadas, son susceptibles a ser desviadas de su trayectoria por campos magnéticos. Al llegar a la Heliósfera, son afectados por los campos electromagnéticos, de ahí que sus registros contienen información que permite estudiar mejor el Sol. Y como antecedente muchas ramas de la física espacial tienen como fundamento el estudio de los rayos cósmicos. En este capítulo se realizará una revisión de cómo fueron descubiertos, qué son, su origen, composición, como son afectados por la actividad del Sol y por las variaciones del medio interplanetario; además de su interacción con la atmósfera de la Tierra.

### 2.1. Historia

En 1898 J. J. Thomson y E. Rutherford encontraron que los iones gaseosos son los responsables de la conducción eléctrica en el gas atmosférico, esto a través de electroscopios. El origen de lo que cargaba el gas no estaba muy claro. En 1911 V. F. Hess emprendió una serie de ascensos en globo con electroscopios a bordo, de tales experimentos se determinó que a mayor altura, mayor era la carga que se inducía en el electroscopio. La conclusión a la que se llegó fue que existe una fuente de radiación muy penetrante que llega desde fuera de la Tierra.

Como las únicas formas de radiación que se conocían en ese entonces tenían que ver con fotones, los científicos consideraron que la radiación que producía la carga que medía el electroscopio era debida a éstos. Esta hipótesis se vio confirmada momentáneamente por V. R. Millikan y E. Cameron que observaron que el espectro de energía de la radiación cósmica que se produce en un lago a distintas profundidades, es reproducible a partir de tres grupos de fotones con energías de 26, 110 y 220 MeV.

En junio de 1929, Bothe y Kolhöster observaron que dos contadores Geiger-Mueller, uno arriba del otro, separados por una distancia corta y conectados cada uno a un electroscopio, se descargaban simultáneamente. Para entender lo que pasaba, colocaban un contador encima de otro dentro de una caseta rodeada de cinco centímetros de hierro y seis centímetros de plomo. Los resultados fueron que aún con el blindaje, las coincidencias entre los telescopios se reducía sólo 25%. De esto se puede concluir que la radiación cósmica no está constituida por algún tipo de radiación bien conocida hasta el momento que era la radiación alfa y gamma; por ejemplo, la radiación gamma penetra el plomo hasta un centímetro de espesor.

En 1932 Carl Anderson se encontraba estudiando la cascada que generan las partículas cósmicas en una cámara de niebla y observó un camino dejado por algo cargado positivamente y con la misma masa que el electrón. En [30] concluyó que dichas partículas se forman a partir de la colisión de una partícula de la cámara de niebla con una partícula de la radiación cósmica. El resultado es que de la colisión se forma un electrón y un antielectrón que tiene una masa igual a la del electrón, pero una carga positiva. Al antielectrón se le denomina positrón.

Bruno Rossi inventó el circuito electrónico de coincidencias, el cual forma la base de todos los circuitos electrónicos que involucran contadores electrónicos. En 1930, Rossi utilizó válvulas electrónicas para registrar los pulsos de coincidencias de unos contadores Geiger. Él acomodó los detectores en un triángulo tal que un rayo cósmico no podía atravesar los tres contadores. En 1932 él encontró que el 60% de los rayos cósmicos que podían atravesar 25 cm de plomo, también podían atravesar un metro completo. Este experimento sirvió para demostrar que se produce una cascada de partículas secundarias. Rossi también demostró que en el flujo de radiación cósmica existe una componente suave que se absorbe en unos cuantos milímetros de plomo y una componente dura que consistía de partículas con energía superior a 1 GeV. Esto termina por demostrar lo equívoca de la hipótesis de Millikan.

En 1936 Carl D. Anderson y Seth Neddermeyer descubrieron el muón como un constituyente más de la cascada atmosférica. Debido a la masa del muón, al principio se creyó que se trataba de la partícula que predijo Yukawa Hideki en 1935 para explicar la fuerza que mantiene unidos a los protones y neutrones en un núcleo atómico. Posteriormente se descubrió que la responsable es la fuerza fuerte. Aunque los muones fueron asignados correctamente como miembros del grupo de los leptones de las partículas subatómicas porque se comportan como tales, los leptones nunca reaccionan con el núcleo u otras partículas a través de la interacción nuclear fuerte. Un muon es relativamente estable, con una vida media de apenas 2.2 microsegundos antes de que decaiga por la fuerza débil en un electrón y dos tipos de neutrinos. Como los muones están cargados, antes de que decaigan pierden energía al desplazar electrones de los átomos (ionización). A velocidades relativistas, la ionización disipa energía en cantidades relativamente pequeñas, por lo que los muones en la radiación cósmica son extremadamente penetrantes y pueden viajar cientos de metros debajo de la superficie de la Tierra.

En 1938 Pierre Auger, posicionó dos detectores de partículas a gran altura en los Alpes, separados por algunos metros y notó que ambos avisaban la señal de arribo de partículas exactamente al mismo tiempo. Una investigación sistemática demostró coincidencias en los contadores separados horizontalmente hasta una distancia de 75m. Al mismo tiempo, encontró que la razón de conteo se cortó abruptamente al pasar de 10cm a 10m, mientras que la razón decaía lentamente a mayores distancias. Auger registró “cascadas atmosféricas”, que son las cascadas de las partículas secundarias provocadas por la colisión de partículas primarias altamente energizadas con moléculas de aire.

Butler y Rochester descubrieron el kaon en un experimento usando una cámara de niebla. Ellos tomaron dos fotografías de una cámara de niebla y notaron que en una de las fotografías se veía una transformación de un nuevo tipo de partícula no cargada en dos partículas más ligeras y cargadas. En la otra fotografía se observa un nuevo tipo de partícula cargada transformarse en un par de partículas más ligeras, una de las cuales está cargada y la otra no [31].

## 2.2. Origen y composición

Los rayos cósmicos (RC) son partículas energizadas que llegan en su mayoría, desde fuera del Sistema Solar a la Tierra. Su espectro de energía va desde  $10^6$  eV hasta  $10^{21}$  eV [16]. Su composición es principalmente de protones y núcleos (98%), mientras que el resto (2%) son electrones. En la Tabla 2.2.1 se puede observar la composición de los diversos núcleos de elementos que constituyen los RC, los diferentes átomos se indican con su número atómico,

( $Z = 1$ ) hidrógeno; helio ( $Z = 2$ ); elementos ligeros ( $L = 3 - 5$ ), L; elementos medianos ( $Z = 6 - 9$ ), M; pesados ( $Z = 10 - 19$ ), H; muy pesados ( $Z = 20 - 30$ ), VH; mucho muy pesados ( $31 - 92$ ), VVH; y los superpesados ( $Z \approx 100$ ), SH. El cociente  $RC/AR$  es para la abundancia de los RC sobre la abundancia cósmica [32].

Los remanentes de supernova son la principal fuente de material para los rayos cósmicos [33], las fuentes de material secundarias son explosiones de supernova, magnetósferas de pulsares y magnetósferas de estrellas dobles [34]. Por otro lado, la principal fuente de energía de los RC proviene de turbulencia generada por el campo magnético de remanentes de supernova, conforme el campo magnético se expande por el medio interestelar, las partículas que interactúan con él se aceleran a través de la aceleración de choque difusa [33]. Durante tal aceleración, el flujo de partículas cargadas es acelerado por la compresión del campo magnético. Fuentes secundarias de energía son cuásares y radiogalaxias.

Grupo	Elemento	Z	Abundancia de los RC (%)	Abundancia cósmica (%)	RC/AC
Protón	H	1	93	90.7	1
Alfa	He	2	6.3	9.1	0.7
L	Li, Be, B	3-5	0.10	$4 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^5$
M	C, N, O, F	6-9	0.42	0.14	3
H	Ne-K	10-19	0.14	0.054	10
VH	Ca-Zn	20-30	0.04	$2 \times 10^{-3}$	20
VVH	Ga-U	31-92	$2 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	2
SH	>U	110	?	?	?

Tabla 2.2.1: Abundancias relativas de los elementos de la radiación cósmica [32].

La mayoría de los rayos cósmicos son de origen extrasolar; sin embargo, el Sol también produce rayos cósmicos, denominados rayos cósmicos solares. Los cuales se producen en eventos energéticos en la atmósfera solar [16].

Las abundancias relativas de los rayos cósmicos satisfacen aproximadamente las mismas abundancias que se encuentran en el Sistema Solar, salvo algunas diferencias. En la Figura 2.2.1 se observa el efecto par-impar, donde el elemento con  $Z$  número atómico par es más abundante que su antecesor impar. [35]. Sin embargo, se observa que la abundancia de protones en los rayos cósmicos es inferior a la encontrada en materia del sistema solar. La razón de esta discrepancia no ha sido explicada aunque podría deberse a una característica de origen o a la alta energía necesaria para ionizar el átomo de hidrógeno [35]. Para los dos grupos de elementos Li, Be, B y Sc, Ti, V, Cr, Mn, se observa que son varios ordenes de magnitud más abundantes en los rayos cósmicos que en material del Sistema Solar, esto debido a que éstos son el producto final de la *spallation* con elementos de mayor masa. Para el primer grupo, la *spallation* es con carbono y oxígeno, para el segundo grupo, la *spallation* es con hierro.

### 2.2.1. Espectro de energía

En la Figura 2.2.2 se muestra el amplio espectro de energía de los RC que fue determinado al principio por experimentos realizados en globos aerostáticos y por satélites. El flujo decae rápidamente con la energía por lo que es necesario representar a la intensidad y a la energía en una escala logarítmica con base 10.

Aquí se grafica la función  $EdN/dE = dN/dlnE$ . Como la energía que se mide acarrea una incertidumbre  $\delta E$ , que es proporcional a  $E$ , la representación que se hace es la forma natural de mostrar el flujo de energía que abarca 25 órdenes de magnitud por 10 de energía. En comparación, el espectro electromagnético tiene un rango de 15 órdenes de magnitud para la energía de diferentes tipos de onda con diferente frecuencia.

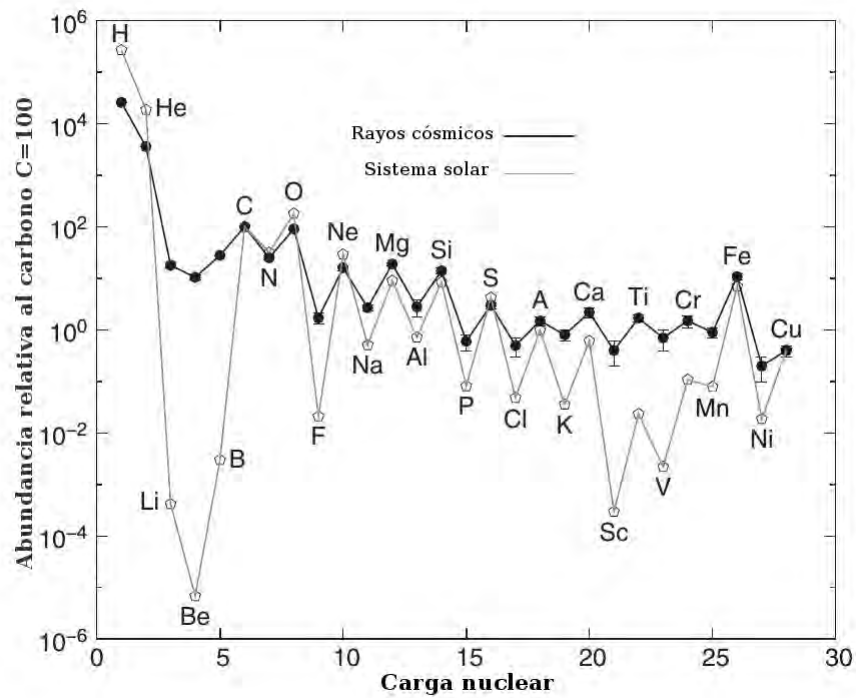


Figura 2.2.1: Abundancia relativa de los rayos cósmicos en la Tierra. Los puntos negros conectados con líneas más oscuras son para los elementos de los rayos cósmicos, los elementos con unidos con una línea más clara son para elementos que se encuentran en el sistema solar. Relativo al carbono = 100. [35].

Hay un incremento en la pendiente cerca de  $3 \times 10^6 \text{ GeV}$  que se conoce como la “rodilla”. Cerca de la rodilla, el flujo de partículas que decae es una por metro cuadrado por año. En seguida, cerca de los  $4 \times 10^8 \text{ GeV}$  ocurre otro incremento en la pendiente, donde la cantidad de partículas detectadas disminuye hasta unas cuantas por kilómetro cuadrado por año, a esta zona del flujo se le conoce como la segunda rodilla [36]. A continuación está otra zona en donde la pendiente se incrementa nuevamente, esta zona se le llama “el tobillo”, las analogías anatómicas hacen referencia a que si la rodilla se dobla, el tobillo se dobla en el sentido opuesto. Finalmente, después de un incremento de la energía en un orden de magnitud más, ocurre un corte que se conoce como el límite GZK [37], [38].

El límite Greisen-Zatsepin-Kuzmin (límite GZK) es un límite teórico superior a la energía de los protones que viajan en el medio interestelar. El límite es de  $5 \times 10^{19} \text{ eV}$ , el límite se establece a través de interacciones de frenamiento de los protones con los fotones de la radiación de microonda de fondo en largas distancias (160 millones de años luz). El límite está derivado a partir de que el componente principal de la radiación cósmica son protones; sin embargo, las observaciones demuestran que los rayos cósmicos más energéticos están constituidos de elementos pesados [39].

### 2.3. Cascada atmosférica

Es una cascada compuesta por partículas cargadas, nucleones (un nucleón puede ser un protón o un neutrón) y radiación electromagnética que se extiende por varios kilómetros cuando un rayo cósmico primario entra en la atmósfera. Se denomina cascada debido a que cuando la partícula choca con un átomo del aire, produce muchos



Espectro de energía de los rayos cósmicos.

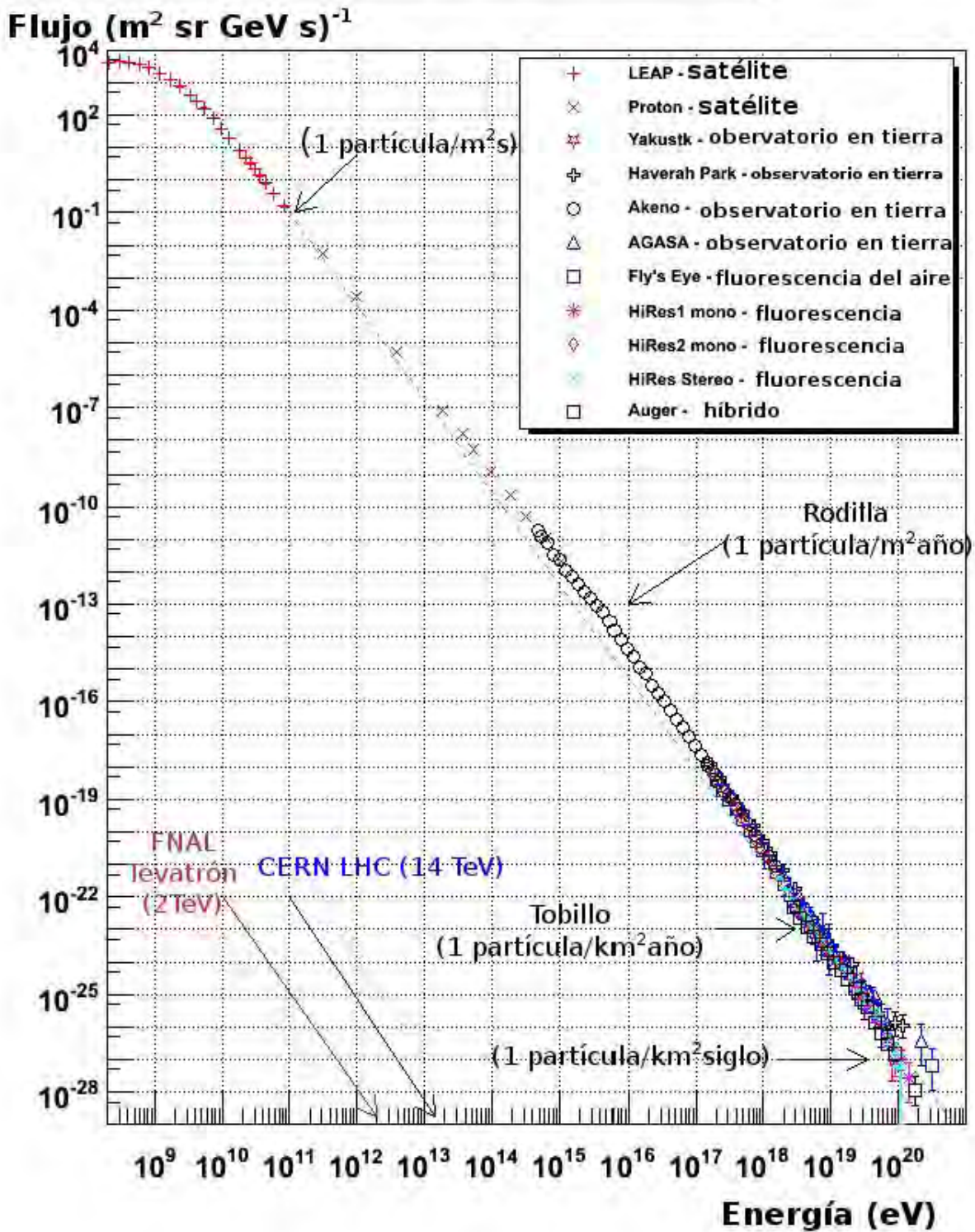


Figura 2.2.2: Espectro de energía de los rayos cósmicos. Se marca el flujo de rayos cósmicos según el telescopio con el que fueron observados desde  $1\text{GeV}$  a  $10^{20}\text{eV}$ . Para comparar, se presentan las energías de los aceleradores de partículas (LHC) y el Tevatrón del Fermilab (FNAL). [38]

hadrones energéticos. Los hadrones inestables decaen rápidamente en partículas y en radiación electromagnética [16].

Los hadrones son partículas hechas de quarks retenidos juntos a través de la fuerza fuerte. Los hadrones se clasifican en dos tipos diferentes, los bariones hechos de tres quarks y los mesones, hechos de un quark y un antiquark. Los protones y los neutrones son ejemplos de bariones, los piones son ejemplos de un mesón.

Cuando un rayo cósmico hadrónico energético ( $E > 10^{13} eV$ ) interactúa con una partícula constituyente de la atmósfera de la Tierra ( $N_2, O_2, Ar$ ), genera partículas secundarias en la colisión, las partículas generadas se comportan de la misma forma con las siguientes colisiones conforme se adentran más y más en la atmósfera. Este fenómeno es conocido como cascada atmosférica. En principio, la llegada de los rayos cósmicos primarios a la Tierra es isotrópica. Los procesos de colisión son dominados por hadrones y forman una cascada de hadrones que se propaga longitudinalmente a lo largo de la dirección del vector de momento del primer rayo cósmico incidente. Debido a que el choque de las partículas es transversal, ocurren procesos de dispersión y la cascada se extiende lateralmente también [40].

Dentro de la cascada atmosférica, además de la generación de hadrones, ocurre la generación de muones, neutrinos y rayos gamma. Los muones y neutrinos se producen principalmente por el decaimiento de piones cargados y kaones, por lo tanto son productos secundarios de la cascada hadrónica. De forma similar, la cascada electromagnética es secundaria a la cascada hadrónica y está compuesta mayoritariamente por rayos gamma que resultan por el decaimiento de piones neutros ( $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ ). Los piones existen en tres estados de carga, positivo, neutro y negativo. Los piones cargados  $\pi^+$  y  $\pi^-$  son inestables, tienen una vida media de  $2.6 \times 10^{-8} s$  y pueden producir nuevas colisiones, a diferencia de los neutros. Cada uno de los rayos gamma creados, genera a su vez su propia cascada electrón-fotón a través de creaciones del par electrón-positrón o del frenamiento Bremsstrahlung. La creación de pares deja de ocurrir debajo de la energía de 1.02 MeV, donde el efecto Compton y el fotoeléctrico se vuelven importantes [40], [41].

Los neutrinos son básicamente indetectables con instrumentos de detección estándar. Dependiendo del ángulo cenital,  $\theta$ , parte o la mayoría de la componente de neutrinos generada en la cascada y que carga con una fracción de la energía depositada en la colisión penetrará la Tierra y continuará su viaje a las profundidades del espacio. Ver Figura 2.3.1

## 2.4. Variaciones de los rayos cósmicos

El arribo de las partículas a la Tierra no es homogéneo y viene modificada por diversas variaciones atmosféricas y del medio interplanetario, como la temperatura y presión o las condiciones del viento solar. Pero existen diversos fenómenos geofísicos que son independientes de dichas variaciones como son la modulación solar y la variación diurna.

### 2.4.1. Modulación solar

El Sol emite plasma ionizado a una velocidad aproximada de 300-400 km/s. Los rayos cósmicos galácticos deben de viajar en contra de este flujo para poder entrar en la Heliosfera y llegar a la Tierra. El efecto del Sol provoca que los rayos cósmicos pierdan energía y que los menos energéticos no puedan ni penetrar el Sistema Solar. La cantidad de rayos cósmicos que el Sol impide que entren es mayor en el período de máxima actividad solar y es menor en el mínimo. Esto porque durante el periodo de máxima actividad solar, las irregularidades presentes en el

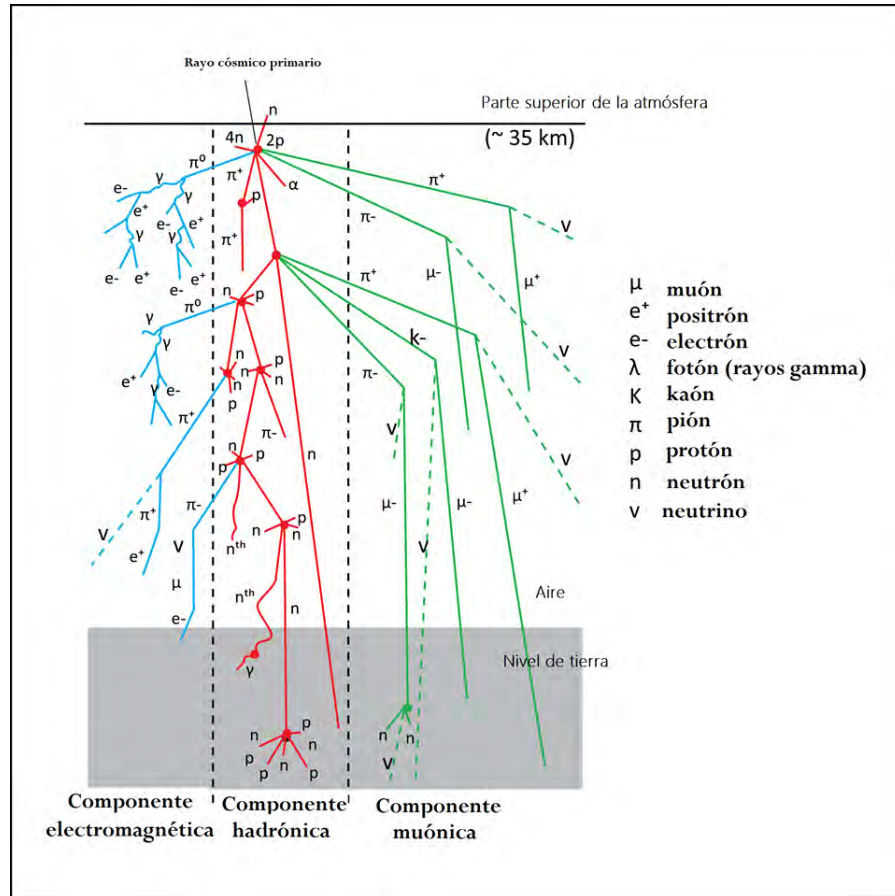


Figura 2.3.1: Esquema que representa las partículas secundarias generadas en una cascada atmosférica provocada por un protón. Los productos que llegan a la tierra son: rayos  $\gamma$  (80%); electrones y positrones (18%); hadrones (0.5%) y muones (1.7%) [42]

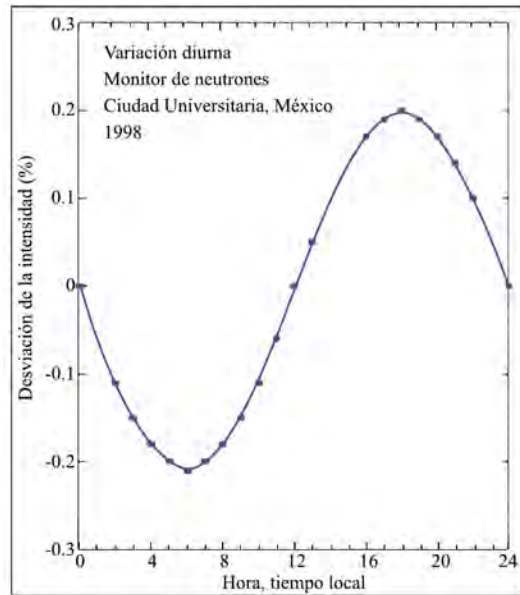


Figura 2.4.1: Variación diaria de la intensidad de la radiación cósmica detectada en la superficie. La gráfica corresponde a la variación diaria promedio obtenida en México durante 1998 [43].

Medio Interplanetario (MI) se acentúan de tal manera que la estructura del viento solar se vuelve más complicada de lo que sería durante el mínimo de actividad solar.

Los Rayos Cósmicos (RC) al entrar a la Heliosfera ven afectado su movimiento por la presencia del Campo Magnético Interplanetario (CMI) y comienzan a girar alrededor de las líneas del campo en una trayectoria helicoidal. El CMI es in-homogéneo, entonces induce modificaciones locales de su trayectoria. Las fluctuaciones del CMI de escalas cercanas al radio de giro de las partículas provocan un fenómeno que se denomina dispersión resonante. Como la distribución de las fluctuaciones es homogénea, la dispersión resonante ocurre en todas direcciones con igual probabilidad. La suma de muchas dispersiones ocasiona un proceso que se conoce como difusión. Sin embargo, a pesar de que la difusión ocurre en todas direcciones, la existencia de una dirección principal del CMI hace que las partículas tiendan a moverse preferentemente en la dirección de la espiral de Arquímedes [43].

Además, el CMI es arrastrado por el viento solar que fluye hacia afuera del Sol. Las partículas cargadas se oponen a las líneas del CMI que se mueven hacia afuera con el viento solar. Este proceso se conoce como convección.

De este modo, la modulación solar comprende los procesos de convección, difusión y deriva, los cuales generan que los RC lleguen a la Tierra en menor o mayor cantidad dependiendo de la etapa del ciclo de actividad solar.

### 2.4.2. Variación diaria

Alrededor de las 18 horas, en todos los detectores de rayos cósmicos en tierra, se registra un máximo de intensidad, la cual desciende con el transcurso del día (Figura 2.4.1). Esta variación es provocada por el viento solar. El viento solar está compuesto esencialmente por un flujo convectivo y otro flujo difusivo, la suma de los flujos influye en la deflexión de los rayos cósmicos para su arribo.

En la Figura 2.4.2 se representa esquemáticamente la suma de los flujos de fuerzas que modifican la trayectoria de una partícula. Como consecuencia la suma de los flujos coincide con una dirección cercana a las 18 horas. Por lo que

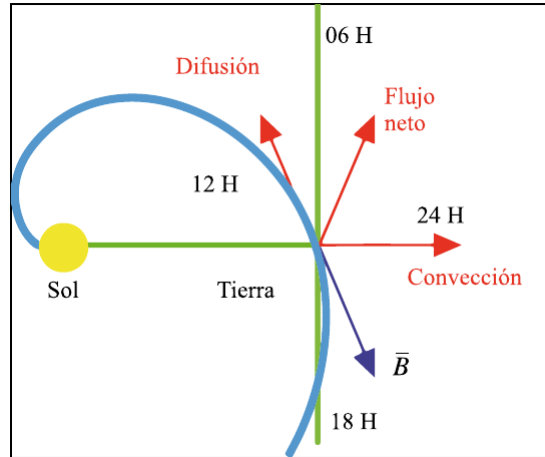


Figura 2.4.2: Representación de la variación diurna de los rayos cósmicos como una competencia entre los procesos difusión-convección [43].

un detector en tierra observará un aumento en la cantidad de partículas que provienen de esa dirección. Entonces, la intensidad de radiación cósmica tendrá un máximo alrededor de esa hora (tiempo local). Aproximadamente, unas 12 horas antes, el detector apuntará en la dirección opuesta, desde donde se detectará una cantidad menor de partículas, por lo tanto, un mínimo. Entonces esta variación se presenta como un balance a lo largo del día como se muestra en la Figura 2.4.2.

### 2.4.3. Efecto Latitudinal y efecto este-oeste

Cuando una partícula con carga se mueve dentro de un campo magnético experimenta una fuerza deflectora: la fuerza de Lorentz. La fuerza es perpendicular a las líneas de campo magnético y a la dirección de movimiento de la partícula. Por lo que el efecto neto será un movimiento helicoidal. Se define el radio de Larmor  $r_L$  para una partícula que se mueve en un campo magnético homogéneo ( $B$ ) como la Ecuación 2.1.

$$r_L = \frac{V_p}{\omega_c} = \frac{mV_p}{qB} \quad (2.1)$$

Donde  $B$  es la magnitud del campo magnético.  $V_p$  es la componente de la velocidad de la partícula en la dirección perpendicular con respecto a  $B$ ,  $m$  la masa de la partícula,  $q$  la carga y  $\omega_c$  es la frecuencia de Larmor. Definiendo  $p = mV_p$  como el momento lineal, y a la carga  $q = Ze$  como el producto de la carga fundamental  $e$  por el número atómico  $Z$ , se obtiene la rigidez magnética (Ecuación 2.2).

$$Br_L = \frac{mV_p}{q} = \frac{p}{Ze} \quad (2.2)$$

La rigidez magnética es proporcional al momento lineal, por lo que una partícula con mayor energía será más resistente a ser desviada por el campo magnético. Por el contrario, una partícula con un múltiplo de la carga fundamental mayor que uno (por ejemplo una partícula alfa) cederá ante el campo magnético más fácilmente que un protón.

Aproximando el campo magnético de la Tierra al de un dipolo, se observa que dependiendo de la carga que posea la partícula que incide en la tierra, esta se verá deflectada cierto ángulo debido a la dirección del campo magnético

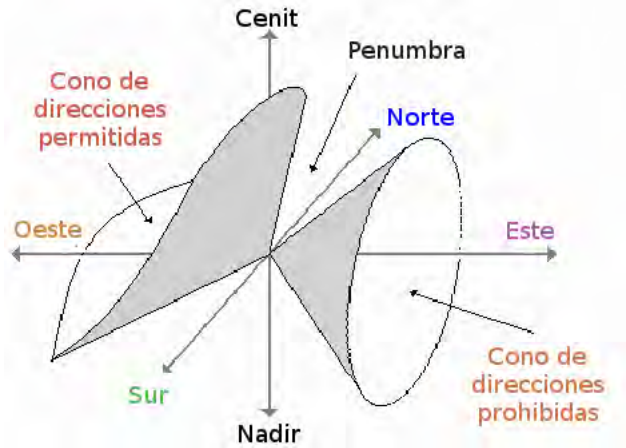


Figura 2.4.3: Representación geométrica de las regiones prohibidas y permitidas de los RC, la penumbra es la región donde se combinan las regiones permitidas y las prohibidas [45].

terrestre. Esta deducción fue dada por primera vez por Störmer dando a conocer a su vez, que existen regiones prohibidas. Las regiones prohibidas mantienen la estructura de conos. Si la carga de la partícula es positiva, ella se verá reflejada hacia la derecha respecto a la dirección del momento magnético. En otras palabras, si se posiciona un detector de rayos cósmicos en algún punto de la superficie de la Tierra (que no sea los polos), se verá que un grupo de partículas con carga positiva llegará en mayor cantidad desde el oeste que desde el este. Si la carga de la partícula incidente es negativa, el cono de Störmer asume la dirección opuesta. La asimetría inducida se denomina efecto este-oeste que se ilustra en la Figura 2.4.3.

