



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Variaciones en el Flujo de los Rayos
Cósmicos Detectados por el Telescopio de
Neutrones Solares (TNS) en Sierra Negra
Atribuidas a Tormentas Geomagnéticas**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA
TIERRA**

P R E S E N T A:

SEBASTIAN PEREA CONTRERAS



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. LUIS XAVIER GONZÁLEZ MÉNDEZ**

CD. 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.

1. Datos del alumno

Perea

Contreras

Sebastian

55 11 56 08

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Ciencias de la Tierra

311689039

2. Datos del asesor

Dr.

Luis Xavier

González

Méndez

3. Datos del sinodal 1

Dr.

Mario

Rodríguez

Martínez

4. Datos del sinodal 2

Dr.

Julio César

Mejía

Ambriz

5. Datos del sinodal 3

Dr.

Oscar Gustavo

Morales

Olivares

6. Datos del sinodal 4

Dra.

Marni Margarita

Pazos

Espejel

7. Datos del trabajo escrito

Variaciones en el flujo de los rayos cósmicos detectados por el Telescopio de Neutrones Solares (TNS) en Sierra Negra atribuidas a tormentas geomagnéticas.

80 p.

2018

Dedicatoria

A mis padres, quienes me han dado las herramientas para llegar a este momento tan importante en mi formación profesional a través de su amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida. Las metas que cumpla también son suyas...

A toda mi familia, amigos y personas que han sido parte importante de mi vida, pues de alguna forma han aportado en ser quien soy hoy en día.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme una educación de excelencia y darme la oportunidad de vivir grandes experiencias.

Al Dr. Luis Xavier González Méndez, por su confianza, enseñanzas, apoyo y asesoría en este trabajo y otros aspectos de mi formación profesional. Por su disposición y por siempre decir las cosas como son.

A todas las profesoras y profesores que influyeron en mi formación académica durante todos mis años escolares.

ÍNDICE

RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO I: EL SOL Y LAS EMISIONES SOLARES	9
CARACTERÍSTICAS GENERALES	10
ESTRUCTURA SOLAR INTERNA	11
EL NÚCLEO SOLAR	12
ZONA RADIATIVA	12
ZONA CONVECTIVA	13
LA ATMÓSFERA SOLAR	14
FOTÓSFERA, LA "SUPERFICIE SOLAR"	14
CROMÓSFERA	15
CORONA	17
ACTIVIDAD SOLAR Y SUS EMISIONES	19
ORIGEN DE LA ACTIVIDAD SOLAR	19
FULGURACIONES	20
REGIONES DE INTERACCIÓN CORROTANTE (RICs)	21
FILAMENTOS	21
EYECCIONES DE MASA CORONAL (EMC)	22
CAPÍTULO II: RAYOS CÓSMICOS	24
2.1. DEFINICIÓN	25
2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA	26
2.3 ESPECTRO DE ENERGÍA	28
2.4. MODULACIÓN SOLAR DE RAYOS CÓSMICOS	30
2.4.1. VARIACIÓN DIURNA	31
2.4.2. DECRECIMIENTO FORBUSH	32
2.4.3. LOS CICLOS DE 11 AÑOS Y DE 22 AÑOS	32
2.5. MODULACIÓN GEOMAGNÉTICA DE RAYOS CÓSMICOS	34
2.5.1. RIGIDEZ UMBRAL (EFECTO LATITUDINAL)	34
2.5.2. EFECTO ESTE-OESTE	35
2.6 INTERACCIÓN ATMOSFÉRICA	37
2.6.1. CHUBASCO DE PARTÍCULAS	37
CAPÍTULO III: TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS E ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS	39
3.1. CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE	40
3.1.1. ELEMENTOS DEL CAMPO GEOMAGNÉTICO	40
3.2. LA MAGNETÓSFERA	42
3.2.1. LOS ANILLOS DE RADIACIÓN	44
3.2.2. CORRIENTES ELÉCTRICAS EN LA MAGNETÓSFERA	45

3.3. TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS	46
3.4. ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS	47
3.4.1. ÍNDICE K	47
3.3.2. ÍNDICE DST	47
<i>CAPITULO IV: TELESOPIO DE NEUTRONES SOLARES Y LA RED MUNDIAL DE OBSERVATORIOS</i>	49
4.1. INTRODUCCIÓN	50
4.2. TELESCOPIO DE NEUTRONES SOLARES (TNS).	51
4.2.1. PRINCIPIO DE DETECCIÓN DEL TNS EN SIERRA NEGRA	53
4.3. EVENTOS DETECTADOS POR LOS TNS	57
4.3.1. EVENTOS DETECTADOS PORT EL TNS-SN	57
<i>CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y RESULTADOS</i>	59
5.1. CRITERIO DE SELECCIÓN DE DATOS	60
5.2. RESULTADOS	62
CONCLUSIONES	74
REFERENCIAS	77

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló un estudio de la influencia de las siete tormentas geomagnéticas más intensas del 2015 en el flujo de rayos cósmicos detectado por el Telescopio de Neutrones Solares en Sierra Negra (TNS-SN). Se utilizaron como base las variaciones en la intensidad de los índices Dst y Kp, así como datos horarios del TNS-SN, instalado a 4580 m s.n.m. Con base en el análisis desarrollado, se concluyó que la profundidad atmosférica del TNS-SN es un factor determinante en la detección de variaciones significativas relacionadas con tormentas geomagnéticas, ya que la variación diurna detectada está amplificada. El TNS-SN puede registrar de forma eficiente eventos de corta duración y muy energéticos. Para poder detectar eventos menos energéticos y mayor duración es necesario que el porcentaje de variación del detector al momento del evento sea mayor al 5% del promedio de los datos y que la variación diurna amplificada sea menor. Ahora sabemos, que el TNS-SN es un buen instrumento para detectar del flujo de la componente más energética de los rayos cósmicos secundarios y que está diseñado para detectar de forma eficiente eventos de partículas energéticas solares, generadas en las fulguraciones.

INTRODUCCIÓN

El estudio de los rayos cósmicos comprende su origen, los procesos físicos que los aceleran, su composición, la interacción en la heliósfera y el medio interplanetario y con el campo magnético y atmósfera de la Tierra. Sumado a esto, las variaciones registradas por detectores de radiación cósmica nos ayudan a entender fenómenos solares, interplanetarios e incluso terrestres que modulan la intensidad registrada por detectores en la superficie.

Las tormentas geomagnéticas, producto de la interacción entre eventos solares energéticos y el campo geomagnético, son un fenómeno de escala global que produce variaciones significativas en la intensidad de rayos cósmicos detectados en la superficie.

En México, se utiliza el monitor de neutrones de la CDMX (MN-CDMX) en Ciudad Universitaria para estudiar las variaciones de los rayos cósmicos, siendo de gran relevancia por su ubicación geográfica cercana al ecuador y que se traduce en una alta rigidez magnética. Además, se cuenta con el Telescopio de Neutrones Solares de Sierra Negra (TNS-SN), para complementar el estudio de las variaciones del flujo de rayos cósmicos con relación a distintos fenómenos solares y atmosféricos. Ambos equipos se encuentran a cargo del Instituto de Geofísica de la UNAM.

En la presente tesis, se analizaron los datos registrados por el TNS-SN durante 7 tormentas geomagnéticas en el año 2015. El objetivo es observar cómo es la respuesta en el registro del flujo de partículas del TNS-SN y determinar si es un equipo confiable para el estudio de estos eventos.

El primer capítulo de este trabajo describe las distintas estructuras que conforman al Sol, desde el interior hasta la atmósfera. Se explican, de manera muy

general, los procesos que dan origen a la actividad solar y las distintas manifestaciones de esta. A partir de la interacción de la actividad solar con el campo geomagnético, es que pueden suceder las tormentas geomagnéticas.

El capítulo 2 trata sobre los rayos cósmicos. Se explica su origen, composición química y espectro de energía. También se describe su interacción dentro de la heliósfera con el campo magnético interplanetario; así como su modulación dentro de la magnetósfera y la atmósfera terrestre, para su posterior detección en superficie.

En cuanto al capítulo 3, se define el fenómeno de tormenta geomagnética, crucial en el desarrollo de esta tesis. Para esto, se describe el campo geomagnético y su interacción con el viento solar. Además, se mencionan las distintas regiones de la magnetósfera terrestre y los fenómenos que en ellas suceden, que repercuten en la intensidad del campo geomagnético. Por último, se habla de los índices más utilizados en superficie para medir la intensidad del campo geomagnético y sus variaciones.

En el capítulo 4, se describe el funcionamiento del TNS para la detección de la radiación cósmica, haciendo hincapié en el equipo instalado en la cima de Sierra Negra, Puebla. El registro de datos por parte del TNS-SN es el punto fundamental del presente trabajo.

En el capítulo 5, se presenta el criterio de selección de datos y se muestran los resultados obtenidos a partir de una serie de gráficas. También, se discuten los fenómenos físicos que explican dichos resultados.

Por último, se presentan y desarrollan las conclusiones a las que se llegaron a partir del análisis de los resultados.

CAPÍTULO I

EL SOL Y LAS EMISIONES SOLARES

CARACTERÍSTICAS GENERALES

El Sol es la estrella de nuestro Sistema Solar y constituye el 99.9% de la masa del mismo. Se trata de una estrella promedio de las más de cien mil millones que conforman nuestra galaxia y actualmente se encuentra en la fase media de su vida. Está compuesto básicamente por Hidrógeno (92.1%), Helio (7.8%) y otros elementos químicos más pesados que no sobrepasan el 0.1%.

El Sol presenta un movimiento de rotación en la misma dirección que la Tierra, pero con una inclinación de 7° respecto al plano de la órbita. A diferencia de un cuerpo rígido, tiene una rotación diferencial, lo que significa que el gas en el ecuador y las regiones cercanas a éste giran más rápido que el de las zonas polares. La tabla 1.1. muestra algunos de los principales parámetros físicos del Sol.

La distancia media entre el Sol y la Tierra es de ~150 millones de kilómetros, distancia a la cual por convención se le ha llamado Unidad Astronómica (U.A.).

Volumen	1.412 x10 ²⁷ m ³ (1.3 millones Tierras)
Luminosidad	3.854 x10 ²⁶ W
Masa	1.989 x10 ³⁰ Kg (332,946 masas terrestres)
Radio	6.955 x10 ⁸ m (109 radios terrestres)
Distancia media al Sol	1.4959787 x10 ¹¹ m
Temperatura en la fotosfera	5780 K
Temperatura en la corona	2-3 x10 ⁶ K
Temperatura en el núcleo	15.6 x10 ⁶ K
Densidad media	1409 kg m ⁻³
Densidad en el núcleo	151300 kg m ⁻³
Presión en el núcleo	2.334 x10 ¹⁶ Pa
Presión en la fotosfera	10 Pa
Constante solar	1361 W m ⁻²
Edad	4.55 x10 ⁹ años

Tabla 1.1. Principales parámetros físicos del Sol, tomada de [1].

ESTRUCTURA SOLAR INTERNA

Prácticamente toda la materia que compone al Sol se encuentra en el interior de este. A partir de modelos teóricos y de observaciones indirectas es que podemos en cierta forma entender y estudiar lo que pasa en esta región, pues es completamente opaca y no podemos ver nada de ella. La descripción más aceptada para explicar la estructura y dinámica solar es un modelo de capas, como se presenta en la figura 1.1.

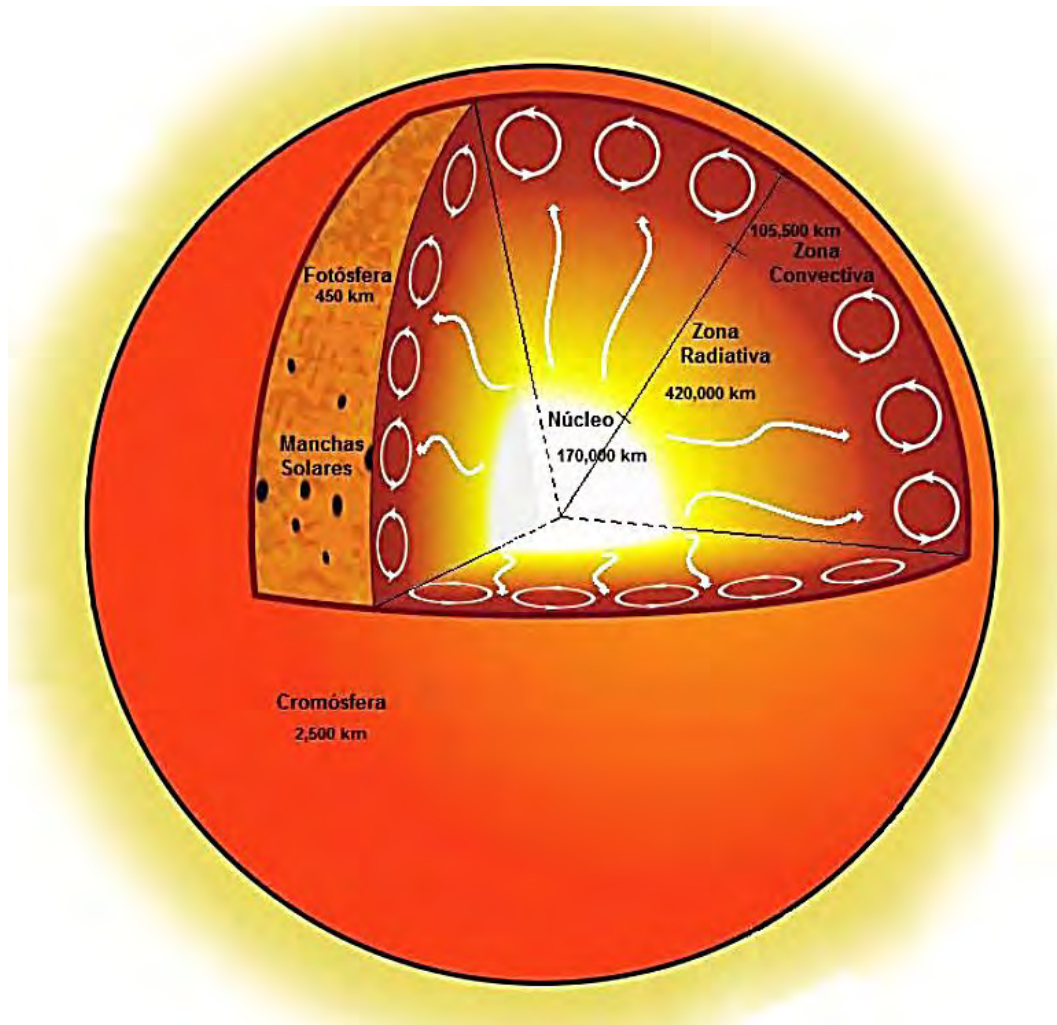


Figura 1.1. Esquema del interior solar, donde se muestra el espesor promedio de cada una de las capas que lo conforman. Imagen obtenida de [2].

EL NÚCLEO SOLAR

El núcleo es la fuente de energía del Sol, donde suceden las reacciones nucleares exotérmicas de fusión. Representa solamente el 2% del volumen solar, pero en este volumen se encuentra aproximadamente la mitad de su masa. Está compuesto de 49% de Hidrógeno, 49% de Helio y de 2% de otros elementos que funcionan básicamente como catalizadores en las reacciones nucleares [1].

Con una temperatura de aproximadamente 15×10^6 K, una densidad 15 veces mayor a la del plomo y presiones de hasta 2.334×10^{16} Pa, los núcleos atómicos (principalmente protones) y electrones pueden desplazarse a muy altas velocidades. Bajo estas condiciones los núcleos pueden colisionar unos con otros, vencer su respectiva repulsión eléctrica y unirse mediante la fuerza nuclear fuerte. De este proceso resultan la formación de elementos más pesados, así como la liberación de energía en forma de rayos gamma (γ). Las reacciones mediante las cuales se da este proceso en el Sol son básicamente las p-p y el ciclo CNO, correspondiendo al 99% y 1% del proceso de fusión, respectivamente [2,3].

ZONA RADIATIVA

Rodeando al núcleo y a toda la energía que este produce tenemos la zona radiativa, la cual tiene una clase de efecto aislante que ayuda a mantener la temperatura del núcleo. Se encuentra entre 0.25 y 0.8 radios solares, constituyendo el 32% del volumen del Sol y 48% de su masa.

En esta zona, la energía es transportada por fotones mediante el proceso de radiación, donde los núcleos atómicos absorben y reemiten repetidamente los γ producto de la fusión nuclear en el núcleo, provocando que los fotones disminuyan en energía y aumenten su longitud de onda progresivamente.

La densidad en esta zona sigue siendo tan alta que a un fotón le puede tomar hasta 50 millones de años atravesarla. Para entonces, las longitudes de onda de los fotones se encuentran mayormente en la región del espectro visible [3].

ZONA CONVECTIVA

Se encuentra entre 0.8 y 1 radios solares, constituyendo el 66% del volumen solar pero apenas 2% de su masa. En esta zona donde la temperatura comienza a descender y los fotones se absorben con facilidad la radiación comienza a ser menos significativa y la energía es transportada por el proceso de convección. El gradiente de temperatura entre la parte baja ($\sim 2 \times 10^6$ K) y la parte alta (~ 5800 K) provoca que el plasma caliente suba y el frío baje, formando celdas de convección. Las cimas de estas celdas convectivas pueden apreciarse en la superficie solar en forma de celdas de granulación (1000 km de diámetro) y supergranulación (hasta 30 000 km de diámetro). Esta circulación convectiva de plasma (partículas cargadas) genera grandes campos magnéticos que influyen de manera importante en la producción de manchas solares.

LA ATMÓSFERA SOLAR

Se extiende desde la parte superior de la zona convectiva y permea el medio interplanetario hasta regiones más allá de Plutón. A todo este volumen permeado por el viento solar se le llama heliósfera. Contamos con muchas observaciones que nos permiten estudiar y describir las capas que conforman la atmósfera y los fenómenos que suceden en ellas; sin embargo, dichos fenómenos son tan complejos que los modelos actuales no explican del todo las observaciones.

La atmósfera solar está compuesta por tres capas o estructuras: la fotosfera, seguida por la cromósfera y por último la corona. La fotosfera la apreciamos como el disco solar que vemos en el cielo, pero las otras dos capas solo las podemos distinguir durante los eclipses solares o usando coronógrafos.

FOTÓSFERA, LA “SUPERFICIE SOLAR”

Se trata de una capa delgada de entre 300 y 500 km de espesor, la cual emite su máximo de radiación en la región amarilla del espectro electromagnético, indicando que su temperatura media es de 5700 K. Se caracteriza por presentar la parte superior de las celdas convectivas provenientes del interior, conocidas como granulación. Casi toda la energía que llega del interior solar es radiada hacia el medio interplanetario en longitudes de onda correspondientes a la parte visible del espectro [4].

Es en esta capa, donde podemos encontrar zonas más oscuras las cuales son conocidas como manchas solares. Estas son estructuras magnéticas que emergen a la fotosfera, con intensidades de entre 1000 a 4000 Gauss y su tamaño varía de entre varios miles de kilómetros hasta más de 10^5 kilómetros. Observándolas detenidamente, encontramos que constan de una región central oscura llamada umbra rodeada de un halo menos oscuro denominado penumbra, que consta de

filamentos que parten desde la sombra de manera radial, como se muestra en la figura 1.2. La razón de que las manchas solares se observen más oscuras se debe a su temperatura, de 1000 – 1900 K más fría que el promedio de la fotosfera solar [5]. Las manchas solares presentan un ciclo de ~11 años entre máximos o mínimos, y a partir de esto se determina el ciclo de actividad solar.

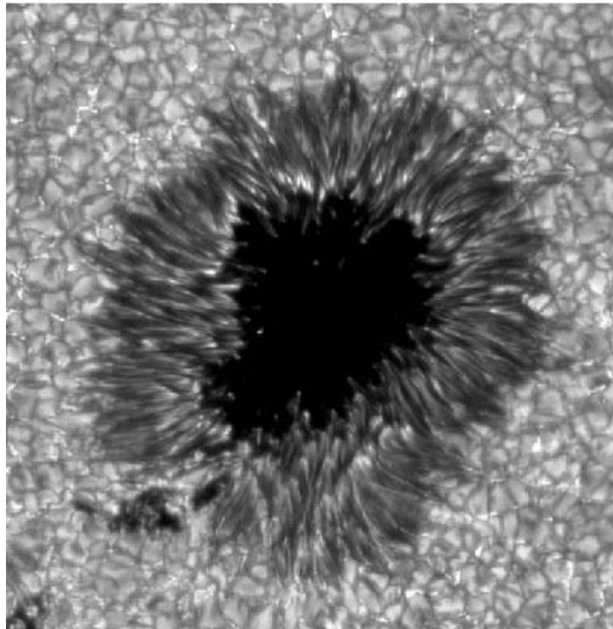


Figura 1.2. Imagen tomada en 4306 Å (óptico) de una mancha solar regular. La parte central oscura es la umbra y la región estriada que la rodea la penumbra. También se aprecian las celdas de granulación alrededor de esta. El diámetro de la mancha solar es de aproximadamente 30000 km. Tomada de [5].

