



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

EAP. DE FÍSICA

Estudio de las tormentas geomagnéticas durante el ciclo solar 23^o

MONOGRAFÍA

Para optar el Título de Licenciada en Física

AUTOR

Ruth Analy Atalaya Chávez

LIMA – PERÚ
2015

Dedicatoria

Quiero dedicar esta monografía a mis padres y a Dios.

A mis padres, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento.

A Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar.

Índice General

Resumen

Listado de Figuras

Listado de Tablas

Capítulo I – Introducción

Capítulo II – Fundamento Teórico

2.1 Descripción del magnético terrestre.

2.1.1 Origen del Campo Geomagnético.

2.1.2 Ecuaciones importantes en la teoría dínamo.

2.2 Componentes del campo Geomagnético.

2.3 Variaciones del Campo Geomagnético

2.4 Interacción Sol y Tierra: Magnetosfera terrestre.

2.5 El Sol y Su estructura.

2.6 La actividad solar.

2.7 Erupciones solares.

2.8 Tormentas geomagnéticas.

2.8.2 Fases de una tormenta geomagnética.

2.8.2 Clasificación de las tormentas geomagnéticas.

Capítulo III – Datos y Análisis

3.1 Análisis de los datos geomagnéticos de octubre y noviembre del 2003.

3.2 Descripción de la tormenta geomagnética de octubre del 2003.

3.3 Descripción de la tormenta geomagnética de noviembre del 2003.

Capítulo IV – Conclusiones

Referencias Bibliográficas

Anexos

Resumen

El objetivo principal es entender como las tormentas geomagnéticas pueden estar relacionadas con la actividad solar. En esta monografía se analiza los datos de los observatorios geomagnéticos

(Hermanus, Alice, Huancayo, Kakioka y Boulder), durante los meses de octubre y noviembre del 2003. Estos datos son obtenidos por el Centro Mundial de Datos Geomagnéticos (CMDG) y luego se implementó un programa en matlab para procesar dichos datos, dando como resultados perturbaciones súbitas de la componente geomagnética H para cada observatorio. Estas perturbaciones son ocasionadas por la actividad solar que afecta al campo geomagnético ocasionando así tormentas geomagnéticas. También se clasificó dichas tormentas según su intensidad mediante el índice Dst. Obteniendo como resultados súper tormentas geomagnéticas que se encuentran en un rango $Dst \leq 200nT$.

Listado de Figuras

Fig.1 Dinamo auto- sustentado.

Fig.2 Componentes del campo magnético terrestre.

Fig.3 Representación gráfica de la magnetosfera (líneas moradas y celestes). Las líneas blancas representan las trayectorias de las partículas del viento solar, desviadas por la magnetosfera.

Fig.4 Estructura del Sol.

Fig.5 Manchas solares. <http://www.iac.es/gabinete/difus/ciencia/sol tierra>

Fig.6 Fechas de los Ciclos solares desde 1 hasta 23. <http://www.ips.gov.au>

Fig.7 Fases de una tormenta geomagnética, A: fase inicial, B: fase principal y C: fase recuperadora.

Fig.8 Componentes del campo magnético terrestre H, Z, y D registradas por el observatorio de Huancayo. La última grafica nos muestra el índice Dst.

Fig.9 Variaciones de la componente H del campo magnético terrestre (nT) durante el periodo 9-12 Octubre 2003 (No tormenta geomagnética) las flechas indican el valor de la componente H al medio día en los observatorios geomagnéticos correspondientes.

Fig.10 Variación de la componente H del campo magnético terrestre durante la primera tormenta geomagnética del 28 al 31 de octubre del 2003. Las flechas nos indica la fase inicial de la tormenta.

Fig.11 Variación de la componente H del campo magnético terrestre durante la segunda tormenta geomagnética del 19 al 23 de noviembre del 2003. Las fechas nos indica la fase inicial de la tormenta

Fig.12 Índice Dst en los meses de octubre y noviembre del 2003.

Listado de tablas

Tabla 1. Clasificación de una tormenta magnética de acuerdo al índice Dst.

Tabla 2. Coordenadas geográficas de las estaciones geomagnéticas.

Capítulo I

1.1 Introducción

Cuando hablamos de tormentas geomagnéticas nos referimos a perturbaciones súbitas del campo magnético, las cuales pueden durar horas o varios días y modifican el campo en más de $500nT$.

Estas tormentas geomagnéticas pueden ser muy intensas ocasionando severos daños a nuestros sistemas tecnológicos como son las redes eléctricas, oleoductos, los satélites que se encuentran en órbita, señales de radio, etc. Actualmente somos muy dependientes de la tecnología la cual funciona a través de alguno de estos medios, es por ello la importancia del estudio de las tormentas geomagnéticas.

El objetivo de esta monografía es analizar el comportamiento del campo magnético terrestre durante los periodos del 28 al 31 de octubre y del 19 al 23 de noviembre del año 2003, donde se produjeron tormentas geomagnéticas de intensidad apreciable. En estos meses se observaron las tormentas geomagnéticas más importantes del ciclo solar 23°. Este ciclo empezó en mayo 1996 y finalizó en enero 2008 [1].

El mencionado ciclo solar se caracterizó por un gran número de manchas solares y eyecciones de masa corona (EMC). Algunas de estas eyecciones alcanzaron a nuestro planeta y originaron perturbaciones en el campo magnético terrestre y auroras boreales, las cuales fueron visibles en el sur de Florida y Texas. La monografía está dividida de la siguiente manera. El capítulo 2 describe brevemente las tormentas geomagnéticas. El capítulo 3 presenta el análisis de datos geomagnéticos proporcionados por el Centro Mundial de Datos Geomagnéticos (CMDG). El capítulo 4 mencionamos las principales conclusiones de este estudio.

Capítulo II

2.1 Descripción del campo magnético terrestre

La naturaleza del campo magnético como fenómeno físico es generado a partir de dos formas: la primera es a través de partículas cargadas eléctricamente y en movimiento, y la segunda se debe a que las partículas elementales como los electrones tienen un campo magnético intrínseco a su alrededor. Por su parte el campo geomagnético se origina a partir de la primera definición, es decir, por corrientes eléctricas, las cuales se originan con el movimiento de los materiales en el núcleo externo de la Tierra.

2.1.1 Origen del Campo Geomagnético

Actualmente es bien sabido que el 95% del campo magnético de la Tierra es producido en su interior. Por lo que, dentro de este existe un mecanismo que es capaz de generar y mantener el campo de un simple dipolo. La explicación está en las propiedades y movimientos del núcleo de la Tierra, un cuerpo esférico de material metálico, probablemente de una composición níquel-hierro, cuya parte externa se encuentra en estado líquido. El diámetro del núcleo es de alrededor de 6920 *km*, poco mayor que el radio terrestre. El núcleo se encuentra rodeado por el manto, consistente de roca semisólida y de un espesor de 2860 *km*. El magnetismo interno de la Tierra se explica por la llamada teoría del dínamo, según la cual el núcleo externo (de consistencia líquida) está dando vueltas lentamente, con respecto al manto semisólido, generando de esta manera corrientes eléctricas que rodean al núcleo. Estas corrientes generan a su vez un campo magnético, parte del cual escapa a la superficie de la Tierra, dándonos el campo magnético que observamos, y otra parte interacciona con el núcleo líquido que está en movimiento, sosteniendo de esta manera la acción del dínamo.