En un dipolo geocéntrico, se define la rigidez umbral como la mínima rigidez magnética que una partícula requiere para penetrar en la Tierra y se expresa a través de la Rigidez umbral de Störmer ( $R_C$ ) (Ecuación 2.3).

$$R_C = \kappa \frac{1}{L^\alpha} = \frac{M \cos^4 \lambda}{4r^2} \quad (2.3)$$

Donde  $\kappa \approx 14.823GV$ ,  $\alpha = 2.0311$ ,  $L$  representa el parámetro de Mc Ilwain, el cual indica la distancia a la cual una línea de campo magnético cruza con el plano ecuatorial.  $M$  representa el dipolo magnético de la Tierra,  $r$  la distancia al centro del dipolo en unidades de radio terrestre, y  $\lambda$  es la latitud geográfica [44].

#### 2.4.4. Decrecimiento Forbush (dF)

El decrecimiento Forbush consiste de una caída en las cuentas de la radiación cósmica secundaria detectada a nivel de tierra. Este decrecimiento lo detectó Scott Ellsworth Forbush en 1973 y lo relacionó con la ocurrencia de tormentas geomagnéticas [1]. En un lapso de unas cuantas horas, la intensidad registrada en una estación determinada puede reducirse desde un 1.5%-2% hasta un 20% o un 30% en casos extremos. La intensidad registrada para un monitor puede variar dependiendo de la rigidez umbral y de la intensidad del precursor. Después de llegar a un mínimo, la intensidad se recupera gradualmente. La fase de recuperación puede durar desde varios días hasta semanas. En contraste con la variación diurna, el dF se mide de forma casi simultánea en todo el mundo.

Esencialmente existen dos tipos de decrecimientos Forbush, recurrente (Figura 2.4.7) y no recurrente (Figura 2.4.4), ambos tipos se relacionan con la transición a la altura de la Tierra de una perturbación electromagnética de origen solar que funciona como un escudo que impide que los rayos cósmicos (RC) entren en la Tierra. Los dF tienen

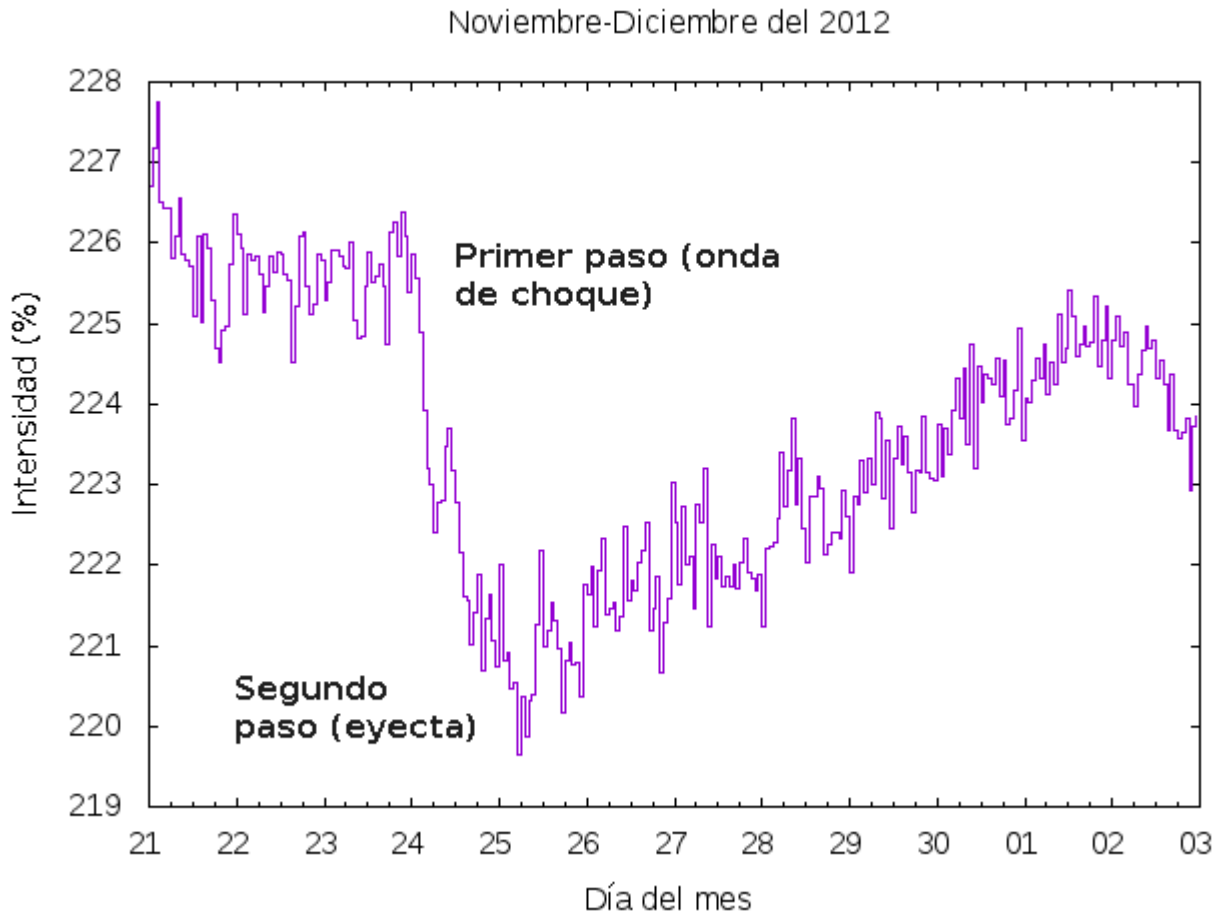


Figura 2.4.4: Típico decrecimiento Forbush no recurrente de dos pasos, observado por el MN-CDMX el 23 de noviembre del 2012. El primer paso es por efecto de la onda de choque y el segundo paso es por el efecto de la eyecta.

una firma característica que se asocia al precursor que lo provocó. El precursor se refiere a la perturbación de origen solar que provocó el dF. El dF de tipo recurrente, se asocia con la transición de una Región de Interacción de Corriente (RIC) y el dF de tipo no recurrente, se asocia con una Eyección de Masa Coronal Interplanetaria (EMCI). Los precursores presentan una firma característica en los parámetros del viento solar que les permite ser distinguibles.

De los decrecimientos Forbush no recurrentes, hay dos tipos dependiendo de la interacción que tenga el campo magnético terrestre con la EMCI [46]. En la Figura 2.4.6 se muestran las partes de la EMCI pertinentes y los dos tipos de dF que puede producir. En el cuadro A de dicha Figura se muestra un dF no recurrente “en dos pasos”, el primer paso se relaciona con el efecto de la onda de choque de la EMCI, el segundo paso es debido al efecto del material de la EMCI. En el cuadro B se observa el efecto provocado sólo por la onda de choque. Para ambos cuadros, el punto S es aquel donde se observa un incremento en las cuentas de la radiación cósmica, este se relaciona con una región de campo magnético y plasma comprimido [47].

El incremento de la radiación ocurre porque en la EMCI existe una discontinuidad del MI, en el frente de choque se produce una variación del campo magnético que por la Ley de Faraday genera un campo eléctrico. En dicho

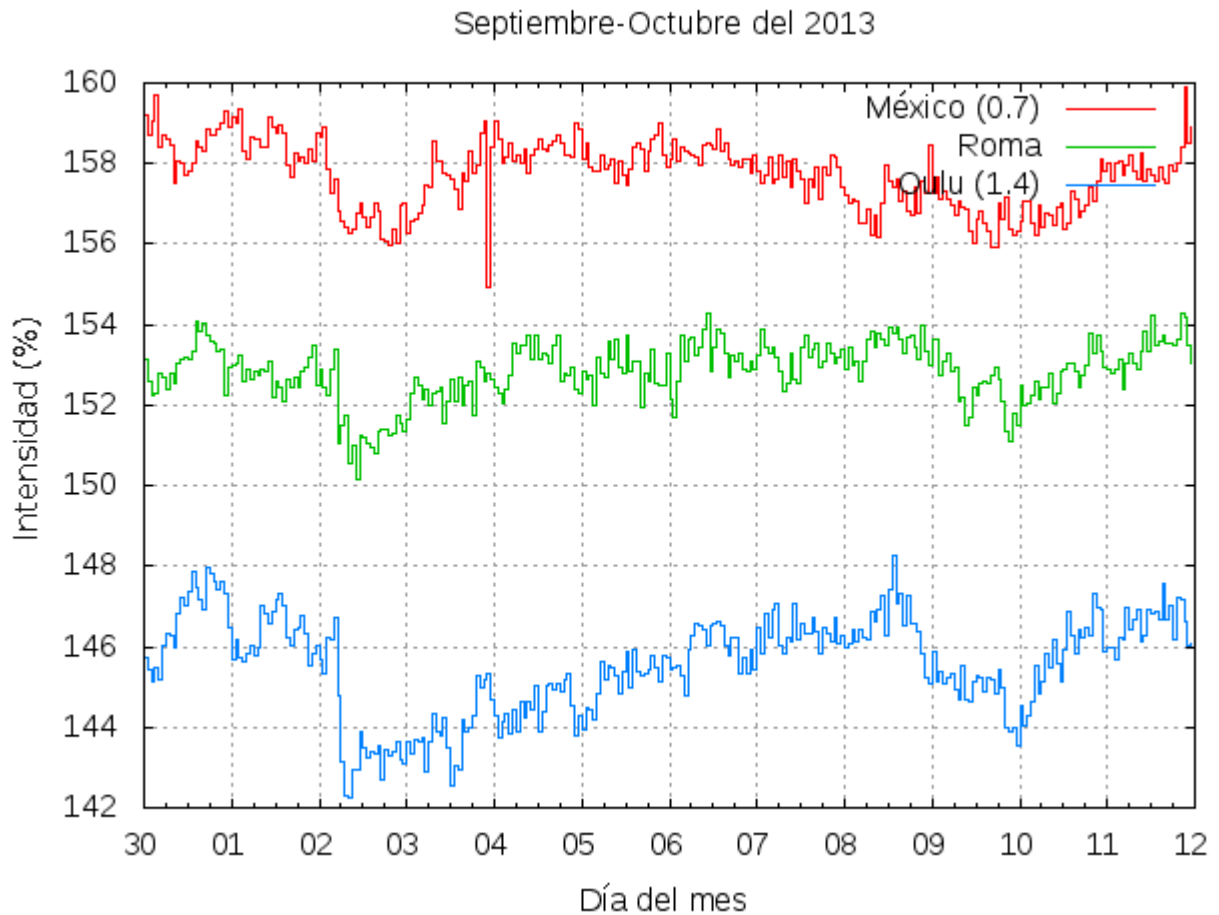


Figura 2.4.5:  $dF$  no recurrente de un solo paso observado por el MN-CDMX, el de Roma y el de Oulu el 2 de octubre del 2013. Para efectos visuales, la gráfica de Oulu y la de México ha sido modificada por un escalar que no afecta los datos.



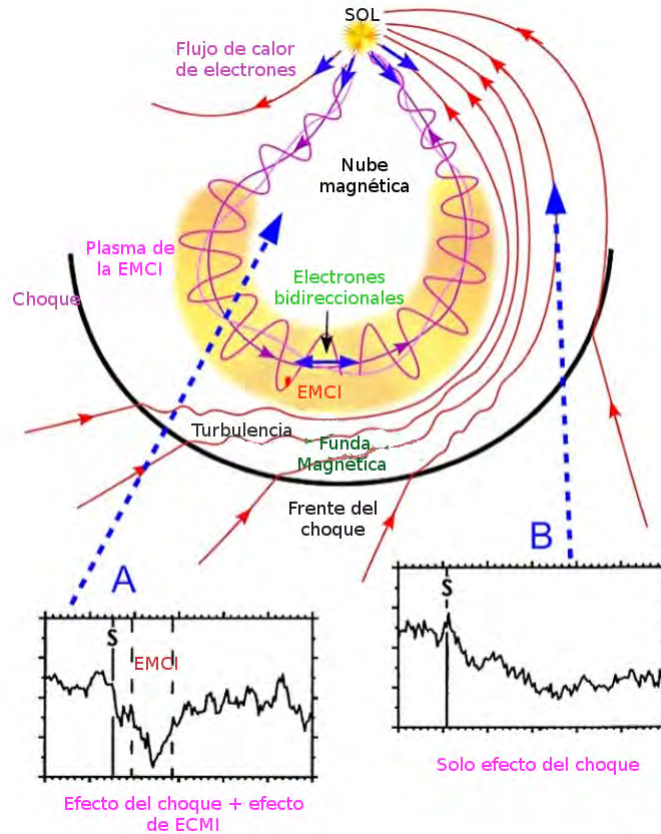


Figura 2.4.6: Una EMCI que provoque un dF no recurrente lo hace en dos formas. Cuadro A, en dos pasos; cuadro B, en un paso. [47]

escenario, el campo acelera a las partículas cargadas que se encuentran circulando cerca de la perturbación, las cuales adquieren energía suficiente para penetrar la magnetósfera terrestre.

El segundo tipo de decrecimiento Forbush es el recurrente, está provocado por la inmersión de la Tierra en una RIC. En esta región del medio interplanetario, se producen ondas de choque por un contraste en las velocidades del viento solar. Este choque induce una perturbación en el campo electromagnético terrestre, lo suficientemente fuerte como para impedir que nuevamente las partículas con menores rigideces magnéticas no puedan penetrar. El monitor de neutrones registrará la caída en la radiación cósmica como un sólo paso o en ocasiones la perturbación puede ser gradual. Los dF de tipo recurrente no suelen ser tan intensos como los decrecimientos Forbush no recurrentes [46].

Ambos fenómenos pueden mezclarse e inducir una bajada en la cuenta de radiación más intensa, por lo que la presencia de uno no excluye al otro.

Existen tres etapas bien definidas en el fenómeno del dF.

- Comienzo. El inicio de un dF es consistente con un inicio formal en los detectores de todo el mundo. Las estaciones que registran primero el dF son aquellas que se encuentran al oeste de la línea Sol-Tierra. Este comportamiento es asumido también por las tormentas geomagnéticas. En ocasiones, la disminución de la radiación puede presentarse incluso antes de la tormenta geomagnética. En la región este de la línea Sol-Tierra la disminución ocurre después del inicio de la tormenta geomagnética.
- Amplitud. La amplitud del dF está relacionada con la rigidez umbral, la profundidad atmosférica y el tipo

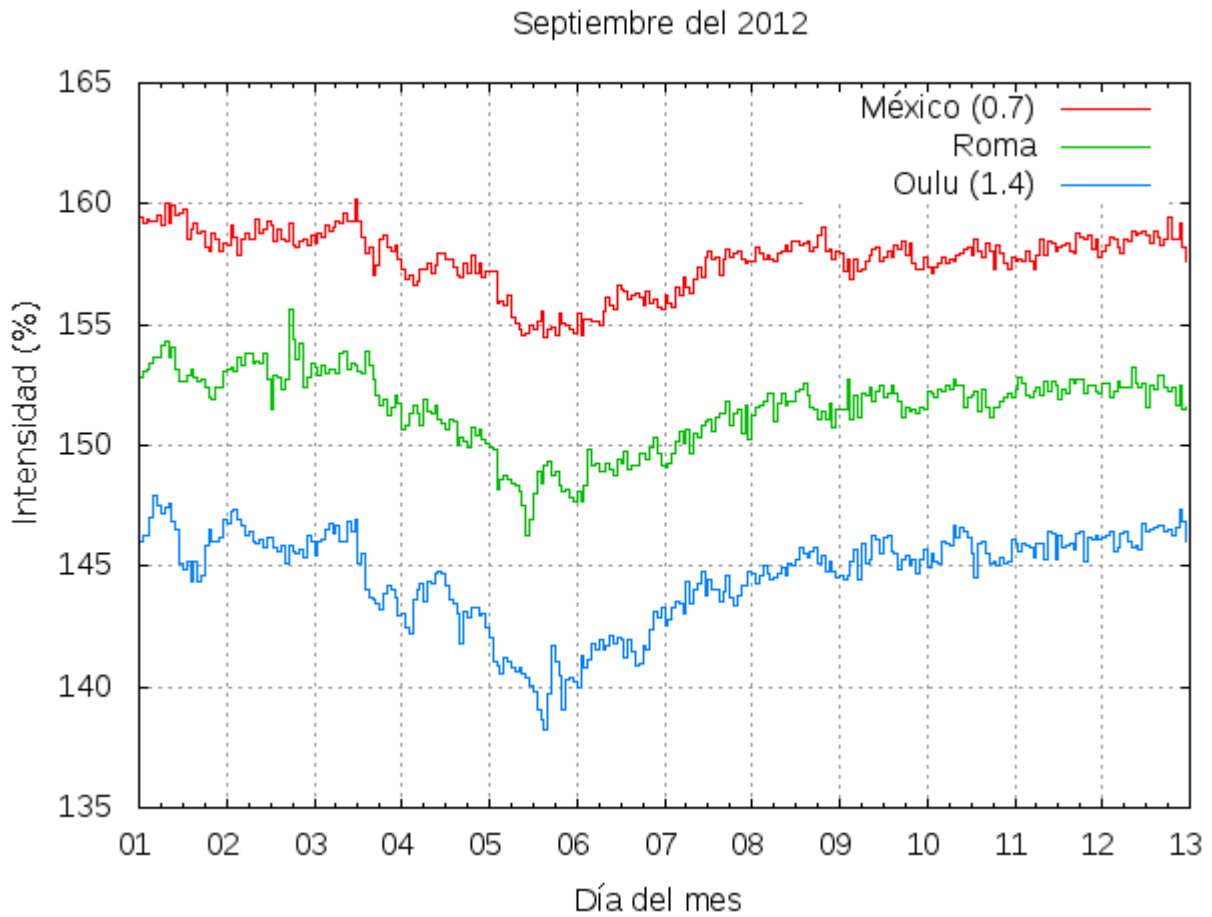


Figura 2.4.7: Ejemplo de dF recurrente observado por el MN-CDMX, el monitor de Roma y el de Oulu. Para efectos visuales, la gráfica de Oulu y la de México ha sido modificada por un escalar que no afecta los datos.

de detector. Para una zona en la Tierra con una rigidez umbral mayor, el dF tendrá una magnitud menor. La profundidad atmosférica en esencia es un parámetro de la atmósfera que determina cuánta es la cantidad de materia relevante que las partículas han de atravesar. Cuanto mayor sea la profundidad atmosférica, mayor será su descenso.

- Recuperación. La recuperación es diferente, para diferentes latitudes, lo cual demuestra una dependencia de la rigidez umbral. Puede durar de 3 a 10 días y a bajas latitudes suele durar más.

—



## Capítulo 3

# Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México (ORC-CDMX)

El observatorio de rayos cósmicos de la Ciudad de México, Javier Alejandro Otaola Lizarzaburu se encuentra instalado dentro de los terrenos de Ciudad Universitaria cerca de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. En la Figura 3.0.1 se muestra una foto del ORC-CDMX. El ORC-CDMX está integrado por dos detectores, el supermonitor de neutrones 6-NM64 y el telescopio de muones. El primero detecta la componente hadrónica de la radiación cósmica secundaria, mientras que el segundo la componente muónica. A continuación se describe el principio a través del cual opera el Monitor de Neutrones de la Ciudad de México (MN-CDMX).

### 3.1. Monitor de Neutrones de la Ciudad de México

A través de la página electrónica [www.cosmicrays.unam.mx/](http://www.cosmicrays.unam.mx/) se puede acceder a los datos del Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México (ORC-CMX). El ORC-CMX además forma parte de una red mundial de monitores de neutrones, cuyos datos se pueden obtener de la página [49].

En 1948 con el objetivo de monitorear la intensidad de la radiación cósmica, la institución Carnegie instaló una cámara de ionización. Ocho años después, con el desarrollo de nuevas tecnologías y con la iniciativa que se obtuvo en el año internacional de la geofísica y con el apoyo de la Universidad de Chicago, se instaló en el Campus de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en la Ciudad de México un monitor de neutrones [48]. Posteriormente, la UNAM adquirió un supermonitor de Neutrones 6-NM64 y tomó cargo del Monitor Simpson. Sin embargo, hoy en día el Monitor Simpson está fuera de servicio [48].

El Monitor de Neutrones de la Ciudad de México (MN-CDMX) está localizado a 2274 m sobre el nivel del mar. La rigidez umbral es de 8.2 GV y está en operación continua desde 1990. El telescopio de Muones está en proceso de mejoramiento. El MN-CDMX consiste de 6 contadores proporcionales de Trifluoruro de Boro ( $BF_3$ ) [48].

Los neutrones en sí no producen ionización en los materiales, la ionización es producida por los núcleos a los cuales los neutrones les transmiten energía, ya sea por dispersión elástica o por reacción nuclear. Por lo tanto, los detectores convencionales que utilizan la radiación ionizante son insensibles a detectar neutrones.

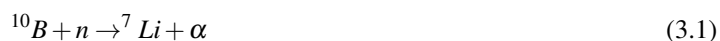
Para que un detector de cualquier tipo sea útil para registrar neutrones, debe ser diseñado de manera que haya abun-



Figura 3.0.1: Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México [48].

dantes dispersiones o reacciones nucleares. Entonces se mide la ionización secundaria producida por los núcleos impactados. Dependiendo de la velocidad de los neutrones, si son rápidos o lentos, su método de detección es distinto. Los neutrones rápidos generalmente son detectados por las dispersiones que producen; los lentos por las reacciones [50].

Los cristales de centelleo orgánicos como el antraceno y el estilbena son útiles para detectar neutrones rápidos. Los neutrones lentos son detectados a través de las reacciones producidas. Las reacciones nucleares más útiles, por su alta probabilidad de ocurrencia son las siguientes [50]:



El detector más común de neutrones lentos es un contador proporcional o Geiger enriquecido con  $\text{BF}_3$  (trifluoruro de boro), este gas satisface ser un buen detector cerca del equilibrio térmico. De preferencia este gas está enriquecido en el isótopo  $^{10}\text{B}$  para provocar la reacción 3.1. Las partículas de  $\text{Li}$  y  $\alpha$  generadas producen los pulsos eléctricos [50].

Cuando un rayo cósmico secundario interactúa con un monitor, provocan una reacción en cascada que dispersa la energía del choque provocando un efecto multiplicador para los contadores.

En la Figura 3.1.1, se muestran las partes del monitor de neutrones que son reflector, productor, moderador y contador proporcional. Se observa al moderador que rodea al contador proporcional el cual es cubierto por el productor; el moderador, el contador proporcional y el productor son subyacentes al reflector.

- Reflector.** Consiste de una capa externa enriquecida en un material rico en protones (parafina en los primeros detectores, y polietileno en los detectores más modernos). Los neutrones de baja energía no pueden penetrar en este material, pero no son absorbidos por él. De esta manera, las partículas que no son rayos cósmicos,

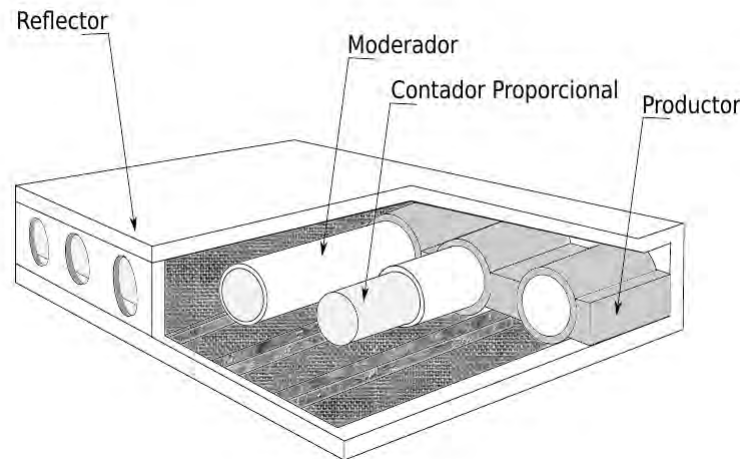


Figura 3.1.1: Esquema del Monitor de Neutrones 6-NM64 [51].

no penetrarán y quedará fuera del monitor, mientras que neutrones de baja energía generados en el plomo se quedarán dentro del monitor. Este material es principalmente transparente a los neutrones de la cascada atmosférica.

- **Productor.** Está constituido de plomo y representa el mayor contribuyente del detector en peso. Existen neutrones rápidos en las cascadas atmosféricas que debido a su velocidad, podrían no ser detectados por el contador proporcional, por lo que el papel del productor es convertir a los neutrones rápidos en neutrones lentos. Después de que los neutrones rápidos atraviesan el reflector, llegan al productor y ahí ocurre una interacción que desprende neutrones lentos. En promedio, el plomo convierte un neutrón rápido en 10 neutrones lentos.
- **Moderador.** Es un material que también es rico en protones como el reflector, éste alenta a los neutrones que están confinados en el reflector, lo que los hace más susceptibles a ser detectados.
- **Contador proporcional.** Este es el corazón del detector de neutrones. Después de que se filtran neutrones por el reflector, se frenan con el productor y se regulan con el moderador, ellos encuentran un núcleo en el contador proporcional y provocan que se desintegre. Esta reacción nuclear produce partículas energéticas cargadas que ionizan el gas del contador proporcional, produciendo una señal eléctrica. En los primeros monitores Simpson, el componente activo en el gas era el  $^{10}\text{B}$ , que produce una señal a través de la reacción  $n + ^{10}\text{B} \rightarrow \alpha + ^7\text{Li}$ . Los contadores proporcionales recientes usan en su lugar la reacción  $n + ^3\text{He} \rightarrow ^3\text{H} + p$ .





## Capítulo 4

# Parámetros del medio interplanetario involucrados en el análisis de los decrecimientos Forbush

### 4.1. Definición a considerar para un decrecimiento Forbush

Un decrecimiento Forbush es un evento de la radiación cósmica secundaria que ocurre en todas las estaciones del planeta. Para el propósito de este análisis, se toma en cuenta principalmente el Monitor de Neutrones de la Ciudad de México, el cual es insensible a numerosos dF de baja magnitud, por esa razón se redefine un decrecimiento Forbush como aquel que satisface las siguientes condiciones:

- La caída en el porcentaje de la radiación cósmica secundaria es de por lo menos 1.5 % en México, 1.6 % en Roma y 2.5 % en Oulu. Esta diferenciación es para distinguir esta variación de la variación diurna (0.7 %, 0.8 % y 1.3 % respectivamente).
- En menos de 24 horas el porcentaje de radiación disminuye 1.5 % o más en México, 1.5 % o más en Roma y 2.5 % o más en Oulu.
- El tiempo de recuperación es de 7 días en promedio y necesariamente mayor o igual que tres días.

### 4.2. Parámetros del medio interplanetario

En capítulos anteriores se describió el medio interplanetario, a continuación se describen los parámetros suficientes para determinar la naturaleza de los fenómenos y las causas que provocan los decrecimientos Forbush.

Los datos del medio interplanetario se obtuvieron de la página OMNIweb [52], el cual consiste de los datos combinados de diversos satélites a una distancia de una unidad astronómica del Sol.

### 4.2.1. Campo magnético

Se toman en cuenta las tres componentes espaciales del campo magnético  $B_x$ ,  $B_y$  y  $B_z$  en coordenadas GSE. Dichas coordenadas consisten en posicionar el eje de las  $x$  en la línea Sol-Tierra. El eje  $z$  es perpendicular al plano de la eclíptica mientras que el eje  $y$  es antiparalelo a la dirección de movimiento de traslación del planeta. Las componentes del campo magnético son las proyecciones del campo magnético en dichas coordenadas.

Un campo magnético comprimido es aquel cuyas líneas de campo se encuentran juntas. La intensidad del campo magnético a 1  $UA$  es de  $6 nT$ .

En el caso particular cuando se detecta una nube magnética, en los parámetros del viento solar, se observa que las componentes del campo magnético se retuercen y giran conforme alguna de las componentes aumenta y otra disminuye. Es decir, una rotación. Si la interacción es con la onda de choque producida por una eyección de masa coronal (EMCI), se presentará un incremento suave o abrupto de la medida del campo magnético.

Para el caso de una RIC, la información que brinda el campo magnético es difusa y poco madura, porque a 1  $UA$  el campo magnético no se ha desarrollado completamente. Sin embargo, es posible establecer que en dicha estructura se presenta una región de choque, donde viento solar rápido embiste viento solar lento. En tal zona se presenta campo magnético comprimido, seguido de una distensión. La magnitud del campo magnético se verá aumentada y después disminuida, mientras que las componentes rotarán. Existe una rotación del campo magnético todas las veces y siempre está presente que la componente  $B_z$  es significativa. La componente  $B_z$  es la responsable de que ocurran tormentas geomagnéticas a través de la reconexión magnética.

### 4.2.2. Velocidad

Un efecto interesante que se presenta en el viento solar es que los electrones y los protones tienen una velocidad diferente en el viento solar, debido a su masa los protones son más lentos. Sin embargo, se asume que la velocidad del viento solar es la misma para todas las partículas que constituyen una porción de fluido.

El viento solar ordinario tiene una velocidad de 350 km/s.

La firma que deja el paso de una EMCI a través del perfil de velocidad es una alteración discontinua debida la onda de choque, que se manifiesta como un incremento abrupto, seguido de una lenta bajada asociada a las subsecuentes ondas elásticas.

La RIC, consiste de una región de viento solar rápido que embiste viento solar lento, necesariamente se observa un incremento en la velocidad de las partículas pero no necesariamente el incremento es continuo.

A través de la velocidad y del tiempo que dura en el medio interplanetario la estructura, se puede inferir el tamaño de la perturbación electromagnética.

### 4.2.3. Densidad y temperatura

La densidad promedio del viento solar es de  $7 \text{ partículas/cc}$  a 1 Unidad Astronómica (1  $UA$ ) y se asume libre de colisiones [53]. La temperatura promedio de protones es de  $5 \times 10^4 K$  y de electrones  $2 \times 10^5 K$  [53].

La firma en el medio interplanetario de una EMCI es que está enriquecida por iones pesados [22]. Esto promueve que se convierta en una región más fría y menos densa que el viento solar ordinario.

La firma de una RIC es una anticorrelación de la velocidad del viento solar con la densidad. Además, la temperatura del viento solar rápido es menor que la del viento solar lento [54], por lo que en una RIC, la temperatura del viento solar desciende a la vez que desciende la densidad.