CROMÓSFERA

Está situada entre la fotosfera y la corona, donde la temperatura empieza a ascender de forma radial, contrariamente a lo que se pensaría al estarse alejando de la fuente de calor. La definición de esta capa es difícil de acotar debido a la cantidad de fenómenos presentes en ella. Por su temperatura se podría definir como la región limitada por el mínimo de temperatura en la superficie solar y por el límite superior

donde la temperatura se encuentra alrededor de $1-2 \times 10^4$ K (aproximadamente a 2000 km sobre superficie del Sol) [6].

Se considera como un fluido magnético parcialmente ionizado que presenta un comportamiento hidrodinámico, regido por los fenómenos magnéticos originados en el interior solar y en la misma cromósfera. Tales procesos denominados magnetohidrodinámicos dan lugar a fenómenos como las espículas, playas cromosféricas, filamentos, entre otros. Todas estas estructuras son estudiadas observando a la cromósfera en diferentes longitudes de onda, las cuales pueden dar a conocer los mecanismos físicos que suceden. Las líneas espectrales dominantes son las del H_α (Figura 1.3) y las del EUV [7].

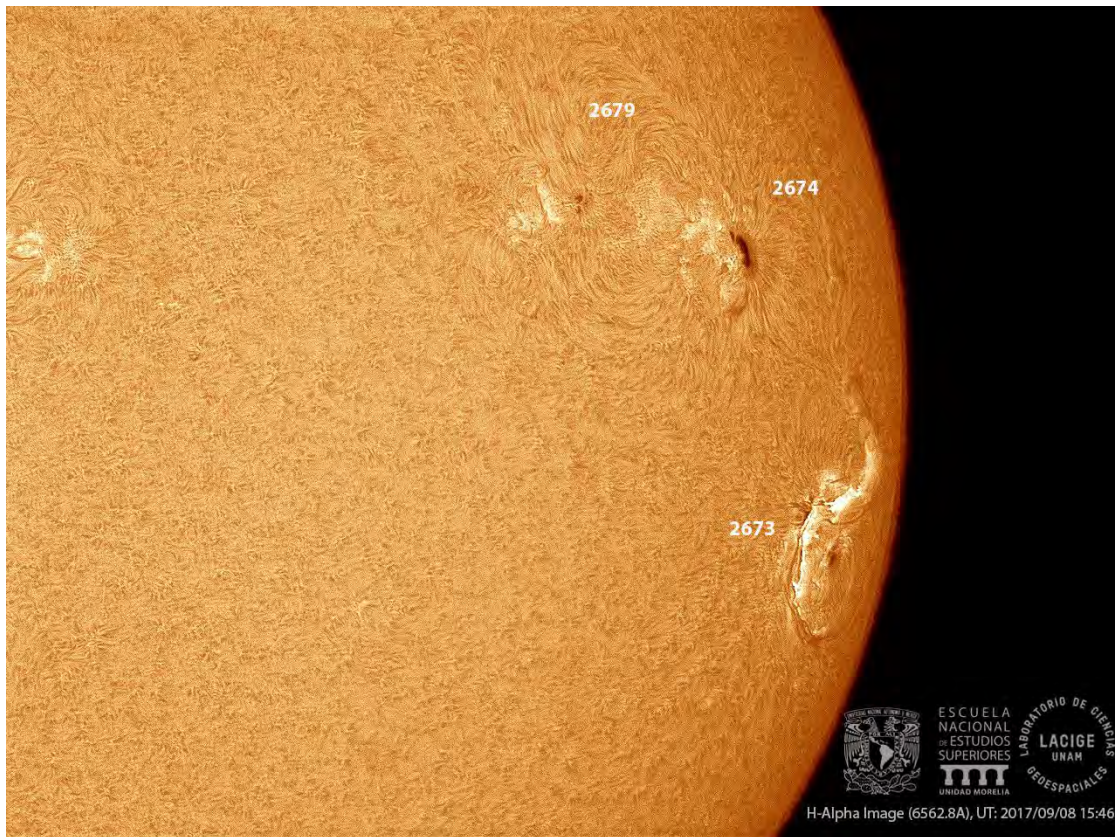


Figura 1.3. Imagen de la cromósfera tomada en H_α donde se observan tres zonas activas, identificadas por un número, relacionadas con manchas solares. Proporcionada por [8].

CORONA

La corona es la región más externa de la atmósfera solar y es la última frontera del Sol, permeando todo el espacio interplanetario hasta aproximadamente 150 unidades astronómicas (UA), donde se estima termina la heliósfera. La corona puede dividirse en interna y externa (Figura 1.4).

La corona interna puede verse como un halo blanco que rodea el disco solar, el cual se extiende varios millones de kilómetros hacia el espacio. A partir de observaciones satelitales del espectro, principalmente en longitudes de onda correspondientes al ultravioleta y los rayos X, se pueden identificar especies atómicas fuertemente ionizadas, indicando que las temperaturas son muy elevadas, del orden de 2×10^6 K. La causa de esta súbita variación en la temperatura aún no es bien entendida y se han propuesto algunos mecanismos para explicarla, destacando la disipación de ondas y la disipación de campos magnéticos intensos [2].

De las observaciones podemos identificar en las imágenes regiones densas y magnéticamente activas más brillantes. Estas regiones tienen una naturaleza dipolar, indicando que la mayor parte de las líneas de campo se cierran en la misma región y forman un campo magnético cerrado. Por otro lado, encontramos regiones de muy baja intensidad magnética que se observan más oscuras denominadas hoyos coronales, y a partir de los cuales las líneas de campo magnético se abren libremente hacia el espacio interplanetario (aunque se cree que las líneas de campo cierran en los límites de la heliósfera). Al tener un campo abierto, el material coronal puede escapar libremente y forma el viento solar rápido, que tiene una velocidad mayor a 400 km/s y llega a alcanzar los 1000 km/s.

La corona externa se extiende hasta la frontera de la heliósfera y constituye todo el flujo de plasma que permea el medio interplanetario. Este flujo fue propuesto por Ludwig Biermann a principios de los 50's mediante observaciones de la dirección de la cola de los cometas y posteriormente descrita por Eugene Parker en 1958, mediante modelos teóricos que explicarían el equilibrio dinámico de la corona.

A este flujo se le conoce como viento solar y su velocidad promedio es de 400 km/s en el mínimo solar [3].

La distribución espacial del viento solar varía de manera significativa durante el ciclo solar. Mientras que en el mínimo solar, los hoyos coronales por donde sale viento solar rápido se limitan prácticamente a los polos solares, durante el máximo solar las estructuras magnéticas son más complicadas y los hoyos coronales pueden presentarse en latitudes más bajas.

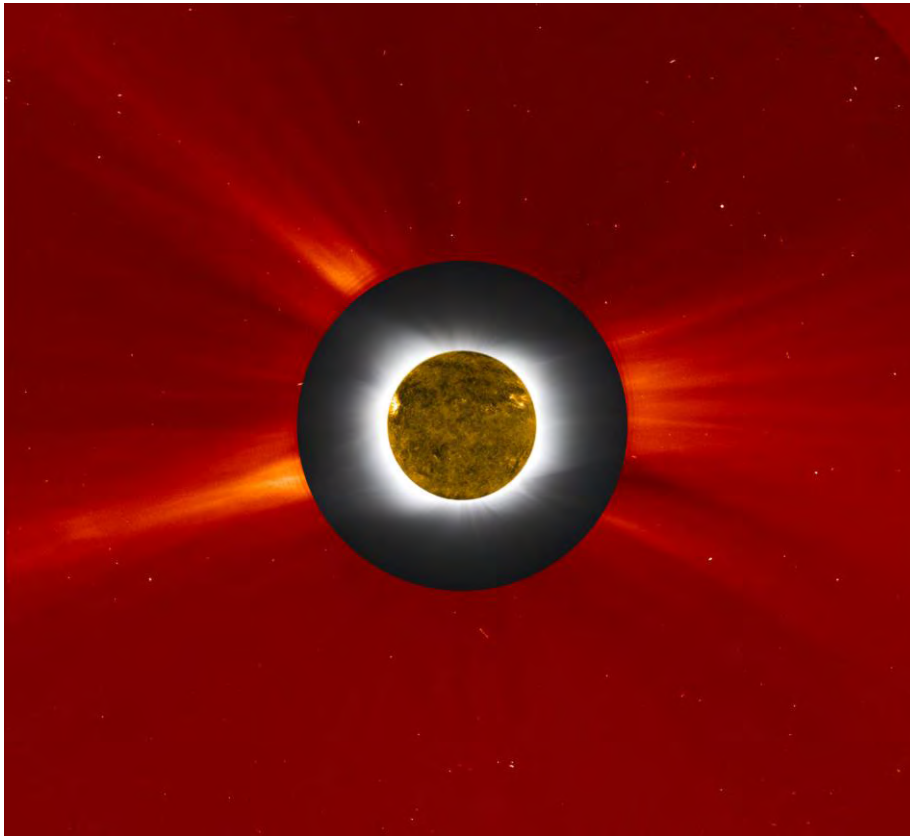


Figura 1.4. Se muestran tres imágenes superpuestas tomadas al mismo tiempo durante un eclipse solar. En la foto del eclipse solar (blanco y gris), donde se muestra la corona interna, se reemplazó la silueta de la Luna por una imagen del Sol tomada en el extremo ultravioleta por el SDO. Después, se agregó una imagen de corona externa (rojo) tomada por el satélite SOHO. Tomada de [9].

ACTIVIDAD SOLAR Y SUS EMISIONES

ORIGEN DE LA ACTIVIDAD SOLAR

La actividad solar está íntimamente relacionada con la actividad magnética que presenta el Sol, por lo que entender el campo magnético solar y su evolución temporal y espacial es de suma importancia. Se piensa que tiene su origen en la región cercana a la base de la zona convectiva, donde sucede un fenómeno de dinamo que genera un campo magnético constante y autosostenido, similar al que se genera en el núcleo externo fluido de la Tierra. El dinamo solar ocurre en consecuencia de la rotación diferencial que presenta el Sol, mencionada en la sección 1.1, misma que logra cambiar la estructura del campo dipolar poloidal al deformar las líneas de campo magnético cerca del ecuador, hasta formar un campo toroidal. No obstante, a través de varios procesos físicos complejos, se puede regresar de una configuración de campo toroidal a una poloidal, con la excepción de que esta tendrá una polaridad opuesta [10].

El cambio entre una configuración y otra se presenta aproximadamente cada 5.5 años, produciendo un ciclo de 11 años conocido como ciclo Schwabe o simplemente como ciclo solar (esta duración no es constante, puede variar entre 9 y 12 años). Cada configuración puede verse reflejada en la cantidad de manchas solares presentes en la fotosfera, por las que emergen líneas campo magnético.

Cuando inicia un ciclo, las manchas solares surgen en latitudes medias ($\pm 30^\circ$) y conforme transcurre el ciclo aparecen cada vez más cerca del Ecuador. Estas pueden aparecer solas o en grupo, los cuales dependiendo de su interacción (entre otros factores) causaran una mayor actividad magnética.

Cada 22 años hay una inversión del campo magnético solar, resultando en el ciclo magnético del Sol.

FULGURACIONES

Este fenómeno, conocido también como ráfaga, se define como una súbita liberación de energía. La cantidad de energía liberada puede llegar a ser de 10^{34} erg en cuestión de minutos [2], lo que permite acelerar grandes cantidades de masa de la atmósfera solar, emitiendo radiación electromagnética en todas las longitudes de onda. Los mecanismos que dan lugar a estas “explosiones” aún no están explicados del todo, pero se sabe que son producto de la energía magnética disponible en la atmósfera solar, la cual es mayor en regiones activas. En estas regiones se pueden deformar los campos magnéticos debido a la rotación diferencial del Sol, al grado de alcanzar una completa desestabilización; si sucede esto, las líneas de campo se “rompen” y reconectan para adquirir una configuración de menor energía, acelerando las partículas que se encuentran en la zona de reconexión hasta velocidades relativistas. A este proceso se le conoce como reconexión magnética y se puede presentar mediante otros mecanismos.

La evolución de una fulguración sigue una serie de pasos: comienza por una fase precursora que dura 10-30 minutos, en la cual la radiación de rayos X suaves y EUV predomina y corresponde a un incremento en la energía libre. Posteriormente se encuentra la fase impulsiva de 10-1000 segundos de duración, donde se observan γ , rayos X duros y micro-ondas generados en el proceso de reconexión magnética. Por último, se encuentra la fase gradual en la que las partículas aceleradas en la fase impulsiva viajan por la atmósfera solar y excitan las partículas que encuentren, las cuales radian su exceso de energía [10].

Al ser los rayos X una parte importante de la radiación producida en una fulguración, se utiliza una clasificación con base al flujo de energía en su ancho de banda (1-8 Å) registrado por el satélite GOES. Esta clasificación usa una letra que indica el orden de magnitud del flujo y un número por el cual se multiplica dicha base. De este modo, la clasificación de las fulguraciones son:

- $A \Rightarrow 10^{-8} \text{ W m}^{-2}$
- $B \Rightarrow 10^{-7} \text{ W m}^{-2}$
- $C \Rightarrow 10^{-6} \text{ W m}^{-2}$
- $M \Rightarrow 10^{-5} \text{ W m}^{-2}$
- $X \Rightarrow 10^{-4} \text{ W m}^{-2}$

Por ejemplo, una fulguración tipo X2 tendrá un flujo de $2 \times 10^{-4} \text{ W m}^{-2}$.

REGIONES DE INTERACCIÓN CORROTANTE (RICs)

Como se mencionó anteriormente, los hoyos coronales emiten viento solar rápido. Este choca e interacciona con el viento solar de baja velocidad que se encuentra a su paso y crea las regiones de interacción corrotante. Dentro de estas regiones, la presión del plasma y el campo magnético presente se incrementa debido a la compresión [11]. Cuando este fenómeno sucede en dirección terrestre, puede repercutir severamente en el campo geomagnético.

FILAMENTOS

En la cromósfera baja encontramos estructuras largas en forma de cuerda caracterizadas por presentar líneas de campo magnético en forma helicoidal, las cuales se aprecian como nubes en las imágenes de $H\alpha$. Se forman en los límites entre regiones de polaridad magnética positiva y negativa, llamadas líneas neutras. Estas nubes de plasma y campo magnético se disipan y desaparecen en cuestión de días o semanas, pero en ocasiones lo hacen ascendiendo hacia la corona, formando los filamentos (vistos en el disco solar como estructuras oscuras) o prominencias (visto

en el limbo solar flotando en la corona) como se muestra en la figura 2.5. Los filamentos pueden desestabilizarse bruscamente y lanzar todo el material que contienen y el que se encuentra alrededor de ellos produciendo una eyección de masa coronal.



Figura 2.5. Imagen tomada por el Observatorio Solar de la ENES-UNAM, unidad Morelia donde se aprecia una prominencia. Tomada de [8].

EYECCIONES DE MASA CORONAL (EMC)

Las EMC son grandes erupciones de plasma y campo magnético de la corona solar. Podemos imaginarlas como burbujas de plasma que salen hacia el medio interplanetario a velocidades de entre 200-2000 km/s conteniendo inmensas toneladas de material coronal ($\sim 10^{15}$ g) y un campo magnético incrustado o “congelado” en el flujo [12]. Se trata del fenómeno eruptivo solar de mayor impacto en el medio interplanetario y por consiguiente en sus efectos sobre la Tierra. Son

producto tanto de fulguraciones y de filamentos, aunque hay que recalcar que no todas las fulguraciones y filamentos causan EMC.

Las EMC que viajan más rápido que el viento solar generan una onda de choque, la cual acelera a las partículas que encuentre a su paso y puede generar una mayor radiación. Esta onda de choque, junto con parámetros como su tamaño, velocidad y dirección, determinarán el impacto que tendrá una EMC sobre la Tierra, así como la configuración de las líneas de campo magnético que van congeladas en ellas. En el capítulo 3 veremos que cuando una EMC tiene las líneas de campo magnético direccionadas hacia el sur, llamada componente B_z , ocurren las tormentas geomagnéticas.

CAPÍTULO II

RAYOS CÓSMICOS

2.1. DEFINICI3N

Los rayos c3smicos pueden definirse en general como part3culas energ3ticas cargadas provenientes del espacio y que constantemente alcanzan la Tierra. La naturaleza qu3mica de los rayos c3smicos puede abarcar los n3cleos de todos los elementos, predominando los de Hidr3geno y Helio. Sumado a esto, se incluye en la definici3n un flujo constante de electrones y anti-materia (antiprotones y positrones), adem3s de los rayos gamma [13].

En cuanto a su origen, pueden generarse dentro de nuestra galaxia o provenir de fuera de ella a partir de procesos de aceleraci3n en supernovas, hoyos negros y en menor medida de otros procesos f3sicos que a3n no son bien conocidos. Posteriormente, las part3culas interactuan con la materia y los campos magn3ticos del medio interestelar.

Tambi3n se toman en cuenta las part3culas solares energ3ticas (SEP's por sus siglas en ingles) o rayos c3smicos solares. Se trata de part3culas energ3ticas producidas en fulguraciones o EMC, compuestas en su mayor3a por protones y part3culas alfa, as3 como neutrones y rayos γ . Las energ3as que alcanzan las SEP's van desde unos cuantos eV hasta GeV [14].

El estudio de esta radiaci3n c3smica tiene un car3cter multidisciplinario donde astrof3sicos, f3sicos de part3culas de altas energ3as, f3sicos de plasmas y cient3ficos de la Tierra trabajan en conjunto para entender mejor el origen, composici3n y procesos que dan lugar a las altas energ3as de estas part3culas.

2.2. COMPOSICI3N QU3MICA

Se reconocen dos grupos dentro de la radiaci3n c3smica que llega a la Tierra. A las part3culas que llegan a la parte superior de la atm3sfera terrestre se les conoce como radiaci3n c3smica primaria, mientras que aquellas producidas por las interacciones entre las primarias y los n3cleos atmosf3ricos se les llama radiaci3n c3smica secundaria.

De la radiaci3n c3smica primaria, aproximadamente el 93% de las part3culas son n3cleos de hidr3geno, 6% consiste de n3cleos de helio y el resto son n3cleos de elementos m3s pesados, los cuales se dividen en elementos ligeros L ($Z = 3-5$), medianos M ($Z = 6-9$) y pesados H ($Z \geq 10$). En la figura 2.1. se muestran las abundancias de los rayos c3smicos primarios comparados con la abundancia relativa de los elementos en el sistema solar.

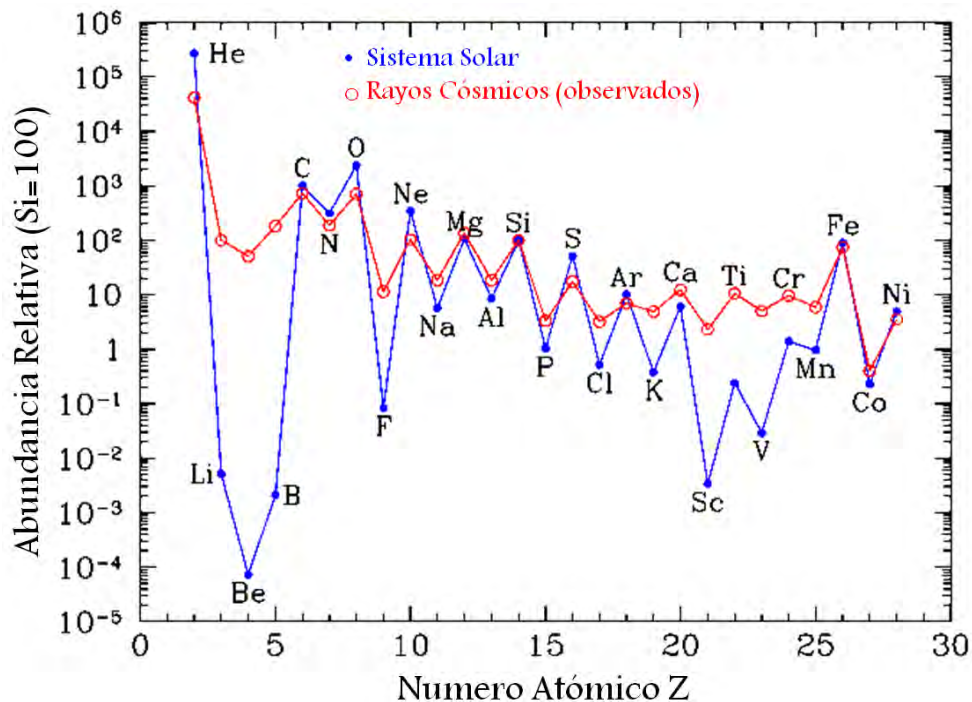


Figura 2.1. Abundancias relativas de los elementos en la radiaci3n c3smica primaria y en el Sistema Solar, ambas normalizadas respecto al Silicio, al que se le asigna el valor de 100. Para los rayos c3smicos se consideran n3cleos que tienen la misma energ3a por nucle3n. Tomado de [15].