Para entender mejor la teoría del dinamo ver la fig.1. En esta figura, la corriente (i), que circula en el circuito, genera un campo magnético (B). El campo magnético inducido decrece con el tiempo, al igual que la corriente, debido a la resistencia del conducto. Sin embargo, el campo magnético variable que atraviesa el disco giratorio, induce una corriente en éste, y la corriente inducida reforzará el campo inicial. Este proceso se repite en un ciclo interminable.

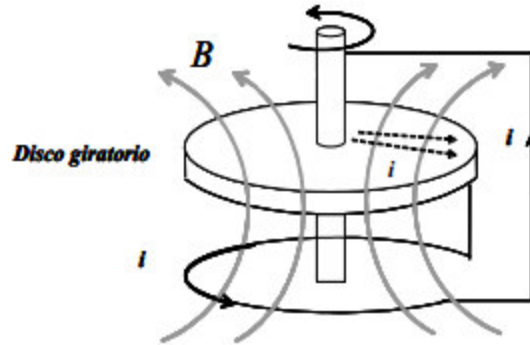


Fig1. Dinamo auto- sustentado.

2.1.2 Ecuaciones importantes en la teoría dínamo:

La teoría del dinamo se describe por las ecuaciones de la magneto hidrodinámica (MHD). Fundamentalmente se trata del comportamiento de un fluido conductor en movimiento en un campo magnético.

Las ecuaciones son las siguientes:

Por lo tanto dentro de las ecuaciones MDH, seleccionamos la ecuación de electrodinámica que involucra la velocidad del fluido, v ; B la inducción magnética, E campo eléctrico y J densidad de corriente (Ley de Ohm) y la ecuación electrodinámica que involucra la variación temporal del campo magnético (Ley de Faraday).

$$J = \sigma \left(E + \frac{(v \times B)}{c} \right) \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

Despejamos E de la ecuación (1)

$$E = \frac{J}{\sigma \nabla \times} - (v \times B) \quad (3)$$

Remplazamos ecuación (3) en (2)

$$\nabla \times (J/\sigma) - \nabla \times \left(\frac{v \times B}{c} \right) = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} \quad (4)$$

Por la ley de Amper:

No consideramos la corriente de desplazamiento

$$J = \frac{c}{4\pi} \nabla \times B \quad (5)$$

Remplazos (5) en (4)

$$\frac{c}{4\pi\sigma} \nabla \times (\nabla \times B) - \frac{1}{c} \nabla \times (v \times B) = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} \quad (6)$$

Despejamos:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) - \frac{c^2}{4\pi\sigma} \nabla \times (\nabla \times B) \quad (7)$$

Sabemos:

$$\nabla \times (\nabla \times B) = \nabla (\nabla \cdot B) - \nabla^2 B = -\nabla^2 B \quad (8)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (9)$$

Remplazamos (8) en (7)

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) + \frac{c^2}{4\pi\sigma} (\nabla^2 B) \quad (10)$$

$$\eta = \frac{c^2}{4\pi\sigma} \text{ Coeficiente de difusión}$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) + \eta (\nabla^2 B)$$

De la ecuación (10) podemos afirmar:

➤ **Fluido en reposo ($v = 0$)**

La ecuación (10) se reduce:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{1}{\sigma \mu} \nabla^2 B$$

Esta ecuación de difusión, que indica decaimiento del campo magnético con el tiempo.

➤ **Conductividad infinita ($\sigma = \infty$)**

Cuando la conductividad es ∞ , el coeficiente de difusión de la ecuación (10) es cero por lo que no aparece la ecuación de difusión.

Queda descrita:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B)$$

Esta ecuación tiene una estructura matemática fácil de analizar como un teorema en la hidrodinámica:

Q: campo vectorial en un fluido, según la ecuación

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \nabla \times (v \times Q)$$

$$\frac{d}{dt} \int_S Q \cdot dS = 0$$

La analogía entre las ecuaciones, podemos obtener como resultado el teorema de Afven :

$$\frac{d}{dt} \int_S B \cdot dS = 0$$

En otras palabras, el teorema Alfvén declara que el flujo magnético, a través de cualquier espira que se mueva solidaria al fluido, es constante el tiempo; por lo tanto, a medida que el fluido se mueve, él arrastra las líneas de campo magnético con él. En esa situación, el fluido puede fluir libremente en la dirección paralela al campo magnético, pero si el vector velocidad del fluido tenga una componente perpendicular a B las líneas serán arrastradas con el fluido.

2.2 Componentes del campo Geomagnético

La intensidad del campo geomagnético es representada generalmente de dos maneras:

- Componentes XYZ : Tres componentes ortogonales entre sí, siendo X y Y componentes horizontales que apuntan hacia el Norte y Este respectivamente. Z es la componente que apunta hacia el centro de la Tierra.
- Componentes HDI : H es la magnitud de la componente horizontal que es considerada positiva cualquiera sea su dirección; D es la declinación magnética: ángulo que se mide desde la componente X hacia H ; e I es el ángulo formado entre la intensidad total y la componente horizontal.

La fig. 2 ilustra la relación existente entre estas componentes.

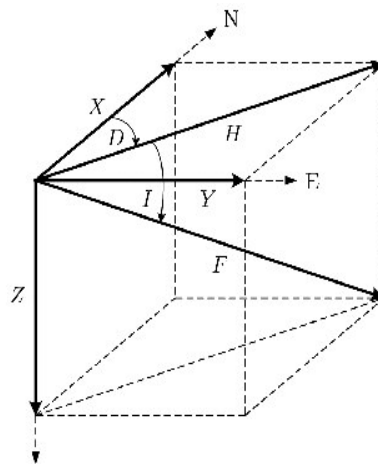


Fig.2 Intensidad del campo magnético B , sus componentes ortogonales X , Y , Z y componentes H , D e I .

B: Intensidad del campo magnético.

H: Proyección del campo magnético sobre el plano horizontal.

D: Declinación (ángulo que forma la componente H con la dirección norte geográfico).

I: Inclinación (ángulo que forma el vector de campo geomagnético con el plano horizontal).

X: Es la componente horizontal en la dirección del norte geográfico.

Y: Es la componente horizontal en la dirección del este geográfico.

Z: Es la componente vertical.

Las unidades de las componentes B, H y Z son nano Tesla (nT). Mientras D y I se miden en grados.

Tenemos las siguientes relaciones:

$$D = \tan^{-1}(Y/X) = \cos^{-1}(X/H),$$

$$F = (H^2 + Z^2)^{1/2}, H = (X^2 + Y^2)^{1/2},$$

$$I = \tan^{-1}(Z/H), B = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2}.$$

2.3 Variaciones del Campo Geomagnético

El campo geomagnético varía con el tiempo. La razón de cambio de las diferentes componentes no son uniformes y éstas pueden ser clasificadas de la siguiente manera (Cillis & Sciutto 2006):

Variaciones Seculares: Son variaciones que se extienden durante varios años. Estos se originan por cambios en el interior de la Tierra y son generalmente incrementos y decrementos suaves y lentos. Los valores de la variación secular de las componentes del campo van desde $10nT$ por año a $150nT/año$.

Variaciones Periódicas:

Se originan debido a la influencia de campos externos y en general equivalen a menos de $100nT$

Los periodos característicos son *12 h, 1 día, 27 días, 6 meses, 1 año, 11 años, 22 años*, etc.