#### 4.2.4. Beta del plasma

Es un cociente de presiones que indica el balance para el plasma. Se define como la presión cinética sobre la presión magnética.

$$\beta = \frac{nk_B T}{B^2/2\mu_0} \quad (4.1)$$

En esta ecuación,  $n$  es el número de partículas,  $k_B$  es la constante de Boltzmann,  $T$  la temperatura del plasma y  $\mu_0$  es la permeabilidad del vacío.

Cuando  $\beta > 1$ , entonces la presión cinética es dominante sobre la presión magnética y el plasma se moverá por efectos inerciales. En el medio interplanetario, el campo magnético viaja pegado a las partículas conforme se expanden como una espiral de Arquímedes.

Si  $\beta < 1$ , entonces la presión magnética es dominante sobre la presión cinética y el plasma se moverá como dicte el campo magnético.

Como el parámetro  $\beta$  sólo da evidencia de qué fuerza domina el movimiento del plasma, para identificar una RIC no es muy útil, pero para identificar una EMCI es certera, pues en una EMCI la estructura magnética tiene su propia estructura de campo magnético diferente y más fuerte que la del medio interplanetario y por lo tanto la  $\beta < 1$ .

#### 4.2.5. Índice Dst

El índice Dst significa tiempo de la perturbación de la tormenta. Mide el grado de perturbación de la componente Horizontal (H) del campo magnético de la Tierra y se mide en nanoteslas. Este valor se mide por la universidad de Kyoto en Japón y es especialmente relevante para tormentas geomagnéticas que ocurren en latitudes medias.

El índice Dst promedia el valor de la componente H del campo magnético a través de una transformada de Fourier.

Cuando ocurre una tormenta geomagnética, el índice Dst muestra un aumento repentino que corresponde con la fase inicial de la tormenta indicada en la Figura 4.2.1. Cuando el campo magnético desciende demasiado de su nivel base, se considera que se encuentra en la fase de recuperación. La magnitud de dicha tormenta está definida por la Tabla 4.2.1:

Actividad geomagnética	índice Dst (nT)
Quieto	Dst > -30
Débil	-30 ≥ Dst ≥ -50
Moderado	-50 ≥ Dst ≥ -100
Intenso	-100 ≥ Dst

Tabla 4.2.1: Clasificación de la actividad geomagnética.

Cuando la estructura electromagnética tiene una componente  $B_z$  negativa del campo magnético, se producirá reconexión magnética y entonces generará una tormenta geomagnética. Dicha tormenta será diferente en caída y

en comportamiento según la estructura del campo magnético del fenómeno que provoque la tormenta. En el caso de las tormentas geomagnéticas inducidas por una EMCI, en el Dst se observará una alteración abrupta en el tiempo, existirá una región de campo magnético comprimido donde la magnitud del índice se elevará por encima del promedio, posteriormente se verá mermado violentamente. Luego vendrá la fase de recuperación, donde el campo magnético se resuelve lenta y gradualmente regresando a tener el promedio del valor de Dst que tenía antes de la perturbación como se muestra en la Figura 4.2.1

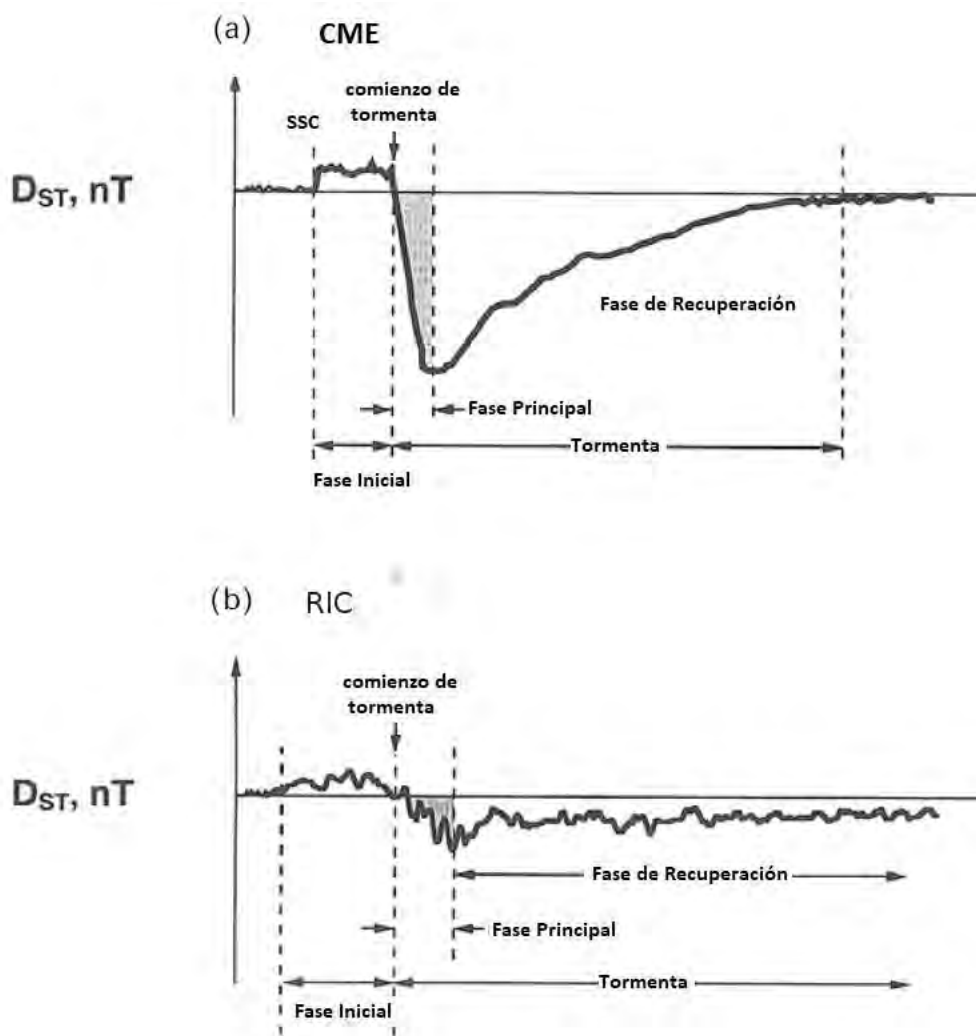


Figura 4.2.1: Comparación de los perfiles de tormentas geomagnéticas. En a) la tormenta es generada por una EMCI, en b) es generada por una RIC. El comienzo súbito de una tormenta geomagnética es causado por una compresión abrupta de la magnetósfera [54].

En el caso de una tormenta geomagnética inducida por una RIC se ve como una perturbación más suave del campo magnético, comprimiéndolo por encima del promedio, esta es la fase inicial, posteriormente se verá un descenso gradual. En general las RIC poseen siempre una componente negativa del campo magnético  $B_z$ ; sin embargo, no suelen causar tormentas geomagnéticas intensas, sino apenas moderadas. La fase de recuperación obedece un incremento más pequeño que en el caso de las tormentas causadas por una EMCI.

## Capítulo 5

# Análisis de decrecimientos Forbush

Se elaboró una base de datos que comprende el ciclo de actividad solar 24, desde enero del 2008 hasta febrero del 2018, tomando en cuenta los datos de tres observatorios.

- Monitor de Neutrones 9-NM-64, localizado en Oulu, Finlandia.  $65.05^{\circ}$  N,  $25.47^{\circ}$  E y una rigidez umbral de 0.8 GeV.
- Observatorio SVIRCO (Estudio de las variaciones en la intensidad de los rayos cósmicos por sus siglas en italiano) 20-NM64, localizado en Roma, Italia.  $42.86^{\circ}$  N,  $12.47^{\circ}$  E y una rigidez umbral de 6.27 GeV.
- Observatorio de Rayos Cósmicos “Dr. Javier Otaola Lizarzaburu” (ORC-CMX), localizado en Ciudad Universitaria, con una localización geográfica de  $19.19^{\circ}$  N,  $19.11^{\circ}$  O y una rigidez umbral de 8.2 GeV.

Se seleccionaron estos observatorios debido a su distinta rigidez umbral y diversa localización geográfica. La base de datos fue adquirida desde el *Neutron Monitor Data Base* (NMDB) [49] y se utilizó una razón de conteo de radiación cósmica de una hora. Como el Monitor de Neutrones del ORC-CMX tiene la mayor rigidez umbral, los dF que se observen en los otros dos monitores de neutrones tendrán mayor porcentaje de caída.

Los datos analizados fueron corregidos por presión atmosférica. Además, en la presentación de las cuentas de la radiación cósmica, los valores de la intensidad para las estaciones de México y de Oulu fueron modificadas por un factor escalar de 0.7 y de 1.7 respectivamente como se observa en el ejemplo de la Figura 5.0.1.

Se elaboró una base de datos donde se analizaron los decrecimientos Forbush más intensos que acontecieron durante el Ciclo Solar 24 y se muestran en las Tablas: (5.0.1),(5.0.2),(5.0.3), (5.0.4), (5.0.5), (5.0.6), (5.0.7), (5.0.8), (5.0.9) y (5.0.10). En cada Tabla, la fecha está escrita en día/mes (d/m), la hora está en tiempo universal, la magnitud o amplitud (Mag) se encuentra en porcentaje de variación sobre la media de los dos días quietos anteriores al dF y la duración (Dur) está dada en horas. La duración es la diferencia temporal desde el momento en que inició el dF hasta aquel momento donde el promedio de las cuentas de radiación cósmica regresa a ser el mismo.

2009												
México				Roma				Oulu				
Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Precursor
5/8	5	1.5	170	5/8	6	1.6	151	5/8	5	1.7	139	EMCI

Tabla 5.0.1: Lista de los decrecimientos Forbush del 2009

2010												
México				Roma				Oulu				
Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Precursor
20/1	17	1.5	175	20/1	12	1.5	186	20/1	9	2.2	189	EMCI
5/4	10	1.5	122	5/4	10	1.5	120	5/4	10	3.1	118	EMCI
3/8	12	2	102	3/8	12	2	72	3/8	12	4.5	288	EMCI
5/10	14	1.5	94	5/10	12	1.5	101	5/10	14	2.2	126	EMCI

Tabla 5.0.2: Lista de los decrecimientos Forbush del 2010

2011												
México				Roma				Oulu				
Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Precursor
18/2	2	2.9	126	2/18	3	3	122	2/18	1	4.3	128	EMCI
29/3	8	2.5	431	3/29	12	3.3	456	3/29	10	3	472	EMCI
2/4	20	2.2	133	2/4	21	2.3	60	2/4	20	2.6	110	EMCI
16/6	20	2.9	98	16/6	12	3.2	92	16/6	12	3.5	108	EMCI
23/6	1	2.5	119	23/6	2	2.5	98	23/6	0	3.9	132	RIC
10/7	21	2.9	158	10/7	18	2.6	231	10/7	21	3.3	221	RIC
5/8	17	2.4	116	5/8	15	2.7	90	5/8	15	4.3	155	EMCI
24/10	8	2.8	110	24/10	6	2.5	100	24/10	7	5.1	115	EMCI

Tabla 5.0.3: Lista de los decrecimientos Forbush del 2011

2012												
México				Roma				Oulu				
Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Precursor
24/1	9	1.7	106	23/1	23	2.1	99	23/1	1	3.7	84	EMCI
30/1	17	3.2	114	30/1	19	3.3	142	30/1	17	4.1	111	EMCI
26/2	18	3.1	112	26/2	17	2.6	175	30/26	17	4.4	91	EMCI
7/3	23	7.3	293	7/3	18	8.3	450	7/3	16	13.5	380	EMCI
3/4	5	2.1	202	3/4	2	2.5	324	3/4	0	3	84	EMCI
17/4	0	2.3	204	17/4	0	2.7	228	17/4	0	3.1	252	RIC
30/5	15	2.7	321	30/5	6	2.9	285	30/5	10	4.5	285	RIC
16/6	15	4.3	189	16/6	3	4.2	201	16/6	12	5.2	144	EMCI
5/7	2	3.3	88	5/7	1	4	104	4/7	22	4.3	145	EMCI
14/7	12	4.5	361	14/7	11	5	366	14/7	11	6.7	301	EMCI
3/9	11	3	185	3/9	13	4.5	312	3/9	10	5.8	123	RIC
9/10	9	2.8	262	9/10	16	3.3	324	9/10	9	3.9	307	EMCI
13/11	8	2.2	207	13/11	4	2.4	101	13/11	7	2.5	130	EMCI
24/11	0	2.7	300	24/11	1	2.5	144	23/11	23	2.9	119	EMCI

Tabla 5.0.4: Lista de los decrecimientos Forbush del 2012

2013												
México				Roma				Oulu				
Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Precursor
18/1	7	1.8	172	18/1	8	1.8	121	18/1	3	3	487	EMCI
14/3	18	4.7	248	14/3	13	5.1	217	14/3	12	5.9	229	EMCI/RIC
13/4	17	3.7	217	13/4	22	3.7	134	13/4	22	5.1	158	EMCI
15/5	5	2.5	109	15/5	3	3	120	15/5	20	4.7	160	RIC/EMCI
25/5	11	1.9	81	25/5	14	1.2	72	24/5	22	2.4	653	EMCI
23/6	8	2.6	89	23/6	4	2.7	140	23/6	5	4.7	112	RIC
12/7	22	2.1	77	12/7	21	2.1	80	13/7	3	2.9	74	EMCI
3/9	6	2.6	162	3/9	13	1.9	137	3/9	6	2.4	120	RIC
2/10	1	1.6	72	2/10	4	1.8	72	2/10	18	2.9	103	EMCI
14/11	0	2.2	96	11/11	12	1.8	96	11/11	23	2.4	168	EMCI
14/12	10	2.7	240	14/12	6	3.6	96	14/12	18	5.2	216	EMCI

Tabla 5.0.5: Lista de los decrecimientos Forbush del 2013

2014												
México				Roma				Oulu				
Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Precursor
9/1	5	2	96	9/1	8	1.8	108	8/1	23	2.8	156	RIC/EMCI
15/2	12	2.3	78	15/2	17	2.6	83	15/2	13	2.7	72	EMCI
27/2	18	1.8	120	27/2	18	2.3	144	27/2	18	3.5	102	EMCI
5/4	12	1.6	168	5/4	10	1.7	168	5/4	16	2.8	144	EMCI
18/4	12	3	252	18/4	12	4.3	270	18/4	12	4.9	240	RIC
7/6	14	3	150	7/6	16	3.5	96	7/6	13	3.9	72	EMCI
17/6	18	2.7	246	17/6	17	3.1	120	7/6	16	3.7	200	EMCI
12/8	12	1.5	108	12/8	12	1.3	96	12/8	12	2	120	EMCI
4/9	22	2.8	189	4/9	23	3.3	168	5/9	1	3.7	168	RIC
12/9	1	3.5	82	12/9	8	3.8	96	12/9	8	6.1	408	EMCI
21/10	0	2.9	151	20/10	19	2.7	168	20/10	19	3.4	96	RIC
9/11	17	2.5	96	9/11	14	3.4	96	9/11	14	3.5	120	EMCI
30/11	21	4.2	360	1/12	12	4.3	360	30/11	10	6.6	336	EMCI
21/12	18	6.4	552	21/12	17	6.5	528	21/12	17	9.5	624	RIC/EMCI

Tabla 5.0.6: Lista de los decrecimientos Forbush del 2014

2015												
México				Roma				Oulu				
Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Precursor
1/3	17	1.6	184	1/3	13	2.2	168	1/3	13	2.2	192	EMCI
11/3	4	2.4	144	11/3	15	1.8	108	11/3	17	2.3	120	EMCI
17/3	16	2.2	192	17/3	16	2.3	204	17/3	16	5	216	EMCI
5/5	19	2.1	193	5/5	12	1.9	144	5/5	17	3.7	192	EMCI
22/6	19	6.7	192	22/6	19	6.7	180	22/6	19	9.9	192	EMCI
7/9	10	1.6	264	7/9	15	1.6	250	7/9	12	3.3	267	EMCI
6/11	18	2.1	264	6/11	18	2.3	216	6/11	17	2.9	253	EMCI
3/12	18	2.7	264	3/12	14	2.3	216	3/12	14	3.4	244	RIC/EMCI
30/12	17	2.6	183	30/12	6	3.1	435	30/12	17	5.4	148	EMCI

Tabla 5.0.7: Lista de los decrecimientos Forbush del 2015

2016												
México				Roma				Oulu				
Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Precursor
19/1	17	2.6	81	19/1	10	2	120	19/1	9	2.4	144	EMCI
14/4	5	1.7	73	14/4	0	1.7	76	13/1	23	2.5	100	EMCI
19/5	19	1.8	100	19/5	9	2	168	19/5	15	2.4	77	EMCI
13/6	20	2.7	181	13/6	12	3	194	13/6	13	4.1	195	RIC
7/7	23	2.7	288	7/7	13	3	277	7/7	18	4.3	264	EMCI
19/7	21	1.7	147	19/7	11	1.9	132	19/7	22	2.9	193	EMCI

Tabla 5.0.8: Lista de los decrecimientos Forbush del 2016

2017												
México				Roma				Oulu				
Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Precursor
16/7	10	2.8	74	16/7	12	2.4	72	16/7	5	6.9	102	EMCI
8/9	12	4.1	72	8/9	0	3.7	117	7/9	20	8.7	89	EMCI

Tabla 5.0.9: Lista de los decrecimientos Forbush del 2017

2018												
México				Roma				Oulu				
Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Día	Hora	Mag	Dur	Precursor
22/2	12	1.6	240	22/2	6	2.5	168	22/2	5	2.3	125	EMCI

Tabla 5.0.10: Lista del decrecimientos Forbush del 2018



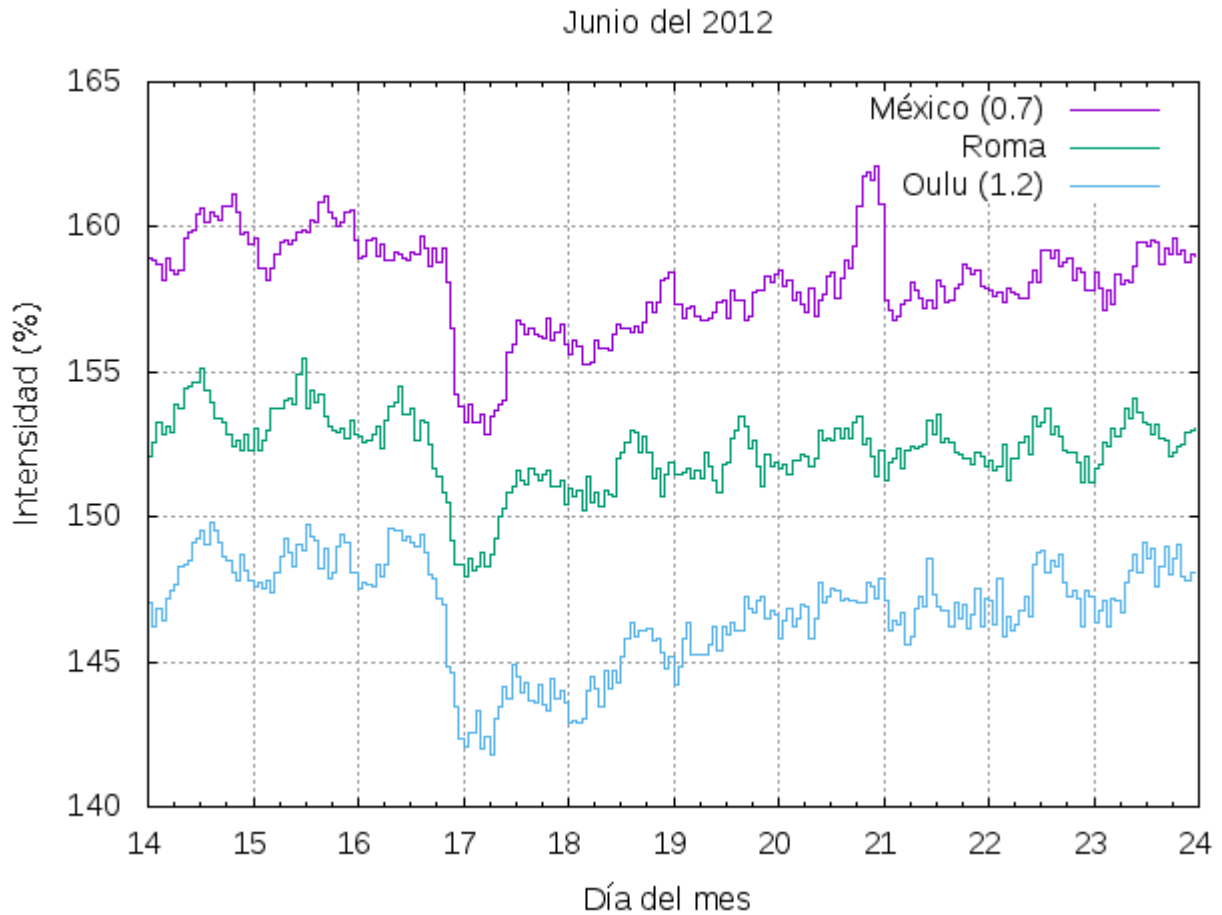


Figura 5.0.1: Decrecimiento Forbush observado el 16 de junio del 2012. Notar que la escala ha sido alterada para efectos visuales, se multiplica por un escalar el cual no afecta la variación de los decrecimientos Forbush. La variación de intensidad en los rayos cósmicos es mayor en Oulu que en México y Roma, pero la de Roma es mayor que la de México.

En las tablas, además se indica el precursor, que pudo ser EMCI, RIC o una combinación de ambos fenómenos. Posterior a la selección de los dF más intensos, se obtuvieron los valores representativos del viento solar y medio interplanetario correspondiente a cada evento. Con base en [52], se obtuvieron los datos combinados a una unidad astronómica del viento solar por minuto. Para este trabajo se exponen los datos promediados por hora.

### 5.1. Selección y análisis de los dF más intensos

En la siguiente sección se muestra un ejemplo del análisis realizado para los eventos seleccionados. Se seleccionaron los dFs más intensos en función de su magnitud. El análisis se llevó a cabo a través de los parámetros físicos descritos en el capítulo 4 con los datos del viento solar de [52]. Dichos datos del viento solar corresponden con las observaciones combinadas de los satélites a una unidad astronómica (1 UA).

La Tabla 5.1.1 muestra los cinco eventos analizados con sus fecha de inicio, hora de la llegada del choque y el

Evento	Inicio	Choque	Grosor radial (UA)
1	7/3/2012	8/3 10:00	0.27
2	14/7/2012	14/7 18:00	0.87
3	14/3/2013	14/3 12:00	0.73
4	21/12/2014	21/12 19:00	0.85
5	22/6/2015	22/6 18:00	0.98

Tabla 5.1.1: Lista del decrecimientos Forbush seleccionados para su análisis.

grosor radial. El grosor radial es el tamaño de la perturbación que se obtiene a través de la ecuación:  $v = d/t$ .

La presentación de los dF es tal que los datos de los monitores de neutrones de México y el de Oulu se modificaron por un factor escalar de 0.7 y 1.4 respectivamente. Esto no afecta los datos.

### 5.1.1. Evento 1

El inicio del dF se da el 7 de marzo del 2012 con una perturbación de una onda de choque a las 16 hrs TU. Posteriormente, el 8 de marzo a las 10 hrs se presentó una segunda perturbación. El inicio del dF es simultáneo para Roma y Oulu, pero hay un retraso de 6 hrs para que México lo observe. La suma de estas perturbaciones provocaron que la magnitud del decrecimiento fuera mayor, alcanzando un valor de 7.3, 8.3 y 13.5 % para las estaciones de México, Roma y Oulu, respectivamente, como se observa en la Figura 5.1.1.

Los parámetros del medio interplanetario en la órbita de la Tierra permite caracterizar que el fenómeno precursor es una EMCI, con base en los parámetros analizados se definen las siguientes características:

Una onda de choque. El promedio del campo magnético manifiesta un incremento y variaciones abruptas que podrían ser discontinuas desde el 8 de marzo a las 10:00 hrs hasta el 9 de marzo al rededor de las 6:00 hrs (Figura 5.1.2). Se presentan cambios abruptos en las componentes espaciales del campo magnético, en particular la componente  $B_y$  del campo magnético desciende (Figura 5.1.3). Cuando la componente  $B_x$  sube aproximadamente a las 12:00 del 8 de marzo (Figura 5.1.4), esto es evidencia de rotación del campo magnético inducido en la región del viento solar que es perturbado por la onda de choque que aceleró partículas. Se dice que es una zona de viento solar acelerado porque la velocidad alcanza los  $780 \text{ km/s}$ , en contraste con el viento solar menos rápido que se encontraba antes de las 10:00 hrs (Figura 5.1.5).

La densidad da dos pulsos dentro de la onda de choque, pero cuando la densidad alcanza su valor mínimo de  $1 \text{ p/cc}$  (Figura 5.1.6) a su vez, la temperatura alcanza su valor máximo. La temperatura desciende en una ocasión cuando la densidad aumenta, siendo que es la zona en donde se da la onda de choque, posiblemente viento solar lento embestido por la onda de choque de la EMCI, posteriormente se encuentra una zona fría (Figura 5.1.7).

Se observa una compresión del campo magnético a las 10:00 hrs, lo que generó una tormenta geomagnética. El promedio del campo magnético se comprime a la misma hora que comenzaron a cambiar sus componentes (10:00) (Figura 5.1.2, Figura 5.1.8). Una vez que la Tierra se encuentra inmersa en la EMCI, el índice Dst desciende hasta  $-140 \text{ nT}$ . Es decir, ocurre una tormenta geomagnética intensa.

La EMCI comienza su recorrido desde la 1:00 hrs TU del 9 de marzo y termina a las 13:00 hrs TU del 11 de marzo. Durante este periodo, se observa que el viento solar tiene una  $\beta < 1$  (Figura 5.1.9), una temperatura relativamente fría, baja densidad, un descenso suave de la velocidad y una rotación sutil de las componentes del campo magnético.

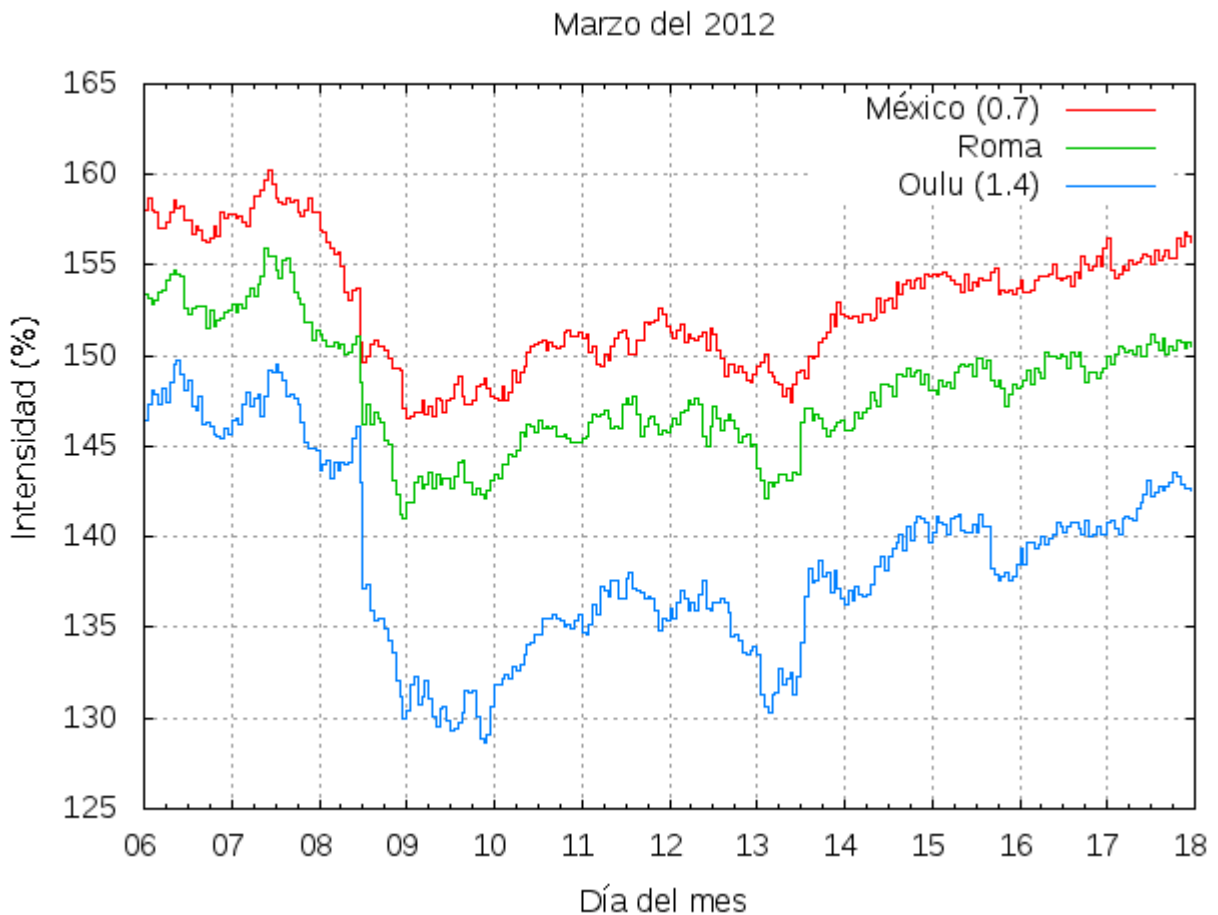


Figura 5.1.1: Decrecimiento Forbush observado el 8 de marzo del 2012. Para efectos visuales, se modifica la curva de Oulu y la de México, la primera se sube por un escalar 1.4 y la segunda se baja por un escalar 0.7

Durante esta transición en particular, ocurrió el descenso en la radiación cósmica para las tres estaciones, donde simultáneamente las tres alcanzaron su mínimo.

El índice Dst presenta dos caídas, una anterior a la transición de la onda de choque que alcanza el mínimo a las 8 hrs TU del 8 de marzo y uno justo después de que transita la EMCI, a las 8 hrs del 9 de marzo. Para estas mismas horas, la componente  $B_z$  del campo magnético alcanza un mínimo respectivamente (Figura 5.1.10).

El dF logró ser más fuerte por la suma de los efectos de dos eyecciones de masa coronal; sin embargo, la primera eyección no logró perturbar tanto el campo magnético como la segunda. Siendo que la primera sólo perturbó el campo magnético de la Tierra a través de su onda de choque, la segunda EMCI lo perturbó a través de su campo magnético y de la eyecta. La EMCI que perturbó a través de su onda de choque hace aparición 3 días antes, esto se ve reflejado por el índice Dst que alcanzó  $-70 nT$ , una tormenta geomagnética moderada (Figura 5.1.8).