Una característica importante que podemos observar en la figura 2.1. es que hay grupos de elementos con una mayor abundancia en los rayos c3smicos. El m3s significativo es el grupo de los elementos ligeros Li, Be y B con varios 3rdenes de magnitud mayor, as3 como el grupo de elementos sub-Fe como Sc, Ti, V, Cr y Mn que tambi3n presenta una considerable abundancia. Este fen3meno se explica por la interacci3n de los n3cleos acelerados con el medio interestelar mediante la fragmetnaci3n (*spallation*) de elementos abundantes como C, N, O y Fe [13].

Como se mostr3 anteriormente, aparte de estos n3cleos totalmente ionizados podemos encontrar electrones, positrones y componentes neutras (rayos γ y neutrinos).

2.3 ESPECTRO DE ENERGÍA

Se utiliza el espectro de la radiaci3n c3smica para describir el flujo de part3culas vs la energ3a con la que llegan a la Tierra, la cual es medida en eV (un eV es la energ3a que toma un electr3n cuando es acelerado por una diferencia de potencial de 1 V, en una distancia de 1m). Dicho espectro se obtiene mediante mediciones con varios instrumentos, alcanzando a cubrir un intervalo de energ3a de 10^9 a 10^{20} eV. A partir del comportamiento del espectro se pueden inferir los posibles procesos que dan origen a la radiaci3n c3smica (Figura 2.2.).

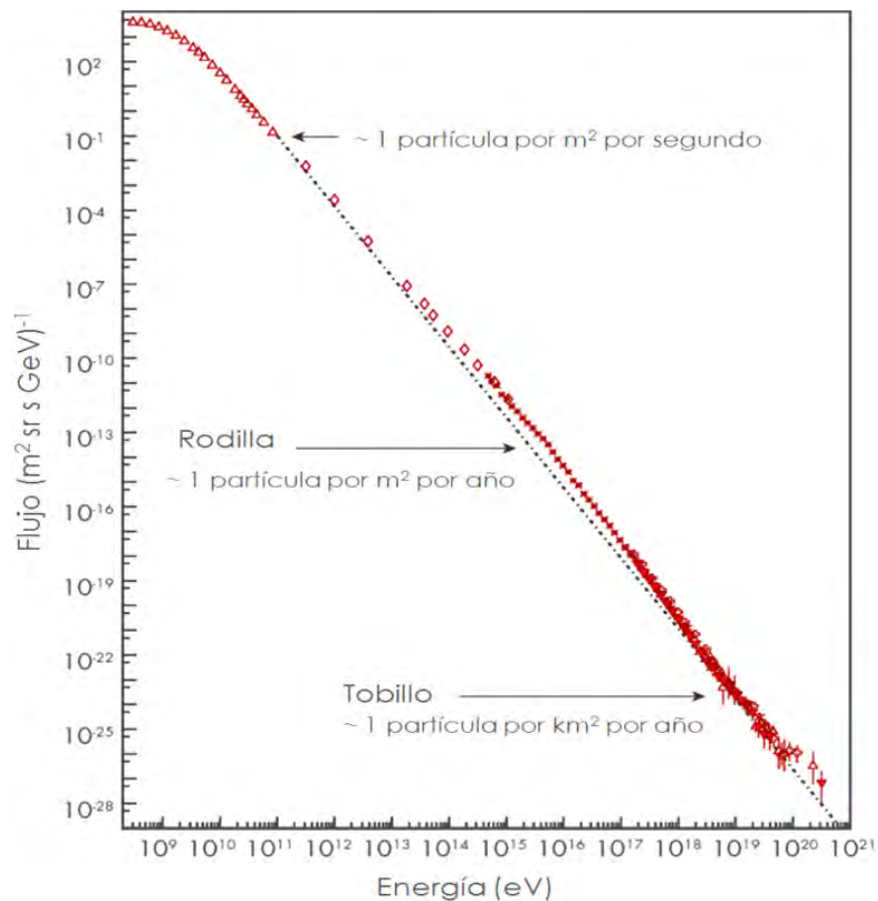


Figura 2.2. Espectro de energ3a de la radiaci3n c3smica. Se muestran las variaciones de la rodilla y tobillo. Tomada de [16].

El espectro puede representarse o aproximarse por leyes de potencia de la forma:

$$J(E) = K \cdot E^{-\gamma} \quad (2.1.)$$

donde J es el flujo de part3culas, E la energ3a, K y γ son constantes. A la constante γ se le llama 3ndice espectral y es la principal caracter3stica del espectro.

En el espectro podemos observar un comportamiento casi constante a energ3as menores a 10^9 eV, producto de la modulaci3n del Sol dentro de la heli3sfera. En el intervalo de 10^9 y 10^{15} , el espectro tiende hacia una ley de potencias con 3ndice espectral $\gamma \approx 2.7$. A los 10^{15} eV se puede notar un ligero cambio en la pendiente, conocido como la "rodilla"; aqu3, el espectro sigue una ley de potencia con $\gamma \approx 3.1$. Posteriormente, alrededor de 10^{20} eV el espectro vuelve a aplanarse, regi3n conocida como "tobillo" del espectro. Como se aprecia en la figura 2.2, a estas energ3as la cantidad de part3culas es insignificante y hasta el momento no se ha registrado ninguna part3cula con mayor energ3a.

Estas ligeras variaciones en el espectro son explicadas por las diferentes fuentes que dan origen a los rayos c3smicos, siendo los fen3menos gal3cticos como supernovas los que explican el comportamiento hasta 10^{17} eV. Sin embargo, para las part3culas con energ3as superiores a esta, conocidas como rayos c3smicos de ultra alta energ3a, el origen no es muy claro, pues no se sabe qu3 mecanismos les permiten alcanzar tales energ3as. Probablemente son rayos c3smicos extragal3cticos y sus radios de giro son de la escala de nuestra galaxia, lo que explicari3 que tengamos un registro tan pobre de ellos [17].

2.4. MODULACI3N SOLAR DE RAYOS C3SMICOS

Suponemos que los rayos c3smicos llegan a la heli3sfera con una distribuci3n isotr3pica. Los de menor energ3a (decenas de GeV) son inmediatamente capturados por el campo magn3tico interplanetario (CMI), congelado en el viento solar, mientras que los de mayor energ3a lo ser3n en regiones m3s cercanas al Sol, donde la intensidad del CMI aumenta. Una vez dentro de la heli3sfera, la intensidad de las part3culas depender3 de la competencia entre los diferentes procesos de modulaci3n. Al ser part3culas cargadas, los rayos c3smicos experimentan la fuerza de Lorentz: $F_L = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$, siguen las l3neas del CMI en trayectorias helicoidales con direcci3n al Sol y en su camino se encuentran con irregularidades. Aquellas part3culas cuyo radio de giro sea comparable con el tama3o de la irregularidad ser3n dispersadas. Este proceso ocurre en todas las direcciones y se conoce como "difusi3n". Al mismo tiempo, el CMI es arrastrado hacia afuera de la heli3sfera por el viento solar, llev3ndose consigo a las part3culas, proceso conocido como "convecci3n". Adem3s, el CMI presenta gradiente y es curvado, lo que provoca que las part3culas deriven a trav3s de las l3neas de campo. Finalmente, las part3culas se est3n propagando en un medio en expansi3n, lo que provocar3 que estas pierdan energ3a, lo que se conoce como desaceleraci3n adiab3tica.

Estos son los principales procesos f3sicos que provocan la modulaci3n solar de la radiaci3n c3smica y todos ellos est3n contenidos en la ecuaci3n de transporte de Parker (1965). La ecuaci3n de transporte describe las variaciones espaciales y temporales en la intensidad y energ3a de los rayos c3smicos gal3cticos en funci3n de su posici3n en la heli3sfera. Esta modulaci3n solo es significativa para part3culas con energ3as menores a 300 MeV [18].

2.4.1. VARIACI3N DIURNA

La constante "lucha" entre los procesos de difusi3n y convecci3n de la radiaci3n c3smica provocan una direcci3n preferencial del flujo de part3culas en las proximidades de la 3rbita terrestre, como la que se representa en la figura 2.3, donde se observan las direcciones de la componente convectiva, difusiva (que sigue la espiral de Arqu3medes) y el flujo neto de part3culas. Este 3ltimo indica que hay una direcci3n preferencial de arriba cercana a las 18 horas de tiempo local, donde habr3 un registro m3ximo de rayos c3smicos en los detectores. As3 mismo, alrededor de las 6 horas de tiempo local el detector apuntar3 en direcci3n contraria y la intensidad registrada ser3 m3nima.

Este fen3meno var3a ampliamente d3a con d3a, reflejo de las cambiantes condiciones del espacio interplanetario modulado por el Sol y el balance entre el flujo difusivo y convectivo. Para el monitor de neutrones de la CDMX la variaci3n diurna promedio es del 0.7% de los datos registrados.

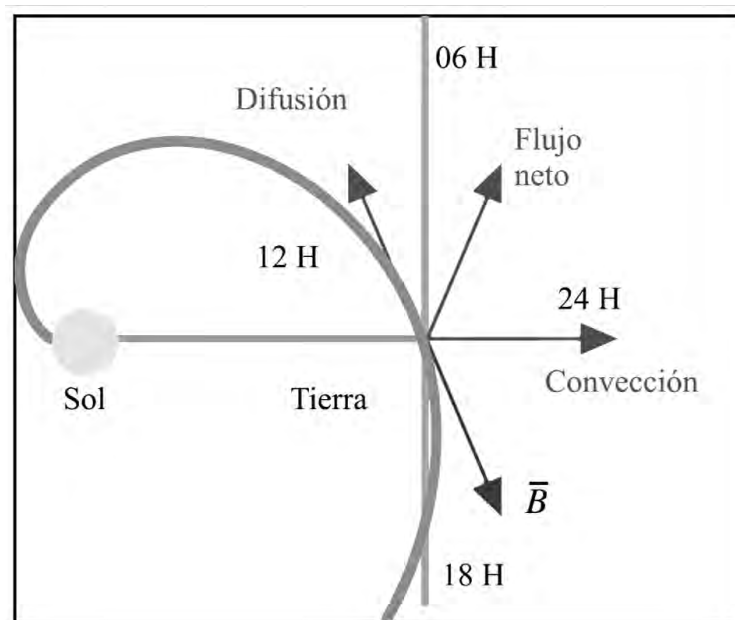


Figura 2.3. Representaci3n del flujo de rayos c3smicos bajo el efecto convectivo-difusivo, que da como resultado la variaci3n diurna. Figura tomada de [4].

2.4.2. DECREMENTO FORBUSH

Es el fen3meno causante de las variaciones temporales m3s altas, alcanzando una disminuci3n en la intensidad de radiaci3n c3smica de hasta un 10% y en casos extremos hasta un 20 o 30% [19]. Su aparici3n est3 relacionada a eventos solares como eyecciones de masa coronal, que como se mencion3 en el Cap3tulo 1, es plasma con un campo magn3tico "congelado" que puede viajar m3s r3pido que el viento solar y que, cuando lo hace, puede provocar una onda de choque en el medio interplanetario, repeliendo parcialmente el paso de part3culas por donde pasa, actuando como una barredora. En los registros se observa que el intervalo de tiempo en que disminuye la intensidad es de unas cuantas horas, pero puede tardar hasta semanas en recuperarse.

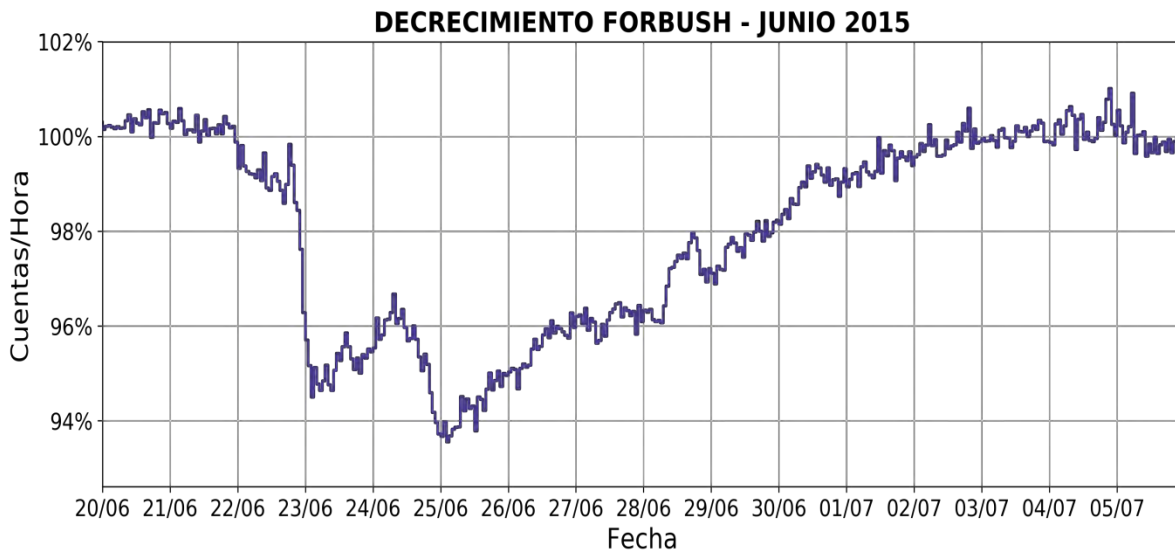


Figura 2.4. Decrecimiento Forbush m3s intenso del presente ciclo solar, ocurrido en junio 2015, registrado por el Observatorio de Rayos C3smicos de la CDMX con una duraci3n de aproximadamente 10 d3as.

2.4.3. LOS CICLOS DE 11 AÑOS Y DE 22 AÑOS

Como es de esperarse, las condiciones magn3ticas de la heli3sfera son distintas dependiendo de la actividad del Sol, en otras palabras, del ciclo solar de 11

años y del ciclo magn3tico solar de 22 a3os. La intensidad de radiaci3n c3smica disminuye claramente en los periodos de m3ximo solar y viceversa en el m3nimo, como se observa en la figura 2.5. En dicha figura tambi3n podemos apreciar la peculiaridad de que en la intensidad de rayos c3smicos los m3ximos est3n puntiagudos y achatados sucesivamente. Este fen3meno depende de la configuraci3n del campo magn3tico de Sol. En una configuraci3n donde las l3neas de campo magn3tico salen por el polo norte solar, la entrada de part3culas se ve favorecida en las zonas polares y se transportan de manera sencilla hacia las otras regiones de la heli3sfera, por lo que vemos un flujo de radiaci3n c3smica constante. Por otro lado, cuando sucede la configuraci3n magn3tica opuesta, las part3culas ingresan preferencialmente por el ecuador de la heli3sfera y quedan atrapadas alrededor de la ecl3ptica por mayor tiempo y repercute en el flujo detectado, el cual solo aumenta por un corto periodo de tiempo [20].

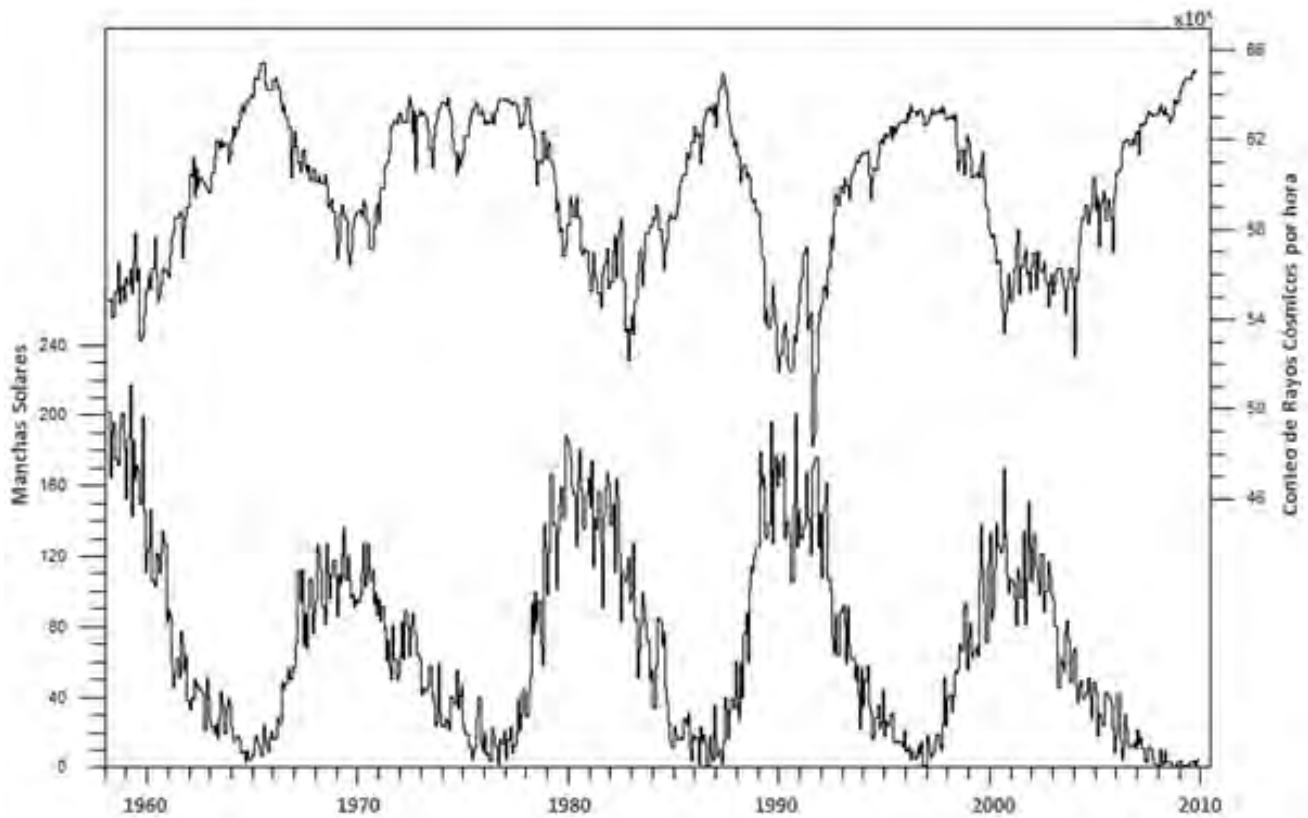


Figura 2.5. Se muestra la relaci3n entre el ciclo solar representado por el n3mero de manchas solares (abajo) y la intensidad de rayos c3smicos (arriba). Tomada de [21].

2.5. MODULACI3N GEOMAGN3TICA DE RAYOS C3SMICOS

Otro obst3culo que enfrenta la radiaci3n c3smica en su llegada a la Tierra es el campo magn3tico terrestre, el cual se describir3 detalladamente en el Cap3tulo 3. Al tratarse casi completamente de part3culas cargadas, este campo puede llegar a modificar significativamente la direcci3n de llegada de estas hasta su detecci3n.

Cuando una part3cula cargada se mueve en presencia de un campo magn3tico experimenta la fuerza de Lorentz y la part3cula tiende a seguir un movimiento helicoidal alrededor de las l3neas de campo magn3tico. Este movimiento est3 determinado por el 3ngulo entre el vector de velocidad de la part3cula y el vector del campo magn3tico, as3 como por una propiedad de las part3culas de oponerse a esta fuerza. Esta propiedad, conocida como rigidez magn3tica, depende de la energ3a de la part3cula y de su carga, como se describe en su ecuaci3n: $P = \frac{pc}{Ze}$, donde la unidad es el Volt.

2.5.1. RIGIDEZ UMBRAL (EFECTO LATITUDINAL)

En la superficie de la Tierra, las part3culas con rigidez magn3tica alta son detectadas sin mayor problema. Conforme se mide el flujo para rigideces menores, encontramos que por debajo de cierta rigidez no se detecta ninguna part3cula, y a ese valor se le conoce como rigidez umbral.

La rigidez umbral var3a en cada punto de la Tierra. En el ecuador magn3tico la energ3a m3nima para que una part3cula penetre hasta la superficie terrestre es de 14.9 GeV, mientras que a $\pm 60^\circ$ de latitud magn3tica la energ3a necesaria es de 1.32 GeV (energ3a por nucle3n) [13]. Por esta raz3n, es importante tener detectores a lo largo y ancho del planeta para tener un registro de un intervalo m3s amplio de

energías. Cuando no se presentan tormentas geomagnéticas, la rigidez umbral para la Ciudad de México es de 8.23 GV y para Sierra Negra es de 8.24 GV.