Estas están relacionadas con la rotación de la tierra y la influencia del Sol y la Luna.

Tormentas magnéticas: Son perturbaciones súbitas del campo magnético, las cuales pueden durar horas o varios días y modifican el campo en más de $500nT$

2.4 La relación Tierra-Sol: La magnetosfera

El campo magnético terrestre está sujeto a una llegada continua de flujo de plasma procedente del Sol, que se conoce con el nombre de viento solar. La interacción entre éste y el campo magnético de la Tierra da lugar a la aparición de una capa de corriente eléctrica, conocida como magnetopausa, por debajo de la cual el campo magnético terrestre ejerce su acción dominante. La región encerrada dentro de la magnetopausa recibe el nombre de magnetosfera. La magnetósfera es una región alrededor del planeta tierra en la que el campo magnético terrestre hace que se desvíe la mayor cantidad de partículas subatómicas provenientes del sol (viento solar) formando así un escudo protector ver Fig.3.

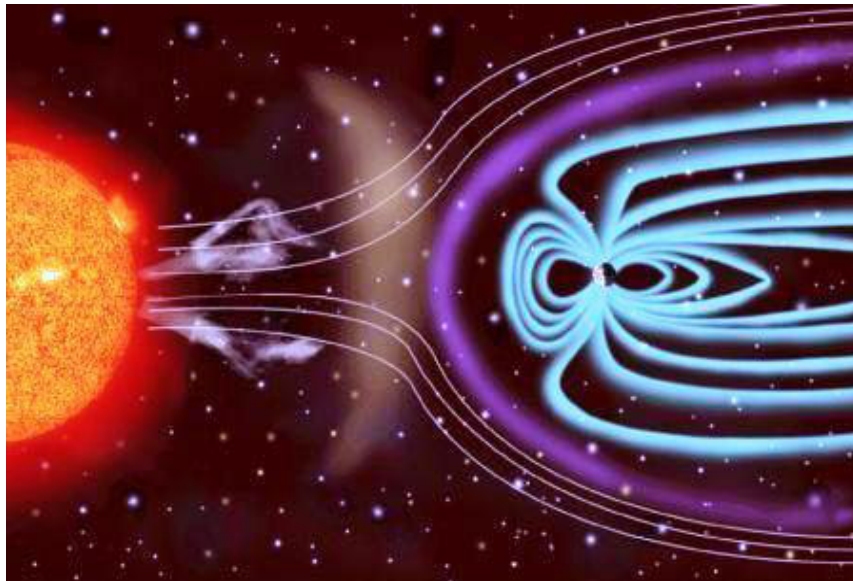


Fig.3 Representación gráfica de la magnetosfera (líneas moradas y celestes). Las líneas blancas representan las trayectorias de las partículas del viento solar, desviadas por la magnetosfera.

2.5 El Sol y Su estructura

El Sol

El Sol es el objeto central de nuestro sistema solar. Se ha formado hace 6.5 billones de años a partir de una enorme nube interestelar de gas frío. Está compuesto principalmente de dos elementos hidrógeno y helio. Sus abundancias han cambiado a lo largo de su vida, por lo que hoy el hidrógeno y el helio representan el 74.9 % y el 23.8 %, respectivamente de su masa total. El oxígeno sólo contribuye con el 1 %, el carbono con el 0.3 % y el neón y el hierro con el 0.2 %.

La temperatura del Sol es tan alta que su material se encuentra en estado plasmático, esto es separado en iones y electrones. Este estado se conoce comúnmente como el cuarto estado de la materia, donde las partículas de materia tienen carga eléctrica. El material de un plasma interactúa con campos eléctricos y magnéticos. El 99% de la materia visible en el universo está en estado plasmático, por lo que al estudiar a nuestra estrella podemos aprender sobre fenómenos que ocurren comúnmente en otros entornos.

Su estructura

El Sol posee una forma esférica y a causa de su lento movimiento de rotación tiene un leve achatamiento polar. Su estructura presenta capas esféricas (como si fueran capas de una cebolla). La frontera y la densidad entre las distintas capas son difíciles de establecer. El Sol está formado por las siguientes capas, ver Fig. 4 [2].

- **Núcleo:** es la zona del Sol donde se produce la fusión nuclear debido a la alta temperatura, es decir, el generador de la energía del Sol.
- **Zona Radiativa :** Las partículas que transportan la energía (fotones) intentan escapar al exterior en un viaje que puede durar unos 100.000 años debido a que éstos fotones son absorbidos continuamente y reemitidos en otra dirección distinta a la que tenían.
- **Zona Convectiva:** en ésta zona se produce el fenómeno de la convección, es decir, columnas de gas caliente ascienden hasta la superficie, se enfrían y vuelven a descender.
- **Fotosfera:** es una capa delgada, de unos 300 Km, que es la parte del Sol que nosotros vemos, la superficie. Desde aquí se irradia luz y calor al espacio.

- La temperatura es de unos 5.000°C. En la fotosfera aparecen las manchas oscuras y las fáculas que son regiones brillantes alrededor de las manchas, con una temperatura superior a la normal de la fotosfera y que están relacionadas con los campos magnéticos del Sol.
- **Cromosfera:** Sólo puede ser vista en la totalidad de un eclipse de Sol. Es de color rojizo, de densidad muy baja y de temperatura altísima, de medio millón de grados. Está formada por gases enrarecidos y en ella existen fortísimos campos magnéticos.
- **Corona:** capa de gran extensión, temperaturas altas y de bajísima densidad. Está formada por gases enrarecidos y gigantescos campos magnéticos que varían su forma de hora en hora. Ésta capa es impresionante vista durante la fase de totalidad de un eclipse de Sol.

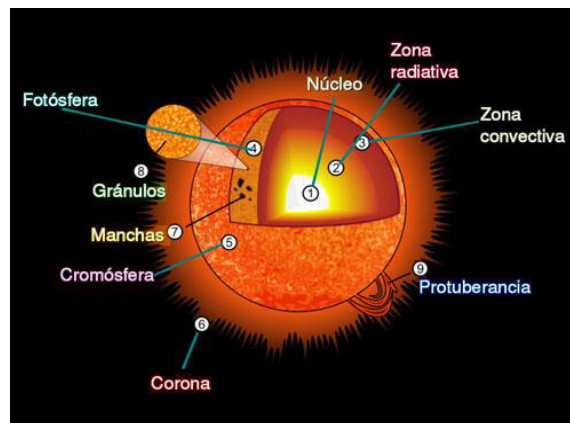


Fig.4 Estructura del Sol. <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>.

2.6 La actividad solar

La actividad solar se manifiesta en las tres capas observables del Sol: la fotosfera, la cromosfera y la corona. Esta actividad se propaga hasta la Tierra en forma de radiación y de partículas subatómicas (llamado viento solar).

La fotosfera es la capa que es más fácil de observar. La manifestación más característica de la actividad solar son las manchas solares que aparecen sobre la superficie del Sol ver Fig. 5. Aunque

las manchas solares ya habían sido detectadas a simple vista varios siglos antes de nuestra era, no fueron conocidas y registradas sistemáticamente como tales hasta la invención del telescopio astronómico (año 1610). Los primeros observadores pronto percibieron que no eran inmutables, sino que tenían una duración y un tamaño variable.

El naturalista alemán Heinrich Schwabe descubrió en 1843 que las manchas parecían presentar un período de unos 10 años, lo que fue confirmado en 1855 por Rudolph Wolf quien halló una periodicidad de 11 años, conocido por ciclo solar ver Fig. 6.