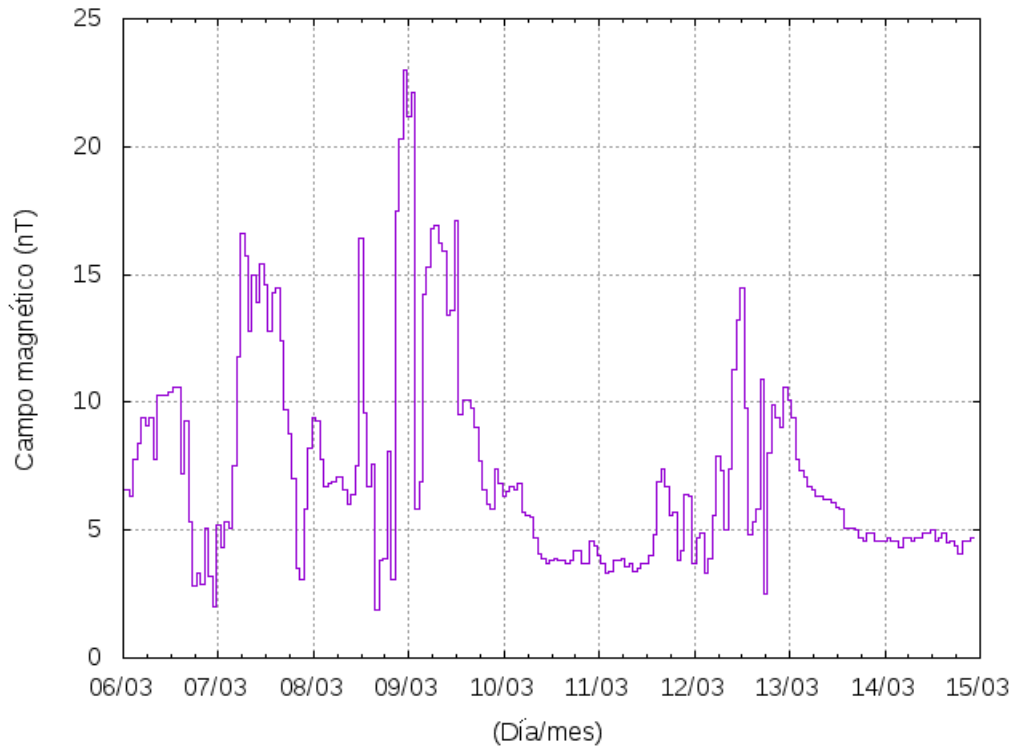


Figura 5.1.2: Promedio del campo magnético para el evento 1.

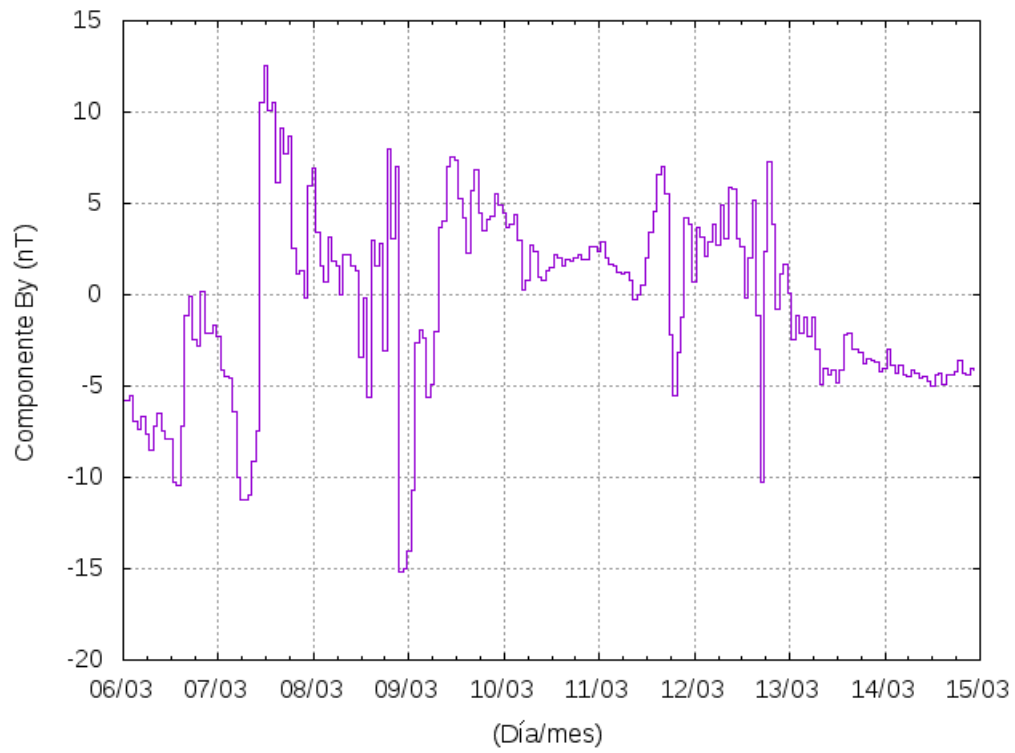


Figura 5.1.3: Componente  $B_y$  del campo magnético para el evento 1.

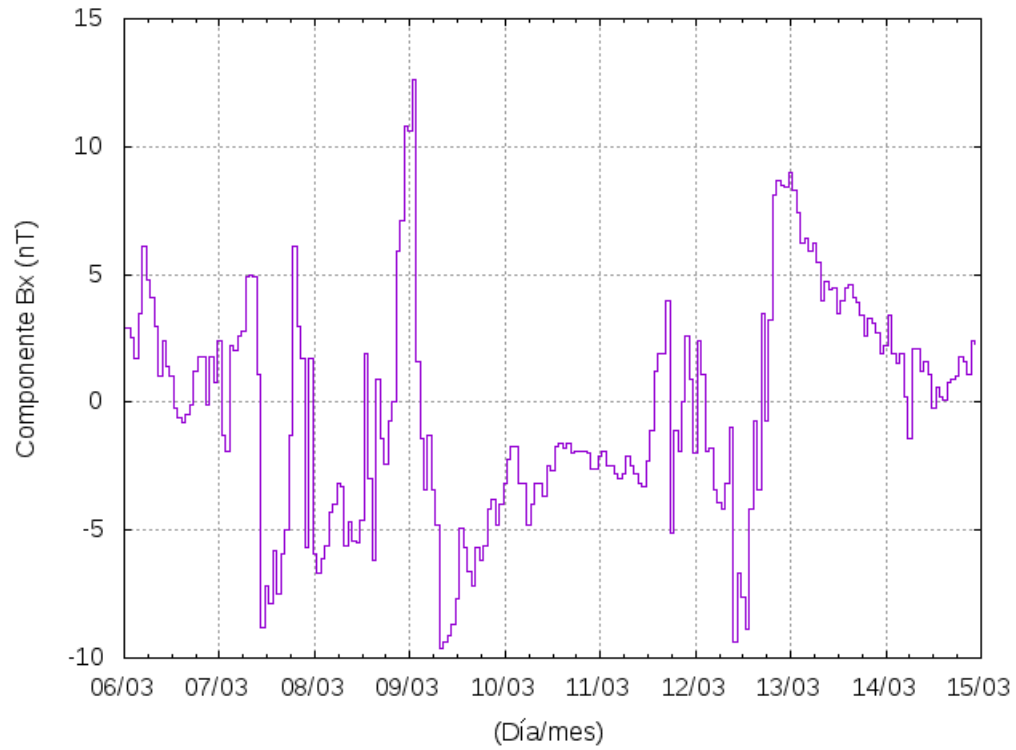


Figura 5.1.4: Componente  $B_x$  del campo magnético para el evento 1.

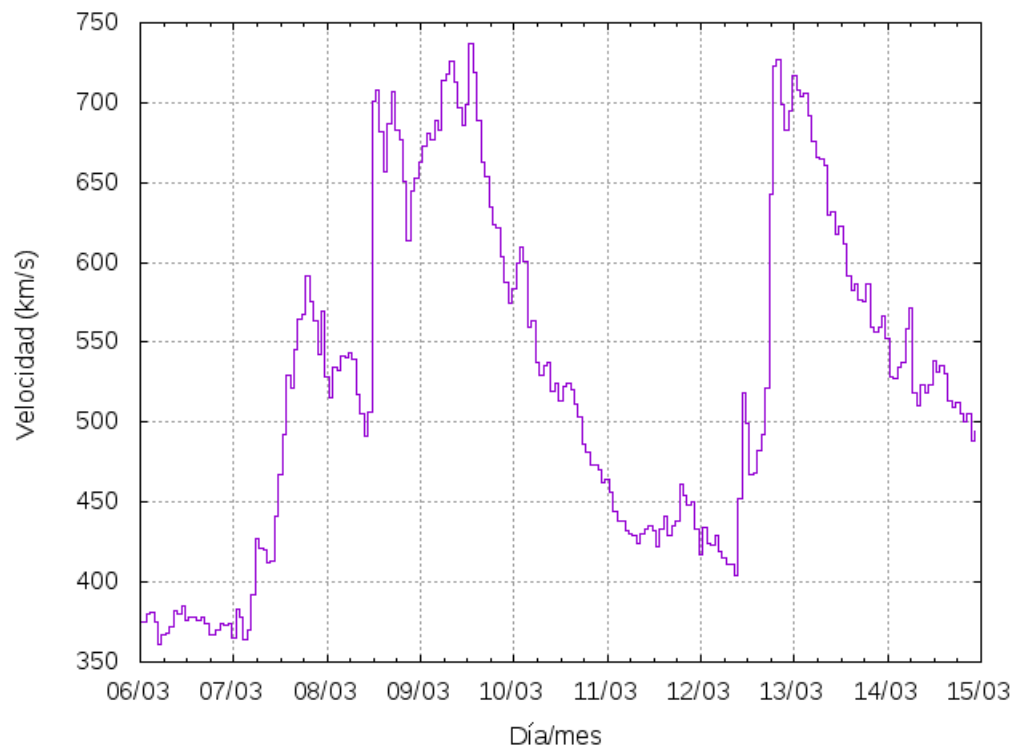


Figura 5.1.5: Velocidad del viento solar para el evento 1.

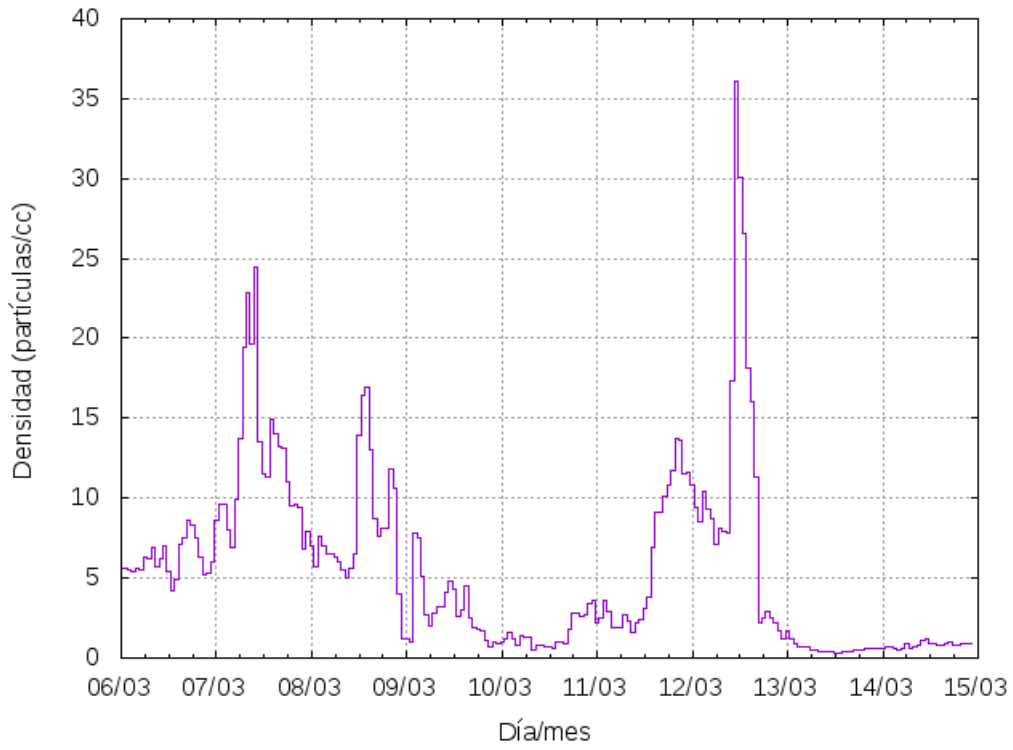


Figura 5.1.6: Densidad del viento solar para el evento 1, cc es por centímetro cúbico.

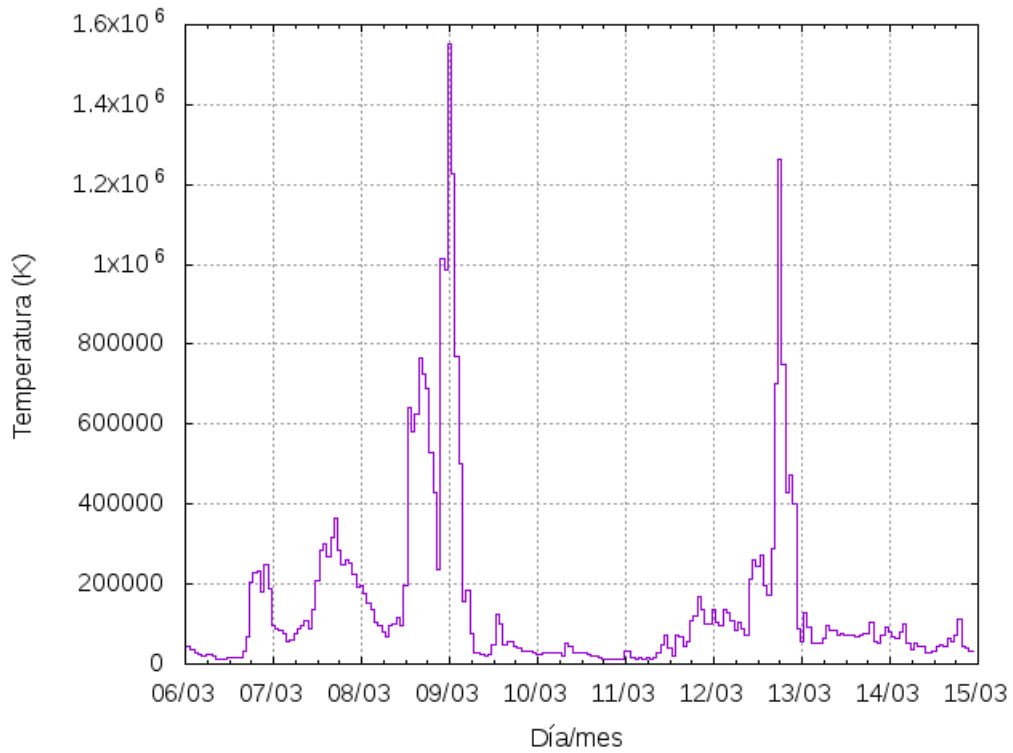


Figura 5.1.7: Temperatura del viento solar para el evento 1.

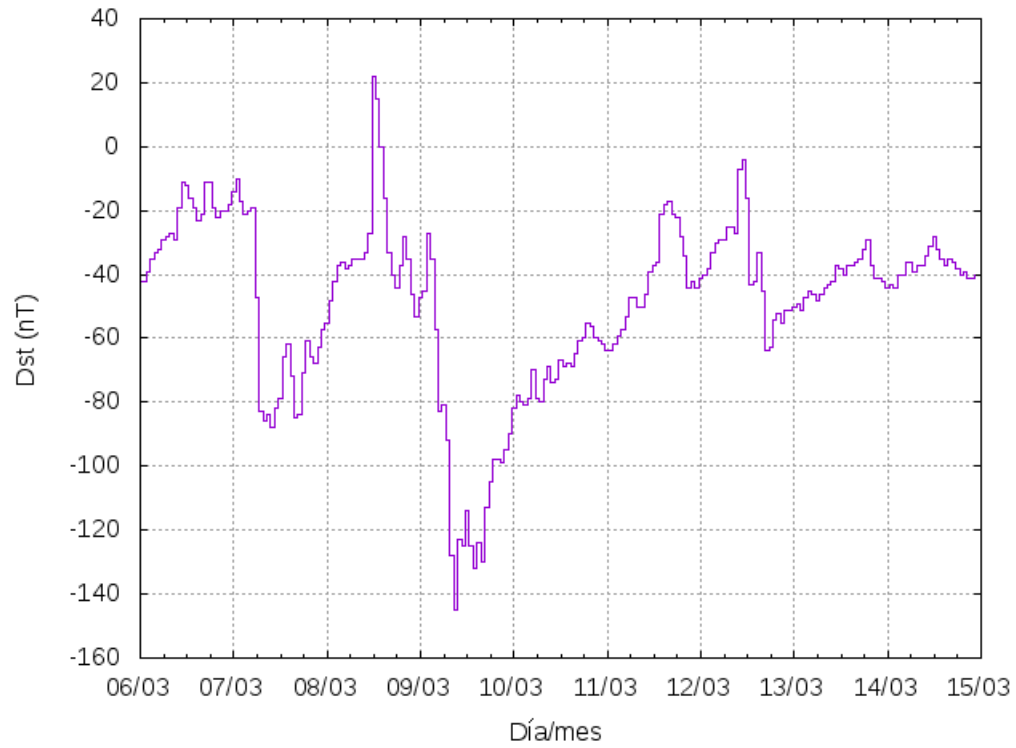


Figura 5.1.8: Intensidad del índice Dst para el evento 1.

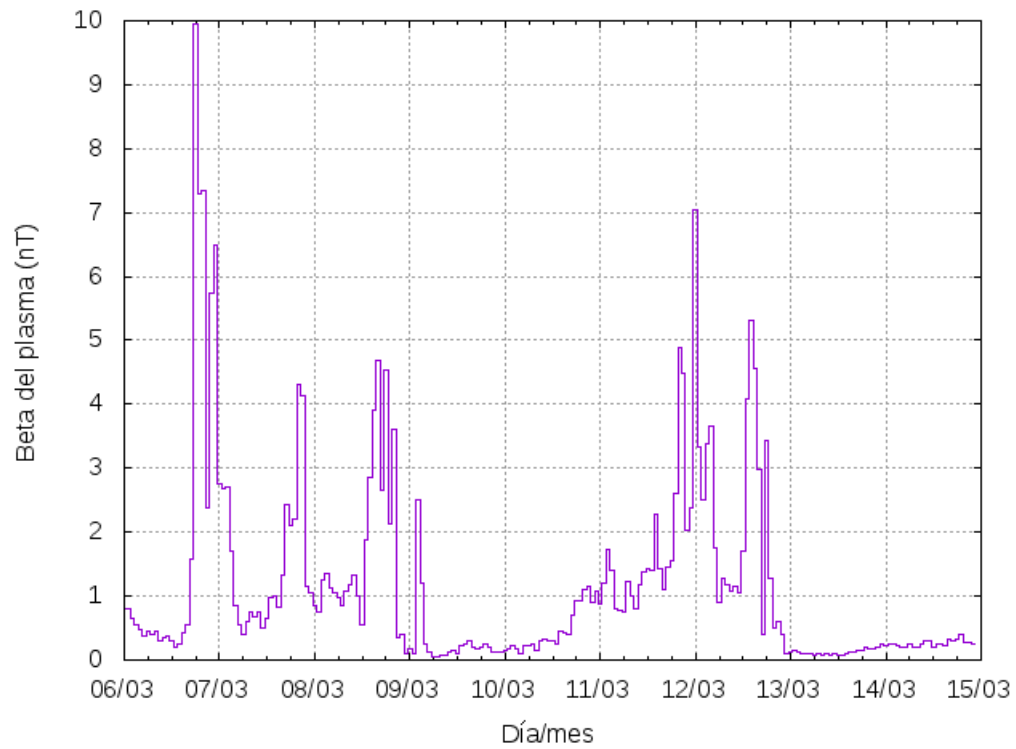


Figura 5.1.9: Beta del viento solar para el evento 1.

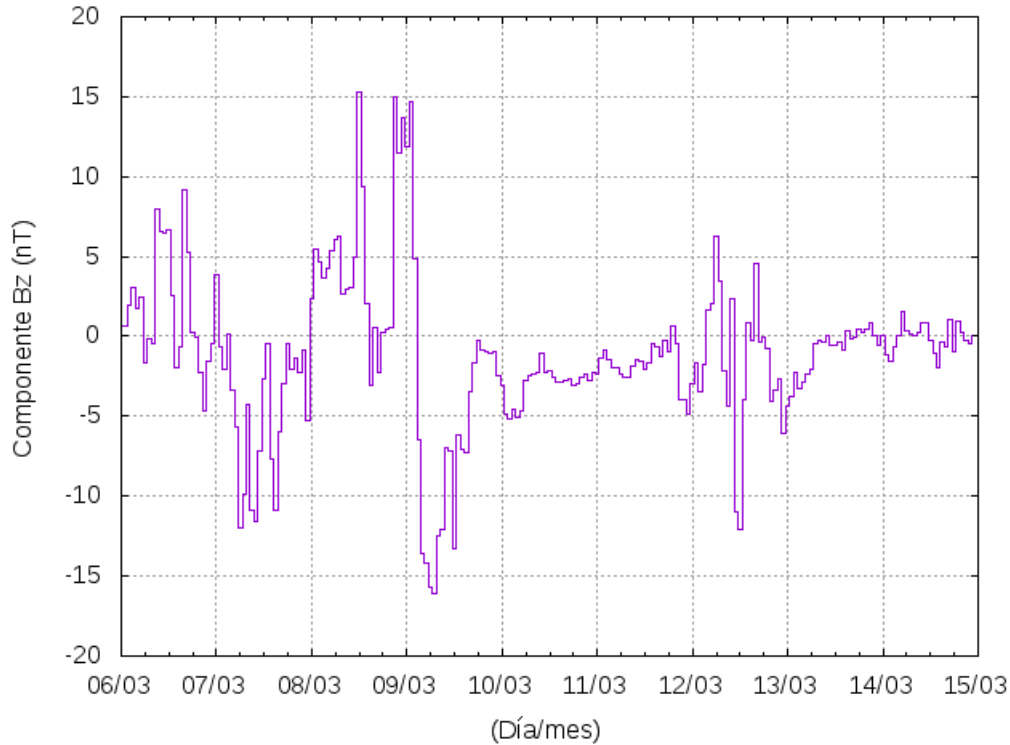


Figura 5.1.10: Componente  $B_z$  del campo magnético para el evento 1.

### 5.1.2. Evento 2

El inicio del dF se anticipa con la llegada de la onda de choque de una EMCI a la Tierra a las 10 hrs TU. Pero el impacto de la eyecta quedó registrada a partir del 14 de julio a las 18:00 hrs TU en los parámetros del viento solar. La onda de choque aceleró partículas que se ven como un incremento súbito en la cuenta registradas por los tres monitores que se encuentran en la Figura 5.1.11. El tiempo que tardó cada monitor en alcanzar el mínimo en las cuentas de radiación fue de 24 hrs, 12 hrs y 14 hrs para las estaciones de México, Roma y Oulu respectivamente. La magnitud del decrecimiento fue de 4.5, 5 y 6.7 para México, Roma y Oulu.

Los parámetros del medio interplanetario en la órbita de la Tierra permite caracterizar que el fenómeno precursor es una EMCI, con base en los parámetros analizados se definen las siguientes características:

El campo magnético se comprime en el frente de la onda de choque, mientras que sus componentes oscilan de forma caótica hasta el 15 de julio a las 6:00 hrs, lo que coincide con el momento donde se alcanza un mínimo de intensidad para la estación de Oulu y Roma, como se observa en las Figuras: 5.1.12, 5.1.13, 5.1.14 y 5.1.15. Dichas componentes del campo magnético dejan de rotar y comienzan a descender de forma coherente desde el 15 a las 10 hrs hasta el 17 a las 6 hrs. El parámetro  $\beta < 1$  en esta región temporal. Por lo tanto, la Tierra se encuentra dentro de la burbuja magnética de la EMCI.

El ORC-CDMX alcanza el mínimo de la intensidad de radiación cósmica 6 horas después de las estaciones de Roma y Oulu.

El observatorio de Roma se mantiene relativamente estable en los conteos de la radiación cósmica durante la transición de la nube magnética.



La velocidad del flujo es mayor para el intervalo de las 20 hrs TU del 14 de julio, hasta las 20 hrs TU del 16 de julio (Figura 5.1.16). La densidad de protones es la más alta en este intervalo de tiempo, evidencia de que se trata de la onda de choque que aceleró partículas. La densidad alcanza un valor de  $20 p/cc$  el 14 de julio a las 18:00 hrs TU (Figura 5.1.17).

La temperatura alcanza el valor máximo de  $5.5 \times 10^5 K$  en el frente de la onda a las 20 hrs TU. Mientras que durante el transcurso de la nube magnética se mantuvo dentro de la “región fría”(Figura 5.1.18).

A las 18:00 hrs TU, la  $\beta$  presenta un pulso mayor que uno, que se relacionan con descensos en la densidad del plasma, posiblemente relacionado a regiones de viento solar en donde las partículas fueron aceleradas y por efectos dinámicos, presentaron huecos en la matriz de plasma de la que formaban parte (Figura 5.1.19).

Se observa que el primer mínimo en la cuenta de radiación es debido al efecto de la onda de choque a las 0:00 hrs TU del 15 de julio, pero este efecto no es observado por el MN-CDMX, ni el de Roma (Figura 5.1.11).

El 14 de julio a las 18:00 hrs se presenta una tormenta geomagnética que es consistente con el inicio del dF y con la llegada del choque, ya que se observa una región de campo magnético comprimido, comienza a descender el 15 de julio a las 0:00 hrs, alcanzando el mínimo el 15 de julio a las 18:00 hrs TU. El índice Dst llega hasta  $-140 nT$ . Tormenta intensa (Figura 5.1.20).

La EMCI comienza a recorrer su trayecto por la órbita de la Tierra el 15 de julio a las 6:00 hrs TU y termina el 17 de julio a las 10:00 hrs TU. El viento solar regresa a una situación de viento solar rápido, que es más lento que las partículas que son aceleradas por una onda de choque y que las que viajan dentro de una EMCI. La densidad desciende a su valor promedio, así como la  $\beta$  como se muestra en la Figura 5.1.20.

El mínimo en la radiación cósmica se alcanza a las 18:00 hrs TU del 15 de julio en México, a las 6:00 hrs TU en Roma y en Oulu entre las 12:00 hrs TU y las 18:00 hrs TU. Estos valores son observados cuando transitaba la EMCI en la órbita de la Tierra; sin embargo, no hay un parámetro que resalte de forma particular como el causante mayor del dF, a excepción de la temperatura, la cual se encontraba en su valor mínimo registrado (desde las 6:00 hrs TU del 15 hasta las 3:00 hrs TU del 16 de julio) como se observa en la Figura 5.1.20.

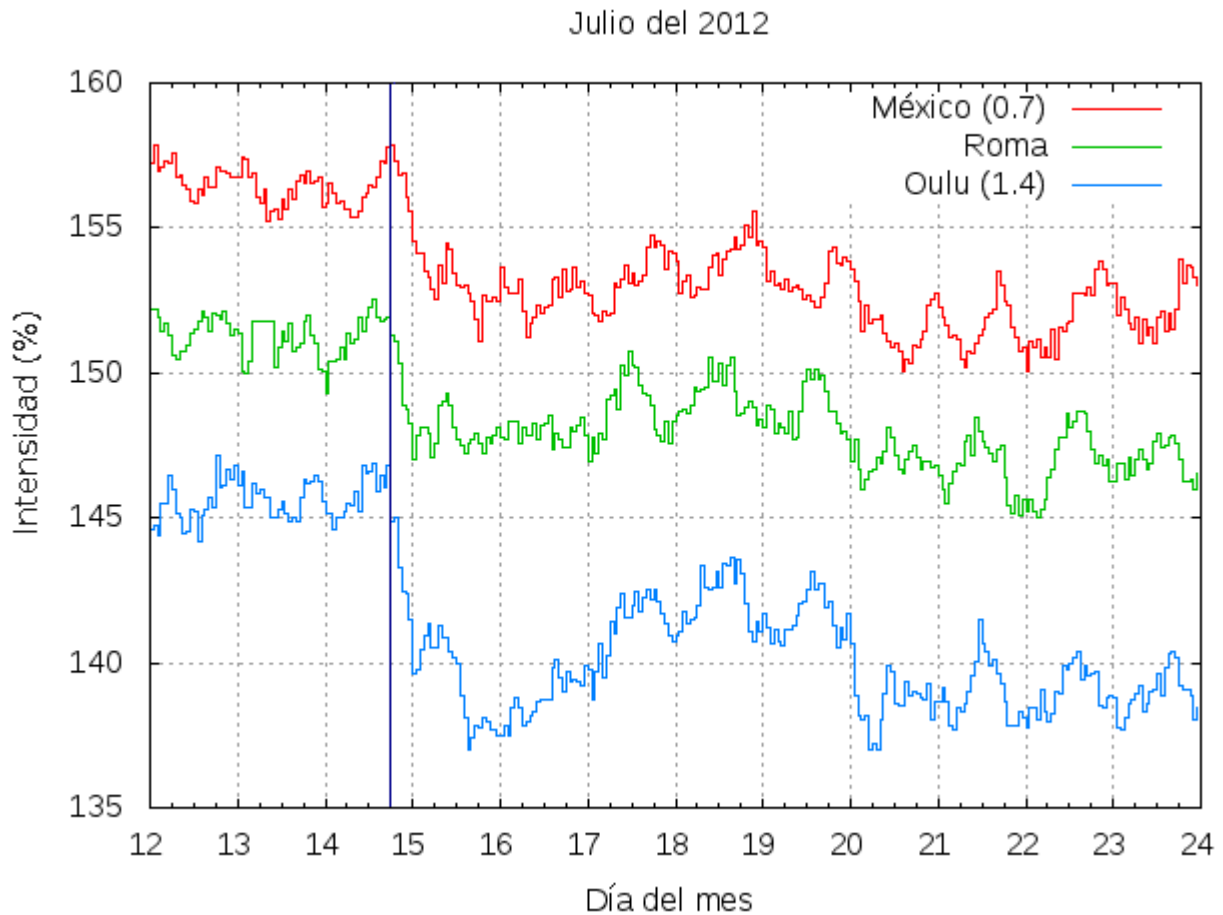


Figura 5.1.11: Decrecimiento Forbush observado el 14 de julio del 2012. Para efectos visuales, se modifica la curva de Oulu y la de México, la primera se sube por un escalar 1.4 y la segunda se baja por un escalar 0.7. Se indica con una línea vertical el incremento en la radiación cósmica.

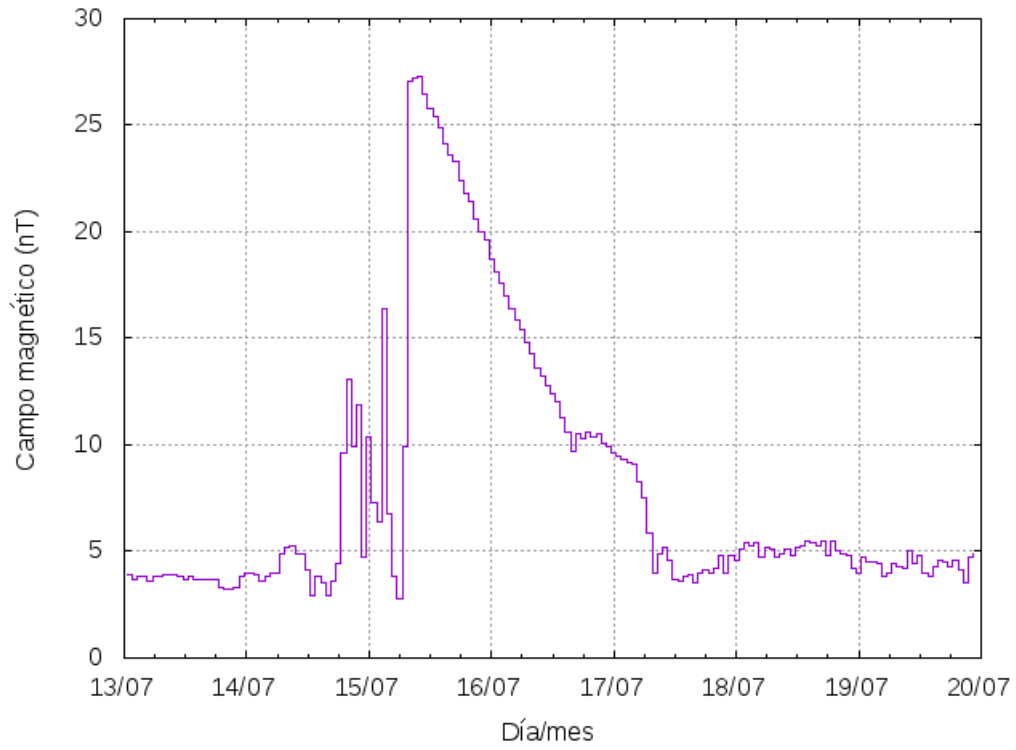


Figura 5.1.12: Promedio del campo magnético para el evento 2.