Cuando se presentan tormentas geomagnéticas, se altera la intensidad del campo geomagnético y varía la rigidez umbral; de este modo, si la rigidez umbral baja para la posición geográfica de la Ciudad de México y Sierra Negra, rayos cósmicos galácticos con energías menores a 8.23 y 8.24 GV, respectivamente, entrarán durante el tiempo de afectación de la tormenta geomagnética y puede afectar el clima espacial. Cabe mencionar que este flujo an3malo sería desviado y no alcanzaría la posición geográfica de la Ciudad de México si no se presentara una tormenta geomagnética.

2.5.2. EFECTO ESTE-OESTE

La trayectoria que siga una partícula cargada en un campo magnético también depende de su carga. Las que tengan carga positiva tendrán una desviación helicoidal en sentido anti horario y las negativas en sentido horario. Esto provoca que para cada punto en la Tierra, las partículas tengan un cono de direcciones prohibidas. Por la configuración actual del campo geomagnético, este cono apunta hacia el este para partículas positivas y al oeste para partículas negativas como se muestra en la figura 2.6. Al ser en su mayoría iones, la radiación cósmica llegará preferentemente del lado oeste del punto de detección.

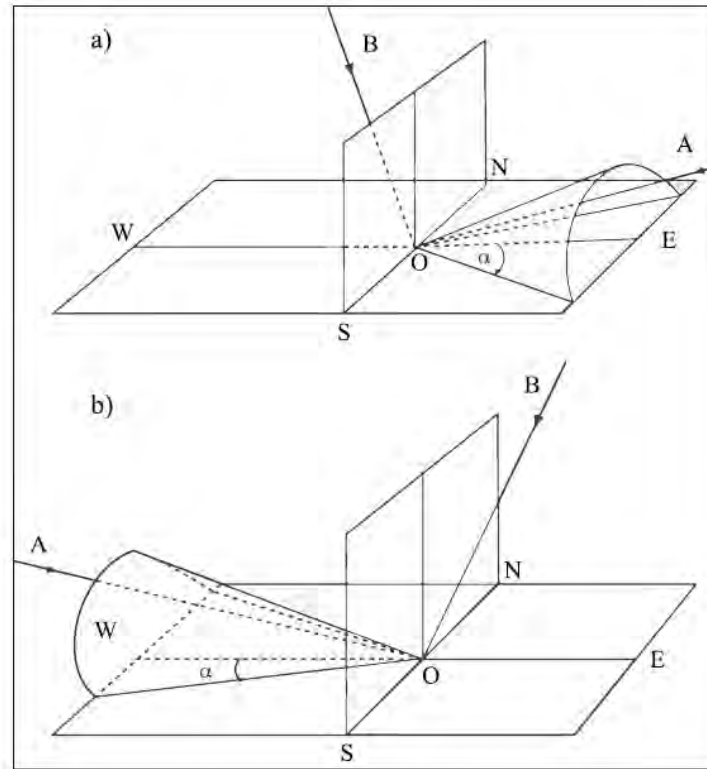


Figura 2.6. Conos de direcci3n prohibida para part3culas positivas (a) y negativas (b) en un punto con misma rigidez magn3tica. Tomada de [4].

2.6 INTERACCIÓN ATMOSFÉRICA

Adicionalmente a las modulaciones mencionadas, la composición e intensidad de los rayos c3smicos observados dentro de la atm3sfera terrestre depende de la cantidad de material atmosf3rico que hayan atravesado y las condiciones del mismo, especialmente la presi3n barom3trica. Por esta raz3n, com3nmente se reporta la intensidad de rayos c3smicos en funci3n de la presi3n o la profundidad atmosf3rica en el punto de observaci3n.

Los rayos c3smicos primarios que inciden sobre la atm3sfera interact3an con los n3cleos presentes y producen rayos c3smicos secundarios, que a su vez pueden interactuar con otros n3cleos sucesivamente. A este proceso se le conoce como chubasco o cascada de part3culas y comienza a ser relevante cerca de 55 km (4 mb), alcanzando un m3ximo a aproximadamente 20 km (56 mb). Debajo de esta altura la formaci3n de rayos c3smicos secundarios disminuye debido a que las part3culas pierden energ3a por colisiones, hasta que decaen o son absorbidas [14].

2.6.1. CHUBASCO DE PARTÍCULAS

A partir de la interacci3n entre la radiaci3n c3smica primaria y los n3cleos en la atm3sfera, se reconocen tres componentes que forman la radiaci3n c3smica secundaria (figura 2.7.):

- **Componente dura o mu3nica:** las part3culas primarias con alta energ3a no tienen colisiones el3sticas y se liberan nuevas part3culas energ3ticas, los piones. Los piones pueden tener carga neutra, positiva o negativa y en cualquier caso son muy inestables. Los neutros, con una vida media de 8.4×10^{-17} s, decaen en dos rayos γ . Los cargados, por su parte, tiene una vida media de 2.6×10^{-8} s y decaen en muones (μ) de la misma carga, los cuales, a pesar de ser tambi3n inestables,

logran alcanzar la superficie terrestre y representan casi toda la radiaci3n c3smica secundaria que se observa a nivel del mar.

- **Componente nucle3nica:** se da cuando el resultado de la colisi3n tiene como producto protones y neutrones. En ocasiones, estos nucleones tienen la energa suficiente para actuar como una partcula primaria y generar otro chubasco de partculas.
- **Componente suave o electromagn3tica:** a partir del decaimiento de piones neutros se crea un par de rayos γ muy energ3ticos. Estos a su vez crean una cascada electromagn3tica, ya que decaen en pares electr3n/positr3n. Los electrones pueden provocar Bremsstrahlung y producir m3s radiaci3n γ .

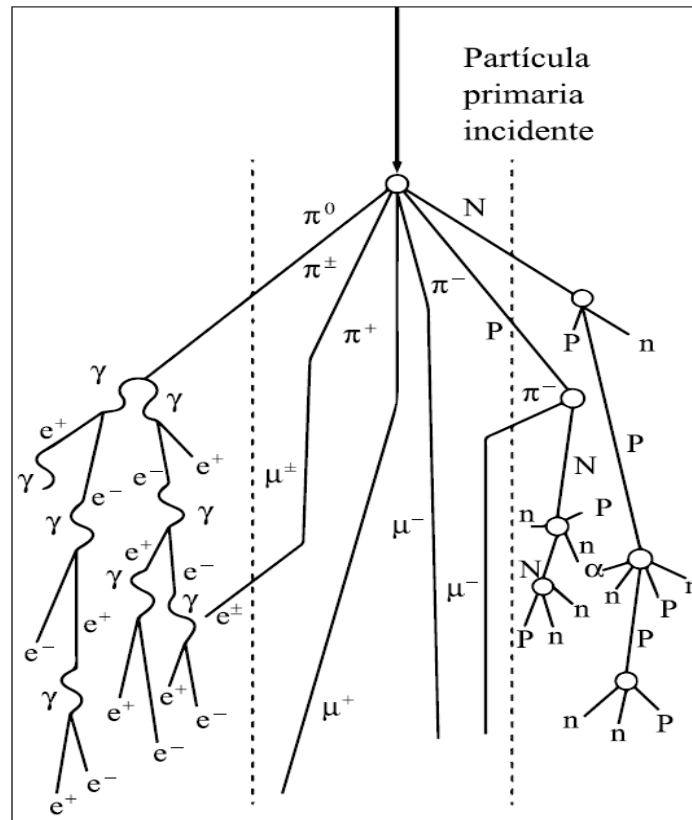


Figura 2.7. Chubasco de partculas a partir del cual se producen partculas secundarias. Del lado izquierdo se representa la componente suave, en medio la dura y a la derecha la nucle3nica. Tomada de [19].

CAPÍTULO III

TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS E ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS

3.1. CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

La Tierra tiene un campo magnético generado principalmente en el interior, mediante el dinamo en el núcleo externo fluido. Sin embargo, otros fenómenos como la magnetización de la corteza, el movimiento de corrientes eléctricas en la ionósfera y el movimiento de grandes masas de aire por fuerzas de marea contribuyen individualmente con sus propios campos magnéticos. La superposición de estos campos conforma el campo magnético terrestre, llamado también geomagnético.

3.1.1. ELEMENTOS DEL CAMPO GEOMAGNÉTICO

El campo geomagnético tiene una dirección y magnitud en cada punto del espacio y puede representarse como un campo vectorial. Para representarlo se utiliza un sistema de coordenadas cartesianas donde el eje X apunta hacia el norte geográfico, el eje Y hacia el este y el eje Z es vertical y positivo hacia dentro de la Tierra, como se muestra en la figura 3.1. Generalmente, el campo geomagnético se describe utilizando la magnitud del campo F , la inclinación I (ángulo entre el plano horizontal y F) y la declinación D (ángulo entre el eje x y la componente horizontal de F , llamada H).

La unidad de intensidad de campo magnético utilizada comúnmente es el Tesla. En la superficie de la Tierra la intensidad varía entre 23 000 y 62 000 nT (1 nT = 10^{-9} T) [22]. También se pueden utilizar los Gauss (1 Gauss = 100 000 nT) y gamma (1 gamma = 1 nT).

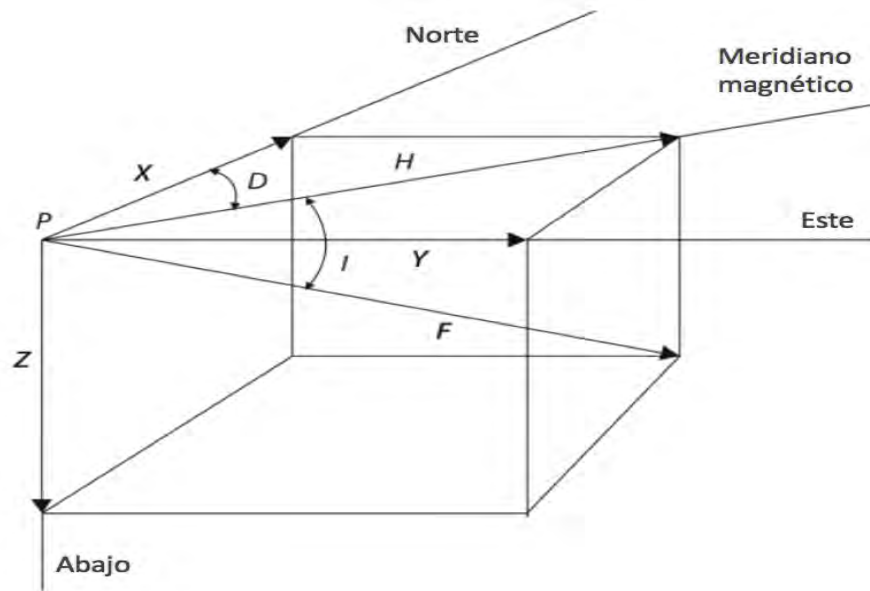


Figura 3.1. Elementos del campo geomagnético en un punto P sobre la superficie de la Tierra, donde F es la intensidad total del campo en ese punto. Figura tomada de [23].

3.2. LA MAGNETÓSFERA

La región en el espacio donde el campo geomagnético domina y controla el movimiento de las partículas se llama magnetósfera. La interacción entre el campo magnético interplanetario (CMI), el viento solar y el campo geomagnético determina la forma de la magnetósfera y las perturbaciones que pueda tener el campo geomagnético. A partir de esta interacción, se identifican en la magnetósfera las regiones representadas en la figura 3.2, que se describen brevemente a continuación:

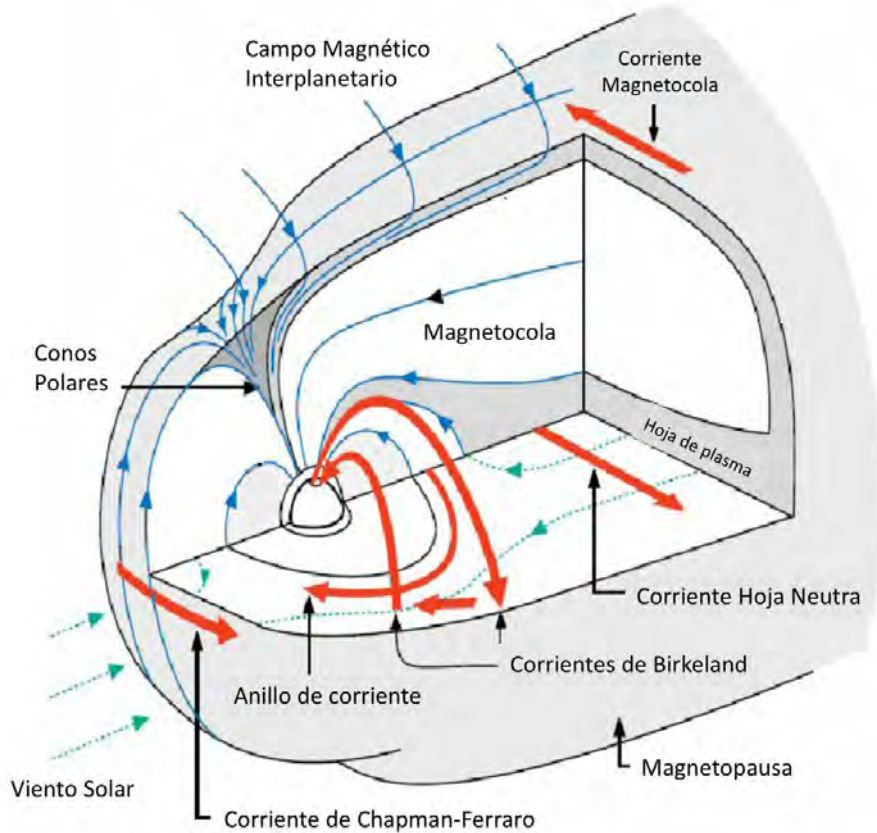


Figura 3.2. En la ilustración se aprecia el modelo de la magnetósfera terrestre, mostrando las líneas de campo magnético, corrientes eléctricas y sus flujos [24].

- **Magnetopausa:** En el lado día de la Tierra, la magnetósfera es comprimida por el viento solar y crea una superficie paraboloide llamada magnetopausa. Esta región se encuentra a aproximadamente $10 R_t$ (radios terrestres) y marca el límite externo de la magnetósfera, donde la presión magnética terrestre y la presión que trae el plasma del viento solar están en equilibrio.
- **Frente de choque:** Conforme el viento solar impacta con el campo geomagnético, se frena de velocidades supersónicas a subsónicas. En este proceso, parte de la energía cinética de las partículas solares es transformada a energía térmica y se crea el frente de choque. Esta región se encuentra entre 13 y $14 R_t$.
- **Magnetofunda:** Esta región se encuentra entre el frente de choque y la magnetopausa. Tiene entre 100 - 200 km de espesor y se caracteriza por llevar el flujo turbulento de viento solar y líneas de CMI alrededor de la magnetósfera hasta la magnetocola.
- **Magnetocola:** La presión del viento solar “rompe” las líneas de campo geomagnético del lado día y las arrastra en sentido anti solar, extendiéndose hasta más de $100 R_t$, donde las líneas de campo geomagnético quedan abiertas y permiten la entrada de partículas.
- **Hoja neutra y hoja de plasma:** En la magnetocola, a partir de aproximadamente $16 R_t$, las líneas de campo con dirección opuesta se encuentran muy cercanas entre ellas alrededor del ecuador magnético. Para que esto ocurra, debe existir una hoja neutra, también llamada hoja de corriente, y una hoja de plasma para separar estas dos regiones. Esta última se alimenta de protones y electrones provenientes de la magnetofunda y en ella las líneas de campo pueden reconectarse para volver a adquirir una

configuración dipolar. Cuando sucede esto, las partículas presentes son aceleradas hacia la Tierra.

- Conos polares: Se localizan en los polos magnéticos del lado día y tienen forma de embudo. En estas regiones donde el campo geomagnético es perpendicular a la magnetopausa, se favorece la entrada de partículas cargadas del viento solar a la magnetósfera. Una vez dentro, siguen las líneas de campo magnético hasta alcanzar la atmósfera, donde excitan a los átomos presentes, emitiendo luz. A este fenómeno que sucede alrededor de las zonas polares se le conoce como auroras (boreales en el polo norte y australes en el polo sur).

3.2.1. LOS ANILLOS DE RADIACIÓN

La magnetósfera funciona como un escudo para el viento solar incidente; sin embargo, siempre existen iones y electrones que logran penetrarla y, dependiendo de su energía, quedan confinadas dentro de las líneas de campo geomagnético. Una vez dentro, la trayectoria que siguen estas partículas cargadas está gobernada por la fuerza de Lorentz, que como vimos en la sección anterior, provoca que tomen una trayectoria helicoidal alrededor de las líneas de campo magnético. En los polos, las líneas de campo son más intensas y densas, actuando como espejos magnéticos que reflejan a las partículas de hemisferio a hemisferio. Se reconocen dos zonas de forma toroidal alrededor del planeta con una gran población de partículas energéticas confinadas, llamadas anillos/cinturones de radiación o de Van Allen, en honor a su descubridor.

El cinturón interno de Van Allen se extiende de 1.2 a 3 R_t en el plano ecuatorial. Está poblado con igual número de electrones y protones de origen terrestre principalmente, siendo estos últimos lo que poseen la mayor parte de la energía (1 - 500 MeV). Se originan a partir de los iones creados en la alta atmósfera por el paso de rayos cósmicos, los cuales seguirán las líneas de campo magnético.

El cinturón externo de Van Allen tiene de igual forma el mismo número de protones y electrones, siendo en este caso los electrones los dominantes en energía (1 keV a 10 MeV). A diferencia del cinturón interno, en esta región que se encuentra entre 4-10 R_t , las líneas de campo geomagnético son más débiles, provocando que el cinturón externo sea más susceptible a variaciones del viento solar. La principal fuente de esta población de partículas proviene de la hoja de corriente, donde protones y electrones son acelerados hacia la Tierra [25].

3.2.2. CORRIENTES ELÉCTRICAS EN LA MAGNETÓSFERA

A partir de la interacción entre el viento solar y la magnetósfera encontramos zonas donde el movimiento de partículas cargadas se ve favorecido, produciendo corrientes eléctricas (ver Figura 3.2.). En particular, se reconocen tres corrientes principales: La corriente de Chapman-Ferraro, que se origina a partir de las partículas que se mueven en la magnetofunda hacia la magnetocola. Las corrientes de la magnetocola, las cuales circulan a través de la magnetocola y forman la hoja de corriente y la corriente de anillo, provocada por el movimiento de partículas alrededor de las líneas de campo geomagnético, donde la configuración es dipolar. Esta fluye a gran altitud alrededor del ecuador y su intensidad y espesor está determinado por la población de iones y electrones que conlleva [26].

3.3. TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS

Se definen como una perturbación prolongada del campo geomagnético, donde se observa un decrecimiento importante en su intensidad de decenas o centenas de nT con una duración de entre algunas horas y hasta varios días. Dentro de una tormenta geomagnética se pueden identificar dos fases: la fase principal, que abarca el periodo de decrecimiento progresivo del campo magnético y la fase de recuperación, donde el campo vuelve a su intensidad normal. En ocasiones podemos encontrar una fase inicial, la cual se caracteriza por un ascenso súbito en la intensidad del campo antes de la fase principal. El ascenso se explica por corrientes en la magnetósfera inducidas por la presión dinámica del viento solar, la cual se intensifica cuando hay frentes de choque en el campo magnético interplanetario [11]. Un ejemplo de la típica firma que provoca este fenómeno en el campo geomagnético se puede observar en la figura 3.3.

La cantidad de energía y partículas que se inyectan a la magnetósfera en una tormenta geomagnética depende de la interacción entre el campo magnético interplanetario (CMI) y el campo geomagnético. Cuando el CMI tiene sus líneas de campo en dirección hacia el sur, llamada componente B_z , ocurre reconexión magnética con las líneas del campo geomagnético (que apuntan al norte) y por lo tanto la entrada de energía y partículas será mayor.

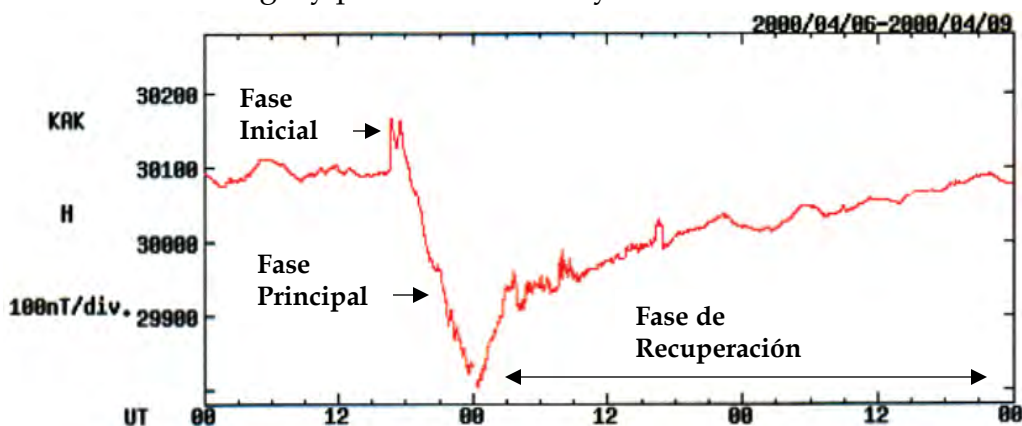


Figura 3.3. Se muestran las fases de una tormenta geomagnética registradas en la componente H del campo geomagnético [11].