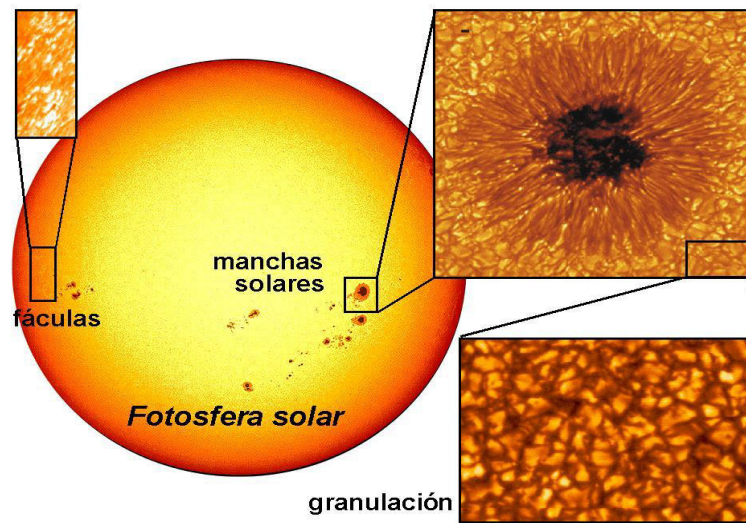


Fig.5 Manchas solares. <http://www.iac.es/gabinete/difus/ciencia/sol tierra>

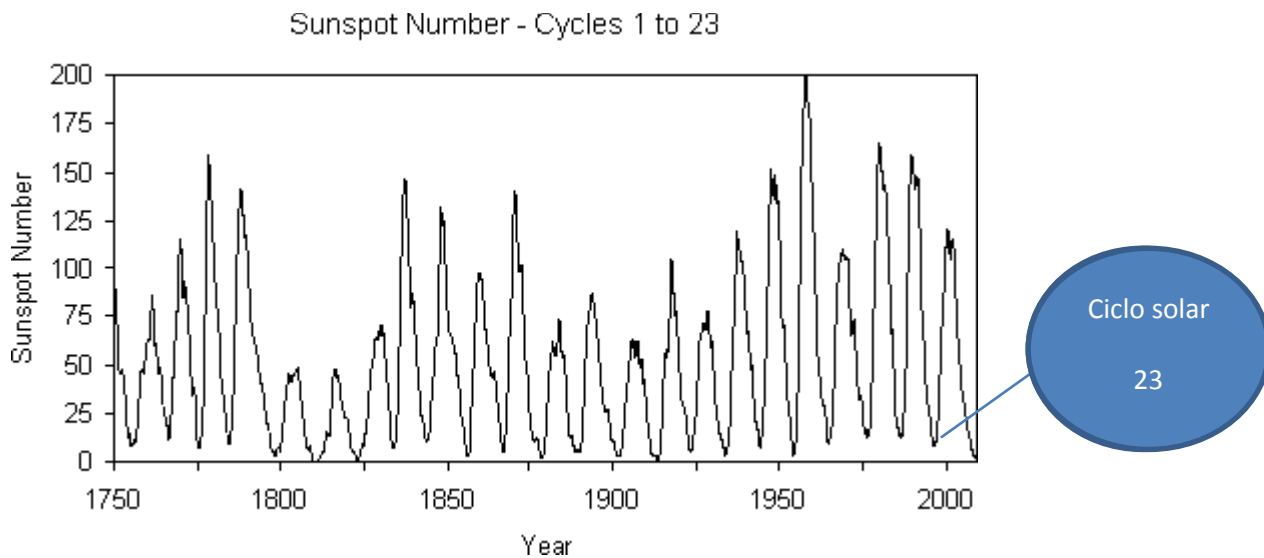


Fig.6 Fechas de los Ciclos solares desde 1 hasta 23. <http://www.ips.gov.au>

2.7 Erupciones solares

Las erupciones solares tienen lugar en la corona solar y la cromosfera, calentando plasma a decenas de millones de grados kelvin y acelerando electrones, protones e iones a velocidades cercanas a la de la luz en el vacío. Estas partículas producen radiación electromagnética en todas las longitudes de onda del espectro electromagnético, desde largas ondas de radio a los más cortos rayos gamma. La mayoría de las erupciones suceden alrededor de manchas solares, donde emergen intensos campos magnéticos de la superficie del Sol hacia la corona.

Las erupciones solares están asociadas a eyecciones de masa coronal (EMC), las cuales son enormes burbujas de material que sale de la corona solar. El material es plasma y principalmente consiste de protones y electrones. La velocidad de las EMC puede ser entre 20 y 3200 km/s, aunque en promedio es de aproximadamente 500 km/s. Cuando la EMC es muy intensa puede afectar de manera importante a la magnetosfera terrestre.

2.8 Tormentas geomagnéticas

Las tormentas geomagnéticas son perturbaciones del campo magnético de la Tierra, que duran desde varias horas hasta incluso algunos días. Su origen es externo y se producen por un aumento brusco de las partículas emitidas en las erupciones solares que alcanzan la magnetosfera, produciendo alteraciones en el campo magnético terrestre [3].

Las tormentas geomagnéticas tienen un carácter global, comenzando simultáneamente en todos los puntos de la Tierra. No obstante, las amplitudes con que se observan las tormentas en distintos lugares son diferentes, siendo mayores cuanto más alta son las latitudes.

La frecuencia con que se producen las tormentas geomagnéticas está relacionada con el ciclo solar.

2.8.1 Fases de una tormenta geomagnética

Las fases de una tormenta geomagnética son tres: la fase inicial (positiva), principal (negativa) y recuperadora [4], Fig.7. La fase inicial (A), también denominado pulso súbito de la componente geomagnética horizontal (H), es consecuencia de la presión que genera la llegada una onda de choque que comprime a la magnetosfera. En la fase principal (B), la componente horizontal (H) disminuye y puede durar por varias horas. En la fase recuperadora(C), H recupera su valor previo a la tormenta.

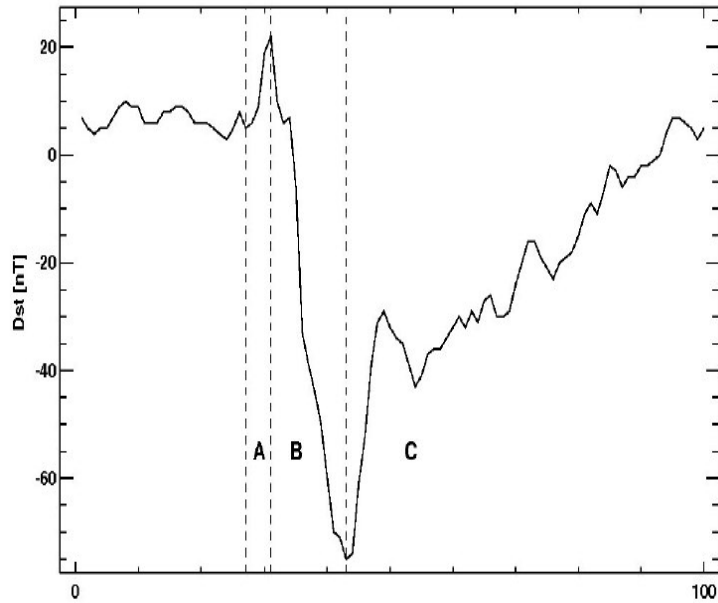


Fig.7 Fases de una tormenta geomagnética, A: fase inicial, B: fase principal y C: fase recuperadora.

