



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PERTURBACIONES GEOEFECTIVAS DE GRAN ESCALA EN EL MEDIO INTERPLANETARIO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

P R E S E N T A

VERONICA ZOLA ONTIVEROS HERNANDEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JUAN AMERICO GONZALEZ ESPARZA

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE GENERAL

1.. <i>Introducción</i>	1
2.. <i>Tormentas geomagnéticas y sus causas en el medio interplanetario</i>	6
2.1. El viento solar	6
2.2. Campo magnético interplanetario	7
2.3. Estructuras de gran escala en el medio interplanetario	10
2.3.1. Eyecciones de masa coronal interplanetarias	11
2.3.2. Ondas de choque	12
2.3.3. Regiones corrotantes de interacción	15
2.3.4. La hoja de corriente heliosférica	18
2.4. Campo geomagnético y magnetosfera terrestre	20
2.5. Reconexión magnética en la magnetosfera terrestre.	26
2.6. Campo eléctrico inducido por el medio interplanetario	27
2.7. Índice D_{st} y tormentas geomagnéticas	28

3.. Estudios previos de geoeffectividad de eventos en el MIP	31
4.. Selección de eventos y metodología	42
4.1. Criterios de selección	42
4.2. Metodología	44
5.. Resultados	56
5.1. Condiciones previas de la magnetosfera.	56
5.2. Sección Geoefectiva	57
5.3. Intervalo de interacción	59
5.4. Campo eléctrico inducido VB_s	60
5.4.1. VB_s máximo	61
5.4.2. VB_s acumulado	62
5.5. Valores mínimos en los parámetros de plasma y campo magnético en el MIP para tormentas moderadas e intensas	70
6.. Conclusiones	71
6.1. Trabajo a Futuro	74
<i>Bibliografía</i>	75

1. INTRODUCCIÓN

Las tormentas geomagnéticas (TGs) son perturbaciones globales del campo magnético terrestre debidas a la inyección y aceleración de partículas energéticas del viento solar al interior de la magnetosfera terrestre. Las variaciones en las corrientes magnetosféricas inducen campos magnéticos que, en ocasiones, resultan en una caída de la componente horizontal ¹, del campo magnético terrestre [Chapman y Bartels, 1940]. Esta caída abrupta en B_H es la característica por la cual se reconoce una TG, mientras que su intensidad se define por el valor mínimo alcanzado del campo magnético. Estas perturbaciones son inducidas principalmente por variaciones en la velocidad, densidad y campo magnético del plasma en el medio interplanetario (MIP) que impacta al entorno magnético de la Tierra.

Evidencias de la relación entre TGs con la actividad y el ciclo solar fueron advertidas desde mediados del siglo XVIII, pero fue hasta la llegada de la era espacial que se pudo confirmar la existencia del viento solar y su interacción con el entorno magnético de la Tierra [Dungey, 1961]; probando que las condiciones generales de la magnetosfera dependen, en gran medida, de los parámetros del plasma del viento solar y campo magnético interplanetario (CMI) a la altura de la órbita terrestre (1 unidad astronómica, UA ²).

Entre las manifestaciones más intensas de la actividad solar se encuentran las eyecciones de masa coronal (EMCs), que son expulsiones violentas de material coronal al MIP. Desde su descubrimiento en la década de los setentas, diversos estudios han confirmado que la velocidad de salida de estos eventos transitorios va de 200 a 2500 km/s [Yashiro et al., 2004]. Cada evento libera en promedio $1,7 \times 10^{15} gr$ de material

¹ En coordenadas cartesianas, la componente horizontal del campo geomagnético, B_H , es la proyección del campo total \mathbf{B} , sobre un plano horizontal y tangente al punto de observación en la superficie terrestre, ver figura 2.9

² 1UA = $1,5 \times 10^{11}$ m

coronal con una energía cinética del orden de 10^{30} ergs [Vourlidis et al., 2002]. Si la EMC se propaga a velocidades mayores que la velocidad de las ondas magnetosónicas en el medio, estas estructuras de gran escala producen ondas de choque en el MIP [p.e. Hundhausen, 1987 y referencias incluidas]. Junto con los flujos de viento solar rápido provenientes de los hoyos coronales, las EMCs en el MIP (conocidas como EMC interplanetarias, EMCIs, o eyectas) y su onda de choque asociada, son precursores de las TGs ya que son las principales causas de las fluctuaciones en los parámetros del viento solar, como velocidad, densidad, temperatura y campo magnético que ocasionaron estas tormentas [p.e. Russell et al., 1974, Gosling et al., 1991]. La relevancia de la intensidad y configuración del CMI perturbado como causante de las TGs se observa en estudios de nubes magnéticas, éstas son un subconjunto de las EMCIs cuya principal característica es una rotación latitudinal suave del CMI y un incremento en la magnitud del mismo [Burlaga et al., 1981], estas nubes magnéticas han sido asociadas en varios estudios como las causantes de las TGs más intensas [p.e Dal Lago et al., 2004, Echer y Gonzalez, 2004].

Pese a que es bien conocida la relación entre actividad solar y TGs, hasta ahora no es posible correlacionar inequívocamente los eventos observados en el Sol con la ocurrencia e intensidad de las TGs, principalmente porque no existe una asociación uno a uno entre los distintos eventos explosivos en el Sol y las perturbaciones globales del campo magnético terrestre. En este trabajo se propone identificar las estructuras de gran escala en el MIP asociadas con TGs (p.e., ondas de choque interplanetarias, EMCIs, cruces de la hoja de corriente heliosférica y regiones corrotantes de interacción).

Una vez identificada la estructura interplanetaria asociada a cada tormenta, y aunque la relación sigue sin ser uno a uno, se puede cuantificar la geoelectividad de los eventos en el MIP a través de distintos índices de actividad geomagnética. En particular, para este trabajo, utilizamos el índice D_{st} (Disturbance storm time) que refleja las perturbaciones geomagnéticas a latitudes medias, entre 20 y 40 grados norte y sur.

Motivación y estructura de la tesis

Durante la evolución de las TGs diversos procesos se dan lugar dentro de la magnetosfera, tales como cambios de densidad en sus distintas regiones, así como la aparición o intensificación de corrientes eléctricas magnetosféricas, atmosféricas y terrestres. Estas corrientes y sus efectos secundarios pueden dañar satélites artificiales, comunicaciones

por radio y via satélite y plantas de energía eléctrica, entre otros sistemas tecnológicos. Más aun, en la parte alta de la magnetosfera, o fuera de ella, el flujo de partículas energéticas durante el paso de perturbaciones en el MIP, puede poner en peligro la salud de astronautas en caminatas espaciales, además de deteriorar celdas solares y componentes electrónicos de los satélites [Lanzerotti, 2001].

La actividad solar y geomagnética no son fenómenos recientes, pero la dependencia que nuestra sociedad tiene de la tecnología y su impacto económico, hace que las TGs sean un desastre natural al que, a diferencia de otros, cada día somos más susceptibles. Así nace la necesidad de entender y poder predecir estos fenómenos para tratar de minimizar sus consecuencias. Para esto es importante la observación continua del Sol y del viento solar, la investigación y el desarrollo de teorías que nos expliquen el comportamiento de la actividad solar junto con la respuesta terrestre, y la creación de nueva tecnología que pueda mantenerse funcionando a pesar de estas manifestaciones de actividad solar que seguirán sucediendo.