3.4. ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS

Las variaciones del campo geomagnético tienen como consecuencia que los sistemas de corriente en la magnetósfera se intensifiquen, especialmente el anillo de corriente. Este último induce un campo magnético con una configuración tal que se opone al campo geomagnético, disminuyendo su intensidad. Este decrecimiento puede ser registrado en la superficie terrestre, especialmente en la componente horizontal H del campo geomagnético (ver figura 3.1.). Dicho esto, los principales índices geomagnéticos se basan en este hecho para caracterizar y cuantificar la magnitud de las variaciones geomagnéticas.

3.4.1. ÍNDICE K

Se trata de un índice local cuasi logarítmico que mide las fluctuaciones de la componente horizontal H del campo geomagnético cada tres horas, respecto a una curva establecida para un día quieto. El índice planetario K_p representa el promedio del índice K de 13 observatorios geomagnéticos entre 44° y 60° de latitud geomagnética norte y sur, ubicados en distintas longitudes. La escala va de 0 a 9, donde valores de 0 a 4 significan muy poca actividad geomagnética y a partir de 5 comienza a considerarse una tormenta geomagnética. El valor de 9 se considera una tormenta geomagnética extrema [22].

3.3.2. ÍNDICE DST

El índice Dst se calcula a partir de las variaciones en la componente horizontal H del campo geomagnético, registradas en cuatro observatorios localizados entre 20° y 30° de latitud del ecuador geomagnético: Hermanus, Kakioka, Honolulu y San

Juan. Para su cálculo, los valores de tiempo quieto son sustraídos de los datos de cada observatorio y en función de su latitud se aplica un factor de corrección. Posteriormente, se toma un promedio de las cuatro estaciones y se da el valor en nT.

Para la posición geográfica de la Ciudad de México, la cual se encuentra a 29.1° de latitud magnética, el índice Dst es el que mayor relevancia tiene y el que se tomó como base para caracterizar a las tormentas geomagnéticas analizadas. Un ejemplo de los registros del índice Dst se muestran en la figura 3.4.

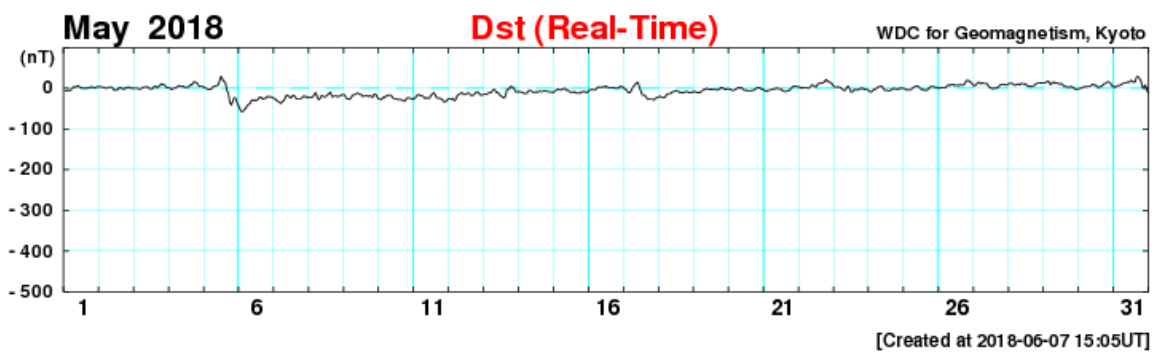


Figura 3.4. Variación de la intensidad del índice Dst para el mes de mayo de 2018. Figura tomada de [27].

CAPÍTULO IV

TELESOPPIO DE NEUTRONES SOLARES Y LA RED MUNDIAL DE OBSERVATORIOS

4.1. INTRODUCCIÓN

Tanto los rayos cósmicos como las partículas solares energéticas son estudiadas desde hace varias décadas por diferentes tipos de detectores, los cuales con el paso del tiempo han adquirido una gran sensibilidad. Sin embargo, hasta hace poco no resolvían la dirección de arribo de las partículas incidentes, ni la energía que tenían. Tampoco distinguían entre partículas cargadas y neutrones.

En vista de la complejidad y el grado de error para calcular los parámetros de direccionalidad y deposición de energía, especialmente en el estudio de la actividad solar, fue necesario utilizar nuevos equipos, como el Telescopio de Neutrones Solares (TNS). Este nuevo equipo nos permite conocer de forma directa la dirección de arribo y la energía de las partículas incidentes, diferenciando entre partículas neutras y cargadas.

En el presente capítulo, se describe el diseño y funcionamiento del Telescopio de Neutrones Solares. Se hablará de la red mundial y específicamente del telescopio ubicado en la cima del volcán Sierra Negra, Puebla.

4.2. TELESCOPIO DE NEUTRONES SOLARES (TNS).

Los telescopios de neutrones solares fueron desarrollados en el Solar-Terrestrial Environment Laboratory (*STELab*) de la Universidad de Nagoya, Japón; con el objetivo de detectar neutrones solares, además del fondo de rayos cósmicos galácticos. Para esto se instalaron varios telescopios alrededor del mundo, localizados geográficamente de manera muy específica para su máximo aprovechamiento. Las dos principales razones para su localización fueron: que deben estar cerca del ecuador, garantizando que estará expuesto a la mayor cantidad de radiación solar diaria y que la rigidez umbral requerida para los iones incidentes sea muy alta y de esta manera aniquilar la influencia de protones. La segunda es que debe localizarse a una altura considerable para reducir la cantidad de materia que pueda interaccionar con los neutrones solares a su entrada en la atmósfera terrestre, por lo que su probabilidad de ser detectados será mayor.

Siguiendo estas especificaciones, la figura 4.1 muestra la distribución de la red mundial de telescopios solares en el planeta. Tal distribución a diferentes longitudes está diseñada de tal manera, que se puedan tener observaciones del Sol en todo momento. Las coordenadas y la altura de los siete TNS que conforman la red mundial se muestran en la tabla 4.1



Figura 4.1. Red mundial de Telescopios de Neutrones Solares. Se muestra el país y la localidad donde están instalados los TNS [28].

Localización, País	Long.	Lat.	Altura [m]	Área [m ²]	Espesor PC [cm]	Inicio de operación
<i>Chacaltaya, Bolivia</i>	68° W	16.2° S	5250	4	40	Sept, 1992
<i>Norikura, Japón</i>	137.5° E	36.1° N	2770	64	20	Oct, 1996
<i>Mauna Kea, USA</i>	156.3° W	19.8° N	4200	8	20	Abr, 1997
<i>Gornergrat, Suiza</i>	7.8° E	46.0° N	3135	4	40	Ene, 1998
<i>Yangbajing, China</i>	90.5° E	30.0° N	4300	9	40	Sept, 1999
<i>Aragats, Armenia</i>	40.5° E	44.2° N	3200	4	60	Feb, 2003
<i>Sierra Negra, México</i>	97.3° W	19.0° N	4580	4	30	Nov, 2003

Tabla 4.1. Red mundial de Telescopios de neutrones Solares. Se muestran su posición geográfica, altura, área, espesor de los plásticos centelladores y la fecha de inicio de operación.

4.2.1. PRINCIPIO DE DETECCIÓN DEL TNS EN SIERRA NEGRA

Este detector fue instalado en marzo de 2003 en una colaboración entre el STELab de la Universidad de Nagoya, Japón y el Instituto de Geofísica de la UNAM, siendo el más reciente de la red mundial. Se instaló en la cima del volcán Sierra Negra, Puebla (19.0° N, 97.3° O) a una altura de 4580 m.s.n.m. Comenzó a operar en Julio de 2004 y desde entonces ha estado registrando datos continuamente [29]. Un esquema del detector se muestra en la figura 4.2.

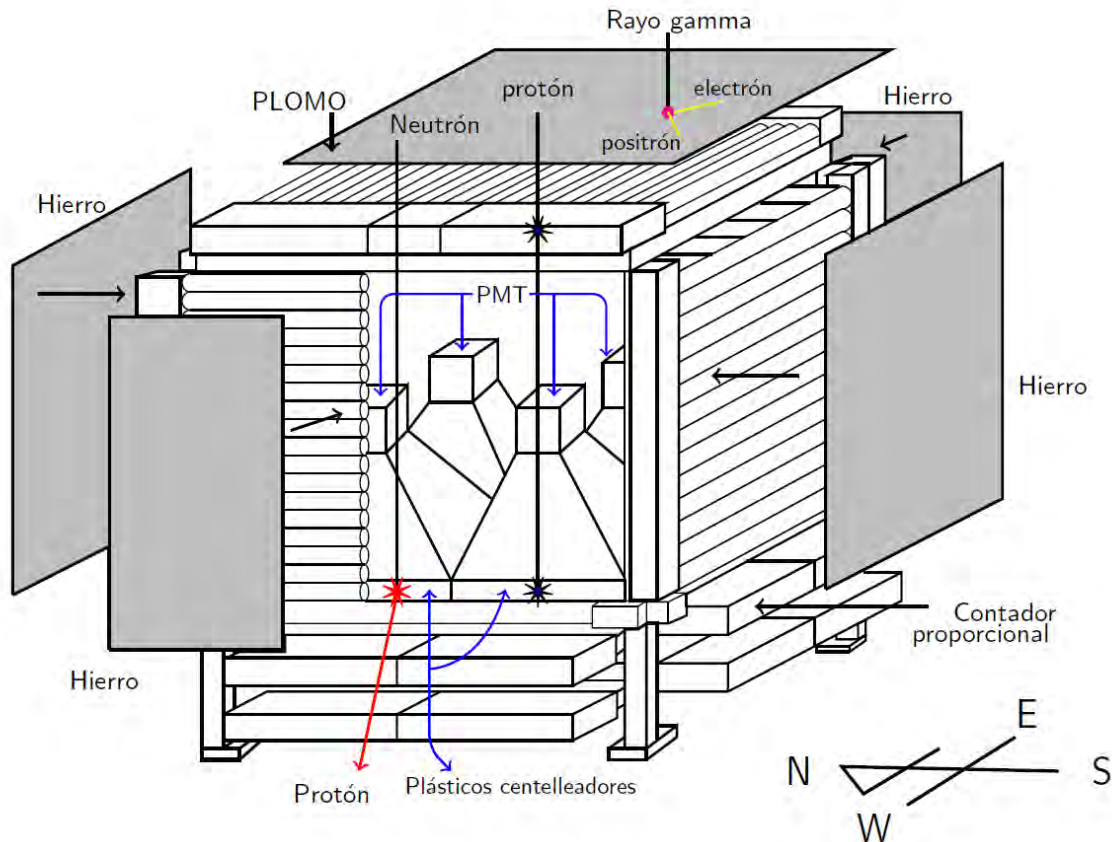
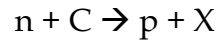
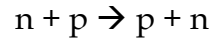


Figura 4.2. Se muestra un diagrama del TNS-SN, donde se aprecian los plásticos centelleadores y los contadores proporcionales [2].

El detector cuenta con cuatro plásticos centelladores (PC) de 1m x 1m x 0.3 m cada uno, hechos de poliestireno (C₈H₈). Cuando un neutrón interacciona con los núcleos de hidrógeno y carbono, se producen protones mediante las siguientes reacciones:



A primera aproximación, los protones producidos adquieren una energía proporcional a la de los neutrones incidentes. Estos protones viajan por el PC excitando y ionizando otros átomos, los cuales al des-excitarse emitirán fotones. Toda la luz emitida, que es proporcional a la energía cinética perdida por el protón en su paso por el plástico, es medida con discriminadores de altura de pulso conectados a los fotomultiplicadores (*PMT's*) ubicados sobre cada uno de los PC. Posteriormente, la señal es discriminada en cuatro niveles dependiendo de la energía: $E \geq 30$ MeV, 60 MeV, 90 MeV y 120 MeV, con una razón de conteo de 10 segundos. A su vez, también toda la radiación cósmica cargada incidente (protones secundarios, muones y electrones) provocará una señal, por lo que para diferenciar a las partículas cargadas de la radiación (p^+ , e^\pm , μ^\pm , etc.) se encuentran contadores proporcionales (CP) alrededor de los PC en la parte superior y a los lados, los cuales solo detectan partículas cargadas.

Los CP son tubos rellenos de gas a presión y constituidos por un alambre delgado que cruza un cilindro de metal, pero aislado de este; además, entre el tubo y el alambre hay un alto voltaje (1200 V). Cuando una partícula penetra el tubo, logra ionizar el gas; los iones producidos son acelerados por el voltaje presente y generan un pulso de corriente eléctrica, que es registrado por el sistema.

Luego, mediante un sistema de anti-coincidencias electrónicas, es decir, comparando las señales de los PC y CP, se puede distinguir entre el flujo de partículas cargadas y neutras. Las partículas cargadas disparan dos señales (en el PC y CP), mientras que las partículas neutras disparan sólo una señal (en el PC).

En la figura 4.3. se muestra un esquema del sistema lógico que utiliza el equipo para la señal de anti-coincidencia.

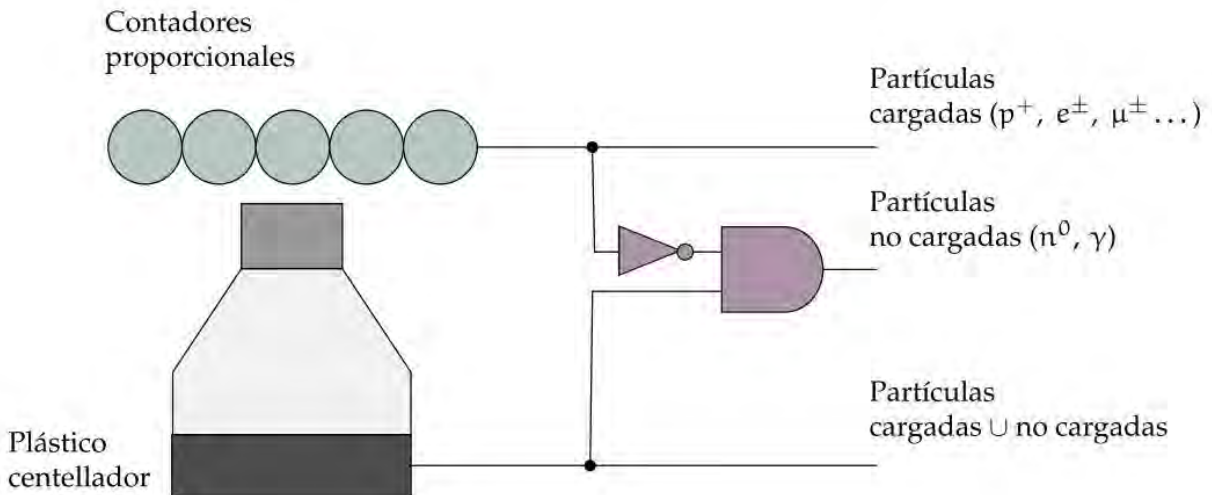


Figura 4.3. Sistema lógico de detección del TNS-SN, a partir del cual se obtienen las señales de anti-coincidencia. Tomada de [30]

Por debajo de los PC encontramos cuatro capas de CP con cinco tubos cada una para determinar la dirección de arribo de las partículas incidentes, dos en la dirección E-W y dos en la dirección N-S, divididas en cinco secciones y dando 25 canales direccionales con una dirección angular de 15° . En este caso, también los protones producidos en los PC pueden detectarse. Para realizar las mediciones de la dirección de arribo, se utiliza un dispositivo lógico programable complejo.

Finalmente, se utiliza una placa de Plomo de 0.5 cm de espesor en la parte superior del detector y otras cuatro de Hierro del mismo grosor a los lados para eliminar el posible ruido en las observaciones producido por los γ de los alrededores, los cuales son convertidos en pares electrón-positrón [29].

Las señales generadas por el detector son adquiridas por módulos especializados en física de partículas. Las operaciones analógicas de amplificación y discriminación de datos se realizan en módulos *NIM* (Nuclear Instrument Module)

y los sistemas de anti-coincidencias, direcciones de arribo, conteo y transmisión de datos son realizados en módulos CAMAC (Computer Automated Measurement and Control) [31]. Por último, los datos finales se almacenan en un servidor, donde dependiendo de la naturaleza de las partículas y de la deposición de energía en los PC, se identifican distintos canales: para partículas cargadas encontramos los canales $S1$ ($E > 30$ MeV), $S2$ ($E > 60$ MeV), $S3$ ($E > 90$ MeV) y $S4$ ($E > 120$ MeV). Para las partículas neutras son $S1_with_anti$ ($E > 30$ MeV), $S2_with_anti$ ($E > 60$ MeV), $S3_with_anti$ ($E > 90$ MeV) y $S4_with_anti$ ($E > 120$ MeV). Por último, para las partículas detectadas por las cuatro capas de CP tenemos los canales *Layer 1*, *Layer 2*, *Layer 3* y *Layer 4*.

En cuanto a los neutrones solares, sabemos que no son desviados por los campos magnéticos y conservan su dirección de origen. Esto es importante, pues al determinar su dirección de arribo, podríamos discriminar entre neutrones solares y neutrones energéticos producidos por rayos cósmicos primarios en la atmósfera.

4.3. EVENTOS DETECTADOS POR LOS TNS

Como se mencionó anteriormente, los TNS están hechos especialmente para la detección de neutrones solares, por lo que los estudios llevados a cabo han estado más encaminados a la detección de eventos solares que produzcan neutrones.

El primer evento de neutrones solares detectado por un TNS ocurrió tras la fulguración el 4 de junio de 1994. El TNS ubicado en el monte Norikura, Japón fue el mejor ubicado para detectar neutrones y logró registrar un aumento durante tres minutos en el flujo de neutrones solares, con una significancia estadística de 4.4σ , aproximadamente nueve minutos después del inicio del evento [2]. Cabe mencionar que las variaciones superiores al promedio de la variación diurna para cada evento son consideradas estadísticamente significativas.

Otros eventos importantes detectados por la red de TNS son:

- Aumento de 4.2σ en el flujo de neutrones por tres minutos, producto de la fulguración X3.3 el 28 de noviembre de 1998, registrado por el TNS en Yangbajing, China.
- Aumento de hasta 8.9σ en el flujo de neutrones durante 2 minutos, producto de la fulguración X17.2 ocurrida el 28 de octubre del 2003, registrado por el TNS en Yangbajing, China.
- Excesos en las cuentas de neutrones durante cuatro minutos de hasta 4.8σ tras la fulguración X2.7 del 3 de noviembre del 2003, registrado por el TNS en Mauna Kea, Hawái.

4.3.1. EVENTOS DETECTADOS PORT EL TNS-SN

El evento más importante registrado por el TNS-SN fue tras la fulguración solar X17 ocurrida el 7 de septiembre del 2005. El satélite GOES detectó un incremento en la emisión de rayos X suaves a las 17:17 tiempo universal (TU), indicando el inicio de la fulguración, alcanzando un máximo a las 17:40 TU. Como

se muestra en la figura 4.4, en el intervalo de tiempo de las 17:40 a las 17:48 TU, el TNS-SN registró un exceso en la intensidad de neutrones detectados por los cuatro canales de energía con los que cuenta (>30 , 60 , 90 y 120 MeV), con significancias estadísticas de 15.8σ , 12.6σ , 9.6σ y 7.8σ para los canales *S1_with_Anti*, *S2_with_Anti*, *S3_with_Anti* y *S4_with_Anti* respectivamente [2].