2.8 .2 Clasificación de las tormentas geomagnéticas

Las tormentas geomagnéticas son clasificadas de acuerdo a su valor Dst (índice para evaluar la severidad de una tormenta geomagnética basado en el valor promedio de la componente horizontal del campo magnético terrestre (H)). La tabla 1 indica el tipo de tormenta y su correspondiente rango de valores de Dst.

Tabla 1. Clasificación de tormentas geomagnéticas de acuerdo al índice Dst.	
Tipo de tormenta geomagnética	Índice Dst (nT)
Quieto	$Dst > -30$
Débil	$-50 < Dst \leq -30$
Moderado	$-100 < Dst \leq -50$
Intenso	$-200 < Dst \leq -100$
Súper tormenta	$Dst \leq -200$

CAPÍTULO III

3.1 Análisis de los datos geomagnéticos de octubre y noviembre del 2003

La data empleada en el estudio de las tormentas geomagnéticas ha sido obtenida del Centro Mundial de Datos Geomagnéticos (CMDG) (<http://www.wdc.bgs.ac.uk/catalog/master.html>).

En la Fig.8 mostramos de modo especial los datos del observatorio de Huancayo entre octubre y noviembre del 2003. Las tres primeras curvas corresponde a las componentes H, Z y D respectivamente y la última son los datos del índice Dst, obtenidos de la siguiente página web http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html. Los valores de las componentes del campo magnético mostrado son valores promedio en intervalos de un minuto [5]. Los índices Dst son valores promedio en intervalos de una hora.

Para el procesamiento de los datos ASCII obtenidos por el CMDG se elaboró un programa en Matlab (Anexos1y2).

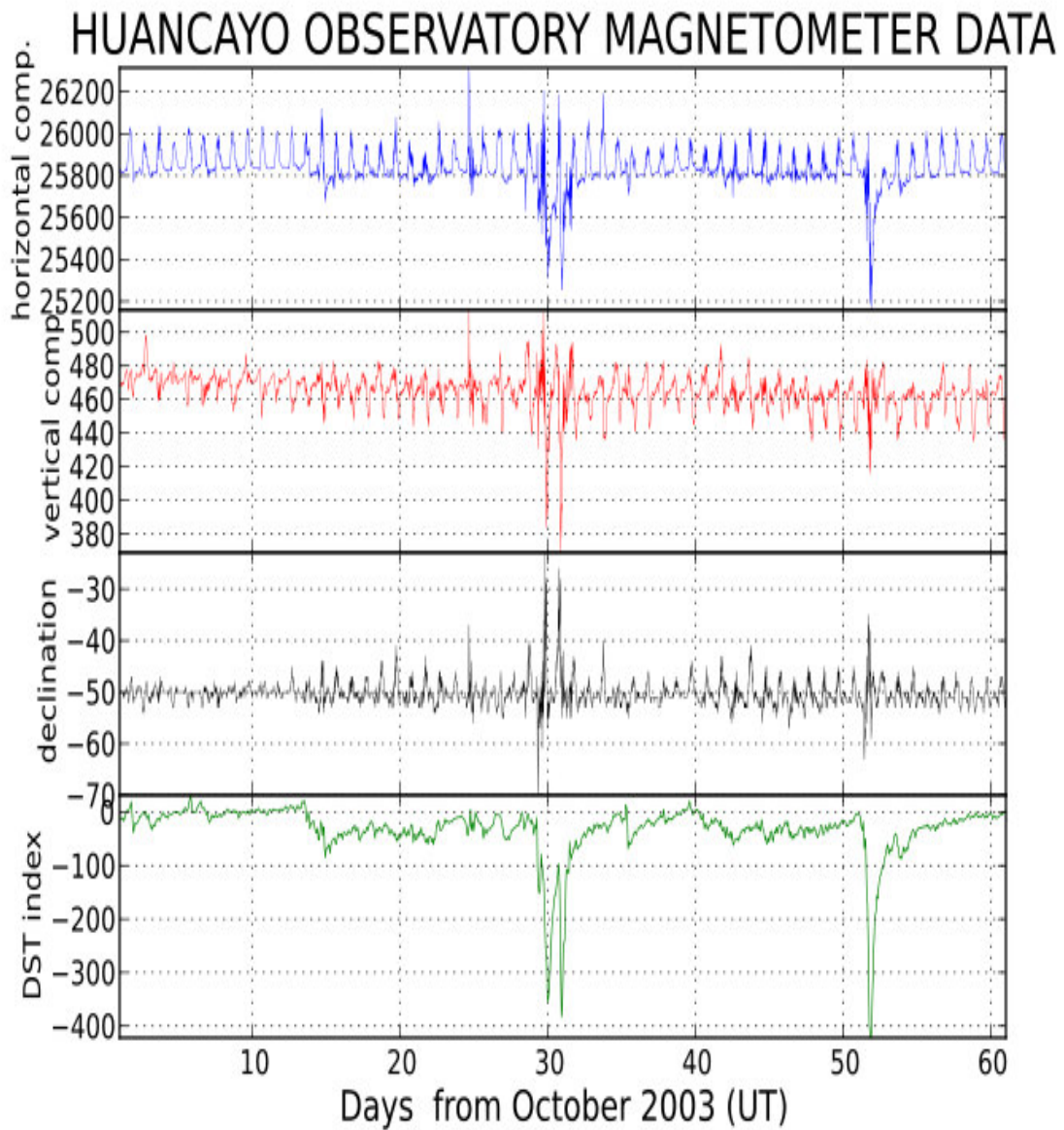


Fig.8 Componentes del campo magnético terrestre H, Z, y D registradas por el observatorio de Huancayo. La última grafica nos muestra el índice Dst.

Para comprender el comportamiento de la magnetosfera terrestre no es suficiente como observaciones de una sola estación geomagnética. Es necesario usar varias estaciones geomagnéticas localizadas en diferentes latitudes y longitudes geográficas. En nuestro estudio hemos considerado las siguientes estaciones, Kakioka (Japón), Alice Springs (Australia), Hermanus (Sudáfrica), Huancayo (Perú) y Boulder (Colorado/USA) ver tabla 2.

Tabla 2. Coordenadas geográficas de las estaciones		
Estación	Latitud	Longitud
Kakioka	+36,23°	140.2°E
Alice Springs	- 23.76°	133.88°E
Hermanus	-34.42°	19.22°E
Huancayo	--12.05°	284.67°E
Bouler	+40.14°	254.8°E

La Fig. 9 muestra la variación de la componente horizontal (H) para los cinco observatorios mencionados en la tabla 2 cuando no hay tormenta geomagnética. Observamos claramente un ciclo de 24 horas (variación diurna) que es muy evidente en el observatorio de Huancayo debido a su cercanía al ecuador magnético.