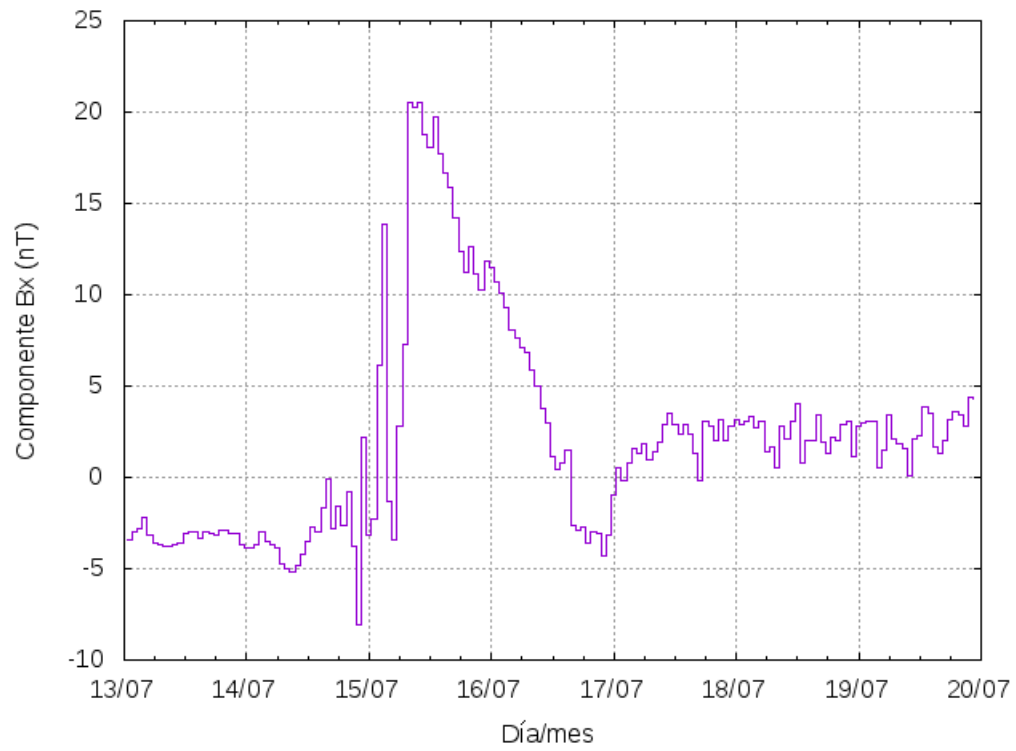


Figura 5.1.13: Componente  $B_x$  del campo magnético para el evento 2.

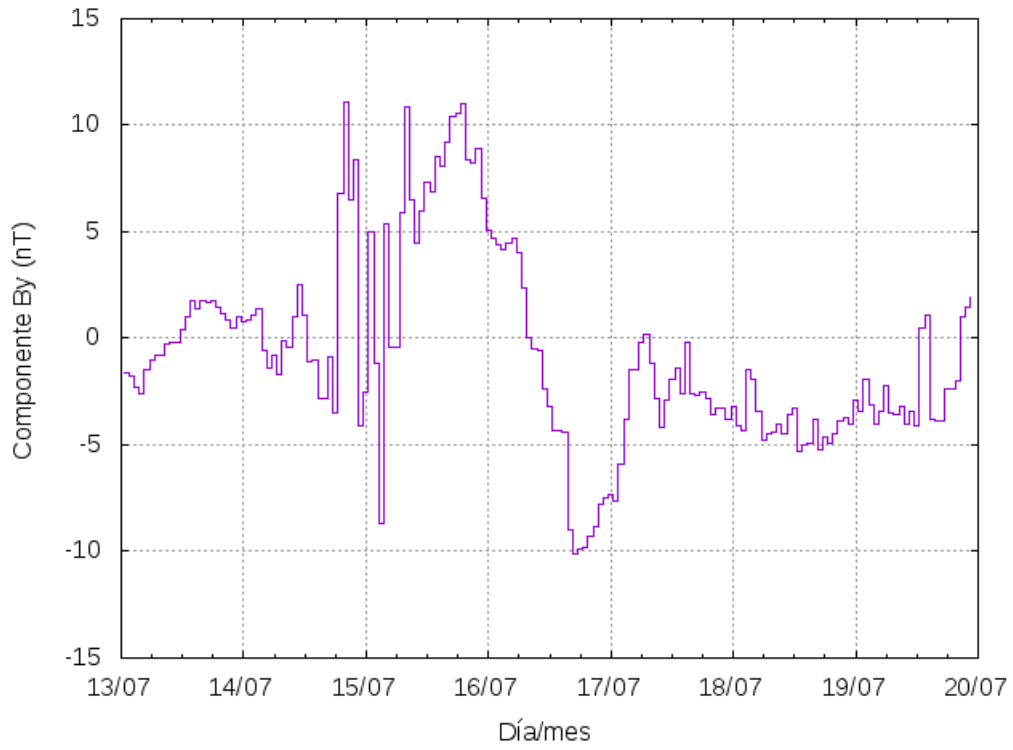


Figura 5.1.14: Componente  $B_y$  del campo magnético para el evento 2.

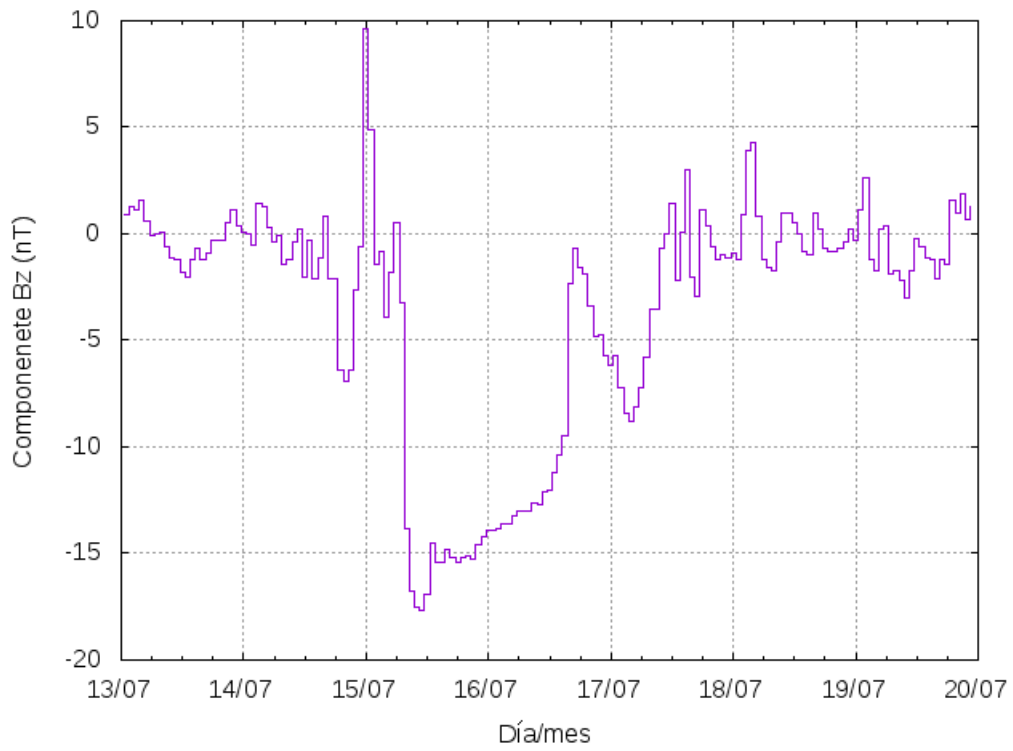


Figura 5.1.15: Componente  $B_z$  del campo magnético para el evento 2.

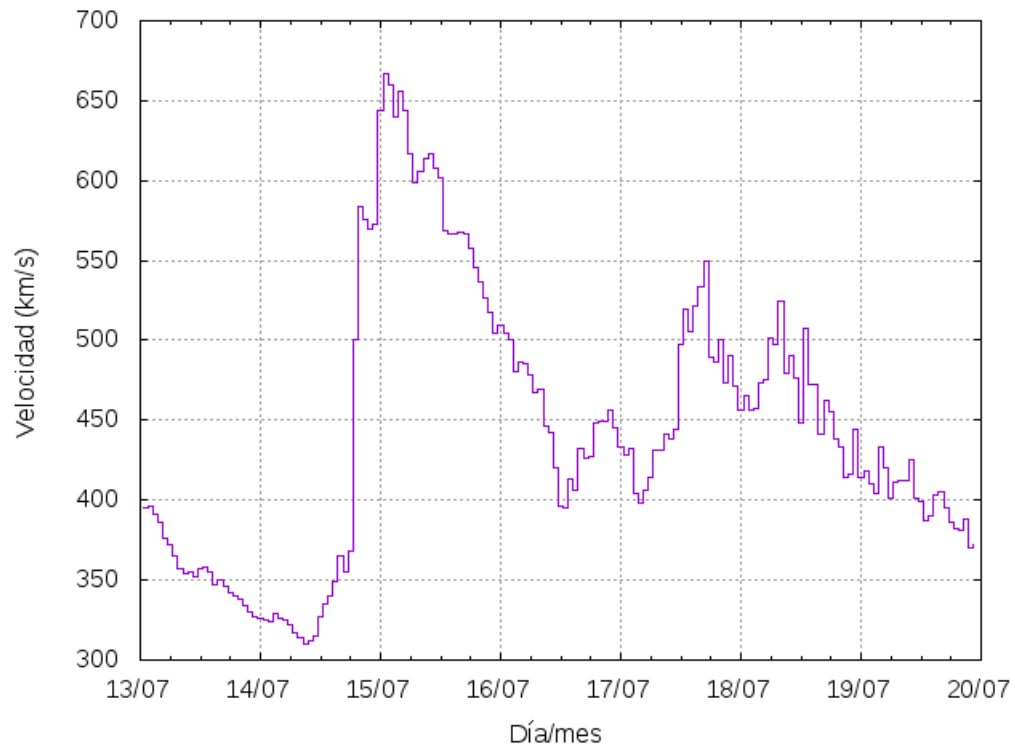


Figura 5.1.16: Velocidad del viento solar para el evento 2.

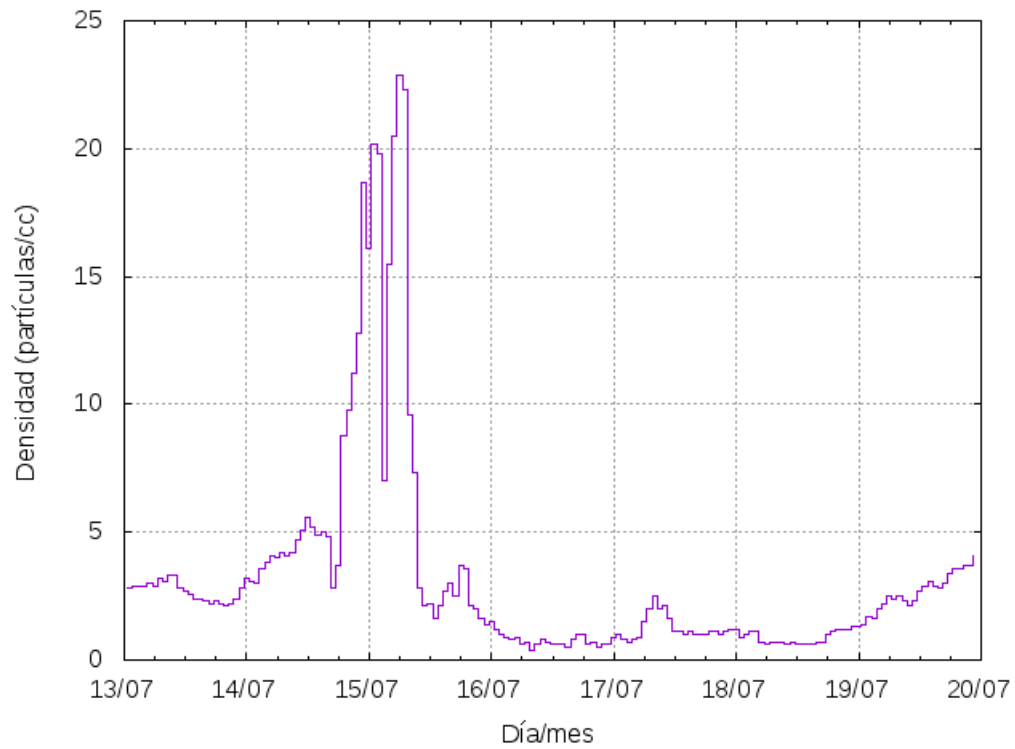


Figura 5.1.17: Densidad del plasma para el evento 2, cc es por centímetro cúbico.

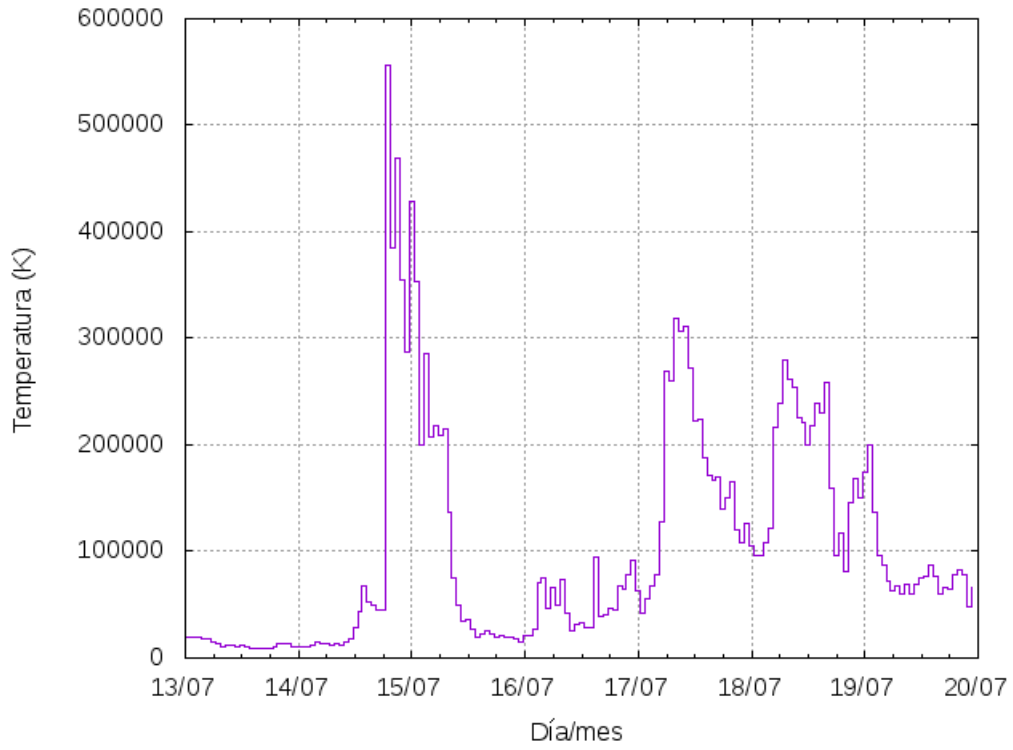


Figura 5.1.18: Temperatura del viento solar para el evento 2.

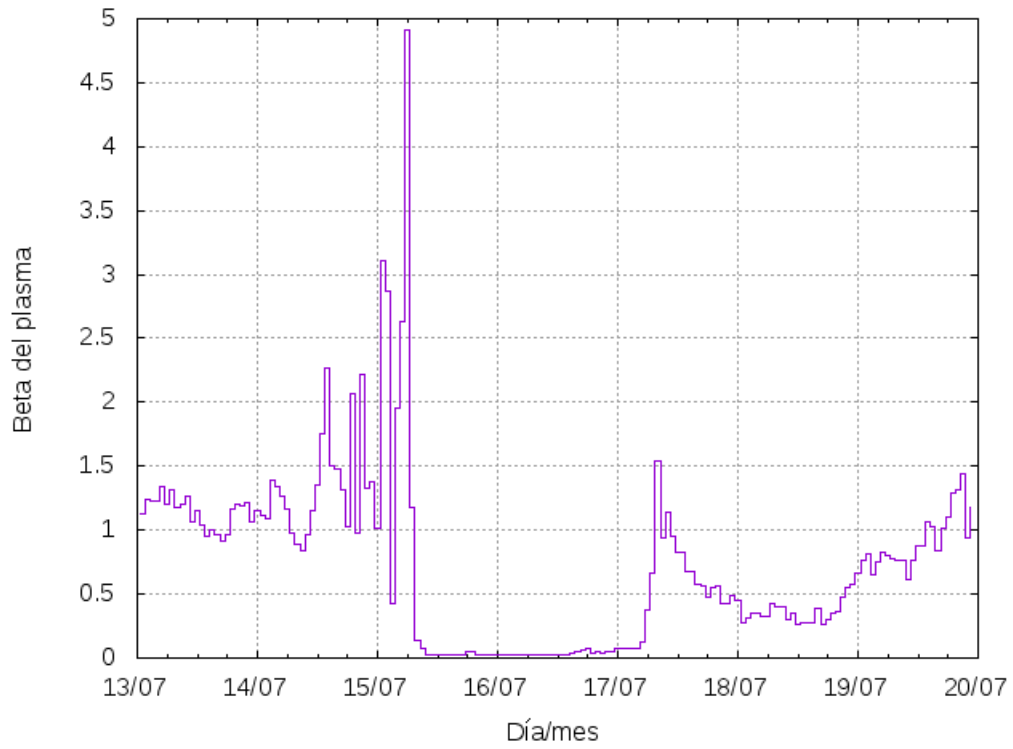


Figura 5.1.19: Beta del viento solar para el evento 2.

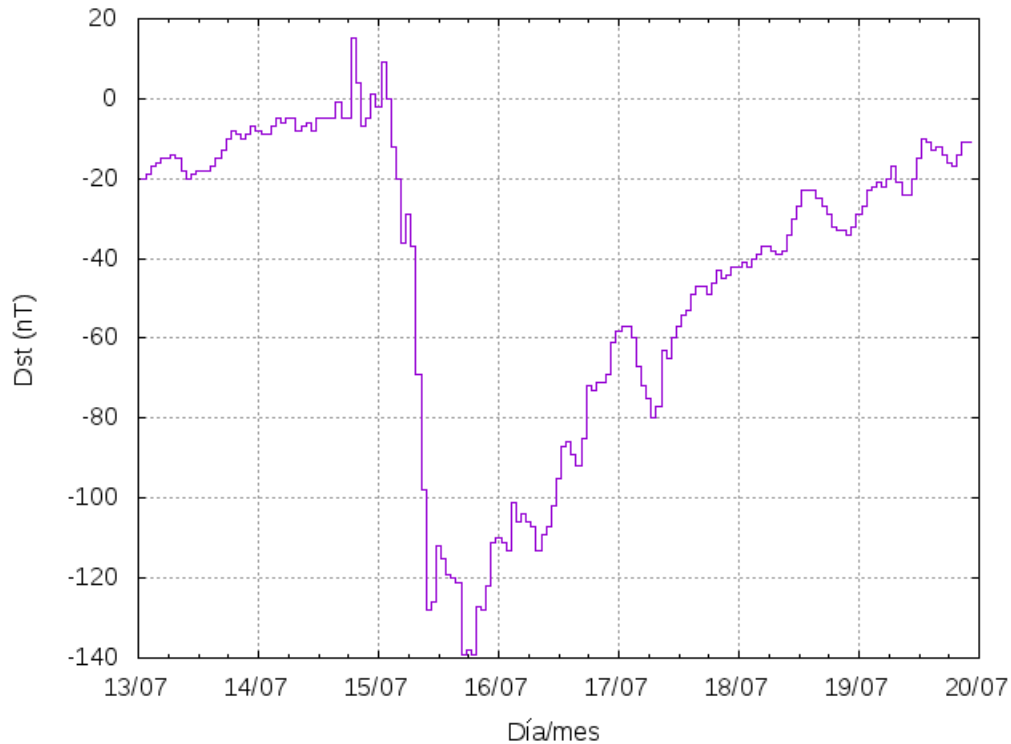


Figura 5.1.20: Intensidad del índice Dst para el evento 2.

### 5.1.3. Evento 3

El inicio del dF se da el 14 de marzo del 2013 a las 12:00 hrs TU, la primera estación en responder a la perturbación es el monitor de neutrones de Oulu, después el de Roma y finalmente el de México 6 hrs después como se muestra en la Figura 5.1.21.

Las componentes del campo magnético del medio interplanetario muestran cambios significativos hasta las 6:00 hrs TU del 15 de marzo. Los parámetros del viento solar muestran que fluye viento solar lento de  $320 \text{ km/s}$  que aumenta su velocidad a las 0:00 hrs TU del 15 de junio a  $340 \text{ km/s}$ , hasta alcanzar los  $420 \text{ km/s}$  alrededor de las 6 hrs TU (Figura 5.1.22). A las 0:00 hrs TU del 15 de marzo, la densidad presenta un pico, lo que evidencia que se encuentra en la zona de interacción de corrientes, es decir, una RIC. A las 0:00 hrs TU del 15 ocurre simultáneamente un mínimo local en las cuentas de la radiación cósmica. La densidad es consistente con la densidad que tiene el viento solar rápido. En conclusión, se trata de una RIC.

El campo magnético de la Tierra no se vió perturbado significativamente, porque la componente  $B_z$  no incrementó de forma significativa. La intensidad del índice Dst alcanzó  $-20 \text{ nT}$ .

A las 5:00 hrs del 17 de marzo, se presenta una onda de choque que acelera partículas y se observa un incremento en las cuentas de la radiación cósmica (Figura 5.1.21). Esto se observa como una compresión del campo magnético, que es un aumento en el promedio del valor del campo magnético del medio interplanetario (Figura 5.1.23). Esta variación indica el final de la RIC y el comienzo de una EMCI.

Se presentan una rotaciones significativas de las componentes del campo magnético, a partir de las 10:00 hrs TU del 17 de marzo. La rotación más significativa es la componente negativa  $B_z$  (Figuras 5.1.24, 5.1.25 y 5.1.26). A la

misma hora que la componente  $B_z$  alcanza su valor mínimo (12 hrs TU del 17 de marzo), se presenta un aumento en la velocidad del viento solar que llega hasta los 700 km/s (Figura 5.1.22). La temperatura es tal que probablemente, la onda de choque está constituida por material del viento solar lento, alcanzando un máximo para la temperatura de  $7.5 \times 10^5$  K dos horas antes del máximo en la velocidad del viento solar (Figura 5.1.27).

La contribución de dos fenómenos, el primero el de RIC y el segundo el de la EMCI, provocó que las cuentas en la intensidad de RC disminuyera en dos ocasiones y por lo tanto fuese mayor.

Según la información de la velocidad del viento solar (Figura 5.1.22), la perturbación de la RIC a la magnetósfera comenzó el 14 de marzo a las 23 hrs TU, pero según las cuentas de la radiación cósmica, el efecto de la RIC existía por lo menos 6 horas antes. Este efecto podría explicarse a través del parámetro  $\beta$  el cual alcanzó valores mucho mayores que uno durante el 13 de marzo (Figura 5.1.28). Según la información de la temperatura del viento solar (Figura 5.1.27), ésta atiende dos pulsos: el primero alcanza el máximo a las 9:00 hrs TU del 15 de marzo, el segundo a las 9 hrs TU del 17 de marzo. Ambos pulsos son consistentes con la región más rápida de la RIC y con la nube magnética de la EMCI respectivamente.

La densidad muestra 4 pulsos seguidos de un decrecimiento, los primeros tres son consistentes con la perturbación de la RIC el 13 de marzo a las 22:00 hrs TU, el 14 de marzo a las 14 hrs y el 15 de marzo a las 9:00 hrs TU (Figura 5.1.29). El cuarto pulso comienza a las 10:00 hrs del 17 de marzo, se da como un incremento abrupto seguido de un decrecimiento suave y muestra la presencia de una EMCI porque la  $\beta < 1$ .

El índice Dst alcanza un valor mínimo de  $-130$  nT. El 17 de marzo entre las 6:00 hrs TU y el 19 de marzo a 23:00 hrs se alcanzan los valores mínimos de las cuentas de radiación para las tres estaciones, además de que el parámetro  $\beta$  también alcanzó su valor mínimo, se observa claramente la presencia de una EMCI (Figura 5.1.30).

La perturbación provocada por la RIC ( $-20$  nT) no es relevante comparada con la tormenta geomagnética provocada por la EMCI ( $-130$  nT).

La contribución de dos fenómenos, el primero el de RIC y el segundo el de la EMCI provocó que las cuentas en la intensidad de RC disminuyera en dos ocasiones y por lo tanto fuese mayor.



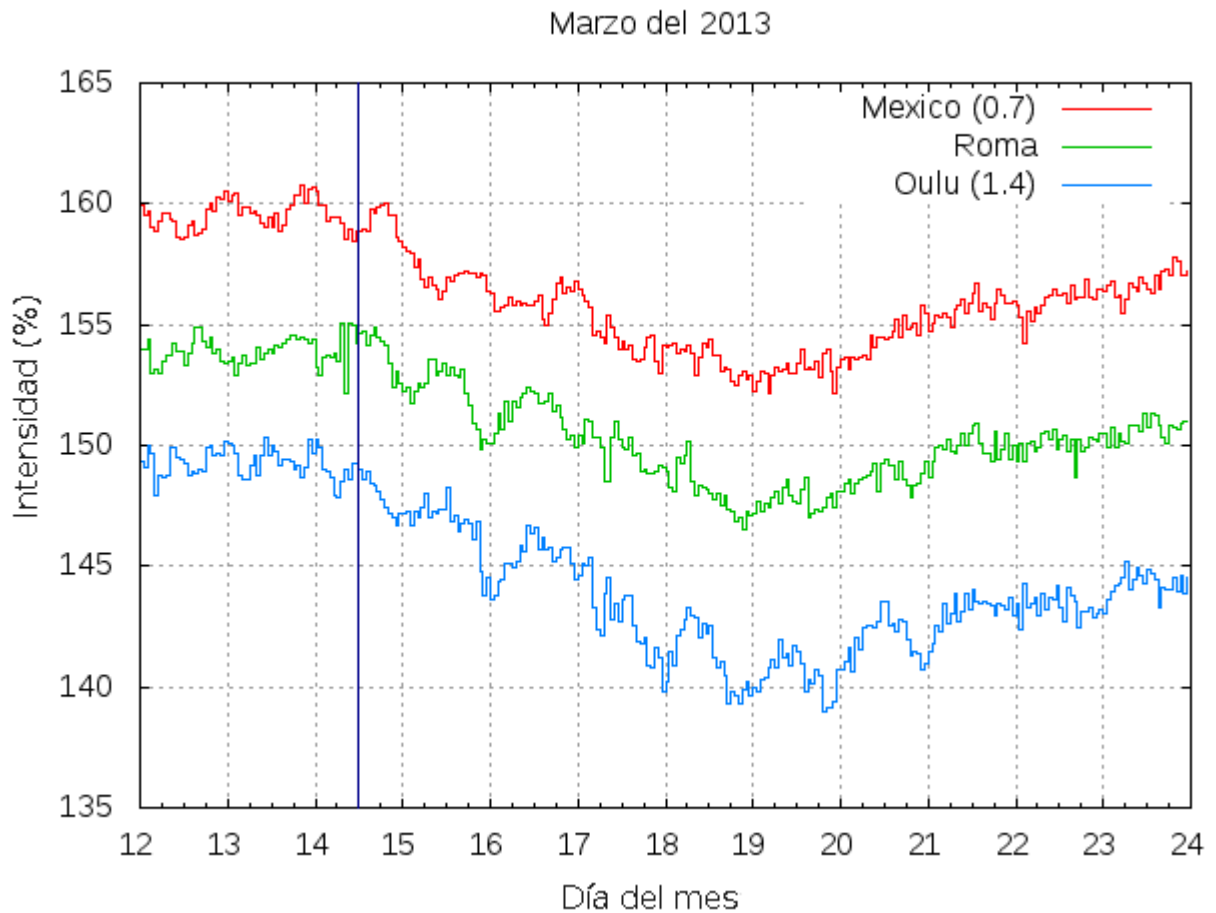


Figura 5.1.21: Decrecimiento Forbush, para efectos visuales, se multiplicó la curva que representa las cuentas de radiación para México por un escalar en 0.7 y para Oulu en un 1.4. Esto no afecta el comportamiento del dF. Se indica con una línea vertical el incremento de las cuentas de radiación como el inicio del dF.

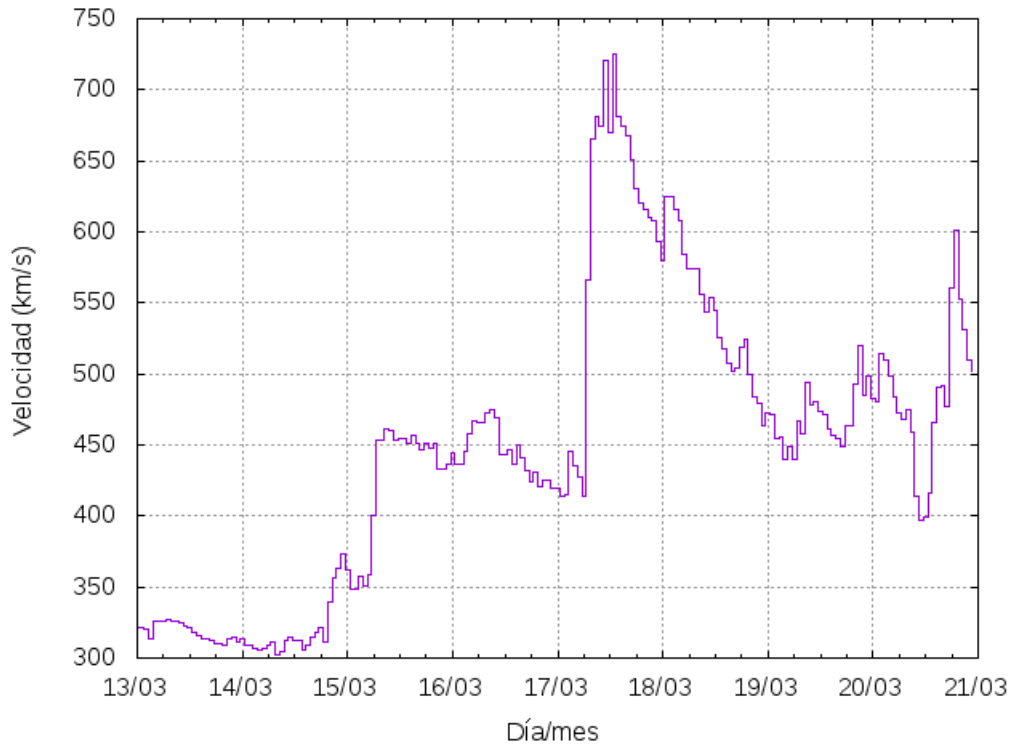


Figura 5.1.22: Velocidad del viento solar para el evento 3.