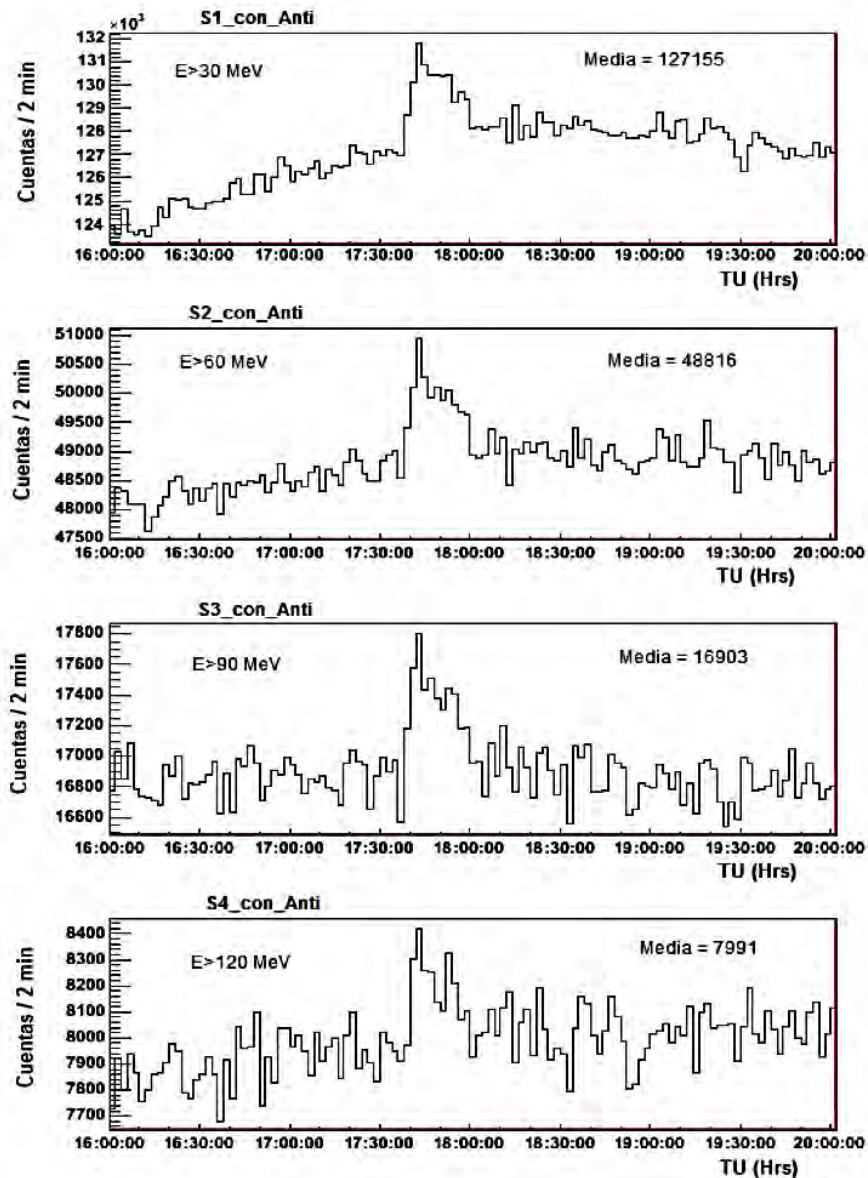


Figura 4.4. Evento de neutrones solares detectados por el TNS-SN tras la fulguración del 7 de septiembre del 2005. Se observa claramente un aumento significativo en las cuentas de neutrones incidentes en los 4 canales de deposición de energía [2].

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1. CRITERIO DE SELECCIÓN DE DATOS

Se analizaron los datos obtenidos por el TNS en Sierra Negra para el año 2015, el cual se encuentra dentro del Ciclo Solar 24. Como se muestra en la figura 5.1, este año es el que precede al inicio del periodo de máxima actividad y se presentaron emisiones que produjeron variaciones en el campo geomagnético.

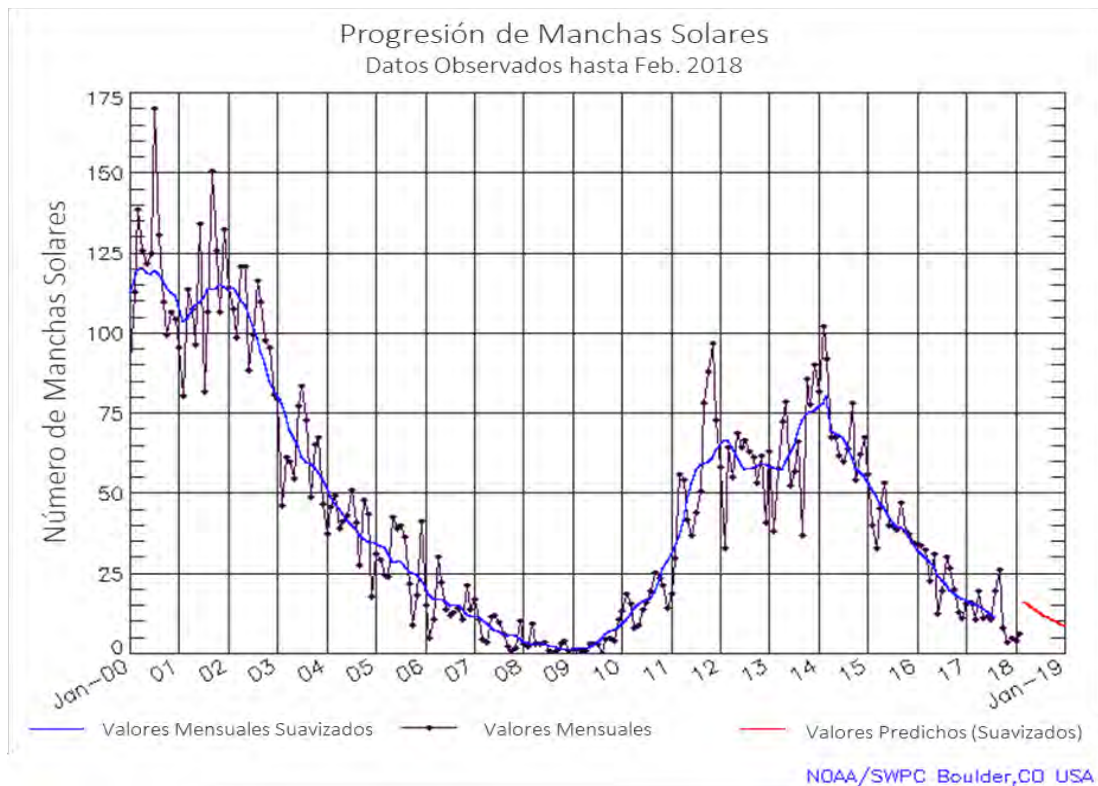


Figura 5.1. Se muestra parte del ciclo solar 23 y lo que va del presente ciclo solar 24. La actividad se muestra con base en del número de manchas solares. Se observa que durante el año 2014 sucedió el máximo solar. Tomada de [32].

Se analizaron 7 de las tormentas geomagnéticas más intensas, con base en los índices geomagnéticos Dst y Kp. Los datos de los índices fueron obtenidos de las bases de datos del World Data Center for Geomagnetism, Kyoto y Space Weather Prediction Center, NOAA, respectivamente.

En la tabla 5.1, se muestran la fecha y hora de las tormentas geomagnéticas catalogadas para este trabajo, los valores extremos del índice Dst y Kp alcanzados, así como la perturbación interplanetaria que originó la tormenta geomagnética.

Fecha y Hora Inicio TG (dd/mm)	Dst Máximo (nT)	Fecha y Hora Dst Mínimo (dd/mm)	Dst Mínimo (nT)	Kp Máximo	Origen de la Perturbación
07/01 07hrs	+18	07/01 11hrs	-99	6	EMC
17/03 05hrs	+56	17/03 22hrs	-223	8	EMC
09/04 22hrs	+24	11/04 09hrs	-79	6	RIC
07/06 18hrs	+25	08/06 08hrs	-73	6	RIC/EMC
21/06 19hrs	+36	23/06 04hrs	-204	8	EMC
03/11 07hrs	+34	07/11 07hrs	-96	6	EMC/RIC
19/12 22hrs	+43	20/12 22hrs	-155	7	EMC

Tabla 5.1. Se muestran las fechas de las tormentas geomagnéticas elegidas para este trabajo en Tiempo Universal (TU) y los valores de los índices Dst y Kp para cada una. También se presenta el fenómeno que dio origen a cada evento de acuerdo con el Solar Terrestrial Activity Report [33].

Con base en las fechas de las tormentas geomagnéticas, se procedió a obtener los datos correspondientes registrados por el TNS-SN, como se observa en la tabla 5.2. Se aseguró que la base de datos del TNS-SN fuera estable y libre de errores electrónicos, errores en el sistema de adquisición de datos y en la programación, para corroborar que los registros sólo mostraran la influencia de los fenómenos solares, como se muestra en [28].

Los canales del TNS-SN que se analizaron fueron el *S1*, *S1_with_anti* (que llamaremos *S1_Anti*) y Layer 1. Recordemos que el canal *S1* registra partículas cargadas, el *S1_Anti* las partículas neutras y Layer 1 todas aquellas que logran penetrar hasta la primera capa de contadores proporcionales ubicados por debajo de los plásticos centelladores.

5.2. RESULTADOS

En esta sección, se presentan los resultados del análisis de las posibles variaciones en los registros del TNS-SN cuando hubo tormentas geomagnéticas. En la parte superior de las gráficas resultantes, se muestran los valores del índice Dst y debajo los datos registrados por el TNS-SN en los canales antes mencionados. El eje horizontal representa la fecha para el año 2015 con una resolución de una hora; se muestran las gráficas a partir del día en que inició la tormenta geomagnética y, dependiendo del tiempo de la fase de recuperación, se tomaron los días posteriores a ésta.

Los datos fueron normalizados conforme al registro de los mismos durante las 72 horas previas a la tormenta, ya que en este periodo no hubo actividad geomagnética significativa y, de este modo, se pueden observar las variaciones atribuidas a cambios en la intensidad de las líneas de campo geomagnético.

En la tabla 5.2. se muestran los porcentajes de variación diurna promedio para cada evento estudiado en cada canal analizado.

Fecha TG (dd/mm)	Canal S1 (%)	Canal S1_Anti (%)	Canal Layer 1 (%)
07/01	5.86	11.31	2.83
17/03	7.82	14.32	2.44
09/04	8.87	15.47	2.88
07/06	8.22	14.27	1.73
21/06	9.26	15.65	2.54
03/11	3.30	2.01	2.58
19/12	23.88	20.50	21.44

Tabla 5.2. Variación diurna promedio para cada canal analizado, correspondiente con cada tormenta geomagnética estudiada para el año 2015. Para los canales S1 y S1_Anti se aprecia una intensa variación para los eventos, mientras que para el canal Layer 1 sólo se observa un incremento extremo en el evento del 19/12. Para el monitor de neutrones de la Ciudad de México, la variación diurna es del 0.7%.

Como se observa en la tabla 5.2, los valores promedio de la variación diurna para cada evento son muy altos, lo que puede opacar las variaciones de los rayos cósmicos detectados y atribuidas a tormentas geomagnéticas.

En general, las gráficas de los datos del TNS-SN para cada evento muestran un comportamiento sinusoidal exacerbado. Este comportamiento se explica por una variación diurna amplificada de la radiación cósmica a la altura de Sierra Negra. Para todos los eventos, la variación diurna amplificada también se presenta en las 72 horas previas tomadas para la normalización, lo que puede evitar la detección de variaciones atribuidas a las tormentas geomagnéticas. En la figura 5.2 observamos la primera tormenta geomagnética del año 2015, provocada por una región de interacción corrotante, que llegó a alterar el índice Dst hasta -99 nT el día 7 de enero.

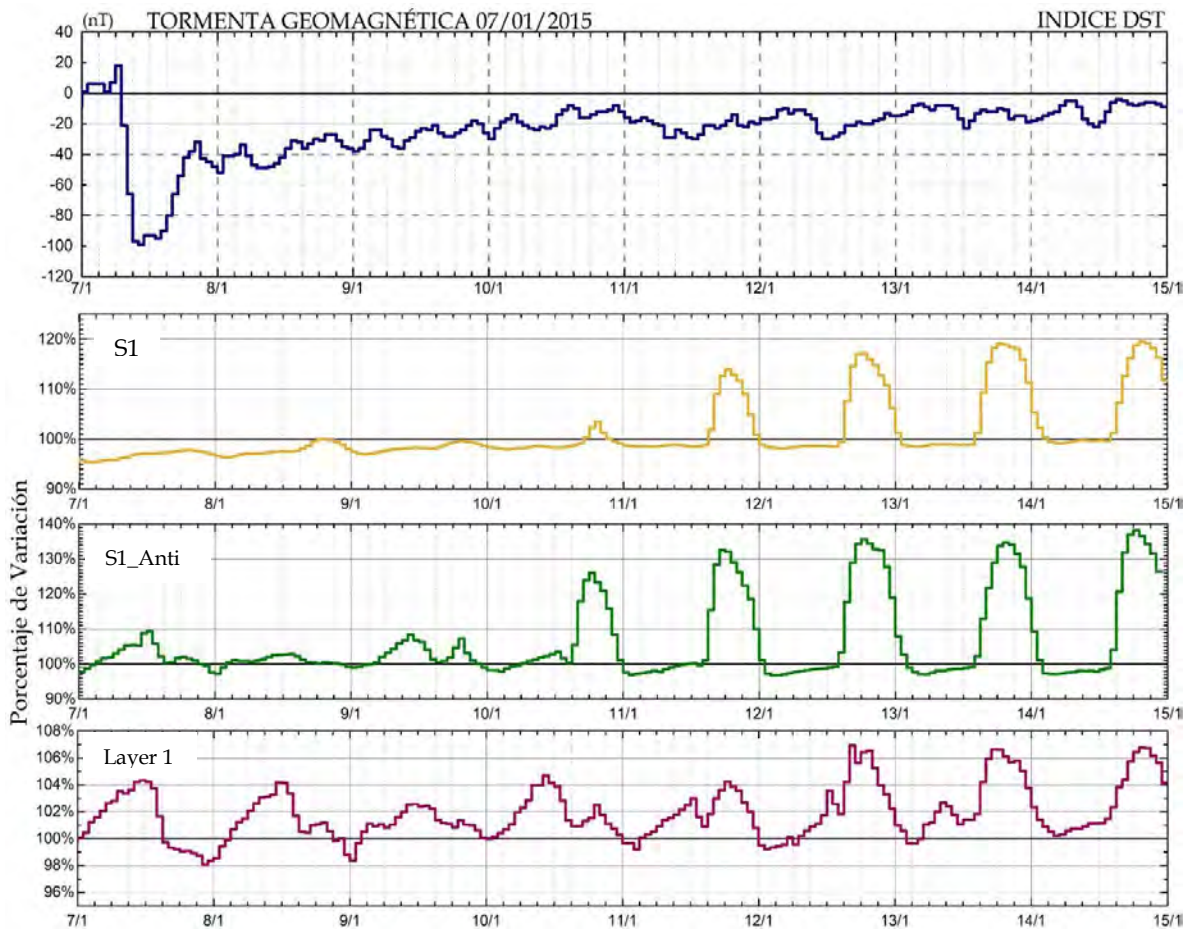


Figura 5.2. Intensidad del índice Dst y porcentaje de variación de las cuentas del TNS-SN (canales S1, S1_Anti y Layer 1), para la tormenta geomagnética del 7 de enero del 2015.

En cuanto a la intensidad de rayos cósmicos registrados por el TNS-SN, se observa que las variaciones en el registro de partículas cargadas y neutrones está totalmente opacada por la variación diurna amplificada que, a simple vista, no es tan obvia los primeros tres días de la tormenta geomagnética; sin embargo, en estos días la variación diurna sigue siendo mayor al 2%. La intensidad del índice Dst baja hasta -99 nT y los conteos de los canales S1, S1_Anti y Layer 1 no muestran incrementos atribuibles a la caída del índice.

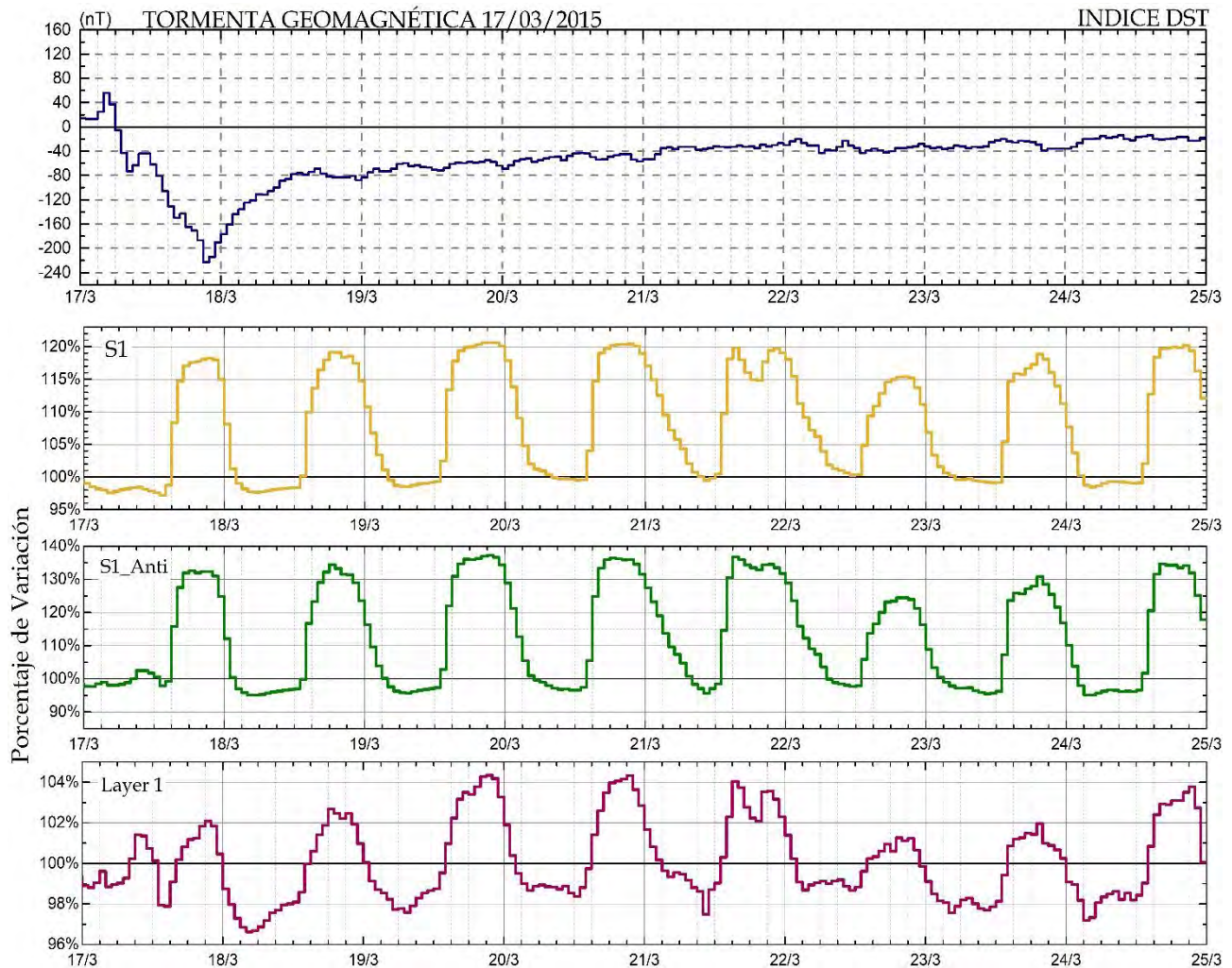


Figura 5.3. Intensidad del índice Dst y porcentaje de variación de las cuentas del TNS-SN (canales S1, S1_Anti y Layer 1), para la tormenta geomagnética del 17 de marzo del 2015.

En la Figura 5.3, se muestra la tormenta geomagnética del 17 de marzo, tratándose de la más intensa de este año, provocada por una EMC emitida el 15 de marzo. Se aprecia claramente en el índice Dst un ascenso súbito, seguido por la caída de la intensidad del campo geomagnético hasta -223 nT a las 21 hrs TU. Los datos registrados por el TNS-SN no muestran una tendencia que corresponda con la máxima caída en el índice Dst, debido a que, nuevamente, la variación diurna amplificada es muy grande, como se muestra en la tabla 5.2. Para el canal S1, el porcentaje de variación alcanza 7.82%, que es mucho mayor que cualquier variación atribuida a eventos solares de gran escala.