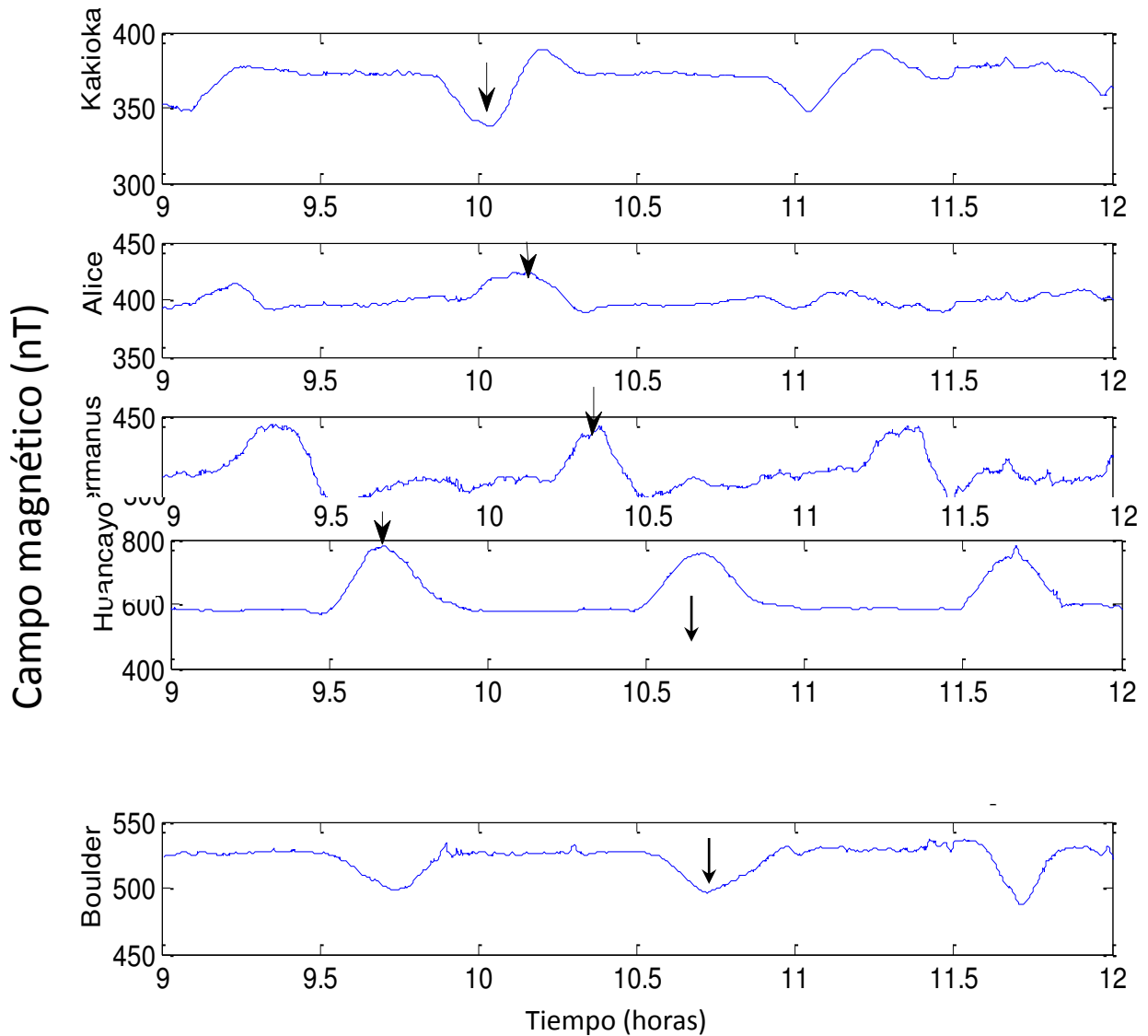


Fig.9 Variaciones de la componente H del campo magnético terrestre (nT) durante el periodo 9-12 Octubre 2003(No tormenta geomagnética) las flechas indican el valor de la componente H al medio día en los observatorios geomagnéticos correspondientes.

En la gráfica anterior se ordenó según la latitud geográfica de los observatorios. Observamos que para los observatorios de Kakioka y Boulder tenemos una variación negativa de 12 y 9 nT respectivamente por encontrarse al norte del electrochorro ecuatorial y para las estaciones de Huancayo, Alice y Hermanus las variaciones son positivas de 53, 8 y 8 nT respectivamente por encontrarse al sur del electrochorro ecuatorial. Los picos observados en la gráfica (marcados con una flecha) corresponden al medio día del lugar donde geográficamente se encuentra el observatorio. Vemos claramente que este efecto se observó primero en Kakioka y Alice Springs, luego en Hermanus, Huancayo y finalmente en Boulder, que corresponde exactamente a su longitud geográfica ordenados de Este a Oeste

3.2 Descripción de la tormenta geomagnética de octubre del 2003

El ciclo solar 23^o se inició en mayo de 1996, siendo su máximo solar en marzo del 2000, y finalizó en enero del 2008. Después de haber pasado el máximo solar se produjeron las 2 tormentas geomagnéticas más importantes de este ciclo en los meses de octubre y noviembre del 2003 [6].

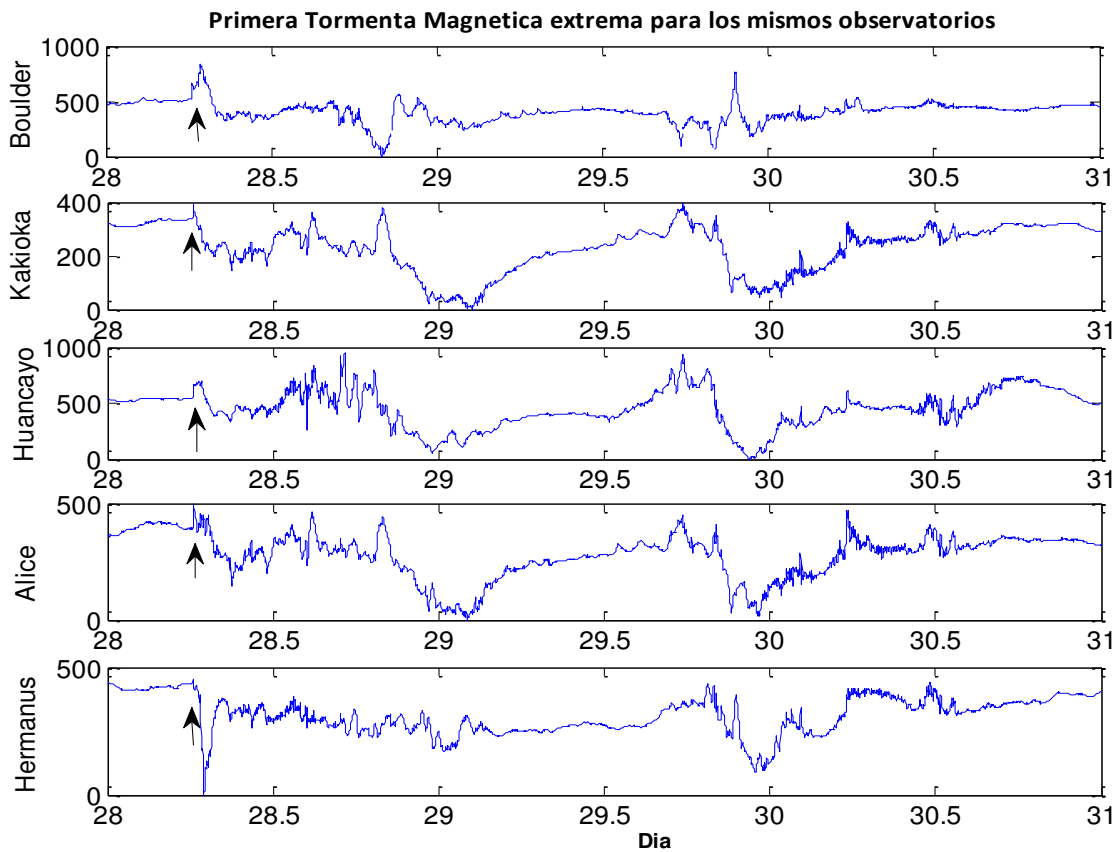


Fig. 10 Variación de la componente H del campo magnético terrestre durante la primera tormenta geomagnética del 28 al 31 de octubre del 2003. Las flechas nos indica la fase inicial de la tormenta.