Es por esto que el estudio de las TGs tiene dos repercusiones importantes: (1) la contribución a la investigación en el proceso físico de acoplamiento del viento solar con la magnetosfera que aun no es descifrado por completo, y (2) la aportación de elementos que permitan mejorar los modelos de predicción y efectos del clima espacial. La motivación de este estudio es mostrar, además las evidentes correlaciones cualitativas entre las perturbaciones interplanetarias y geomagnéticas, una cuantificación de la geoeffectividad de un conjunto TGs asociadas a EMCI, con el fin de contribuir a contestar preguntas aun abiertas en el área de la física espacial, tales como:

1. ¿Cuáles son las estructuras de gran escala en el medio interplanetario o qué combinaciones de ellas se asocian a las TGs de mayor intensidad?.
2. ¿Qué parámetros de plasma y CMI están correlacionados con la geoeffectividad? .
3. Si existe, ¿cuál es la relación empírica entre las magnitudes de los parámetros del viento solar y la intensidad de las TGs?.

Para llevar a cabo el estudio de eventos en el MIP relacionados con TGs en este trabajo, se utilizaron 3 fuentes: (1) la base de datos del *Centro Mundial de Datos para Geomagnetismo en Kyoto* ³ donde se identificaron las TGs, (2) la lista publicada por

³ <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp>

Cane y Richardson [2003] donde se reportan EMCI observadas a 1 UA entre 1996 y 2002, y (3) observaciones *in-situ* de la nave espacial *Advanced Composition Explorer* (ACE) [Chiu et al., 1998], cuyos instrumentos de plasma y campo magnético miden los parámetros del viento que interacciona con la magnetosfera terrestre.

En esta tesis se analizaron, evento por evento, 54 TGs asociadas a EMCIs ocurridas entre 1998 y 2002. Para cada evento se localizó la sección de la estructura que contribuyó a la máxima caída en el índice D_{st} . Las distintas secciones son: (1) funda detrás de la onda de choque ⁴, (2) EMCI, y (3) la combinación de funda y EMCI ⁵. Para este conjunto de TGs encontramos que las EMCI fueron la principal causa de las tormentas moderadas (63 %) y la combinación de funda y EMCI de las tormentas intensas (44 %). En los resultados se presentan también distintas correlaciones entre el campo eléctrico inducido, E_y ⁶, por el plasma en movimiento en el MIP y la intensidad de las TGs, dependiendo de la estructura que causó cada tormenta.

La presentación de esta tesis tiene la siguiente estructura:

En el capítulo 1, *Tormentas geomagnéticas y sus principales causas en el medio interplanetario*, se presenta una revisión general de las estructuras de gran escala en el MIP a 1 UA, y una descripción breve de las principales características de las TGs.

El capítulo 2, *Estudios previos de geoeffectividad de eventos en el MIP*, es un resumen de algunos trabajos anteriores tanto estadísticos como de evento por evento, de TGs y sus causas en el MIP, y que están relacionados o son comparables a esta tesis.

En el capítulo 3, *Selección de eventos y metodología*, se explican los criterios utilizados para la selección de TG y eventos en el MIP, así como la metodología seguida para su análisis.

El capítulo 4, *Resultados*, muestra y discute los resultados obtenidos y se hace una comparación de éstos con resultados de estudios previos.

Finalmente se presentan las conclusiones de la tesis, así como una propuesta de

⁴ Se le conoce como funda a la región entre la onda de choque y el inicio de la EMCI

⁵ Un ejemplo de las observaciones *in-situ* de las distintas regiones se encuentra en las figuras 4.2, 4.3 y 4.4

⁶ Las componentes E_x y E_z no están asociadas a la aceleración de partículas que generan la TG, como se verá en el siguiente capítulo

trabajo a futuro para complementar el estudio.

2. TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS Y SUS CAUSAS EN EL MEDIO INTERPLANETARIO

2.1. *El viento solar*

Estudios teóricos mostraron que la corona solar, al no encontrarse en equilibrio hidrostático, se expande hacia el MIP creando el viento solar [Parker, 1958]. Cerca de la superficie del Sol, de 1 a 2 radios solares, los campos gravitacional y magnético, tienen la intensidad suficiente para retener el material de la corona a pesar de su alta temperatura ($\sim 1 \times 10^6$ K). Sin embargo, a mayor distancia, los campos se debilitan y la corona no puede ser contenida, por esta razón se expande y permea al MIP de plasma y campo magnético, en lo que se conoce como viento solar. La existencia del viento solar fue confirmada por las naves espaciales *Explorer 10* [Heppner et al., 1963] y *Mariner 2* [Neugebauer y Snyder, 1962]. Estas naves observaron flujos continuos de plasma en el espacio exterior con velocidades alrededor de los 300 km/s.

El plasma del viento solar consiste principalmente de electrones, protones y una fracción menor de partículas alfa. Con observaciones *in-situ* de naves dentro y fuera del plano eclíptico se ha comprobado que existen dos flujos principales de viento solar, lento y rápido, que tienen origen en distintas regiones del Sol. Los valores promedio de algunos parámetros del viento solar medidos a la altura de la órbita de la Tierra por la nave *Helios* [Rosenbauer et al., 1976] se resumen en la tabla 2.1. Existen fluctuaciones en los parámetros del plasma en escalas temporales de minutos, horas y hasta días, asociadas con hoyos coronales y distintas manifestaciones de actividad solar. El viento solar es esencialmente conexión entre la actividad solar y el entorno terrestre. Esta interacción depende del CMI que el flujo del viento solar arrastra consigo. El viento solar puede aproximarse a un fluido magnetohidrodinámico.

Con mediciones *in-situ* se ha podido verificar que la velocidad del viento solar es

Parámetro a 1 UA	Viento lento promedio	Viento rápido promedio
Densidad (cm^{-3})	15	4
Velocidad (km s^{-1})	350	700
Temperatura p^+ (10^4 K)	5	2
Temperatura e^- (10^4 K)	2	1
Campo magnético (nT)	6	6

Tab. 2.1: Valores típicos del viento solar observados por la nave *Helios* a 1 UA [Bruno y Vicenzo, 2005]

mayor a la velocidad de propagación de las ondas magnetosónicas en el mismo medio, por lo que se forma una onda de choque al frente de los cuerpos en el sistema solar [p.e. Spreiter et al., 1966; Russell y Luhman, 1997 y referencias incluidas]. Esta onda de choque de proa es consecuencia de la existencia de un cuerpo planetario dentro del flujo supermagnetosónico del viento solar.

2.2. Campo magnético interplanetario

El flujo de viento solar lleva consigo un campo magnético que se debilita conforme se expande (sobre la superficie solar tiene un valor promedio de 10^{-4} T, mientras que a 1 UA su valor es de $\sim 6 \times 10^{-9}$ T). Debido a su alta conductividad eléctrica, el plasma se opone a cambios de flujo magnético en su interior, por lo que las líneas de campo magnético están “congeladas” al plasma en lo que se conoce como *Teorema de Alfvén*,

El teorema de Alfvén afirma que en un fluido conductor de muy baja resistividad, las líneas de campo magnético permanecen congeladas al fluido. Este teorema se puede aplicar a plasmas espaciales bajo una aproximación magnetohidrodinámica (MHD), donde los plasmas son fluidos magnetizados pero eléctricamente neutros, y las perturbaciones temporales son lentas y las espaciales son de gran escala, comparadas con las propiedades características del plasma como la frecuencia de ciclotrón y el radio de Debye.