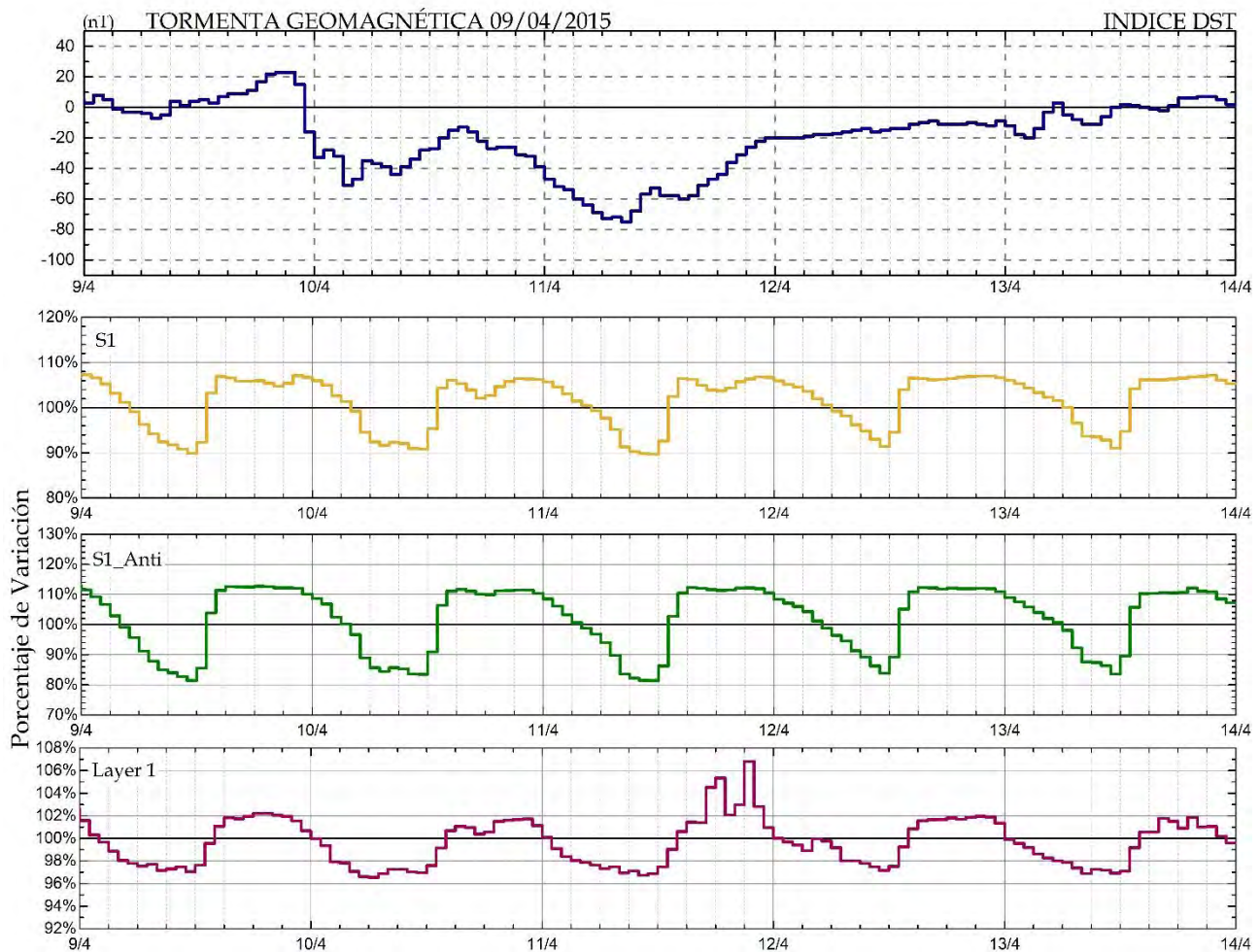


Figura 5.4. Intensidad del índice Dst y porcentaje de variación de las cuentas del TNS-SN (canales S1, S1_Anti y Layer 1), para la tormenta geomagnética del 9 de abril del 2015.

Para la figura 5.4, encontramos una tormenta geomagnética moderada con una fase de ascenso súbito en el Dst el día 9, lo que marca su inicio y que alcanza el valor de -79 nT el día 11 de abril. Los últimos efectos causados por la EMC ocurrida el día 6 se sumaron a el impacto de una región de interacción corrotante. Durante los días de la tormenta geomagnética, nuevamente no se aprecia en ningún canal analizado que los datos salgan del intervalo en el que se encontraban 72 horas previas, indicando que no hay una variación significativa atribuida al evento.

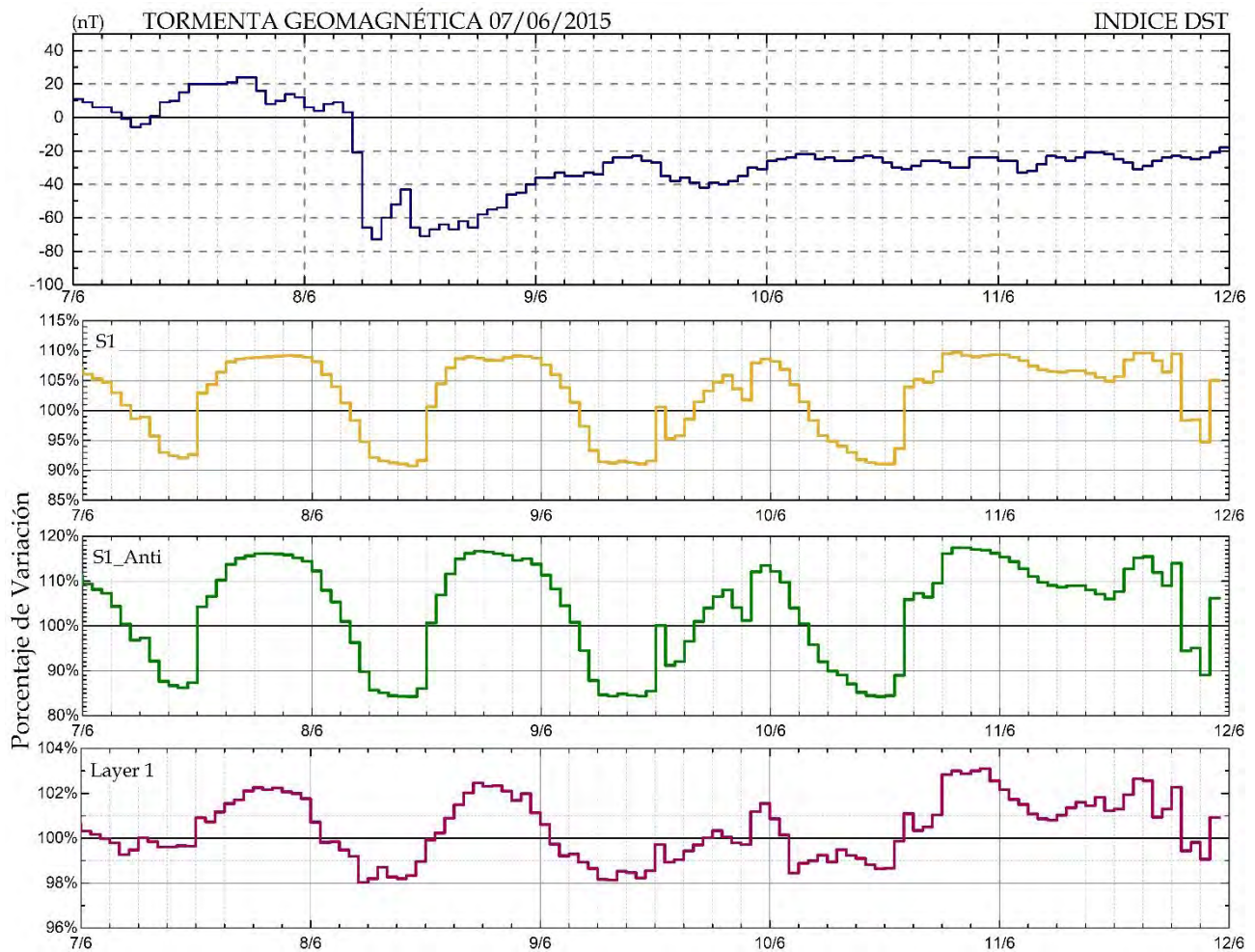


Figura 5.5. Intensidad del índice Dst y porcentaje de variación de las cuentas del TNS-SN (canales S1, S1_Anti y Layer 1), para la tormenta geomagnética del 7 de junio del 2015.

En la figura 5.5 podemos apreciar claramente, con base en el índice Dst, que se presentó una tormenta geomagnética moderada, la cual inicia el día 7 de junio. El

índice Dst bajó hasta -73 nT el 8 de junio a las 8 hrs TU. Este evento fue producto del impacto de una región de interacción corrotante y una EMC. Viento solar rápido se originó en un hoyo coronal en el hemisferio sur del Sol y la EMC se produjo a partir de la explosión de un filamento. Todos los canales analizados tuvieron un comportamiento similar durante el evento y en ninguno se encontró alguna variación significativa relacionada el mismo, debido a la variación diurna amplificada. Incluso en el canal Layer 1, que tuvo durante el evento una variación diurna promedio de 1.73%, no se encontraron variaciones significativas relacionadas al mismo.

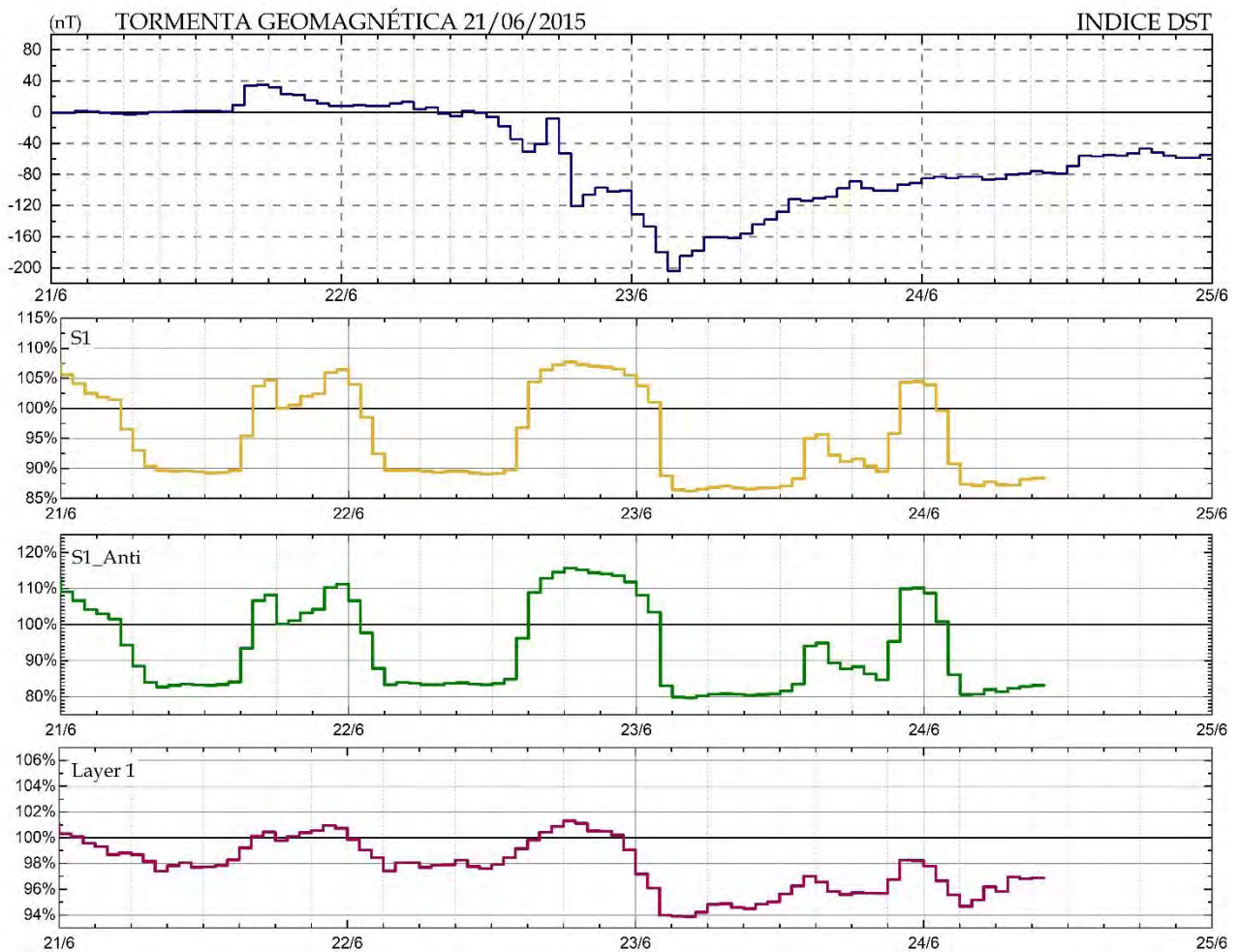


Figura 5.6. Intensidad del índice Dst y porcentaje de variación de las cuentas del TNS-SN (canales S1, S1_Anti y Layer 1), para la tormenta geomagnética del 21 de junio del 2015.

La figura 5.6 presenta otra tormenta geomagnética extrema ocurrida el 21 de junio, donde el Dst alcanzó un valor de -204 nT el día 23. Este evento fue originado a partir de una fulguración M2 en la madrugada del 21 de junio, que liberó una EMC. Este evento, generó el decrecimiento Forbush más intenso del año 2015, registrado por el MN-CDMX. El TNS-SN solo registró datos hasta la mitad del día 24 y se observa, nuevamente, una variación diurna que opaca cualquier posible variación en la intensidad de radiación cósmica detectada en cualquiera de los canales.

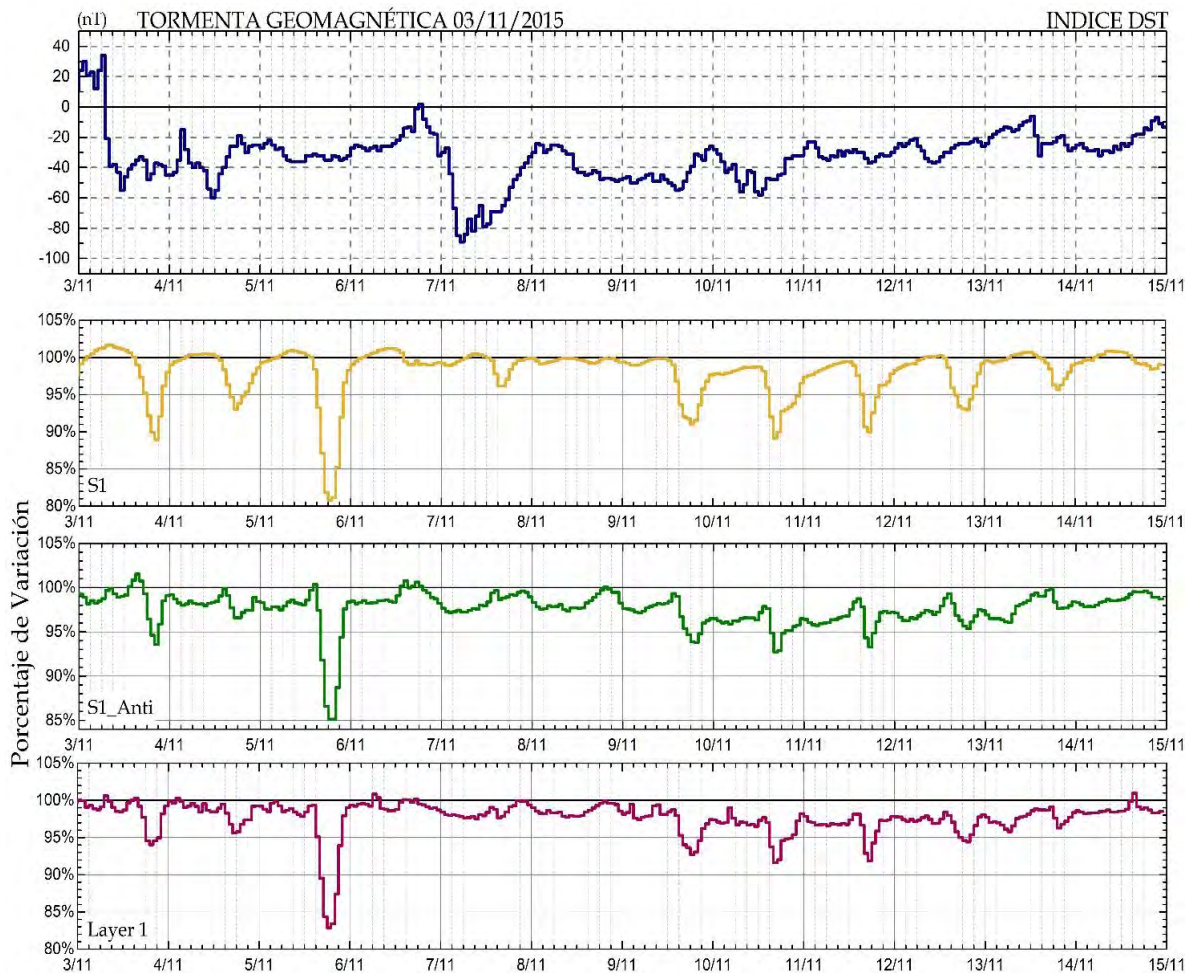


Figura 5.7. Intensidad del índice Dst y porcentaje de variación de las cuentas del TNS-SN (canales S1, S1_Anti y Layer 1), para la tormenta geomagnética del 3 de noviembre del 2015.

La figura 5.7 nos muestra una serie de tormentas geomagnéticas sobrepuestas, que inician el 3 de noviembre y que alcanzan un valor mínimo del Dst

de -96 nT el día 7. El evento es producto de una serie de regiones de interacción corrotante, donde el viento solar rápido se originó de distintas zonas de hoyos coronales en el disco solar, además de una EMC ocurrida el día 7 de noviembre. En los tres canales analizados, la variación diurna que se observa es menor en comparación a los otros eventos, pero sigue presentando una alta significancia, la que impide que en este evento se observen las posibles afectaciones en la intensidad de rayos cósmicos registrados.

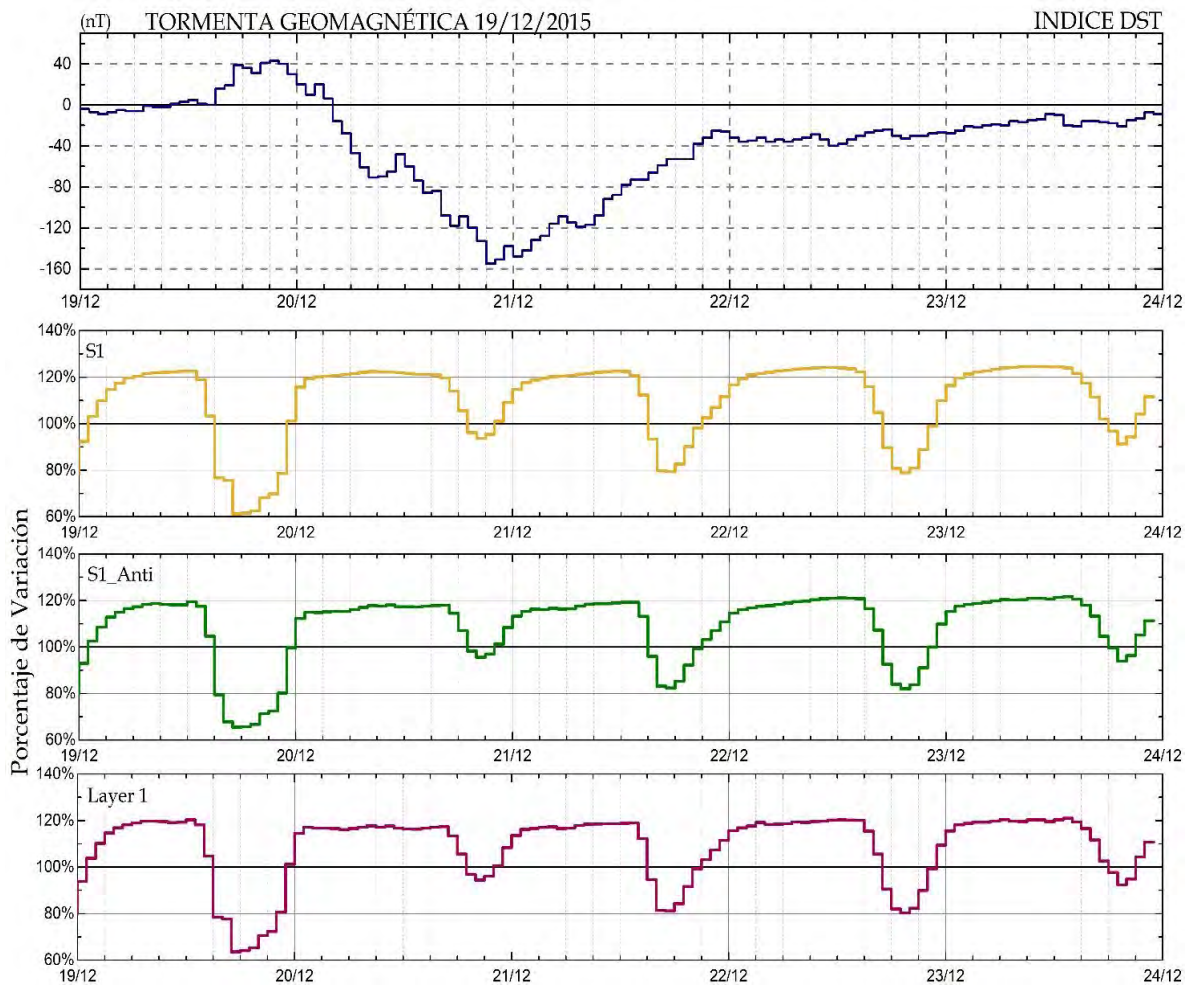


Figura 5.8. Intensidad del índice Dst y porcentaje de variación de las cuentas del TNS-SN (canales S1, S1_Anti y Layer 1), para la tormenta geomagnética del 19 de diciembre del 2015.