La Fig. 10 nos muestra la perturbación de la componente H registrados en los observatorios mencionados. En todos ellos se observa la fase inicial con su respectivo pulso súbito. También, se observa que la intensidad del pulso es mayor en Boulder y menor en los otros observatorios.

En el caso de Hermanus la tendencia de decrecimiento del pulso súbito es rápida a comparación con los otros observatorios.

En la fase principal la componente H tiene un mínimo que comienza del día 29 de octubre a excepción de Boulder que tiene un comportamiento diferente. La fase recuperadora alcanza su máximo valor a las 19 horas del día 29 de octubre del 2003. A continuación se observa lo que parece ser un nuevo pulso súbito de una nueva tormenta geomagnética que alcanza su mínimo de la fase principal a las cero horas del día 30 de octubre. Luego se observa una fase de recuperación que culmina a las 12 horas del día 30 de octubre del 2003.

3.3 Descripción de la tormenta geomagnética de noviembre del 2003

La Fig. 11 muestra la variación de la componente H de la segunda súper tormenta geomagnética del ciclo solar 23^o, se caracteriza por tener un Dst con un valor menor a -400 nT, ver Fig.12.

La fase inicial se observa a las 5 horas del día 19 de noviembre y es esencialmente el mismo para todas las estaciones geomagnéticas consideradas en este estudio. El mínimo alcanzado durante la fase principal se observa primero en Boulder y después se observa en Kakioka, posteriormente en Alice, Huancayo y finalmente en Hermanus.

La fase recuperadora culmina aproximadamente a las doce horas del día 21 de noviembre. A diferencia de la primera tormenta geomagnética del mes octubre ésta es más clásica, La tormenta de octubre pensamos que es un caso excepcional pues tiene un nivel de complejidad que no se observa en otras tormentas.

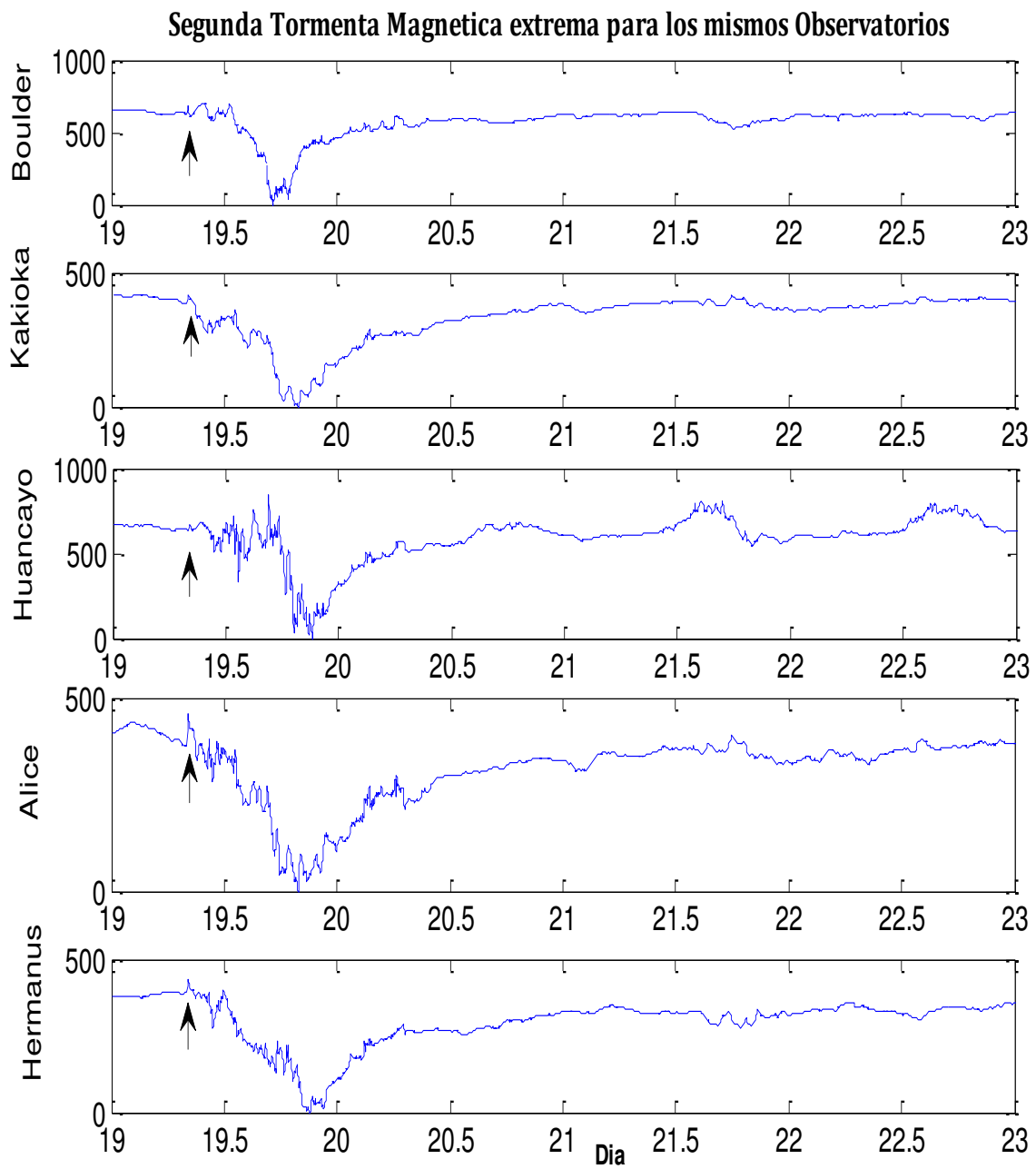


Fig.11 Variación de la componente H del campo magnético terrestre durante la segunda tormenta geomagnética del 19 al 23 de noviembre del 2003. Las fechas nos indica la fase inicial de la tormenta