Con esta aproximación, la ecuación de inducción MHD para un plasma es:

$$\dot{\mathbf{B}} = \nabla \times \mathbf{u} \times \mathbf{B} + \frac{1}{\mu_0 \sigma} \nabla^2 \mathbf{B} \quad (2.1)$$

Dependiendo de la conductividad del plasma, uno de los dos términos a la derecha de la ecuación (2.1) va a dominar. En el caso de alta conductividad eléctrica, se puede despreciar el término difusivo y entonces:

$$\dot{\mathbf{B}} = \nabla \times \mathbf{u} \times \mathbf{B} \quad (2.2)$$

Asumiendo un plasma en el que se cumple la ecuación (2.2), se considera ahora el flujo magnético a través de una superficie S , encerrada por una curva C . El flujo magnético en la superficie S puede variar si la intensidad del campo magnético \mathbf{B} dentro de la curva C cambia, o si la curva C se mueve con respecto a \mathbf{B} . Se puede calcular el cambio de flujo total sobre la superficie S como:

$$\frac{d}{dt} \int_S d\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = \int_S d\mathbf{A} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \oint_C d\mathbf{l} \cdot (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (2.3)$$

Utilizando el teorema de *Stokes*, se tiene que:

$$\oint_C d\mathbf{l} \cdot (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) = \int_S d\mathbf{A} \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (2.4)$$

Sustituyendo en (2.3):

$$\frac{d}{dt} \int_S d\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = \int_S d\mathbf{A} \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) \right) \quad (2.5)$$

De la ecuación de inducción para alta conductividad eléctrica (2.2), el integrando en la derecha de la ecuación (2.5) es cero, concluyendo que:

$$\frac{d}{dt} \int_S d\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.6)$$

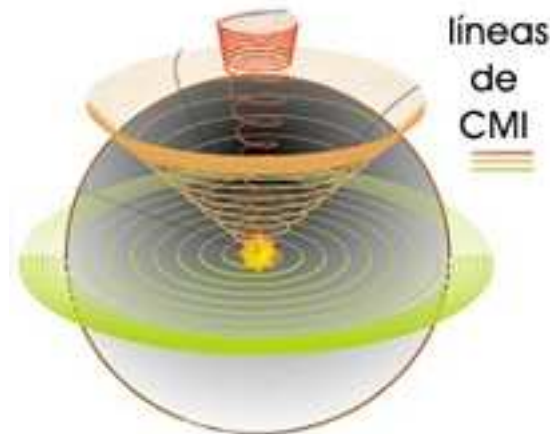


Fig. 2.1: Esquema de la espiral que forman las líneas de CMI a diferentes latitudes como resultado de la rotación solar y la expansión radial del viento solar (adaptada de <http://www.spaceweather.com/glossary/imf.html>).

Por lo que el flujo magnético a través de la superficie S permanece constante. Esto implica que el campo magnético se mueve junto con el plasma, de forma que al fluir el viento solar a través del medio interplanetario arrastra consigo a este campo, constituyendo al CMI [Parker, 1963].

A pesar de que el viento solar fluye radialmente, las líneas de campo magnético interplanetario se curvan, ya que se encuentran conectadas por uno de sus extremos al Sol, y por lo tanto, corrotando con él; mientras que el otro extremo se extiende hacia el espacio arrastrado por el plasma hasta cerrarse en los límites de la heliosfera. Al estar ancladas al Sol y debido a la rotación del mismo, las líneas de CMI se van curvando formando una espiral, como se esquematiza en la figura 2.1. A la altura de la Tierra el CMI tienen una inclinación de 45 grados con respecto a la línea Sol-Tierra y se encuentra sobre el plano eclíptico, sin embargo, en condiciones perturbadas la orientación del campo varía considerablemente. La presencia de componentes del CMI fuera del plano de la eclíptica, en particular en la dirección sur (en coordenadas GSE, ver figura 2.2), es lo que finalmente permitirá que el viento solar interactúe con la magnetosfera terrestre pudiendo causar TGs. En el análisis y resultados de este trabajo se verá que la magnitud de esta componente mantiene una importante correlación con la intensidad de las TGs.

2.3. ESTRUCTURAS DE GRAN ESCALA EN EL MEDIO INTERPLANETARIO

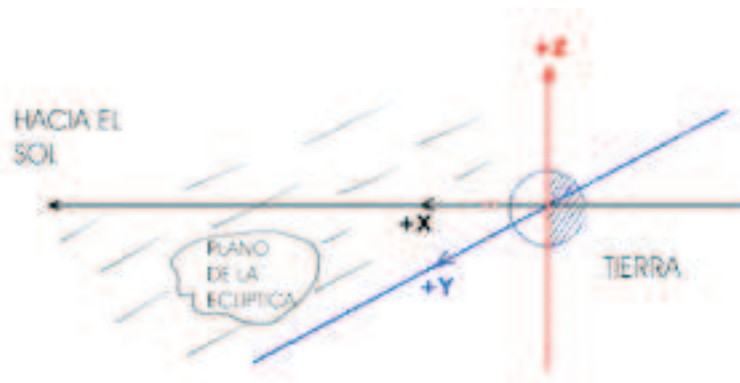


Fig. 2.2: Sistema GSE (Geocéntrico-Solar-Eclíptico). Sistema coordenado de 3 ejes (x, y, z) , con la Tierra en el centro y con el eje x apuntando hacia el Sol, el eje y sobre el plano de la eclíptica y apuntando en dirección opuesta al movimiento de la Tierra alrededor del Sol, y el eje z perpendicular al plano de la eclíptica.

2.3. Estructuras de gran escala en el medio interplanetario

En el MIP se observan continuamente fluctuaciones en el campo magnético, así como en los parámetros del plasma. Aunque esto sucede a distintas escalas, cuando una de estas perturbaciones tiene una duración alrededor de 12 horas o más, las fluctuaciones en el campo y parámetros del plasma son comparables con las escalas del viento solar ambiente y se consideran entonces estructuras de gran escala [Schwenn, 1991]. Estas estructuras perturban al viento solar, asociándose a flujos de plasma de alta velocidad, incremento en la magnitud del CMI, regiones turbulentas del CMI, y fluctuaciones en la densidad, composición y temperatura típicas del viento solar a 1 UA [p.e. Hewish y Bravo, 1986; Klein y Burlaga, 1982; Russell y Shinde, 2003]. Las estructuras de gran escala, tanto espacial como temporal, son las principales precursoras de las tormentas geomagnéticas [p.e. Russell et al., 1974; Echer y Gonzalez, 2004].

Las estructuras de mayor escala en la heliosfera interior son: (1) las EMCIs, (2) las ondas de choque, (3) las regiones corrotantes de interacción (RCI) y (4) la hoja de corriente heliosférica (HCH).