En la Figura 5.8 se muestra la tormenta geomagnética que inició el 19 de diciembre, se observa un ascenso súbito de la intensidad del índice Dst de 43 nT. El

20 de diciembre a las 22 hrs TU, el valor del índice Dst cae hasta -155 nT, producto de dos EMC, detectadas el 16 de diciembre; una fue producto de una fulguración C6.6 y la otra de la explosión de un filamento. De nuevo, la variación diurna esta tan amplificadas que opaca cualquier posible variación de la radiación cósmica debida a este evento. Todos los canales analizados tuvieron un promedio de más del 20% en el valor de la variación diurna, valor muy por arriba de cualquier posible variación atribuida a tormentas geomagnéticas.

Con base en la Tabla 5.2, observamos que el porcentaje promedio de la variación diurna registrada por los canales analizados del TNS-SN, para los eventos estudiados, son mucho más significantes que las variaciones atribuidas a las tormentas geomagnéticas. Por ejemplo, en todos los eventos analizados para todas las partículas cargadas registradas (*Canal S1*), se observa que la variación diurna tuvo incrementos superiores al 3.3%, valor muy por encima del valor de la variación diurna registrada por el monitor de neutrones de la CDMX, que es del 0.7% del promedio de los datos. De este modo, podemos esperar que sólo eventos muy energéticos pueden generar variaciones significantes en los registros del telescopio.

La razón de la variación diurna amplificada que observamos en el TNS-SN, en comparación con el MN-CDMX, puede explicarse por la respuesta de los detectores a la energía de las partículas incidentes, representada en la figura 5.9. En esta figura, se muestra la función de respuesta del monitor de neutrones de la CDMX y del TNS-SN para marzo de 2012, [34]. Se observa que ambos equipos responden similar para partículas que ingresan al tope de los detectores, ya que la rigidez umbral es muy similar (8.23 GV y 8.24 GV), pero el TNS-SN está instalado a 4580 m s.n.m. y el monitor de neutrones de la CDMX a 2274 m s.n.m. Esta diferencia en la profundidad atmosférica juega un papel relevante en los distintos registros de los detectores. De este modo, para la componente de baja energía de la cascada secundaria, la absorción atmosférica alcanza al menos un orden de magnitud [34].

Con base en esto, sabemos que, a la profundidad atmosférica en la cima de Sierra Negra, las componentes hadrónica y electromagnética son muy superiores que a la profundidad atmosférica de la Ciudad de México. Este fenómeno, sumado al proceso de adquisición de datos del TNS-SN provoca que la variación diurna se detecte de forma muy amplificada y las posibles variaciones causadas por estos eventos pasarán desapercibidas en un equipo mayormente sensible a altas energías.

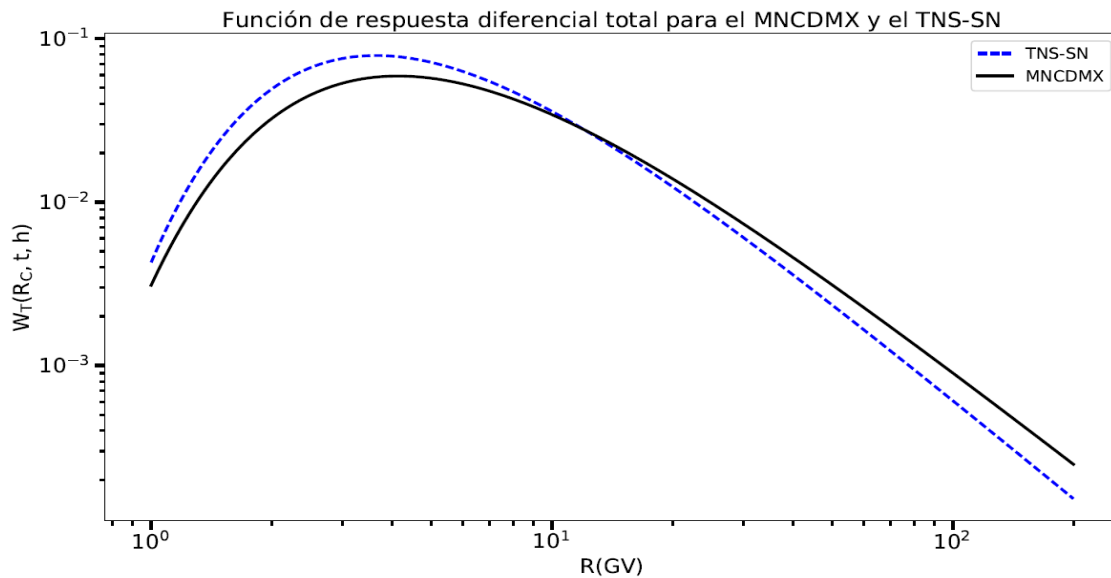


Figura 5.9. Función de respuesta del monitor de neutrones de la Ciudad de México (MNCDMX) y del Telescopio de Neutrones Solares en Sierra Negra (TNS-SN). Se observa que para bajas energías el MNCDMX tiene una mejor detección y para altas energías, el TNS-SN detecta más eficientemente. Tomado de [34].

Sin embargo, la figura 5.10 muestra un decrecimiento Forbush detectado por el TNS-SN durante una tormenta geomagnética el 8 de marzo de 2012. Este evento pudo ser detectado porque se presentaron dos factores primordiales, el índice Dst bajó hasta -75 nT y se mantuvo con variaciones menores a 50 nT por 15 horas; además, la variación diurna registrada por el TNS-SN para ese evento fue del 2%, [35]. De este modo, las variaciones ocasionadas por el evento alcanzaron 5.31% y superaron la variación diurna amplificada (2%), permitiendo la detección del

decrecimiento Forbush. A partir de este resultado, se concluyó que el TNS-SN es un instrumento confiable para el análisis de los decrecimientos Forbush, sólo cuando la perturbación geomagnética sea muy intensa y provoque variaciones en las cuentas de rayos cósmicos de, al menos, el 5% sobre el promedio registrado, además de que la variación diurna no pase de este valor.

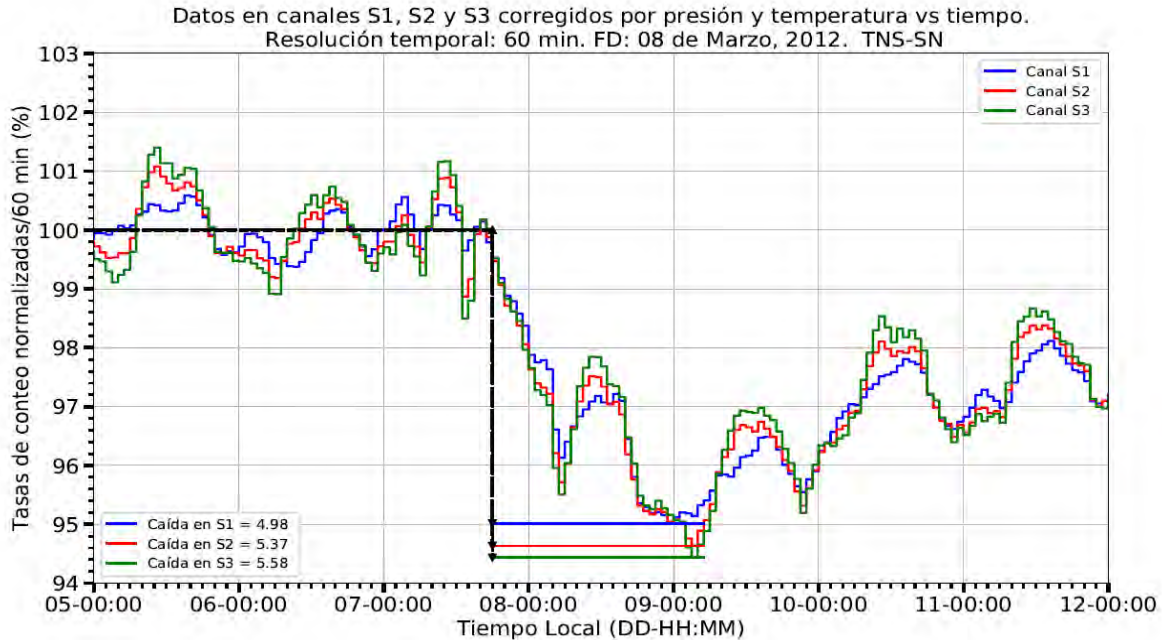


Figura 5.10. Decrecimiento Forbush detectado por el TNS-SN (canales S1, S2 y S3) para el 08 de marzo de 2012. El porcentaje promedio de caída fue del 5.31%. Para este evento, el valor máximo de la variación diurna registrada por el TNS-SN fue de 2% por lo que se pudo detectar el dF. Tomado de [35].

Por otro lado, se ha demostrado que en eventos solares con producción de partículas energéticas y de corta duración, el equipo responde de manera adecuada en su detección. Un claro ejemplo lo podemos ver en la figura 5.11. En esta figura, se observa un evento de partículas energéticas solares registrado por el TNS-SN para la fulguración X17 del 7 de septiembre de 2005. Para este evento, se muestra claramente que el incremento en las partículas se registró por 25 minutos y alcanzó una variación de 15.8σ sobre el fondo de los rayos cósmicos entre las 16 y las 19 hrs

TU [34], indicando un fuerte exceso en el flujo de neutrones, considerando que a partir de 3σ se considera una variación estadísticamente significativa [2]. Con base en la gráfica, se observa que el TNS-SN es susceptible a eventos muy energéticos, de corta duración y focalizados, a diferencia de las variaciones atribuidas a tormentas geomagnéticas, donde las variaciones pueden ser de días y hasta semanas.

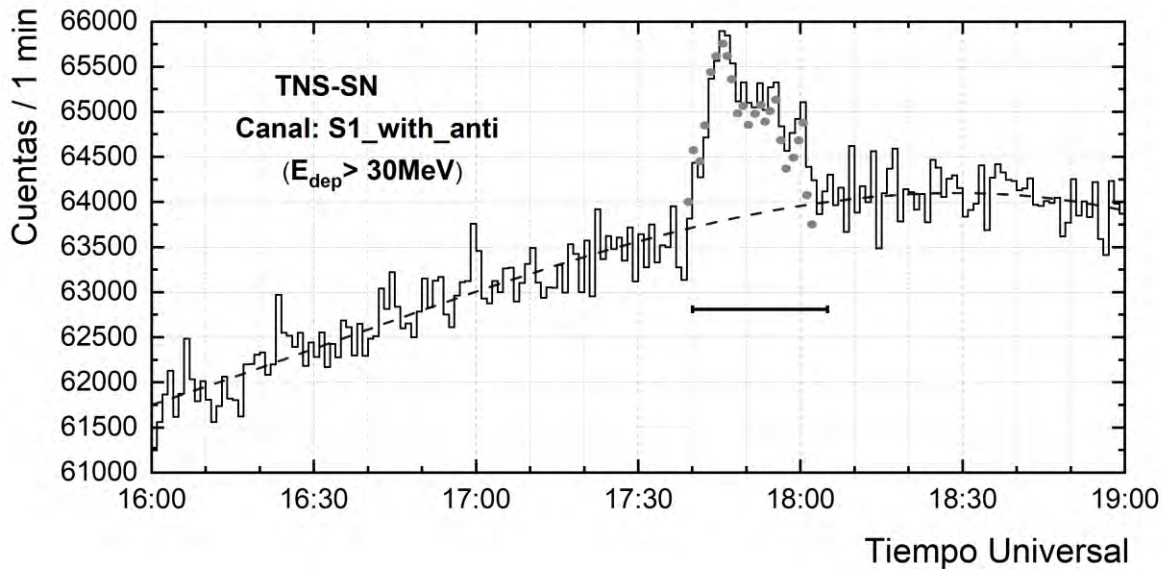


Figura 5.11. Evento de partículas energéticas solares detectado por el TNS-SN para la fulguración X17 del 07 de septiembre de 2005. El evento fue muy energético (15.8σ) y la emisión se registró por 25 minutos (17:30-18:05 TU). La línea punteada representa el promedio de los datos. Tomado de [34].

CONCLUSIONES

No se encontraron variaciones significativas en el conteo de rayos cósmicos cargados o neutros en el Telescopio de Neutrones Solares de Sierra Negra (TNS-SN), relacionadas con siete tormentas geomagnéticas ocurridas en el año 2015. Esto puede explicarse por la alta fluctuación en los datos registrados y atribuida a la variación diurna amplificada que varía por evento y es significativamente superior a las variaciones promedio del flujo de la radiación cósmica atribuida a tormentas geomagnéticas, como se muestra en la tabla 5.2. Esta variación diurna amplificada es producto de la alta sensibilidad del telescopio a las partículas energéticas.

Como se mencionó en el capítulo 5, el MN-CDMX registra una variación diurna de 0.7% y, por lo tanto, si logra detectar variaciones significativas en el conteo de radiación cósmica durante tormentas geomagnéticas.

El factor más importante, es la menor profundidad atmosférica en la que se ubica el TNS-SN a diferencia de otros equipos, como el MN-CDMX. Ambos equipos se encuentran en una región con rigidez umbral similar; sin embargo, el TNS-SN se encuentra a una profundidad atmosférica de 575 g/cm², donde las componentes hadrónica y electromagnética del chubasco de partículas es mucho más intenso y provocan que la variación diurna se vea amplificada.

La alta resolución temporal que significa un evento generado por una tormenta geomagnética, del orden de días a semanas, influye en el análisis de las variaciones del flujo de rayos cósmicos detectados por el TNS-SN. De hecho, el detector es especialmente sensible ante eventos solares focalizados y que producen eventos de partículas solares energéticas (SEPs) en el intervalo de minutos; por lo tanto, no se ven opacados por la variación diurna amplificada. Por esto, el TNS-SN es una herramienta adecuada para el estudio de eventos de partículas energéticas solares, las cuales son aceleradas en fulguraciones.

Para poder observar variaciones en eventos de escala temporal alta, como los ocurridos durante las tormentas geomagnéticas o decrecimientos Forbush, se

requiere que la influencia que provoquen estos fenómenos sobre la radiación cósmica sea muy intensa, de al menos 5% sobre el promedio de los datos, siempre y cuando la variación diurna no supere este porcentaje

Finalmente, con base en la rigidez umbral, la profundidad atmosférica y función de respuesta del TNS-SN, podemos concluir que es un buen detector del flujo de la componente más energética de los rayos cósmicos secundarios y puede detectar variaciones atribuidas a tormentas geomagnéticas siempre y cuando estas variaciones superen el 5% del promedio de datos registrados y la variación diurna amplificada no supere este porcentaje. De este modo, ahora sabemos que el TNS-SN está diseñado para detectar de forma eficiente eventos de partículas energéticas solares. Cambiar la electrónica, sistema de adquisición de datos y programación del equipo con la finalidad de adaptarlo para la detección de variaciones menos energéticas y de mayor duración sería muy caro e impráctico. Sin embargo, para futuros estudios de las variaciones de los rayos cósmicos atribuidos a tormentas geomagnéticas en México, se podrá hacer uso del nuevo telescopio centellador de rayos cósmicos, llamado SciCRT e instalado en la cima de Sierra Negra desde 2015. Este equipo se encuentra actualmente en proceso de calibración y funcionamiento total [36].

REFERENCIAS

- [1] Lang, K. R. (2009). *The sun from space*. Berlin: Springer.
- [2] González, L. X. (2010). *El Telescopio de Neutrones Solares en Sierra Negra y Aceleración de Iones en la Atmósfera Solar* (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México.
- [3] Briggs, R. P., Carlisle, R. J., & Poppe, B. B. (2016). *Solar physics and terrestrial effects: a curriculum guide for teachers, grades 7--12* (Third ed.). Space Environment Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- [4] Cordero, G., Lara, A., Maravilla, D., Mendoza, B., & Valdés Galicia, J. F. (2013). *Introducción a la Física Espacial*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [5] Solanki, S. K. (2003). Sunspots: An overview. *Astronomy and Astrophysics Review*, 11(2-3), 153-286.
- [6] Solanki, S. K. (2004). Structure of the solar chromosphere. *Proceedings of the International Astronomical Union, 2004(IAUS223)*, 195-202.
- [7] Judge, P. (2006). Observations of the Solar Chromosphere. In *Solar MHD Theory and Observations: A High Spatial Resolution Perspective* (Vol. 354, ASP Conference Series, pp. 259-275). Astronomical Society of the Pacific.
- [8] Laboratorio de Ciencias Geoespaciales de la ENES unidad Morelia. <http://www.lacige.unam.mx/>
- [9] Librería de imágenes de la corona solar de Nasa Image and Video Library. <http://www.nasaimages.org/>
- [10] Benestad, R. E. (2006). *Solar Activity and Earth's Climate* (Second ed.). U.K.: Springer/Praxis.
- [11] Nagatsuma, T. (2002). Geomagnetic Storms. *Journal of the Communications Research Laboratory, Vol. 49 No. 3*, 139-154
- [12] Webb, D. F. (2004). Coronal Mass Ejections and Space Weather. *Proceedings of the International Astronomical Union, 2004(IAUS223)*, 499-508.
- [13] Stanev, T. (2013). *High Energy Cosmic Rays*. Berlin: Springer Berlin.
- [14] Smart, D. F., & Shea, M. A. (1985). Handbook of geophysics and the space environment, Chapter 6: Galactic Cosmic Radiation and Solar Energetic Particles. *Air Force Geophysics Laboratory, Air Force Systems Command, United States Air Force*.
- [15] <http://courses.atlas.illinois.edu/fall2009/astr/astr596npa/LECTURES/Lect39.html>.
- [16] Wolchover, B. (2015, May 14). Ultrahigh-Energy Cosmic Rays Traced to Hotspot. Consultado el 18 de febrero, de <https://www.quantamagazine.org/ultrahigh-energy-cosmic-rays-traced-to-hotspot-20150514/>.

- [17] Parizot, Etienne, (2014). "Cosmic Ray Origin: Lessons from Ultra-High-Energy Cosmic Rays and the Galactic/Extragalactic Transition." *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, vol. 256-257, pp. 197-212.
- [18] Potgieter, Marius S. (2013). "Solar Modulation of Cosmic Rays." *Living Reviews in Solar Physics*, vol. 10.
- [19] Alania, M. V., & Wawrzynczak, A. (2008). Forbush decrease of the galactic cosmic ray intensity: experimental study and theoretical modeling. *Astrophysics and Space Sciences Transactions*, 4, 59-63.
- [20] Otaola, J. A., & Valdés Galicia J. F. (1992) *Los rayos cósmicos: Mensajeros de las estrellas*. México: FCE, SEP, CONACyT.
- [21] Miyahara, Hiroko, et al. "Influence of the Schwabe/Hale solar cycles on climate change during the Maunder Minimum." *Proceedings of the International Astronomical Union*, vol. 5, no. 264, 2009, pp. 427-433.
- [22] Matzka, J., Chulliat, A., Manda, M., Finlay, C.C. and Qamili, Earth's Geomagnetic Observations for Main Field Studies: From Ground to Space. Published online: Springer, 2010
- [23] Lanza, R., & Meloni, A. (2011). *The Earth's magnetism: an introduction for geologists*. Berlin: Springer.
- [24] Russell, C. T. (2004). Outer planet magnetospheres: A tutorial. *Advances in Space Research*, 33(11), 2004-2020.
- [25] Knipp, D. J., McQuade, M. K., & Kirkpatrick, D. (2011). *Understanding space weather and the physics behind it*. Boston: Learning Solutions.
- [26] Baumjohann, W., Blanc, M., Fedorov, A., & Glassmeier, K. (2010). Current Systems in Planetary Magnetospheres and Ionospheres. *Space Science Reviews*, 152(1-4), 99-134.
- [27] <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>
- [28] Barón, M. G. (2018). *Análisis de estabilidad de partículas neutras detectadas por el Telescopio de Neutrones Solares en Sierra Negra, Puebla*, (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México.
- [29] Valdés-Galicia, et al., (2004). An improved solar neutron telescope installed at a very high altitude in México. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 535(3), 656-664
- [30] Anzorena, M. A. (2014). *Identificación de partículas neutras mediante análisis de forma de pulso en el Telescopio de Neutrones Solares en Sierra Negra, Puebla*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.

- [31] Y. Muraki, et al., (2004). A data taking system with low power consumption for cosmic ray research. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 530:367-378
- [32] <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>
- [33] <http://www.solen.info/solar/>
- [34] González, L. X., Valdés-Galicia, J. F., Sánchez, F., Muraki, Y., Sako, T., Watanabe, K., Hurtado, A. (2015). Re-Evaluation of The Neutron Emission from The Solar Flare of 2005 September 7, Detected by The Solar Neutron Telescope at Sierra Negra. *The Astrophysical Journal*, 814(2), 136.
- [35] Barrantes, M. N. (2018). *Determinación de la Influencia de los parámetros atmosféricos en el flujo de rayos cósmicos registrado en el TNS de Sierra Negra, Puebla*. (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México.
- [36] Nagai, Y. (2015). *Observation of cosmic ray by the new solar neutron telescope, SciCRT*. (Tesis de Doctorado). Nagoya University, Japón.