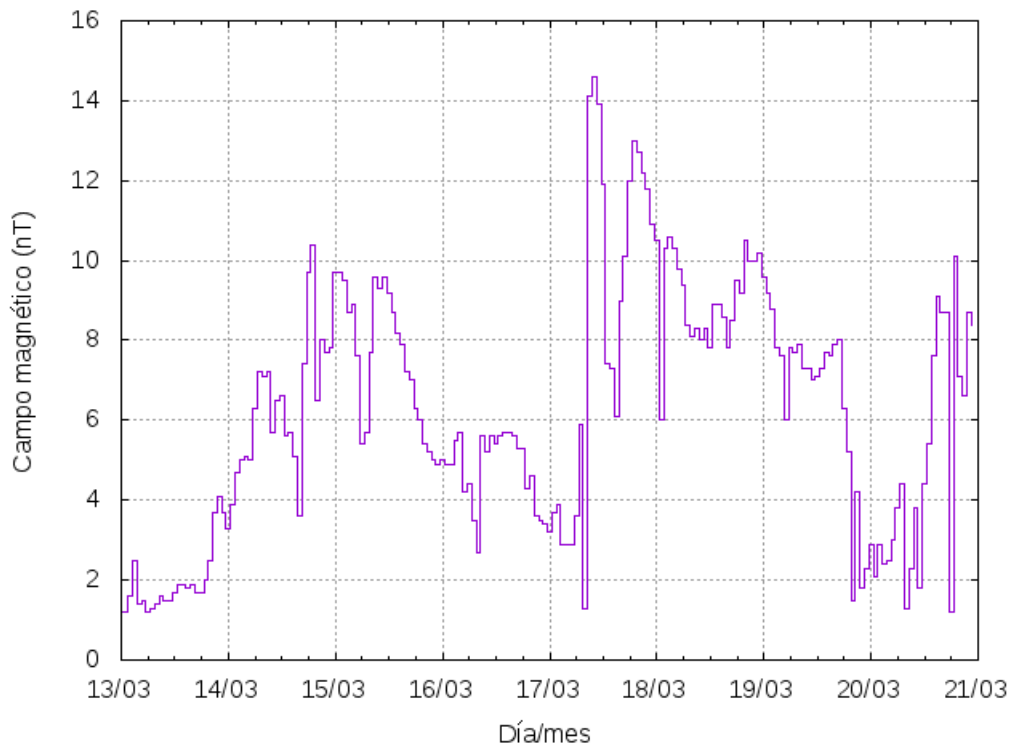


Figura 5.1.23: Promedio del campo magnético para el evento 3.

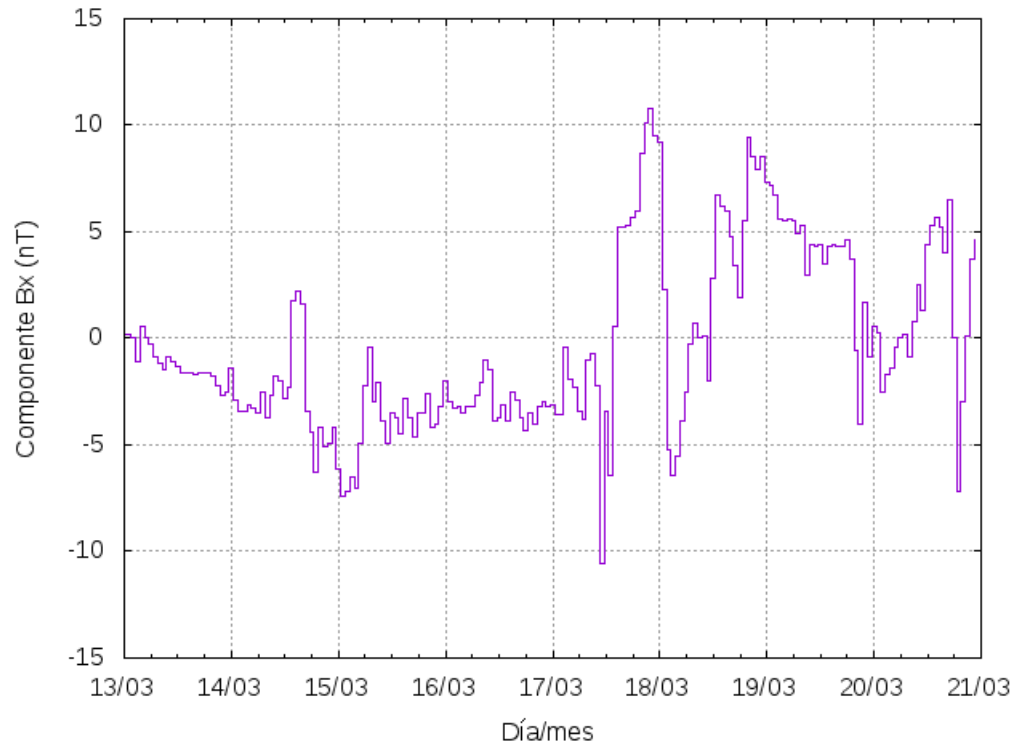


Figura 5.1.24: Componente  $B_x$  del campo magnético para el evento 3.

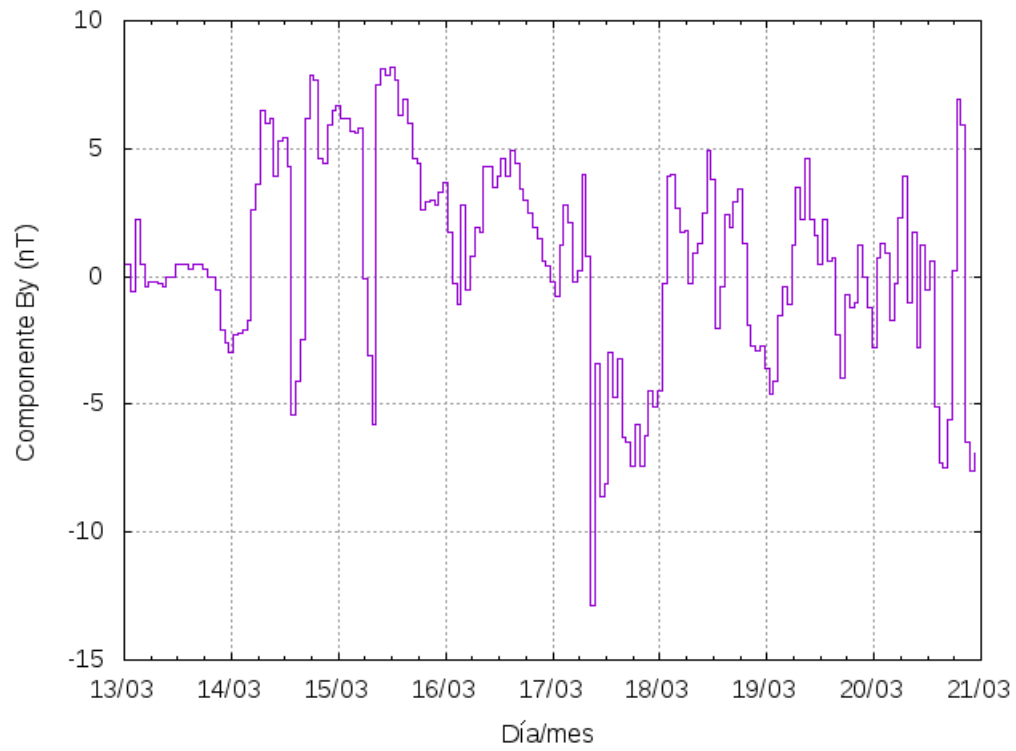


Figura 5.1.25: Componente  $B_y$  del campo magnético para el evento 3.

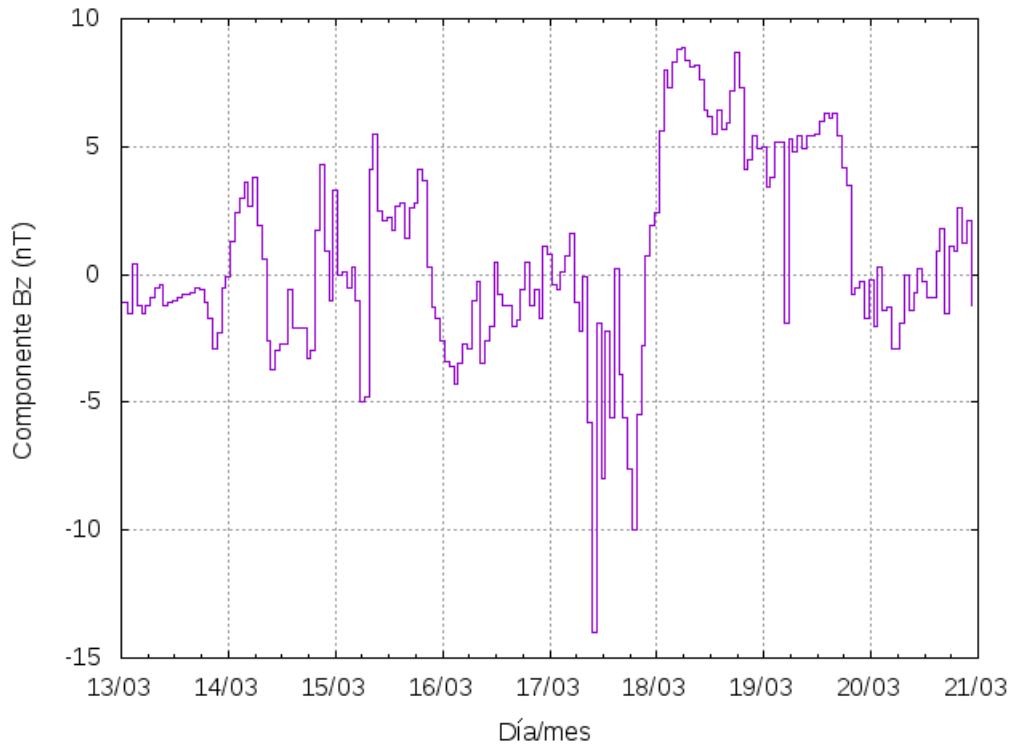


Figura 5.1.26: Componente  $B_z$  del campo magnético para el evento 3.

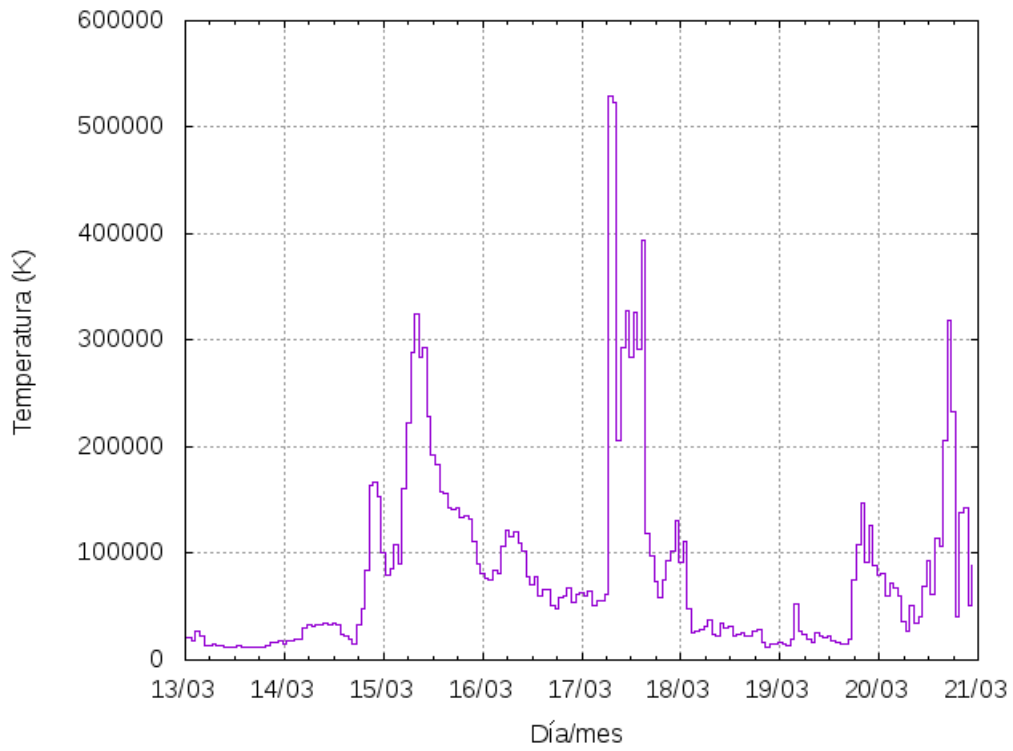


Figura 5.1.27: Temperatura del viento solar para el evento 3.

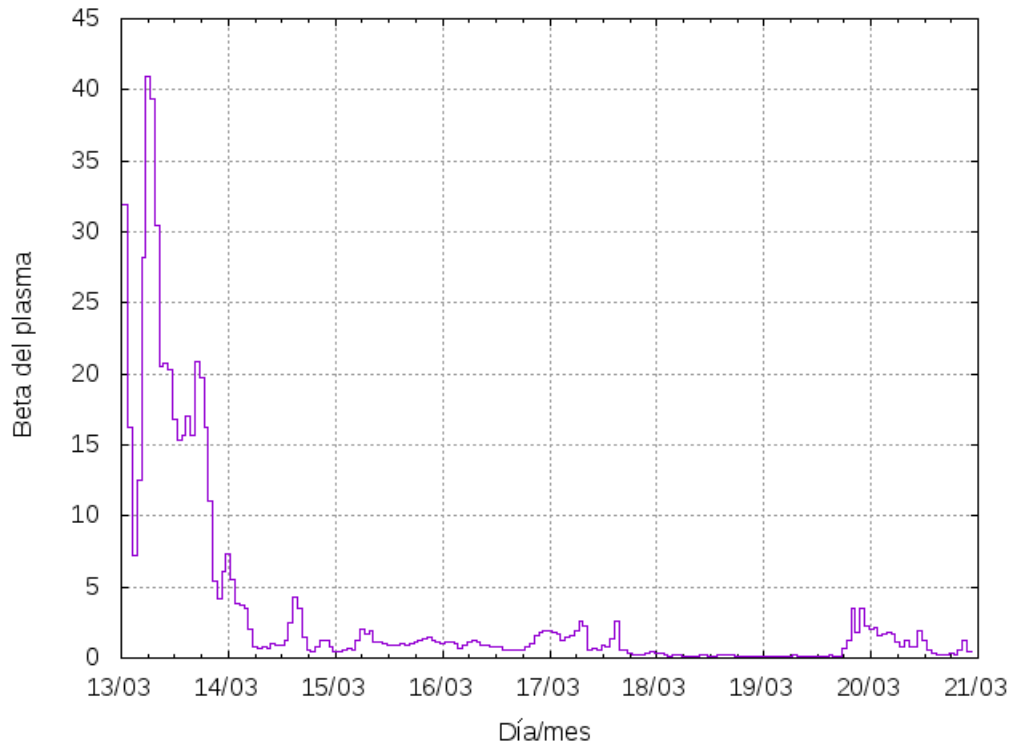


Figura 5.1.28: Beta del viento solar para el evento 3.

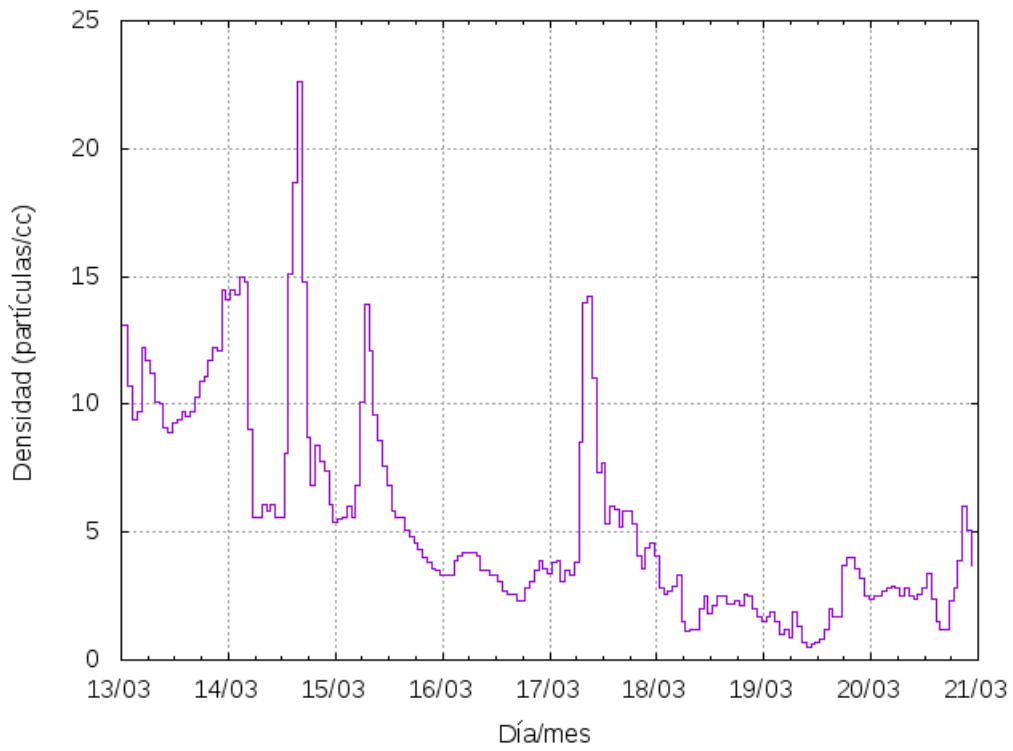


Figura 5.1.29: Densidad del viento solar para el evento 3, cc es por centímetro cúbico.

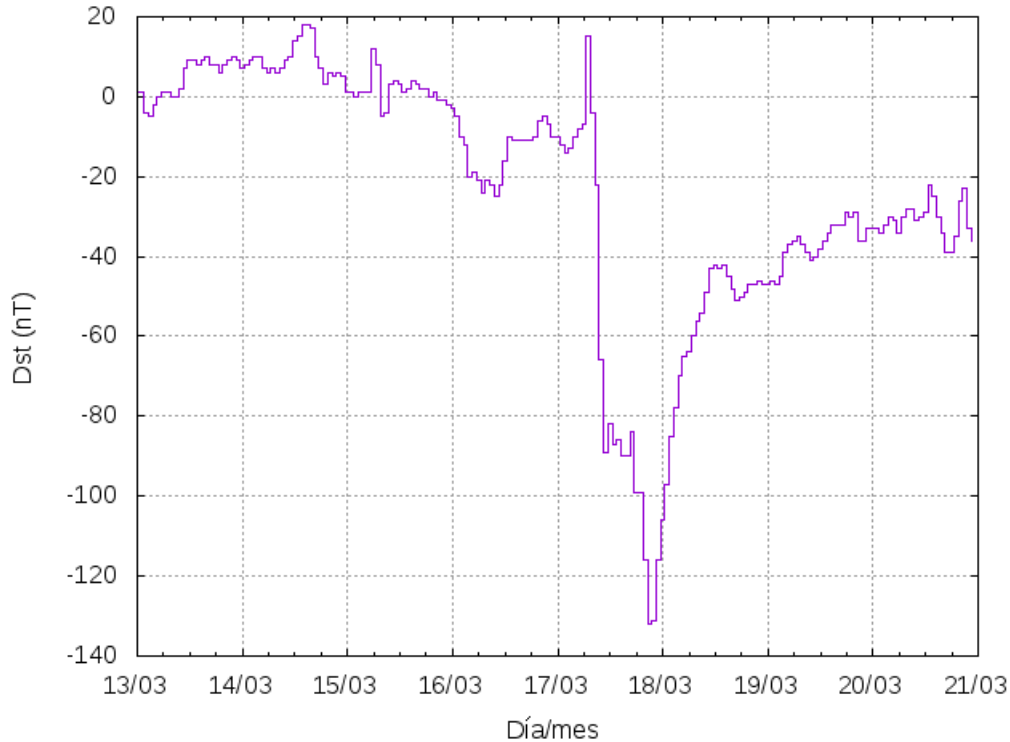


Figura 5.1.30: Intensidad del índice Dst para el evento 3.

#### 5.1.4. Evento 4

El 21 de diciembre del 2014 a las 19:00 hrs TU se presentó una onda de choque. La onda provocó un pequeño aumento en las cuentas de la radiación cósmica que después mostró un descenso abrupto de un solo paso en las tres estaciones (Figura 5.1.31). La diferencia temporal entre el incremento y el decremento de las cuentas de la radiación cósmica es de 3 a 4 horas. Existe una segunda onda de choque entre las 12:00 hrs y las 14:00 hrs del 22 de diciembre y una tercera a las 12:00 hrs TU del 23 de diciembre. La segunda onda de choque se relaciona bien con un pequeño decrecimiento local en las cuentas de radiación para la estación de Oulu y con un incremento en el promedio del campo magnético del viento solar (Figura 5.1.32). La onda de choque del 23 se relaciona perfectamente bien con un decrecimiento observado por las tres estaciones simultáneamente y provocó otro descenso en las cuentas de la radiación cósmica, la tercer onda de choque está relacionada con un incremento simultáneo del campo magnético (Figura 5.1.32).

Este evento fue provocado por la onda de choque de tres EMCI. Entre la primera y la segunda existen 16 horas de diferencia aproximadamente, mientras que entre la segunda y la tercera existen 24 horas de diferencia. Para este evento se toma en cuenta el promedio de la velocidad antes y después del choque como si fuera el mismo fenómeno, aunque son dos.

Se trata de una EMCI porque el parámetro  $\beta < 1$  (Figura 5.1.33) para el tiempo posterior al máximo valor que tomaron los pulsos. Lo que significa que la presión magnética es dominante sobre la presión dinámica. Los pulsos donde  $\beta > 1$  corresponden a los frentes de onda que sucedieron a las 23 TU hrs del 21 de diciembre, a las 22 hrs TU del 22 de diciembre y a las 3 hrs TU del 24 de diciembre.

El 20 y 21 de diciembre del 2014, las componentes del campo magnético presentan rotaciones que se manifiestan

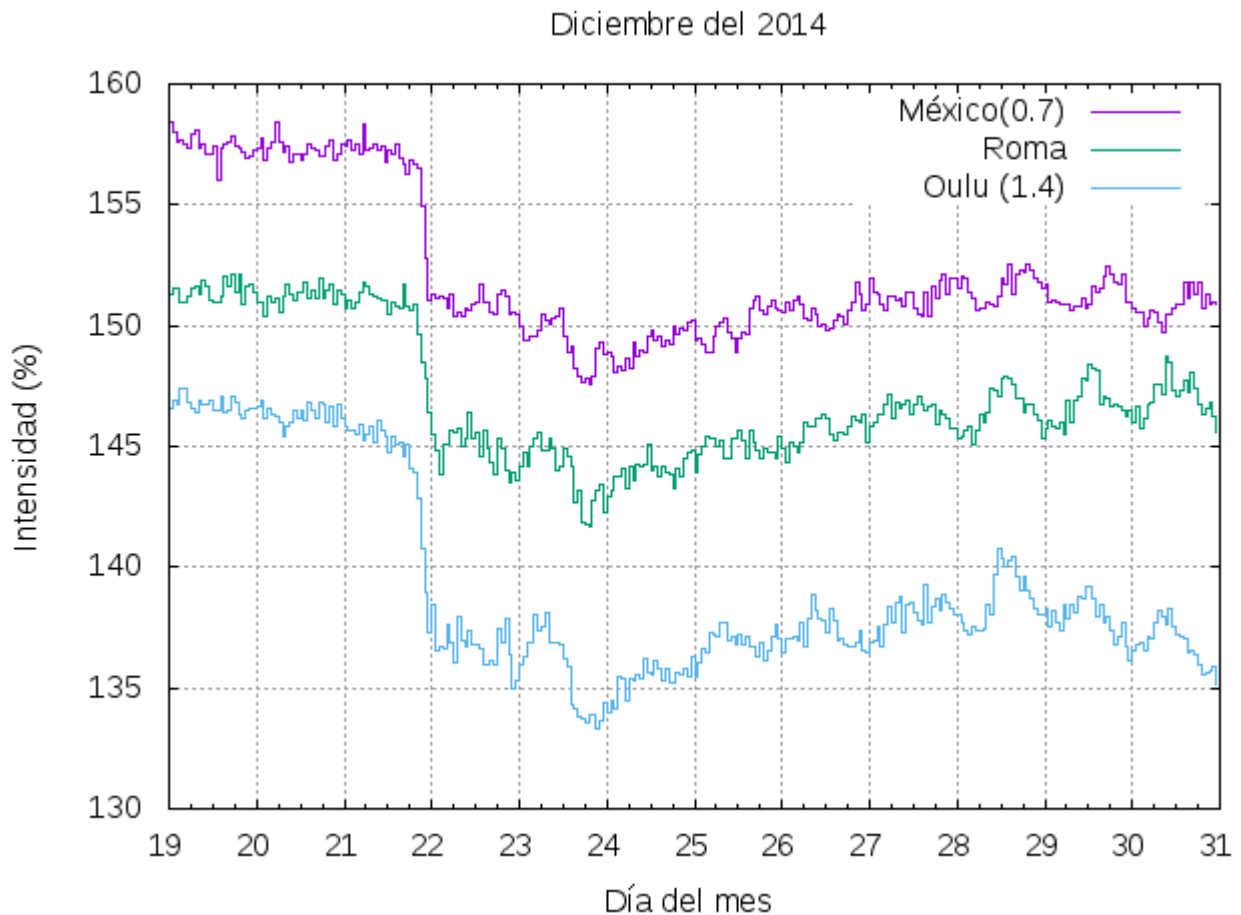


Figura 5.1.31: Decrecimiento Forbush observado el 21 de diciembre del 2014. Para efectos visuales, se modifica la curva de Oulu y la de México, la primera se sube por un escalar 1.4 y la segunda se baja por un escalar 0.7

como decrecimientos del índice Dst (Figuras 5.1.34, 5.1.35, 5.1.36 y 5.1.37). Esto porque las componentes del campo magnético cambian en magnitud para la componente z. Pero es hasta el 20 de diciembre aproximadamente a las 23:00 hrs TU que se da el inicio de una tormenta geomagnética. Esta tormenta no es consistente con el inicio del dF porque el inicio de la tormenta se da 12 horas antes del inicio del decrecimiento Forbush. Como el campo magnético alcanzó un valor mínimo de  $50 \text{ nT}$  entonces se trata de una tormenta moderada.

Los parámetros de la temperatura, densidad y velocidad del viento solar indican que los pulsos que se ven como incrementos abruptos son consistentes con los frentes de onda de una EMCI, excepto el valor de la temperatura, que no incrementa con la primer onda de choque (Figuras 5.1.38, 5.1.39 y 5.1.40).

Este dF es la suma de tres EMCI, aunque sólo la primera y la tercera tuvieron su repercusión directa con las cuentas de la radiación cósmica. Se descarta la interacción de la RIC, pues esta no influyó en alterar el número de las cuentas de RC, quizá porque era muy pequeña aunque su presencia en el viento solar es clara según los parámetros de velocidad y densidad.

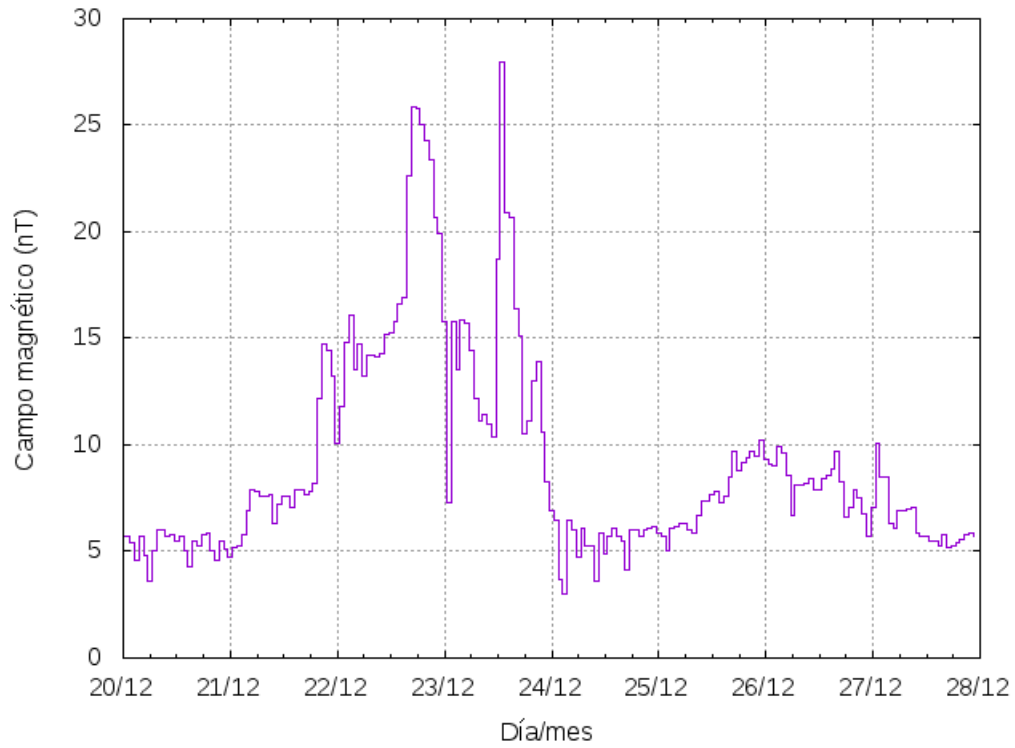


Figura 5.1.32: Promedio del campo magnético para el evento 4.