2.3.1. Eyecciones de masa coronal interplanetarias

El Sol presenta distintas manifestaciones de actividad emitiendo radiación electromagnética y corpuscular al MIP, siendo las EMCs una de las más intensas. Las EMCs son expulsiones violentas de material coronal al MIP en promedio de $1,7 \times 10^{15}$ gr y con una energía cinética del orden de 10^{30} ergs [Vourlidas et al., 2002]. Desde su descubrimiento en la década del setenta, amplios estudios han confirmado que la velocidad de salida de estos eventos transitorios pueden rebasar la velocidad de las ondas magnetosónicas en la corona, produciendo ondas de choque en la corona misma y en el MIP. El estudio más utilizado para las EMCs es a través de imágenes en luz blanca de coronógrafos terrestres y espaciales. Los coronógrafos LASCO C2 y C3 [Brueckner et al., 1995] a bordo de la misión espacial SOHO [Domingo et al., 1995] han registrado, desde su lanzamiento a mediados de los noventas, más de 10000 EMCs.

La investigación en la evolución en el viento solar de las EMCIs y las ondas de choque impulsadas, ha tenido un gran avance gracias a las misiones que han salido de la magnetosfera terrestre, p.e. ISEE3 [Durney y Ogilvie, 1978], Voyager [Stone, 1977], Pioneer [Pio, 1971] y ULYSSES [Bame et al., 1992]. La llegada a la órbita de la Tierra de estas estructuras de gran escala tiene relevancia en estudios de clima espacial, por lo que varias de estas misiones cuentan con instrumentos que miden los parámetros del plasma y campo magnético del viento solar, consiguiendo identificar, entre otros, ondas de choque y EMCIs a 1 UA. Estas observaciones combinadas con las de coronógrafos permiten correlacionar el evento cerca de la superficie solar (< 30 radios solares) con eventos en el MIP a 1 UA de donde se deducen velocidades de tránsito y tiempo de arribo [p.e. Gopalswamy et al., 2000]. De las observaciones *in-situ* se sabe que a 1 UA tienen un ancho radial promedio de 0.2 UA y se distinguen por distintas firmas de plasma [Neugebauer y Goldstein, 1997 y referencias incluidas] que no se observan en el viento solar ambiente y se describen a continuación :

1. Baja temperatura iónica y/o electrónica para una velocidad de viento solar dada.
2. Inusual anisotropía en la distribución de protones con la velocidad térmica paralela mayor que la velocidad térmica perpendicular con respecto al CMI.
3. Incremento en la abundancia de Helio debido al material cromosférico arrastrado por la EMC.
4. Flujos bidireccionales de electrones supratérmicos.

5. Campos magnéticos intensos y consecuentemente β del plasma baja ¹.
6. Rotación en el campo magnético medida *in-situ* por magnetómetros de flujo de protones.
7. Estados de ionización inusuales de iones pesados debido al calentamiento del material durante la EMC.

No todas las firmas se presentan al mismo tiempo ni en todos los eventos, pero la presencia de un mayor número de éstas indica con mayor certeza el paso de una EMCI en el entorno terrestre. En este estudio se consideró el inicio y final de las EMCIs reportados en el estudio de Cane y Richardson [2003], consistente con la firma en el MIP de temperatura iónica baja con respecto a la esperada (cociente entre ellas menor a 0,5).

2.3.2. Ondas de choque

Es posible estudiar el viento solar bajo una aproximación MHD, donde se trata la interacción del plasma con el campo magnético en un medio continuo. En este medio se dan ondas tanto transversales cuya propagación es a lo largo de las líneas de campo magnético, como longitudinales, cuya propagación comprime al medio al igual que una onda sonora, por lo que se les llama ondas magnetosónicas. Existen básicamente tres tipos de ondas MHD, las ondas de Alfvén y las ondas MHD de modo rápido y de modo lento. Estas ondas, que interactúan con las partículas en el medio, son el principal medio de transferencia de energía térmica en el viento solar.

Ondas MHD

Las ondas de Alfvén son ondas transversales que no comprimen el medio, por lo que a su paso no provocan incrementos ni en la densidad ni en la magnitud del campo magnético. La velocidad de las ondas de Alfvén, V_A , sólo depende de la magnitud del

¹ La β del plasma es una medida del efecto del campo magnético sobre el plasma y se define como la razón entre la densidad de energía térmica y la densidad de energía magnética, esto es, $\beta = 2\mu_0 n T / B^2$.

campo magnético y la densidad del plasma, de forma que:

$$V_A = \frac{\mathbf{B}^2}{2\mu_0\rho}$$

donde μ_0 es la permeabilidad magnética del medio.

Las ondas MHD de modo rápido y modo lento, son ondas compresivas que afectan la densidad, temperatura y campo magnético del medio donde se propagan. Ya que tienen una componente transversal y otra longitudinal, su velocidad, $V_{r/l}$, depende tanto de la velocidad de Alfvén como de la velocidad del sonido, C_s , de forma que:

$$2V_{r/l}^2 = (C_s^2 + V_A^2)^2 \pm \left((C_s^2 + V_A^2)^2 - 4C_s^2 \cdot V_A^2 \cdot \cos^2\theta \right)^{1/2}$$

con

$$C_s = \left(\frac{\gamma}{3} \right)^{1/2} \langle v \rangle$$

donde θ es el ángulo entre la dirección del campo magnético y el vector de propagación de la onda y $\langle v \rangle$ la velocidad media del plasma. El signo de (+) corresponde a las ondas de modo rápido y el signo (-) a las de modo lento.

Las velocidades para las ondas magnetosónicas de modo rápido varían dependiendo de las propiedades del medio. Cuando $\theta = 90$, a 1 UA son del orden de 70 y 85 km/s para viento rápido y viento lento respectivamente (valores obtenidos según las velocidad de Alfvén y del sonido en el MIP a 1UA reportadas por Bruno y Vicenzo, 2005).

Fundas y Ondas de choque a 1 UA asociadas a EMCIs

Bajo la aproximación MHD, una onda de choque es una discontinuidad en el medio, que separa dos plasma de distintas propiedades (como campo magnético o velocidad), y que además comprime subitamente y de manera irreversible el medio a su paso, por lo que es fácil distinguir estas ondas de choque en observaciones *in-situ* en el MIP por el incremento simultáneo en los parámetros de velocidad, densidad, temperatura y CMI.

Las EMCIs se propagan a velocidades que implican diferentes interacciones con el viento solar ambiente. Las EMCIs lentas (cuya velocidad es menor a la velocidad del

2.3. ESTRUCTURAS DE GRAN ESCALA EN EL MEDIO INTERPLANETARIO4

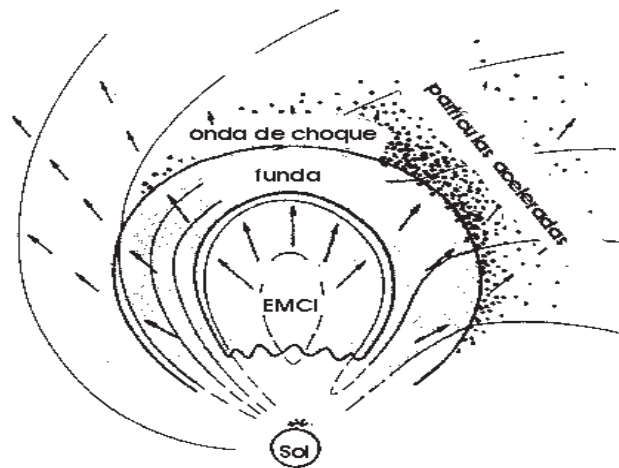


Fig. 2.3: Una EMCI impulsa una onda de choque comprimiendo al viento solar ambiente y acelerando partículas del MIP. Entre la EMCI y la onda de choque se forma una funda.

viento solar ambiente), tienden a ser aceleradas por el viento solar cuya velocidad de expansión es mayor a la de la EMCI. Como el viento solar y la EMCI son plasmas de distintas propiedades (en temperatura, densidad y campo magnético), no se mezclan y en su lugar, el viento la "empuja" a su paso, provocando una discontinuidad entre ambas parcelas de plasma. Las EMCIs de mayor velocidad son desaceleradas por el mismo medio, pero es ahora la EMCI la que se "frena" por encontrar a su paso al viento solar como un obstáculo. Estas EMCIs de alta velocidad comprimen al viento solar, impulsando una onda de compresión al frente de su propagación. Si la velocidad de la EMCI es mayor a la velocidad de las ondas magnetosónicas de modo rápido, esta discontinuidad derivará en una onda de choque que comprime al medio a la vez que acelera partículas a su paso.