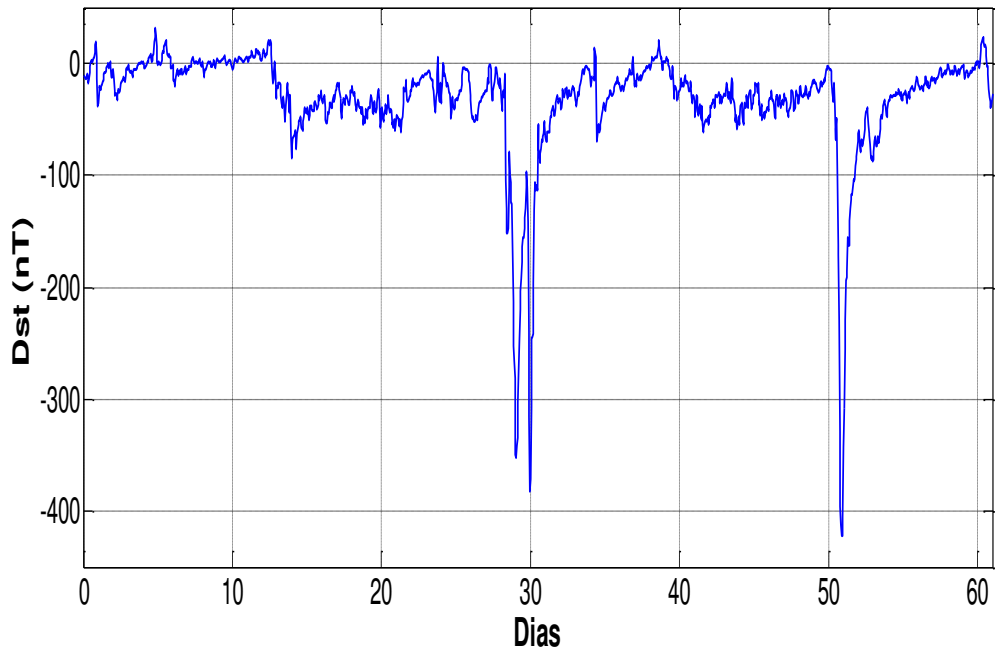


Fig.12 Índice Dst en los meses de octubre y noviembre del 2003.

CAPÍTULO IV

➤ CONCLUSIONES

Se demuestra que las eyecciones de masa coronal (EMC) expulsadas por el Sol, desencadena violentas fluctuaciones en el campo magnético terrestre, como se observa en la Fig. 8. Después de calcular el índice Dst encontramos que existieron dos súper tormentas geomagnéticas durante los periodos del 28 al 31 de octubre y 19 al 23 de noviembre del año 2003. En la primera tormenta es compleja y no se puede precisar con exactitud sus fases por el contrario, en la segunda tormenta podemos distinguir sus tres fases.

➤ REFERENCIAS

- [1] <http://www.astronoo.com/en/articles/solar-flares.html>.
- [2] Schrijver C.J.y Zwaan C, Solar and Stellar Magnetic Activity, Cambridge University (2000).
- [3] <http://www.ign.es/ign/layoutIn/ultTormentasGeomag.do>.
- [4] Sugiura M, On Dst Index , IAGA B Bolluetin No. 40(1991).
- [5] Rosales D, Vidal E, y Orihuela S . Principales variaciones geomagneticas de periodo corto y periodo largo registrado en el observatorio de Huancayo, Peru (2011).
- [6] Gopalswamy N. Yashiro S , Liu Y , Michalek G, Vourlidas A , Kaiser ML , Howard RA . Coronal mass ejections and other extreme characteristics of the 2003 October – Novembre solar eruptions, Journal of geophysical research (2005) ,110(a9) .

➤ **Anexos**

Anexo I

Procesamiento de los datos (wdc) para obtener las gráficas de las 2 tormentas geomagnéticas.

```
clear all

names={ 'hua0310m.wdc', 'hua0311m.wdc'};

M=[];

for k=1:12

    tmp=importdata(strcat('C:\User\Desktop\RUTH\',names{k}),'\t');

    M=[M;tmp];clear tmp;

end

data=M(:,3:end-1);

H=[];D=[];Z=[];F=[];

for k=0:size(data,1)/(4*24)-1

    H=[H;data(96*k+1:96*k+24,:)];

    D=[D;data(96*k+25:96*k+48,:)];

    Z=[Z;data(96*k+49:96*k+72,:)];

    F=[F;data(96*k+73:96*k+96,:)];

end

H_total=reshape(H',1,[]);

D_total=reshape(D',1,[]);

Z_total=reshape(Z',1,[]);

F_total=reshape(F',1,[]);

time=60*(1:length(H_total));% segundos
```

```

figure(10)
%subplot(4,1,1)
plot(time,H_total);
xlabel('Time(s)')
ylabel('H-component (nT)')
figure(11)
%subplot(4,1,2)
plot(time,D_total);
xlabel('Time(s)')
ylabel('D-component (nT)')

%subplot(4,1,3)
figure(12)
plot(time,Z_total);
xlabel('Time(s)')
ylabel('Z-component (nT)')
%subplot(4,1,4)

%plot(time,F_total);
%xlabel('Time(s)')
%ylabel('F-component (nT)')

%% power spectrum
n=2^(nextpow2(length(H_total))-1);
[f PS_H]=First_spectra(H_total(1:n),60,1);% Power spectrum

```



```
[f PS_D]=First_spectra(D_total(1:n),60,1);
```

```
[f PS_Z]=First_spectra(Z_total(1:n),60,1);
```

```
figure(2)
```

```
%subplot(3,1,1)
```

```
loglog(f,PS_H(1:length(f)));
```

```
xlabel('f(Hz)')
```

```
title('Power Spectrum H-componet (nT^2/Hz)')
```

```
figure(3)
```

```
%subplot(3,1,2)
```

```
loglog(f,PS_D(1:length(f)));
```

```
xlabel('f(Hz)')
```

```
title('Power Spectrum D-componet (nT^2/Hz)')
```

```
figure(4)
```

```
%subplot(3,1,3)
```

```
loglog(f,PS_Z(1:length(f)));
```

```
xlabel('f(Hz)')
```

```
title('Power Spectrum Z-componet (nT^2/Hz)')
```

Anexo II

Procesamiento de los datos (wdc) para obtener las gráficas DST De las 2 tormentas geomagnéticas.

```
clear all

% clear all

% clear all

names={'Dst.txt', 'Dst2.txt'};

M=[];

for k=1:2

    tmp=importdata(strcat('C:\Users\RUTH\Desktop\Ruth\',names{k}),\t');

    M=[M;tmp];clear tmp;

end

% M=importdata('hua0311m.wdc',\t');

% % D=importdata('Dst.txt');% % % me llama el archivo en estructura.

%

% % load('dia.txt');

% % di=di(:,1);

% data=M(:,3:end-1);

% H=[];D=[];Z=[];F=[];

%

% for k=0:28

%   H=[H;data(96*k+1:96*k+24,:)];

%   D=[D;data(96*k+25:96*k+48,:)];
```

```

% Z=[Z;data(96*k+49:96*k+72,:)];
% F=[F;data(96*k+73:96*k+96,:)];% end
% Z=[Z;data(96*k+49:96*k+72,:)];
% F=[F;data(96*k+73:96*k+96,:)];
% end
%
% H_total=reshape(H',1,[]);
% D_total=reshape(D',1,[]);
% Z_total=reshape(Z',1,[]);
% F_total=reshape(F',1,[]);
% time=60*(1:length(H_total));% segundos
% h11=time/86400;
% % plot(h11,H_total);
% % xlabel('Dia')
% % ylabel('H-component (nT)')
% %
%
% D=importdata('Dst2.txt');%%% me llama el archivo en estructura.
dat=M(:,2:end);%%% %%% muestro los datos del dst
ds1=[];
for k=1:61;
ds1=[ds1,dat(k,:)];
end
dstotal=reshape(ds1',1,[]);
time=1:length(dstotal);%%% %%% horas
dias=time/24;
% subplot(4,1,1)
% plot(h11,H_total);
% xlabel('Dia')
% ylabel('H-component (nT)')
% subplot(4,1,2)
plot(dias,dstotal)
xlabel('Dias'); ylabel('(nT)')

```