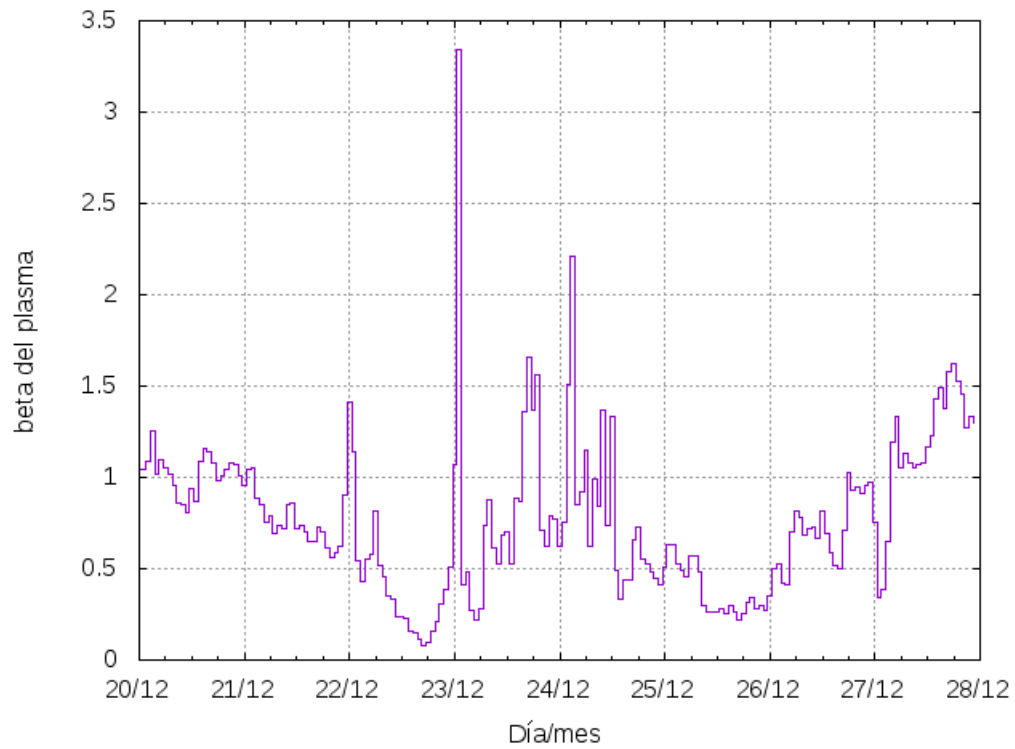


Figura 5.1.33: Beta del plasma para el evento 4.



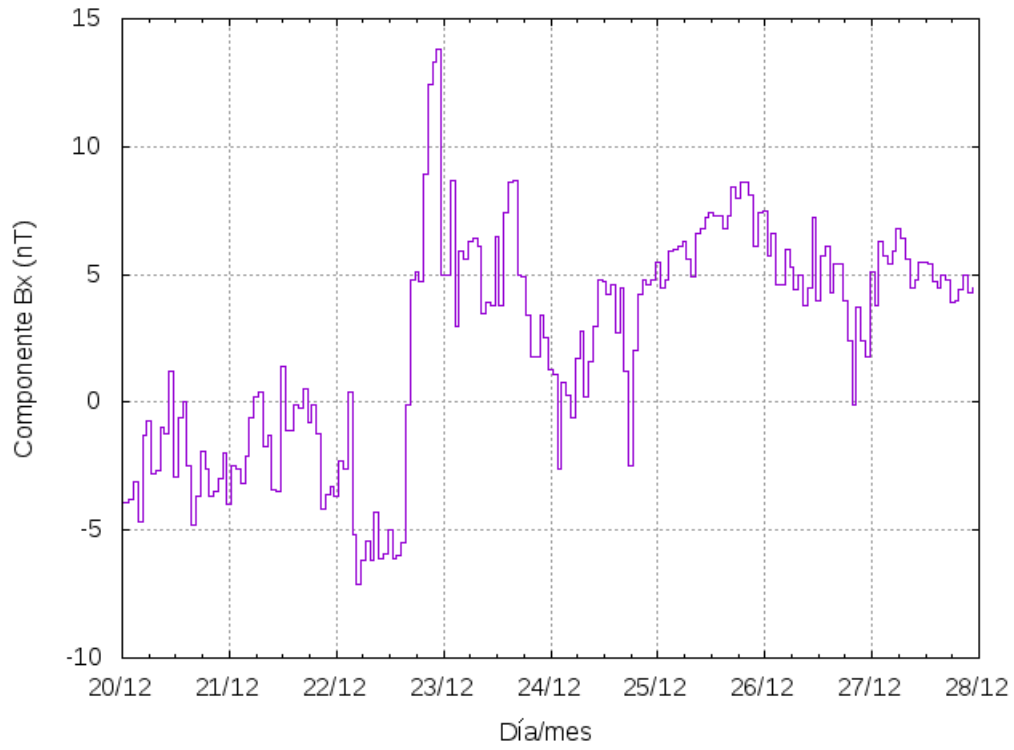


Figura 5.1.34: Componente  $B_x$  del campo magnético para el evento 4.

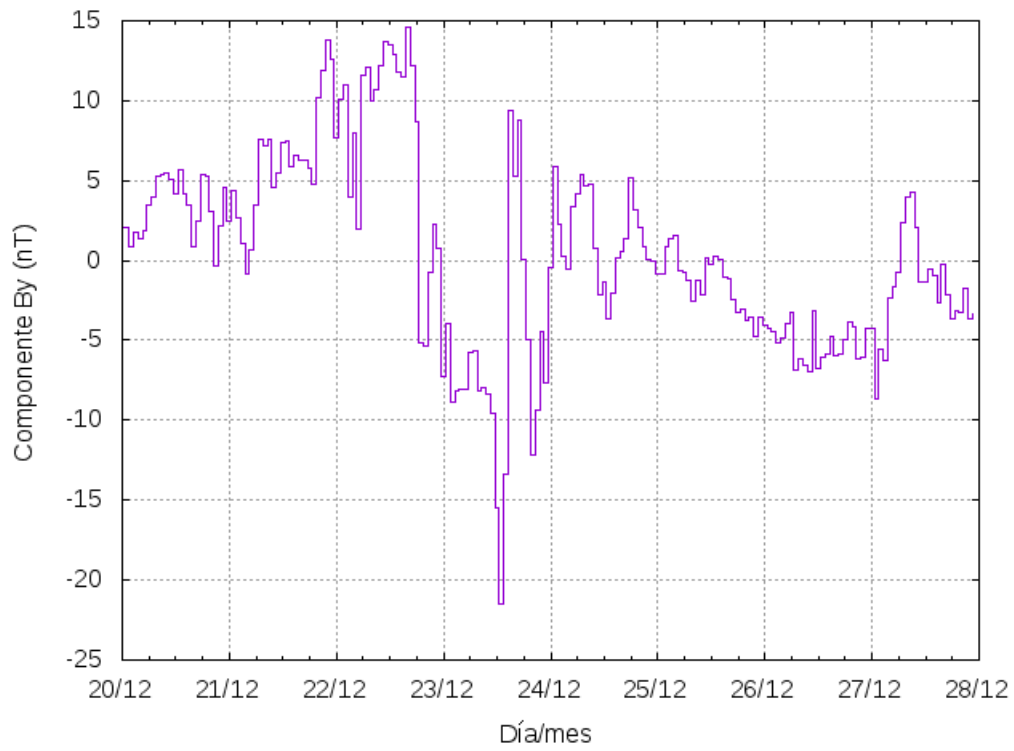


Figura 5.1.35: Componente  $B_y$  del campo magnético para el evento 4.

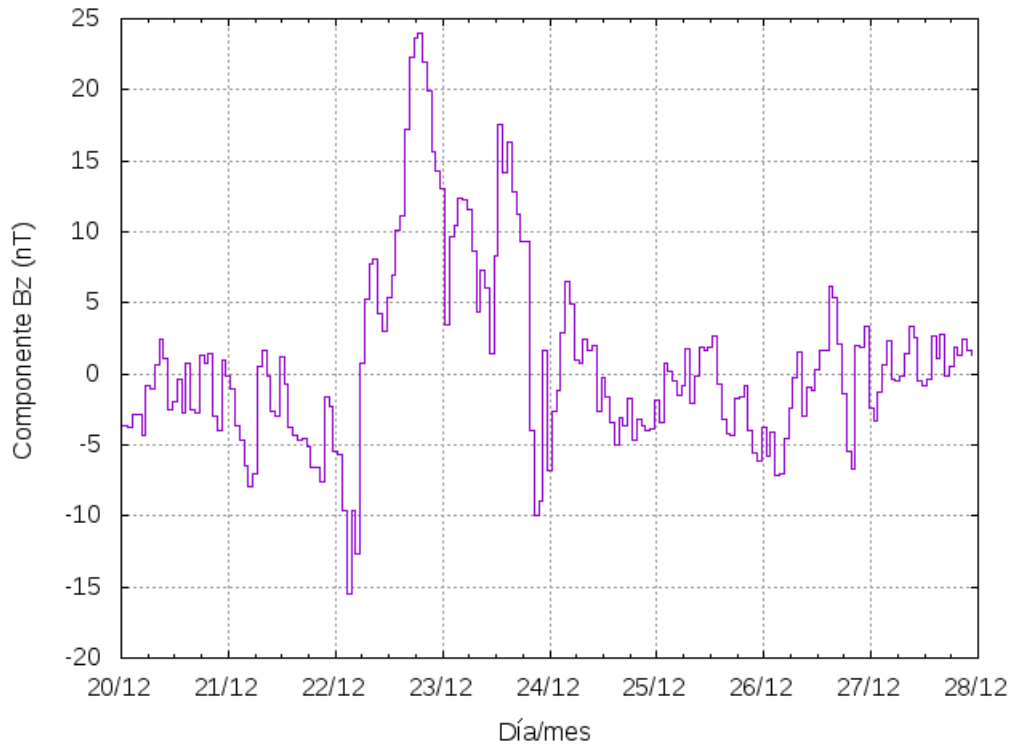


Figura 5.1.36: Componente  $B_z$  del campo magnético para el evento 4.

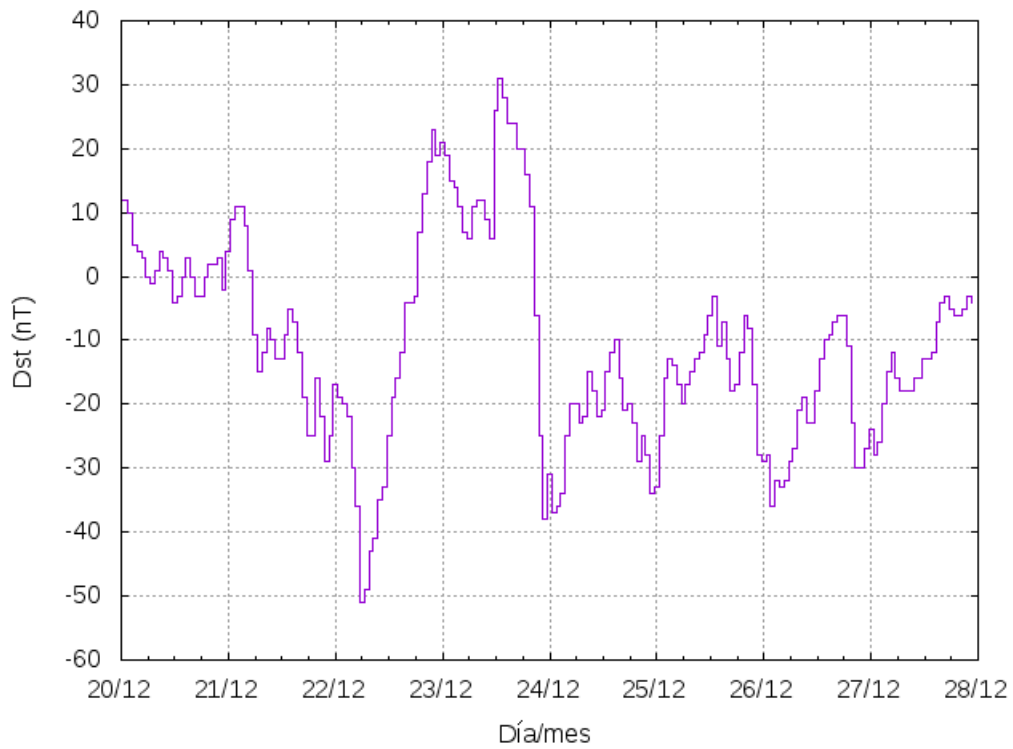


Figura 5.1.37: Intensidad del índice Dst para el evento 4.

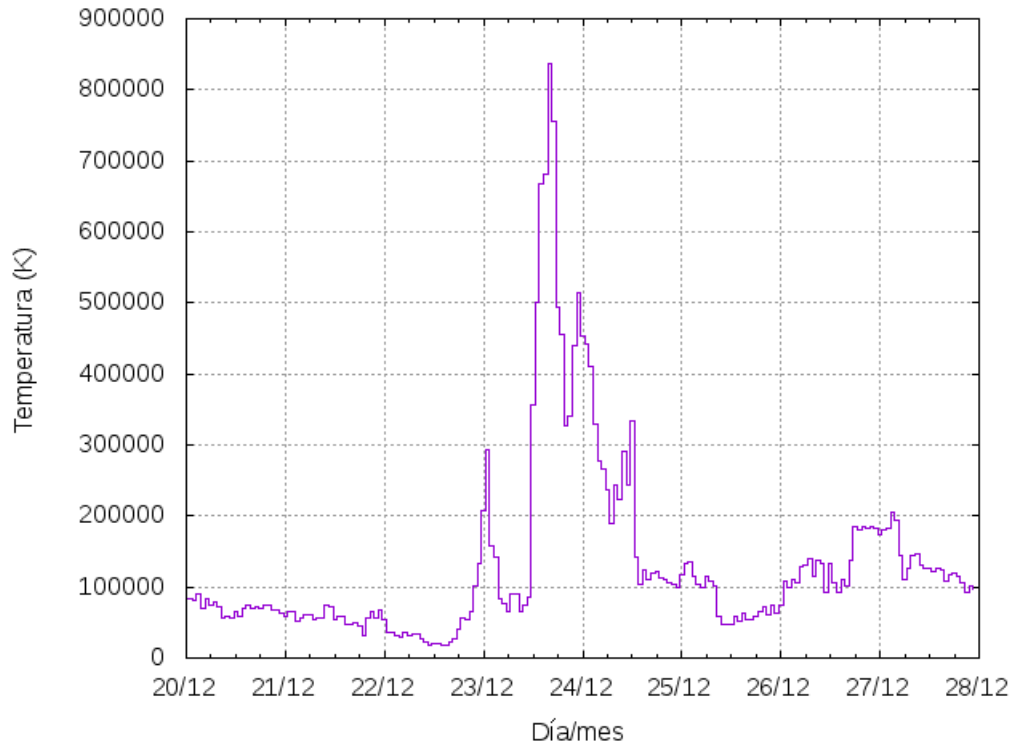


Figura 5.1.38: Temperatura del viento solar para el evento 4.

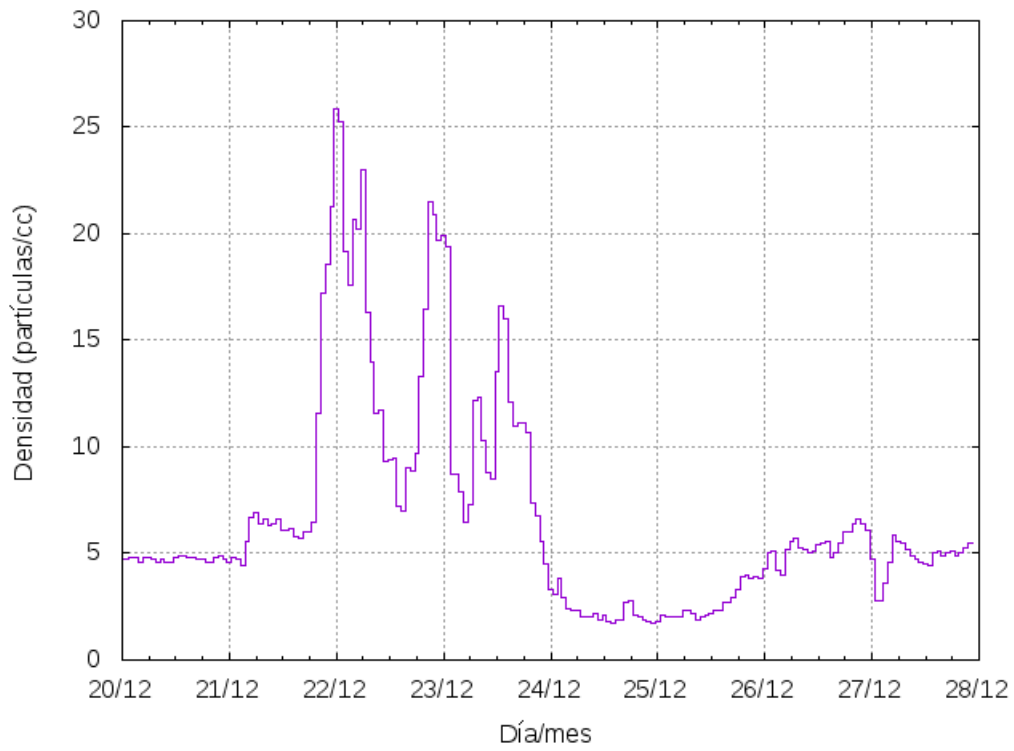


Figura 5.1.39: Densidad del viento solar para el evento 4, cc es por centímetro cúbico.

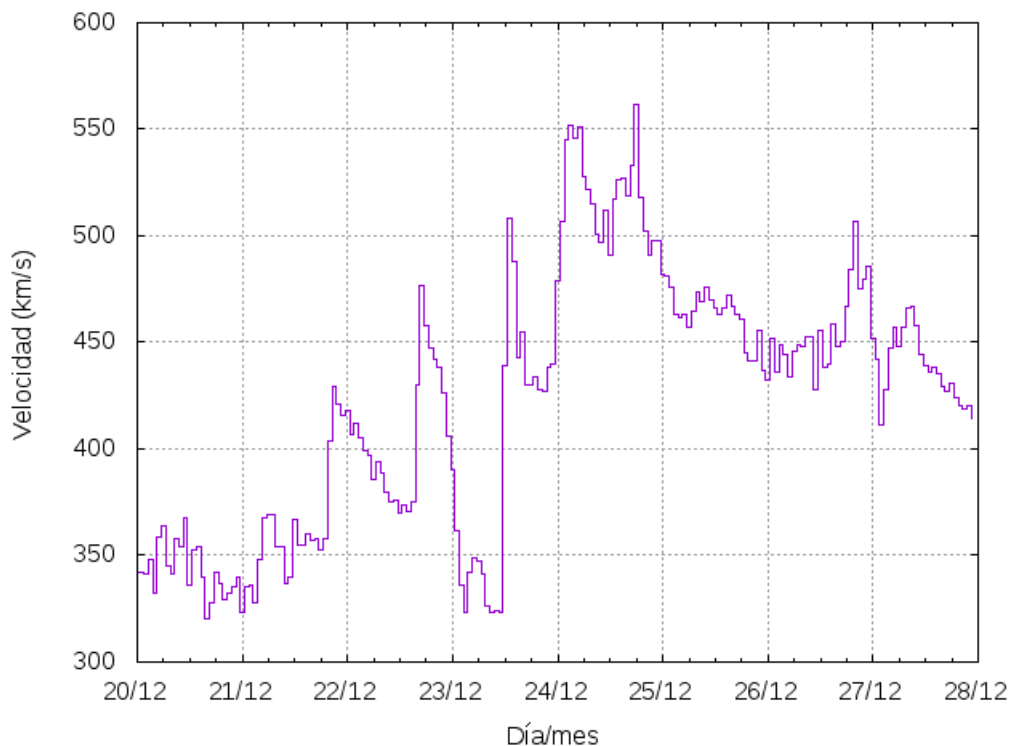


Figura 5.1.40: Velocidad del viento solar para el evento 4.

### 5.1.5. Evento 5

El 21 de junio del 2015 a las 15:00 hrs TU se presenta una perturbación en los parámetros del viento solar, esta perturbación posiblemente es la onda de choque asociada a la EMCI que llega el 22 de junio a las 6:00 hrs TU. Ambas perturbaciones son sensibles a ser observadas cualitativamente, pero ninguna de las dos provoca una disminución significativa de los rayos cósmicos y tampoco perturba de forma significativa los parámetros del campo geomagnético, pues el índice Dst alcanza un valor mínimo de  $-10 nT$  (Figuras 5.1.41 y 5.1.48).

Se observa una segunda EMCI el 22 de junio a las 18:00 hrs TU, la cual es consistente con el dF mostrado en la Figura 5.1.41 cuyo comienzo se dió en todas las estaciones una hora después. El dF fue abrupto y alcanzó un mínimo en la radiación cósmica en menos de 6 horas para las tres estaciones el 23 de junio. Posterior al mínimo que alcanzan las tres estaciones, existe un crecimiento en las cuentas de radiación que se mantiene aproximadamente por otras 12 horas. Durante este periodo de tiempo, el promedio de la intensidad del campo magnético desciende, así como sus componentes (Figuras: 5.1.42, 5.1.43, 5.1.44 y 5.1.45). La velocidad del viento solar se mantiene oscilando en un valor cercano a  $[700 \pm 50] km/s$  como se muestra en la Figura 5.1.46. La beta del plasma en esta región presenta alteraciones que indican un dominio de la presión dinámica (Figura 5.1.47). El índice Dst disminuye dramáticamente presentando un valor récord mínimo de  $-210 nT$  (Figura 5.1.48); una tormenta severa. El índice Dst disminuye en dos pasos; sin embargo, las cuentas de radiación cósmica lo hacen en un sólo paso para este periodo de tiempo, probablemente por la geometría de la EMCI.

El 23 de junio a las 15:00 hrs TU, ocurre un descenso en las cuentas de la radiación cósmica en las tres estaciones, este descenso provocado por la nube magnética de la EMCI. Se caracteriza por poseer una  $\beta < 1$ , una temperatura relativamente fría y una densidad relativamente baja de partículas (Figuras 5.1.49 y 5.1.50). Este dF se dió en dos

pasos, pero el desfase entre la onda de choque y la nube magnética fue de varias horas por esa razón el dF no presentó con toda la claridad el segundo decrecimiento que provoca la nube magnética.

El 24 de junio a las 12:00 hrs se presenta otra EMCI, en esta ocasión con su onda de choque acelerando partículas que apenas incrementaron los valores de las cuentas de radiación para las tres estaciones. Posteriormente ocurre un descenso en las cuentas, que para las tres estaciones alcanza el mínimo local entre las 23:00 hrs del 24 y las 2:00 hrs del 25. Este descenso se da en un sólo paso, es decir, es provocado por la interacción únicamente con la onda de choque de la EMCI (Figura 5.1.41).

El promedio del campo magnético se ve aumentado hasta  $12 \text{ nT}$  que es menor a la anterior onda de choque que en promedio alcanzó un valor máximo de  $45 \text{ nT}$ . Las componentes del campo magnético presentan una rotación suave el 25 de junio a las 12:00 hrs TU. De las tres componentes, la componente  $B_z$  del campo magnético es la que alcanza valores más mínimos ( $-40 \text{ nT}$ ) (Figura 5.1.45). El perfil de temperatura y velocidad dan las propiedades que tendría el viento solar rápido; sin embargo, el perfil de densidad es el mismo que el del viento solar lento. Por lo tanto, se trata del plasma que es acelerado por la onda de choque.

Esta segunda EMCI, tiene una componente  $B_z$  lo suficientemente grande como para interactuar con el campo magnético de la Tierra y hacer descender su valor hasta  $-70 \text{ nT}$

La disminución en las cuentas de la radiación cósmica, provocadas por la segunda EMCI podrían ser suficientes para ser considerados por sí solos otro dF; sin embargo, se suma al anterior, ya que aún se encontraba la afectación de la anterior EMCI. En otras palabras, este dF es la suma de dos perturbaciones electromagnéticas que fueron provocadas por dos EMCI.

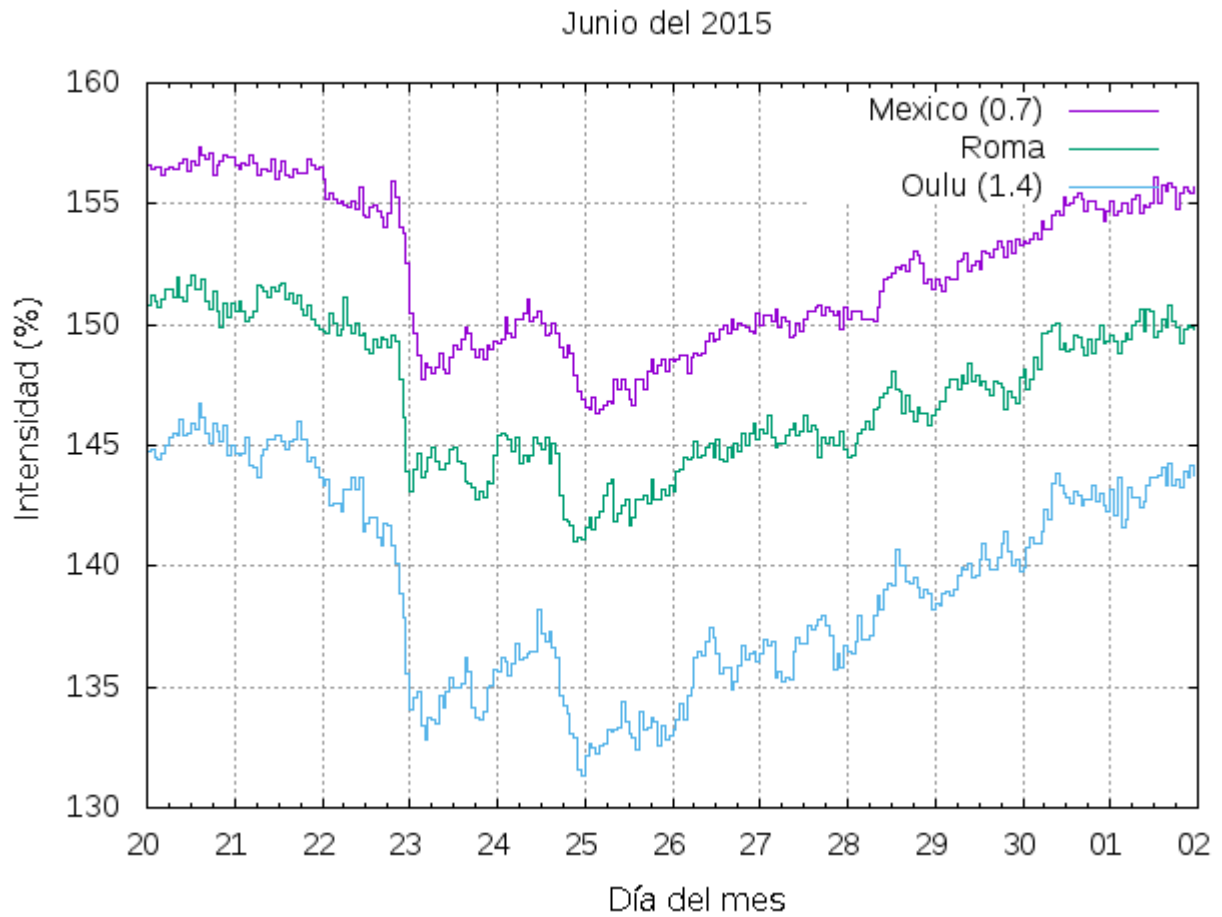


Figura 5.1.41: Decrecimiento Forbush observado el 22 de junio del 2015. Para efectos visuales, se modifica la curva de Oulu y la de México, la primera se sube por un escalar 1.4 y la segunda se baja por un escalar 0.7.

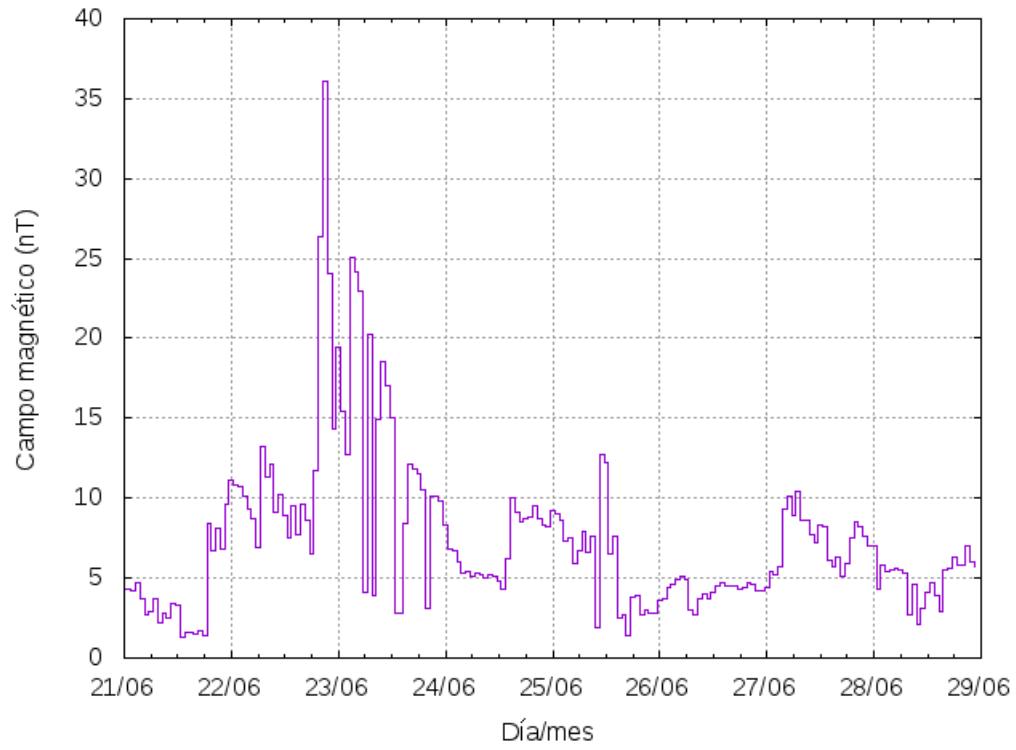


Figura 5.1.42: Promedio del campo magnético para el evento 5.

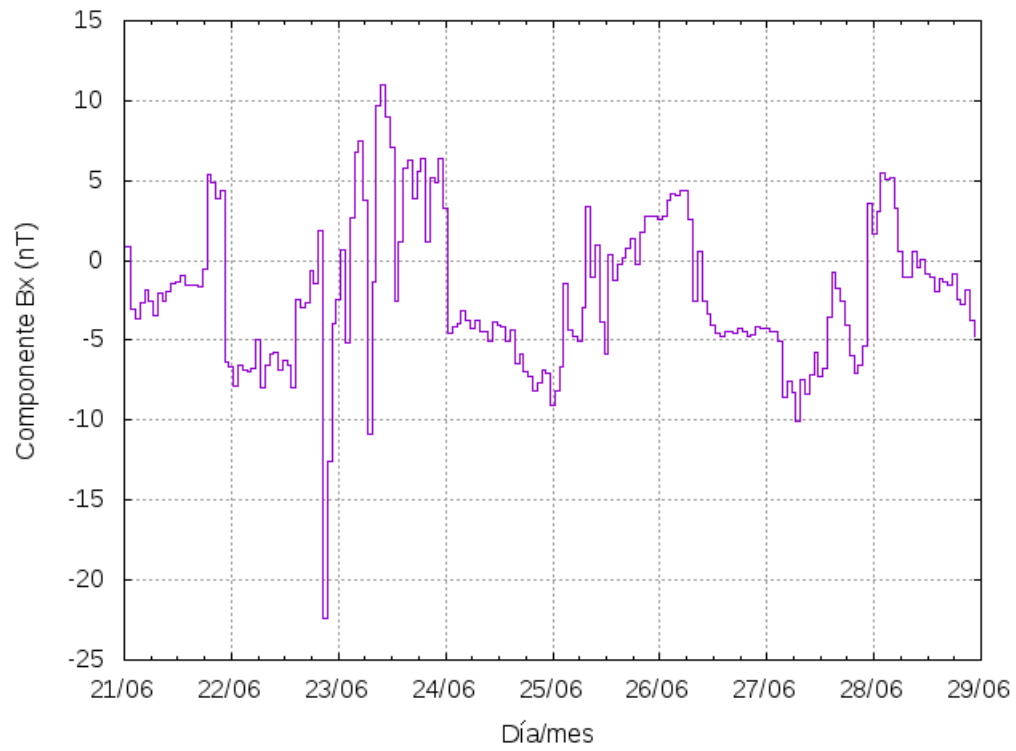


Figura 5.1.43: Componente  $B_x$  del campo magnético para el evento 5.