El viento solar es un plasma no colisional y la disipación de las ondas de choque se produce principalmente por interacciones onda-partícula y el comportamiento colectivo del plasma. La figura 2.4 es una observación *in-situ* de la misión espacial *WIND* del paso de una onda de choque el día 28 de abril de 2001. El choque se identifica por el salto simultáneo poco después de las 5:00 hrs en los parámetros de velocidad térmica, densidad y velocidad de protones. La onda de choque produce una alteración irreversible en el medio, comprimiendo y acelerando el viento solar.

Detrás de la onda de choque, la EMCI apila viento solar formando una región

conocida como funda. En ésta región, el viento solar es calentado y comprimido, por lo que presenta alta densidad y un CMI desordenado y con un incremento en su magnitud [Tsurutani et al., 1988], características que también se observan en la figura 2.4. La figura 2.3 esquematiza la formación de una onda de choque en el MIP impulsada por una EMCI, y la región de la funda entre las dos estructuras.

Aunque la onda de choque en sí no causa las TGs, el plasma en la funda detrás de ésta si tiene una implicación directa en la intensidad de la TG generada como se verá más adelante en este trabajo.

2.3.3. Regiones corrotantes de interacción

Las regiones corrotantes de interacción (RCI) son una consecuencia del encuentro de dos flujos de viento solar: viento rápido y lento, y de la rotación solar. Los flujos de alta velocidad (~ 700 km/hr) se originan en los hoyos coronales que se extienden hacia el ecuador desde los polos magnéticos solares como lo confirmó la misión Ulysses; mientras que los flujos de baja velocidad (~ 400 km/hr) tiene su origen en los cascos coronales. Cuando viento solar de alta velocidad alcanza a flujos de menor velocidad, se forman regiones compresivas en forma de espiral que corrotan con el Sol, lo que sucede especialmente durante la fase descendente del ciclo solar de 11 años [Alves et al., 2006 y referencias incluidas].

Como se esquematiza en la figura 2.5, la parte delantera de una RCI es una onda magnetosónica compresiva que se propaga contra un viento lento, mientras que la parte trasera es una onda compresiva reversa que se propaga contra viento rápido. Entre las ondas se observa una interfase que separa lo que originalmente era plasma frío, lento y denso proveniente del cinturón coronal, del plasma caliente, rápido y de menor densidad proveniente de los hoyos coronales [p.e. Pizzo, 1991]. A distancias heliocéntricas del orden de 2 UA, estas ondas compresivas suelen derivar en choques delanteros y reversos en el MIP por lo que, conforme se propagan, estas estructuras producen regiones de alta densidad y campo magnético interplanetario [Hundhausen, 1995 y referencias incluidas].

En la figura 2.6 se observa la firma de una RCI en los parámetros de velocidad, densidad y temperatura. La gráfica corresponde a observaciones *in-situ* de la nave ACE de los parámetros de plasma y CMI a 1 UA. Los tres paneles de arriba a abajo son velocidad, temperatura y densidad del plasma. En las primeras horas del día 294,

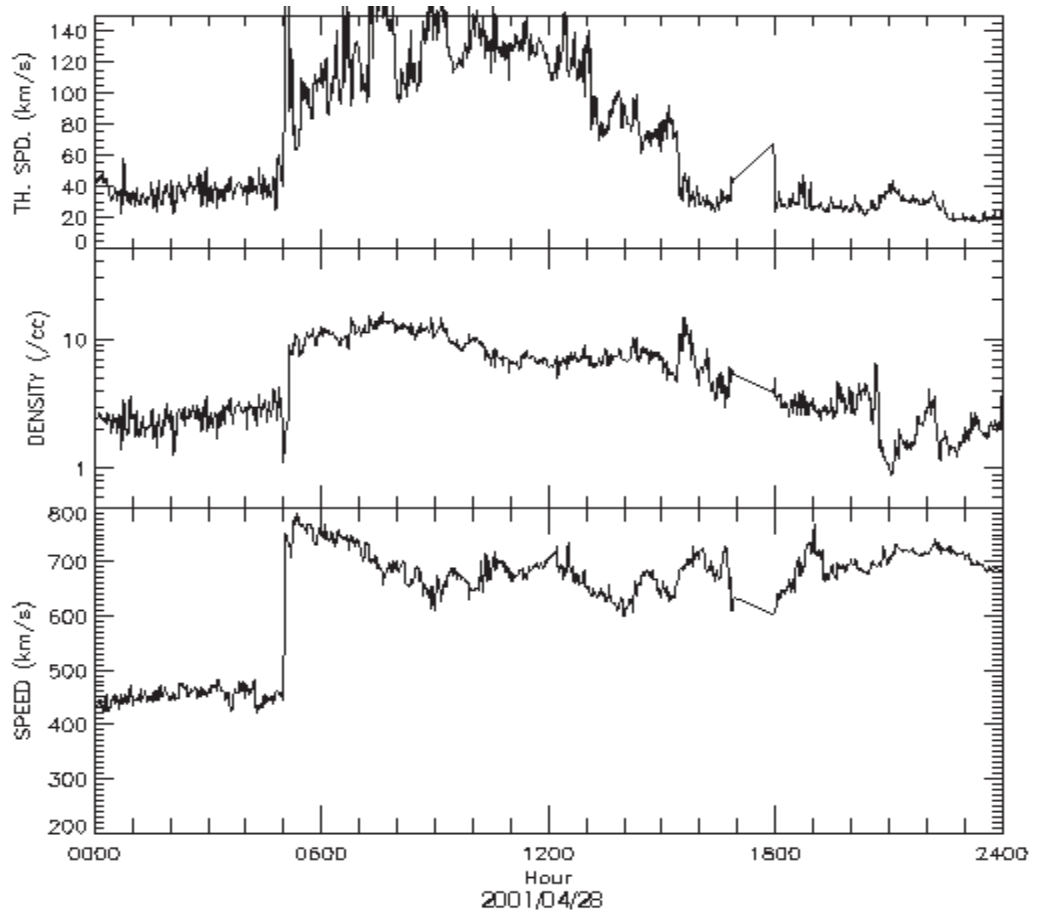


Fig. 2.4: Parámetros del plasma (velocidad térmica, densidad y velocidad de flujo) medidos *in-situ* por la misión WIND al paso de una onda de choque (datos obtenidos de <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>).

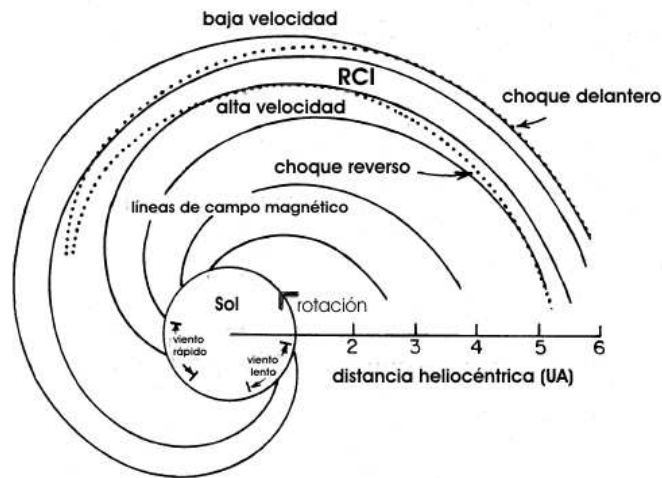


Fig. 2.5: Formación de una RCI entre una corriente de flujo de baja y una de alta velocidad. Las ondas de compresión derivan en una onda de choque delantero y una de choque reversa a distancias mayores a 2 UA. (adaptada de Fisk y Lee, 1980).

la línea discontinua indica el paso de una onda de choque, mientras que en el día 295, la región en el recuadro indica la RCI. Esta es una zona transición entre el viento lento (~ 400 km/s) que se observa previo a la RCI y el viento rápido (~ 700 km/s) que viene después de la RCI. La región de compresión se reconoce con el cambio suave de velocidad. Justo en medio de la RCI se localiza la frontera entre los dos vientos comprimidos y se le conoce como la interfase de corriente, asociada con el pico en densidad. Tanto el plasma del viento lento como del rápido están congelados a su propio campo magnético, por lo que no se mezclan entre si, la interfase se identifica por las siguientes firmas en el MIP: (1) un variación suave en la velocidad alrededor de la discontinuidad; (2) un brinco invertido en densidad y temperatura (el viento lento es más denso y el rápido tiene mayor temperatura); (3) flujos de corte en la velocidad en dirección del plano de la interfase; y (4) un incremento en la magnitud del campo magnético debido a la compresión entre los dos vientos.

La importancia de las RCIs dentro de la actividad geomagnética ha sido reportada por diversos autores, principalmente por su evidente correlación con las TGs recurrentes [p.e. Burlaga y Lepping, 1977]. Estas TGs son generalmente débiles o moderadas y se repiten. Aunque inicialmente se pensaba que las TGs recurrentes eran causadas por los flujos de viento solar rápido proveniente de los hoyos coronales por sí solos, la

investigación actual apunta a que la real causa de estas TGs son los intensos campos magnéticos en dirección sur observados en las regiones de compresión de las RCIs [p.e. Crooker y Cliver, 1994]. El CMI con estas características favorece la inyección y aceleración de partículas al interior de la magnetosfera, lo que finalmente desencadena la TG, proceso que se verá con más detalle en las secciones 2.5 y 2.7

2.3.4. La hoja de corriente heliosférica

El CMI se encuentra dividido en sectores magnéticos definidos por la polaridad predominante del CMI, ya sea apuntando hacia el Sol (negativo) o en dirección opuesta (positivo). Dado que el CMI se origina en el Sol, estos sectores evolucionan en el tiempo al igual que el campo magnético solar. Ya que cada sector presenta una polaridad distinta de campo magnético, entre cada sector se observa una hoja de corriente. Si se considerara un campo magnético dipolar en el Sol, la hoja de corriente heliosférica (HCH) cerca del plano ecuatorial, pero debido a la declinación del eje magnético solar y la rotación solar, la HCH evoluciona en el MIP con una forma similar a la falda de un bailarina, que separa líneas de campo de polaridad opuesta, como se esquematiza en la figura 2.7.

Un cruce de la HCH (cambio de sector magnético) se caracteriza por una inversión súbita en la dirección CMI, estos cambios de polaridad se registran *in-situ*, dentro del plano de la eclíptica, como una rotación de 180 grados en el ángulo longitudinal del CMI. Mientras que los instrumentos de campo magnético registran el cambio de polaridad, los instrumentos de plasma observan a la HCH como una región de alta densidad y baja velocidad. La corriente en la hoja heliosférica es del orden de 3×10^9 A con una densidad máxima de corriente de 10^{-10} A/m² [Israelevich et al., 2001]. La combinación del incremento en la densidad del viento solar debido al cruce de una HCH aunado a la presencia de una estructura de alta velocidad, como podría ser una EMC, es una de las estructuras interplanetarias geoeffectivas que se estudian en este trabajo. La figura 2.8, son datos obtenidos por la nave *ACE* donde se observa el cruce de la HCH (región en el recuadro). Los cuatro paneles de arriba a abajo corresponden al ángulo longitudinal del CMI (*B lambda*), la velocidad, temperatura y densidad del plasma respectivamente. La línea punteada indica el paso de una onda de choque impulsada por una EMCI, mientras que la firma principal que se observa del cruce de la HCH es el cambio súbito de 180 grados en la componente *B lambda*, asociado un incremento en la densidad y un decremento en la velocidad cerca del día 230. En particular para este