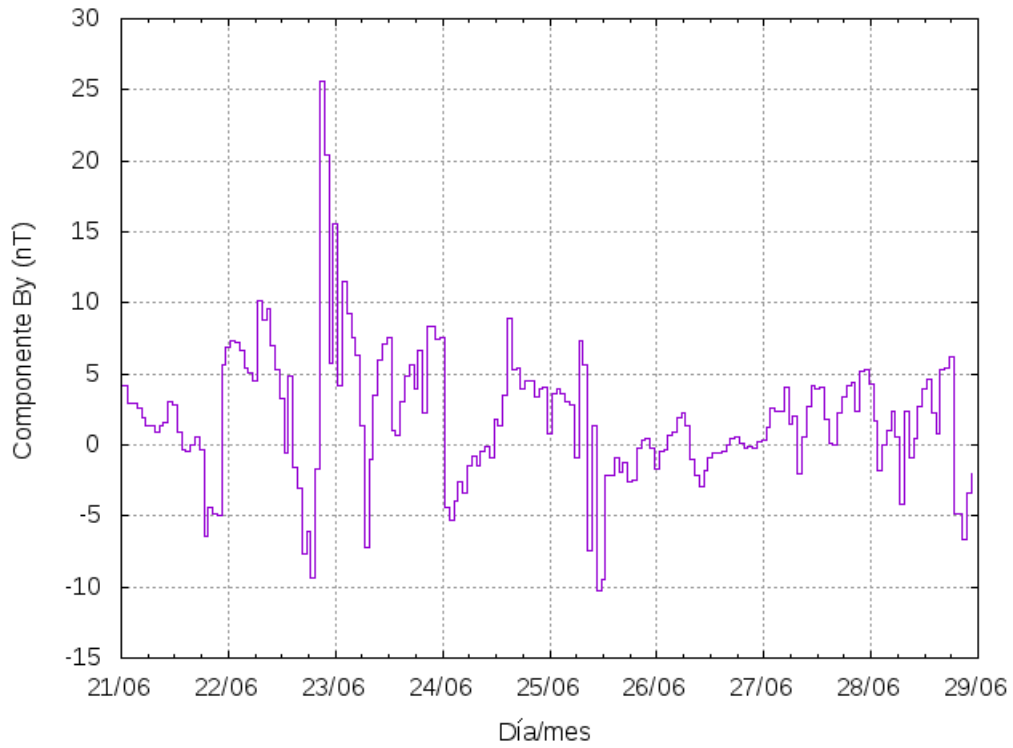


Figura 5.1.44: Componente  $B_y$  del campo magnético para el evento 5.

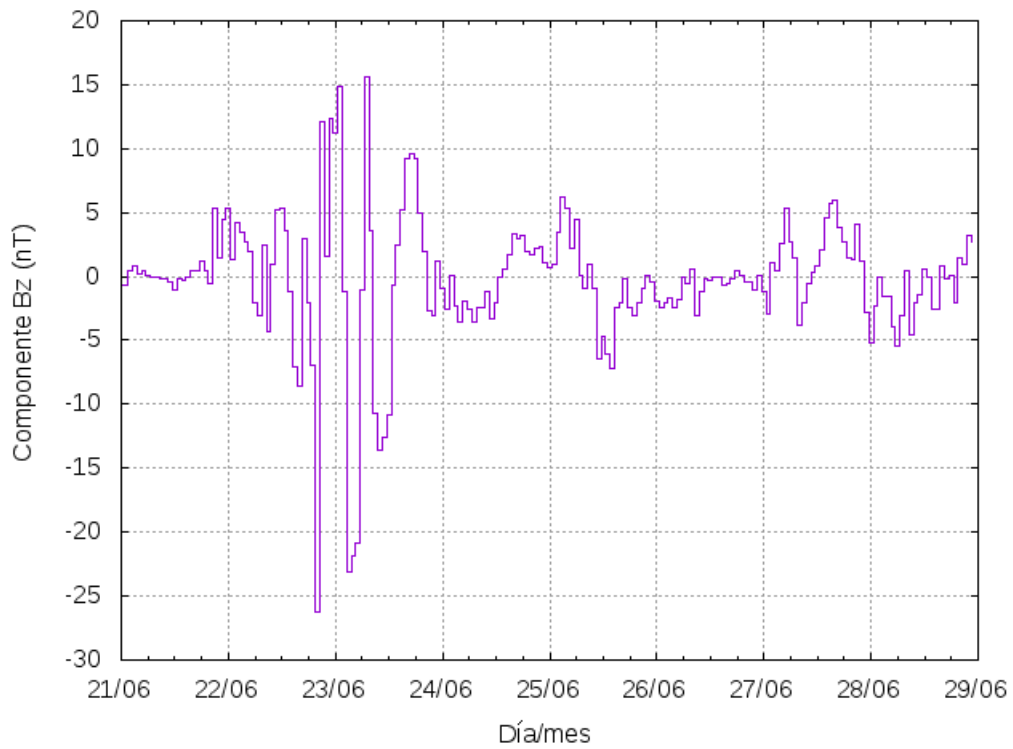


Figura 5.1.45: Componente  $B_z$  del campo magnético para el evento 5.



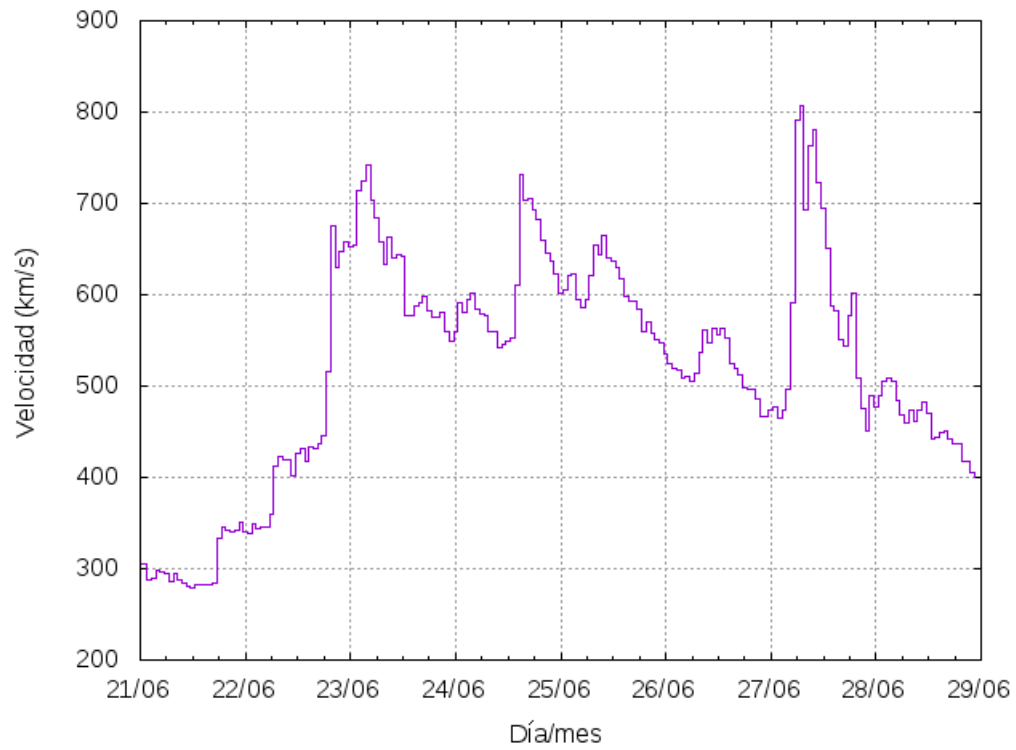


Figura 5.1.46: Velocidad del viento solar para el evento 5.

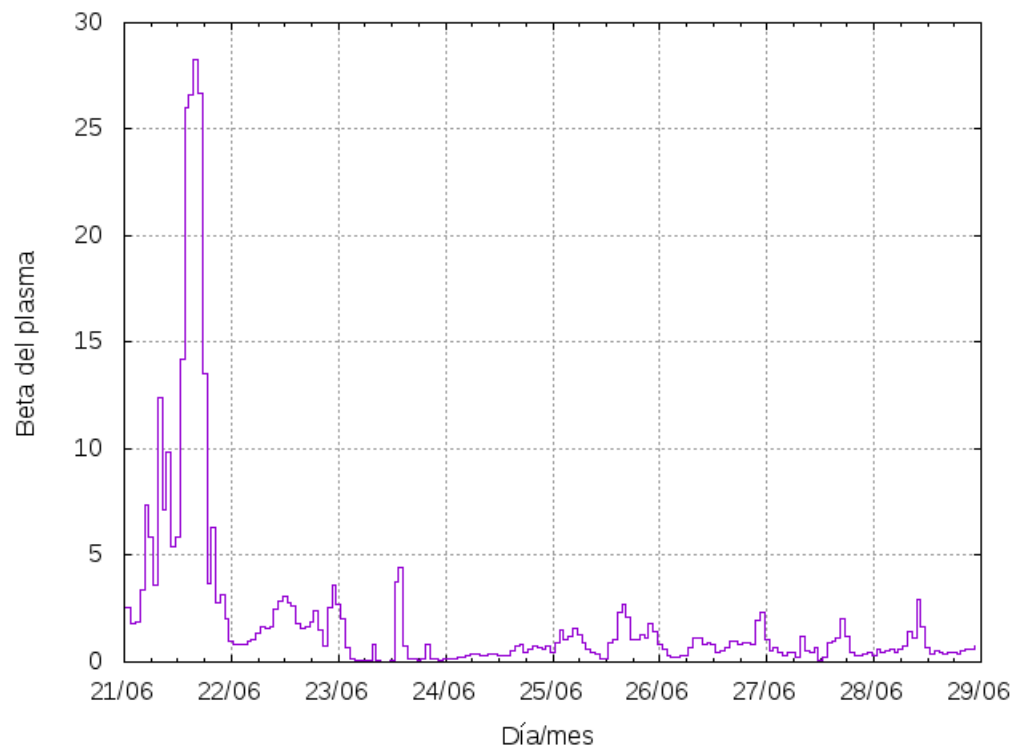


Figura 5.1.47: Beta del plasma para el evento 5.

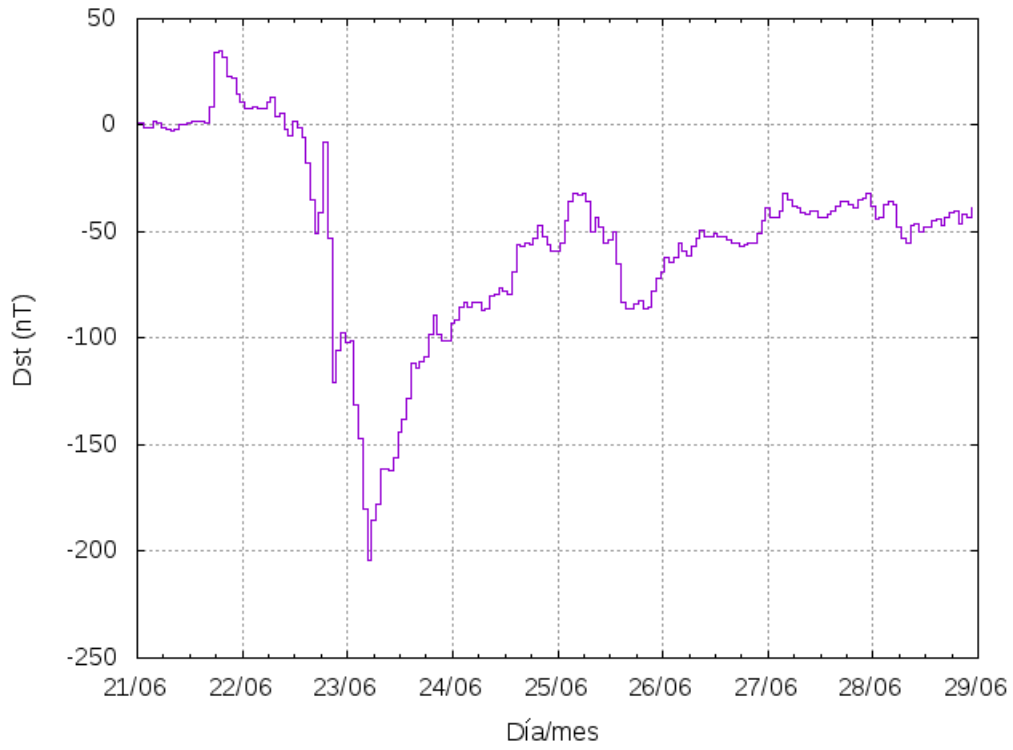


Figura 5.1.48: Intensidad del índice Dst para el evento 5.

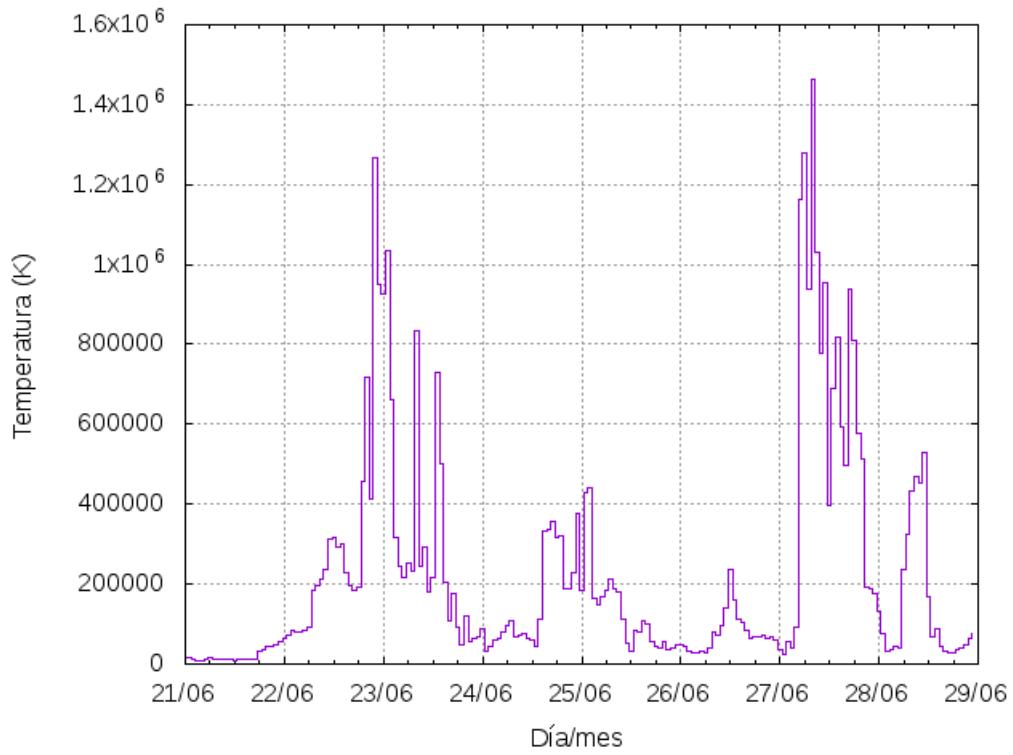


Figura 5.1.49: Temperatura del viento solar para el evento 5.

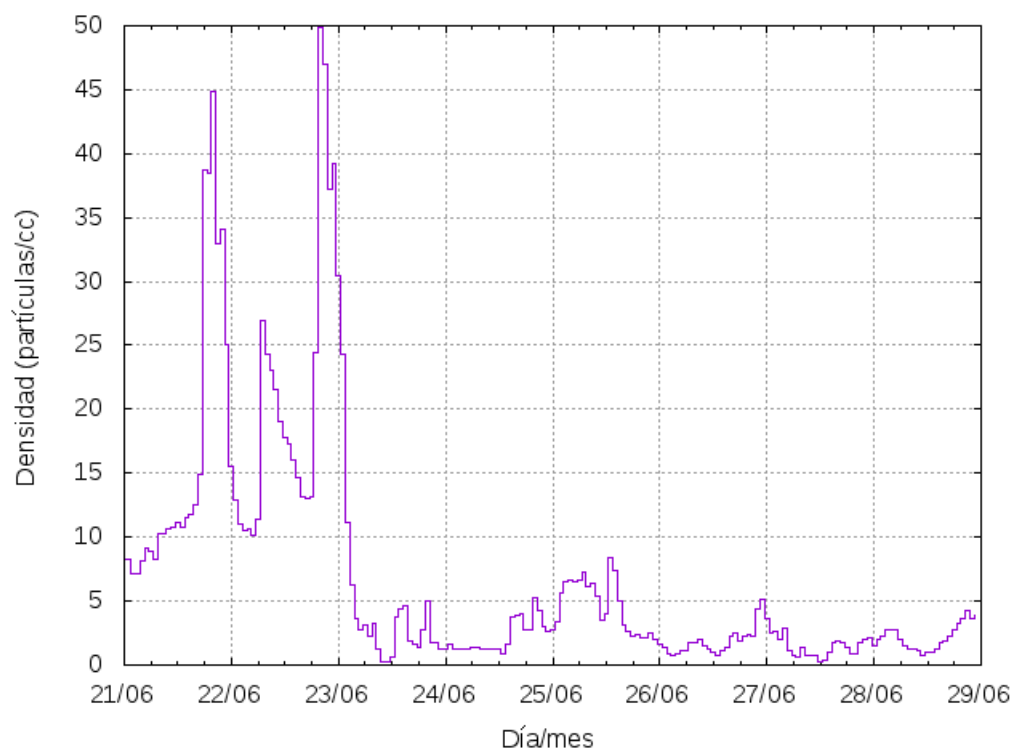


Figura 5.1.50: Densidad del viento solar para el evento 5, cc es por centímetro cúbico.



# Conclusiones

Se utilizaron los monitores de neutrones de la Ciudad de México, Roma y Oulu para determinar los decrecimientos Forbush (dF) más intensos del Ciclo Solar 24, con base en su rigidez umbral ( $8.23 \text{ GeV}$ ).

Con base en el análisis realizado, se encontraron 1 dF en 2009, 4 en 2010, 8 en 2011, 14 en 2012, 11 en 2013, 14 en 2014, 9 en 2015, 6 en 2016, 2 en 2017 y uno en 2018 como se muestra en las Tablas 5.0.1 a 5.0.10.

No ocurrieron dF significativos en el 2008.

Como se muestra en el capítulo 5, se catalogaron 70 dF para el Ciclo Solar 24. 54 Corresponden a los dFs generados por una EMCI, 11 corresponden a dF generados por una RIC y 5 son debidos a la suma de los dos efectos.

Se relacionó el número de dF con la actividad solar; cerca del máximo los dF son más numerosos y también más intensos.

La suma de dos perturbaciones o más en la magnetósfera terrestre puede ocasionar que un dF sea más intenso, como se observa en los eventos 3, 4 y 5 de la sección 5.1.

Los dF ocasionados por RICs son menos intensos que los dF ocasionados por EMCI, además de que son menos numerosos y se presentan con mayor intensidad en la fase descendente del Ciclo Solar 24.

Con base en el análisis desarrollado en la sección 5.1, se determina que los dF pueden ser ocasionados por la suma de dos o más perturbaciones en el medio interplanetario.

La hora de inicio del dF y la hora a la que se presenta la interacción con la perturbación electromagnética difieren. La perturbación inicia al momento de la interacción con el campo geomagnético y el dF inicia al momento que la caída en las cuentas de rayos cósmicos detectados por los monitores de neutrones cae significativamente.

El grosor radial es un valor estimado tomando en cuenta  $v = d/t$ . Este valor sirvió para inferir el tamaño de la perturbación electromagnética. Pero esto no representa una relación concluyente con la magnitud del dF o con la tormenta geomagnética causada y sólo es un estimado del tamaño de las estructuras electromagnéticas que perturban el campo magnético terrestre.

La Región de Interacción de Corrientes (RIC), es una estructura dinámica que se encuentra generalmente bien definida cerca del mínimo solar donde la configuración del campo magnético es la más estable. Sin embargo, no se registraron decrecimientos Forbush de gran intensidad relacionados a una RIC durante los años cercanos al mínimo. Podría esperarse que si la RIC es la estructura mejor definida en el mínimo de actividad solar, entonces esa sea la causante de un mayor número de dF en ese periodo de la actividad, pero no fue así. Este fenómeno se debe a que durante el máximo de la actividad solar, las regiones de viento solar rápido en la corona son impredecibles, son más numerosas y, sobre todo, están distribuidas sin un patrón definido.

Como el viento solar rápido surge de los hoyos coronales y estos a su vez son más numerosos durante el máximo de actividad, se infiere que durante el periodo de máxima actividad solar, se encuentre la mayor cantidad de dF relacionados con RICs.

Dado que durante la realización de este trabajo el Sol no ha concluido su ciclo de actividad, es pertinente que se complete el análisis con futuros dF. Además, este estudio se puede aplicar a los dF que pertenecen a los ciclos solares pasados.

# Bibliografía

- [1] Scott E Forbush. On the effects in cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm. *Physical Review*, 51(12):1108, 1937. 3, 36
- [2] abuffone. <http://buffonescience7.wikispaces.com/3>, @BOOKLET, 2016. URL <http://buffonescience7.wikispaces.com/3>. VIII, 5
- [3] Edward G Gibson. The quiet sun. 1973. 6, 7, 9
- [4] Pål Brekke. The sun: A variable star. In *Our Explosive Sun*, pages 70–81. Springer, 2012. VIII, 6
- [5] Kenneth Lang. *The sun from space*. Springer Science & Business Media, 2008. VIII, 6, 11
- [6] Space Weather Prediction Center National Oceanic and Atmospheric Administration. Sunspots/solar cycle, 2017. URL <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/sunspotssolar-cycle>. VIII, 7
- [7] Jerry Lodrigus. 2017 total solar eclipse, high dynamic range corona, 2017. URL [http://www.astropix.com/eclipse/2017\\_Total\\_Solar\\_Eclipse\\_HDR\\_Corona.html](http://www.astropix.com/eclipse/2017_Total_Solar_Eclipse_HDR_Corona.html). VIII, 9
- [8] Paul A. Heckert. Coronal holes and coronal mass ejections. *Salem Press Encyclopedia of Science*, 2017. URL <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ers&AN=87998270&lang=es&site=eds-live>. 9
- [9] Mark S. Miesch. The solar dynamo. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1970):3049–3069, 2012. doi: 10.1098/rsta.2011.0507. 10
- [10] Rob Garner. Nasa: Understanding the magnetic sun, 2016. URL <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/understanding-the-magnetic-sun>. VIII, 11
- [11] Jack B Zirker. Coronal holes and high-speed wind streams. *Reviews of Geophysics*, 15(3):257–269, 1977. 13
- [12] Veronika S Heber, Heinrich Baur, Peter Bochsler, Kevin D McKeegan, Marcia Neugebauer, Daniel B Reisenfeld, Rainer Wieler, and Roger C Wiens. Isotopic mass fractionation of solar wind: Evidence from fast and slow solar wind collected by the genesis mission. *The Astrophysical Journal*, 759(2):121, 2012. 13
- [13] S Perri and A Balogh. Stationarity in solar wind flows. *The Astrophysical Journal*, 714(1):937, 2010. 13
- [14] Space Weather Prediction Center National Oceanic and Atmospheric Administration. Coronal holes, 2014. URL <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/coronal-holes>. 13
- [15] DF Webb and P Murdin. Solar wind: Manifestations of solar activity. *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, Nature Publishing Group, 2001. 18

- [16] Omar Octavio Musalem Ramírez. Análisis de los fenómenos solares e interplanetarios causantes de los de-  
crecimientos forrush en los rayos cósmicos. Master's thesis, UNAM, 2015. VII, 14, 18, 28, 29, 32
- [17] Craig Nahide Luhmann Janet Michelle Larson Mendez Bryan, Peticolas Laura. Exploring magnetism a tea-  
cher is magnetism activity guide. [urlhttp://cse.ssl.berkeley.edu](http://cse.ssl.berkeley.edu), 2004. VIII, 15
- [18] Jean-Claude Vial and Oddbjørn Engvold. *Solar Prominences*. Springer, 2015. 15
- [19] Harold Zirin and Einar Tandberg-Hanssen. Physical conditions in limb flares and active prominences. iv.  
compersion of active and quiescent prominences. *The Astrophysical Journal*, 131:717, 1960. 16
- [20] Donald Howard Menzel and John Wainwright Evans. *The behavior and classification of solar prominences*.  
Solar Department of Harvard College Observatory, Harvard Univ., 1953. 16
- [21] National Aeronautics and Space Administration. Coronal mass ejections, 2014. URL [https://  
solarscience.msfc.nasa.gov/CMEs.shtml](https://solarscience.msfc.nasa.gov/CMEs.shtml). 16
- [22] Timothy Howard. *Coronal mass ejections: An introduction*, volume 376. Springer Science & Business  
Media, 2011. VIII, 16, 17, 18, 19, 48
- [23] Bojan Vršnak, Mateja Dumbović, Jaša Čalogović, Giuliana Verbanac, and Ivana Poljanić-Beljan. Geomag-  
netic effects of corotating interaction regions. *Solar Physics*, 292(9):140, 2017. 19
- [24] Ian G Richardson. Energetic particles and corotating interaction regions in the solar wind. *Space Science  
Reviews*, 111(3-4):267–376, 2004. 20
- [25] Volker Bothmer and Ioannis A Daglis. *Space weather: physics and effects*. Springer Science & Business  
Media, 2007. VII, 14, 20
- [26] SolarCycleScience. Discover the solar cycle, 2017. URL [http://solarcyclescience.com/  
solarcycle.html](http://solarcyclescience.com/solarcycle.html). 21
- [27] Jr. Benge, Raymond D. Solar cycle. *Salem Press Encyclopedia of Science*, 2013. URL  
[http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.  
aspx?direct=true&db=ers&AN=89475848&lang=es&site=eds-live](http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ers&AN=89475848&lang=es&site=eds-live). 21
- [28] Randall L. Milstein. Shock waves. *Salem Press Encyclopedia of Science*, 2013. URL  
[http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.  
aspx?direct=true&db=ers&AN=89317207&lang=es&site=eds-live](http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ers&AN=89317207&lang=es&site=eds-live). 21
- [29] Richard Fitzpatrick. Introduction to plasma physics. *The University of Texas at Austin: sn*, page 242, 2008.  
22, 23
- [30] Carl D Anderson. The apparent existence of easily deflectable positives. *Science*, 76(1967):238–239, 1932.  
28
- [31] GD Rochester and Clifford Charles Butler. Evidence for the existence of new unstable elementary particles.  
*Nature*, 160(4077):855, 1947. 28
- [32] Javier A Otaola, José F Valdés-Galicia, IV EL CAMPO GEOMAGNÉTICO, and UN ANALIZADOR DE.  
*Los rayos cósmicos: mensajeros de las estrellas*. Fondo de Cultura Económica, 1992. VII, 29
- [33] Luke O'C Drury. Origin of cosmic rays. *Astroparticle Physics*, 39:52–60, 2012. 29



- [34] L.I. Dorman and I.V. Dorman. *Cosmic Ray History*. Space science, exploration and policies. Nova Science Publishers, Incorporated, 2014. ISBN 9781633218376. URL <https://books.google.com.mx/books?id=1PXpoQEACAAJ>. 29
- [35] Thomas K Gaisser, Ralph Engel, and Elisa Resconi. *Cosmic rays and particle physics*. Cambridge University Press, 2016. IX, 29, 30
- [36] KA Firoz and K Kudela. Cosmic rays and low energy particle fluxes. *WDS'07 Proceedings of Contributed Papers*, pages 106–110, 2007. 30
- [37] Douglas R Bergman and John W Belz. Cosmic rays: the second knee and beyond. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 34(10):R359, 2007. 30
- [38] Cosmic ray spectra of various experiments. <http://www.physics.utah.edu/whanlon/spectrum.html>. Visitado: 2017-09-30. IX, 30, 31
- [39] Alexander Aab, Pedro Abreu, Marco Aglietta, Imen Al Samarai, IFM Albuquerque, Ingomar Allekotte, Alejandro Almela, J Alvarez Castillo, Jaime Alvarez-Muñiz, GA Anastasi, et al. Inferences on mass composition and tests of hadronic interactions from 0.3 to 100 eev using the water-cherenkov detectors of the pierre auger observatory. *Physical Review D*, 96(12):122003, 2017. 30
- [40] MVS Rao and Badanaval Venkata Sreekantan. *Extensive air showers*. World scientific, 1998. 32
- [41] Malcolm S Longair. *High energy astrophysics*. cambridge university Press, 2011. 32
- [42] John C Gosse and Fred M Phillips. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quaternary Science Reviews*, 20(14):1475–1560, 2001. IX, 33
- [43] María Guadalupe Cordero Tercero, Alejandro Lara Sánchez, María Dolores Maravilla Meza, Mendoza Ortega, Blanca Emma, and José Francisco Valdés Galicia. Introducción a la física espacial, 2013. IX, IX, 34, 35
- [44] K Herbst, A Kopp, and B Heber. Influence of the terrestrial magnetic field geometry on the cutoff rigidity of cosmic ray particles. In *Annales Geophysicae*, volume 31, page 1637. Copernicus GmbH, 2013. 36
- [45] AJ Dean, AJ Bird, N Diallo, C Ferguson, JJ Lockley, SE Shaw, MJ Westmore, and DR Willis. The modelling of background noise in astronomical gamma ray telescopes. *Space Science Reviews*, 105(1-2):285–376, 2003. IX, 36
- [46] Hilary V Cane. Coronal mass ejections and forbush decreases. *Space Science Reviews*, 93(1-2):55–77, 2000. 37, 39
- [47] IG Richardson and HV Cane. Galactic cosmic ray intensity response to interplanetary coronal mass ejections/magnetic clouds in 1995–2009. *Solar Physics*, 270(2):609–627, 2011. IX, 37, 39
- [48] UNAM. Observatorio de rayos cosmicos de la ciudad de mexico, @BOOKLET, 2013. URL <http://www.cosmicrays.unam.mx/aboutorc.html>. IX, 43, 44
- [49] Neutron monitor database. <http://www.nmdb.eu>. Visitado: 2017-09-30. 43, 51
- [50] CJ Y CAMERAS RICKARDS and R Cameras. Rr las radiaciones ii: El manejo de las radiaciones nucleares. *Mxico: Fondo de Cultura Econmica*, 1995. 44
- [51] Rocio Garcia Ginez. *Estimacion del espectro de alturas de pulsos con correccion del efecto apilamiento para el monitor de neutrones 6nm 64*. UNAM, 2014. IX, 45

- [52] Goddard space flight center space physics data facility. <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>. Visitado: 2017-09-30. 47, 55
- [53] Margaret G Kivelson and Christopher T Russell. *Introduction to space physics*. Cambridge university press, 1995. 48
- [54] Volker Bothmer and Ioannis A Daglis. *Space weather: physics and effects*. Springer Science & Business Media, 2007. IX, 49, 50