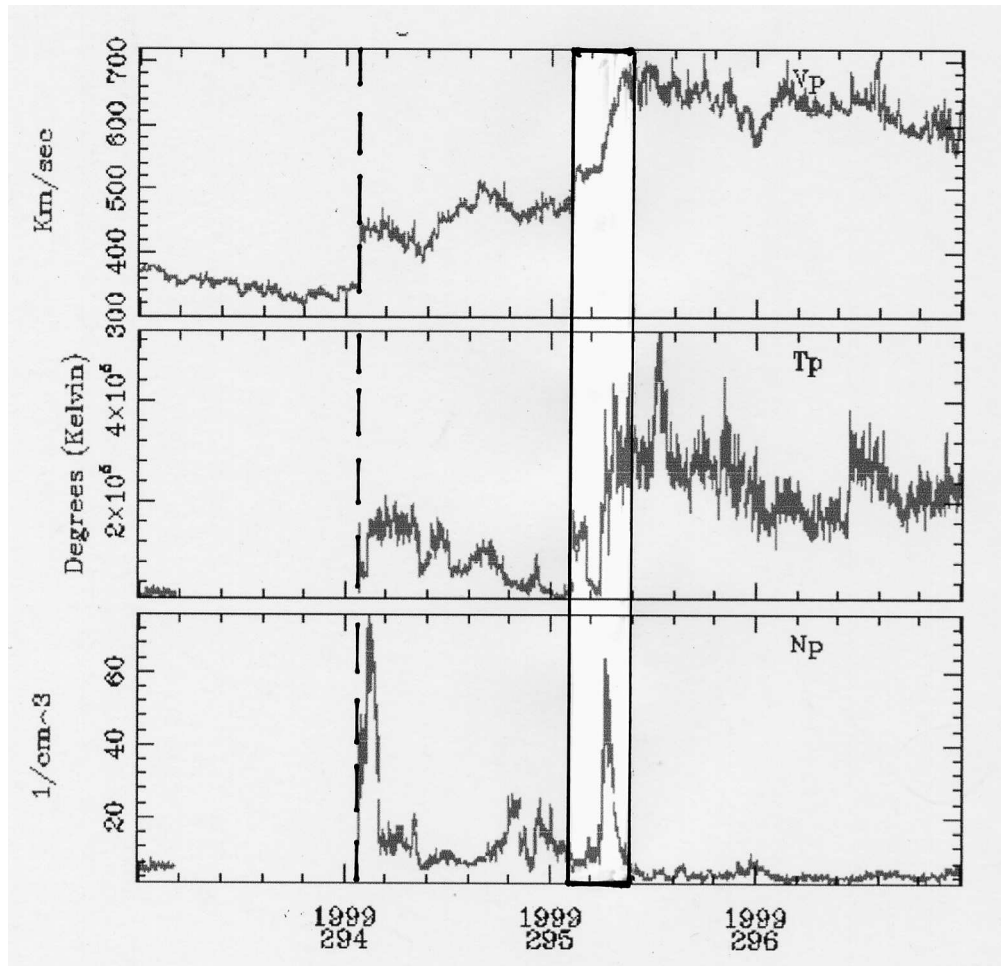


Fig. 2.6: Parámetros de plasma (velocidad, temperatura y densidad) observados por *ACE* a 1 UA. La línea punteada es la onda de choque impulsada por una EMCI. La región encerrada en un recuadro claro es la RCI que al comprimir la EMCI intensifica la TG (datos obtenidos de <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>).

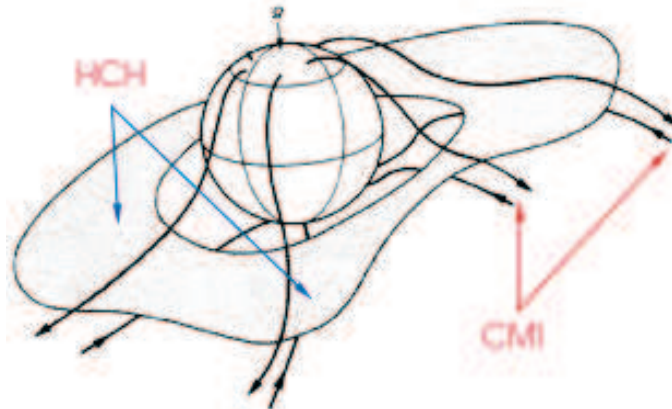


Fig. 2.7: La hoja de corriente heliosférica se extiende en el MIP y separa líneas de campo magnético interplanetario de polaridad opuesta (adaptado de Smith et al., 1978).

caso, la combinación de la EMCI y el cruce de la HCH causó una TG de intensidad moderada.

2.4. Campo geomagnético y magnetosfera terrestre

El núcleo de la Tierra se divide en dos secciones, el núcleo interior y el exterior. Mientras que el núcleo interior es sólido, el exterior está constituido de hierro y níquel fundidos que se encuentran en continuo movimiento debido a la rotación del planeta. Al ser un fluido conductor sometido a rotación diferencial y movimientos convectivos, genera el campo magnético terrestre (*modelo del dínamo magnético*). El campo geomagnético cerca de la superficie terrestre puede ser aproximado por un campo magnético dipolar desplazado 400 km del centro de la Tierra, con el polo norte magnético apuntando hacia el polo sur geográfico y cuyo eje magnético tiene una declinación aproximada de 11 grados con respecto al eje de rotación de la Tierra [Parkinson, 1983].

Las componentes del campo geomagnético se esquematizan en la figura 2.9. La componente horizontal H , que es la que concierne a este estudio, es la proyección del vector del campo total \mathbf{F} sobre un plano tangente a la superficie de la Tierra. En la figura también se indica la declinación (D), la inclinación (I) y las componentes norte

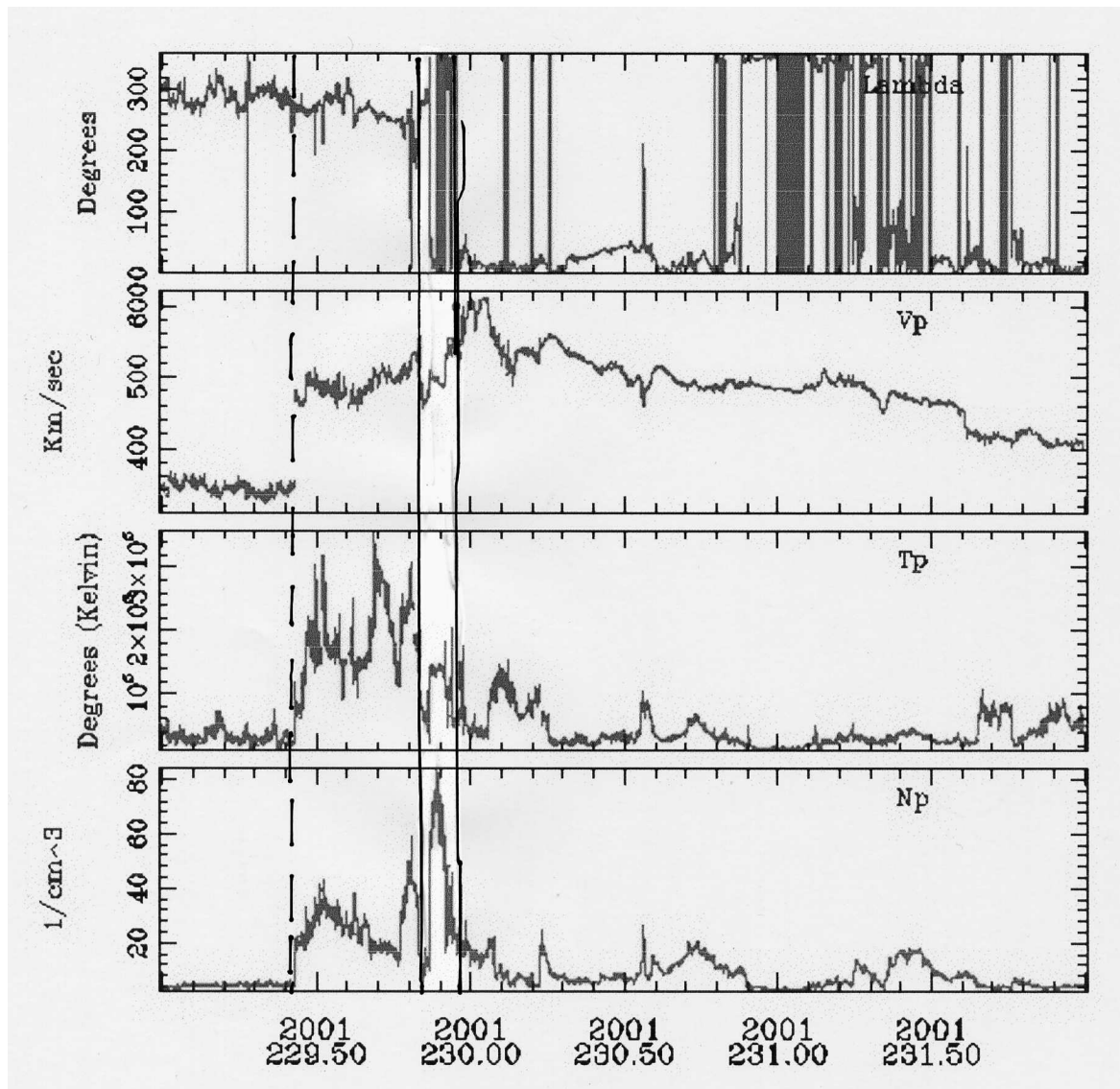


Fig. 2.8: La línea discontinua es la onda de choque impulsada por una EMCI. Dentro de la EMCI se observa la firma del cruce de la hoja de corriente heliosférica (recuadro claro). El parámetro B *lambda* presenta una rotación longitudinal de 180 grados asociado a un decremento en velocidad y temperatura y un incremento en densidad (datos obtenidos de <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>).

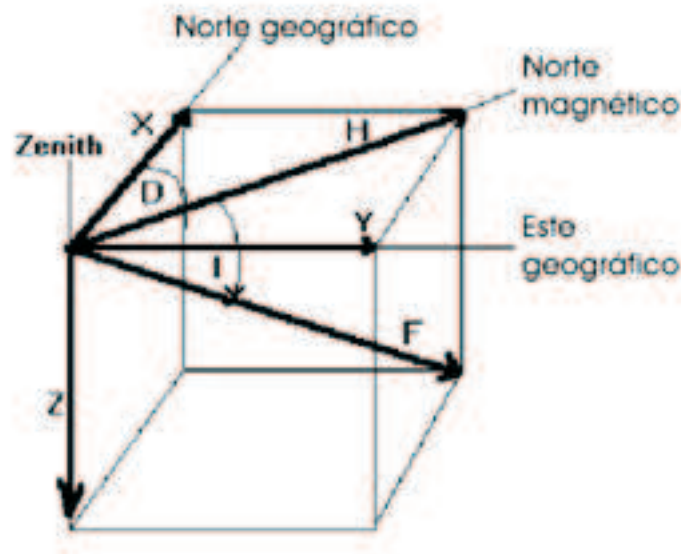


Fig. 2.9: Coordenadas cartesianas del campo geomagnético.

(X), este (Y) y vertical (Z) del campo geomagnético.

El campo se extiende más allá de la superficie terrestre a través de la troposfera, donde no tiene ningún efecto considerable, pero conforme se aumenta la altitud, es el campo geomagnético el que domina el comportamiento de las partículas ionizadas que tienen una mayor densidad a partir de los 100 km. El campo geomagnético afecta el movimiento de las partículas ionizadas y por tanto las corrientes ionosféricas y el movimiento del plasma en esta región.

El viento solar no tiene acceso directo a la superficie terrestre ya que el campo geomagnético y el campo del medio interplanetario, junto con sus respectivos plasmas no se mezclan; en su lugar, el viento solar confina al campo magnético de la Tierra formando la cavidad conocida como magnetosfera. La frontera entre el plasma del viento solar y el plasma de origen terrestre se forma donde la presión dinámica del viento solar se equilibra con la presión interna del campo geomagnético, que es principalmente presión magnética, ya que debido a la baja densidad (entre 0.1 y 8 part./cm³), la presión térmica es despreciable. La región que separa ambos plasmas se le conoce como magnetopausa y su espesor es del orden del radio de giro de los protones en esta región (de 1 a 100 km).

La magnetosfera se comprime o se expande dependiendo de las condiciones del viento solar y del equilibrio de presiones, por lo que la localización de la magnetopausa es variable. Para una presión dinámica típica del viento solar (~ 1.7 nPa), la magnetopausa se encuentra, en promedio, a 10 radios terrestres (R_T) hacia el lado día. A esta altitud, el campo magnético dipolar se ve deformado considerablemente y líneas de campo cerca de los polos se ven arrastradas por el flujo de viento solar y se extienden alrededor de $1000 R_T$ hacia el lado noche [Russell y Luhman, 1997] con una forma similar a la cauda de un cometa.

Ya que el viento solar es un flujo supermagnetosónico, Axford [1962] propuso la existencia de una onda de choque (choque de proa) asociada a la deflexión del viento solar por cualquier cuerpo planetario que contara con un campo magnético, o bien, con una ionosfera altamente conductora. Esta predicción teórica fue comprobada por las observaciones, particularmente para el caso de la Tierra. Esta onda de choque se encuentra al frente de la magnetosfera y es una discontinuidad que frena, calienta y desvía el flujo del viento solar, impidiendo que impacte directamente a la Tierra. Al pasar el viento solar forma una capa turbulenta de plasma entre el choque de proa y la magnetopausa conocida como magnetofunda. Las características del choque de proa y del plasma en la magnetofunda determinan la naturaleza del flujo que interactúa con la magnetosfera y de la posible transferencia de energía del viento solar al interior de la cavidad geomagnética.

La combinación de plasma y campos electromagnéticos en la magnetosfera dan lugar a la presencia de corrientes eléctricas. En particular, en 1958 James Van Allen y su equipo descubrieron la existencia de un cinturón de radiación en la magnetosfera terrestre. Un contador Geiger a bordo del satélite *Explorer I* dió evidencias de la existencia de radiación intensa de partículas en diferentes energías, conforme el satélite aumentaba su altitud. Más adelante, con el *Explorer IV* se pudieron observar los cinturones de radiación sobre una mayor región del espacio, encontrando dos máximos en el conteo de partículas, uno entre la ionosfera y 2 radios terrestres y el segundo entre 3 y 4 radios terrestres. Esto, junto con observaciones subsecuentes de otras misiones, permitió establecer la existencia de dos cinturones de radiación alrededor de la Tierra, el cinturón interno o de Van Allen y el cinturón externo.

Los cinturones de radiación consisten en partículas que orbitan alrededor de la Tierra, ya que éstas son partículas cargadas, se mueven fácilmente sobre las líneas de campo magnético, por lo que se trata de estructuras alineadas al campo.

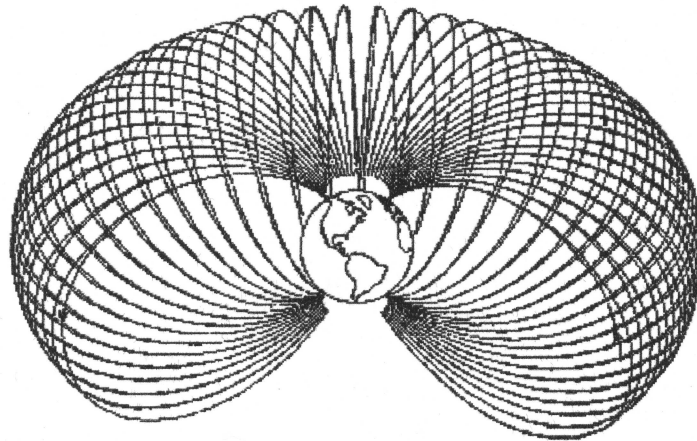


Fig. 2.10: Las partículas atrapadas en el campo geomagnético forman en su movimiento los cinturones de radiación alrededor de la Tierra

Para la formación de los cinturones de radiación se involucran cuatro procesos principales:

- La inyección de partículas cargadas hacia la región.
- La aceleración de partículas a altas energías.
- La difusión de las partículas dentro de la región.
- El proceso de pérdida de partículas.

La fuente puede estar creando partículas *in-situ* por rayos cósmicos o por partículas provenientes del viento solar que se introducen al interior de la magnetosfera. Una vez que quedan atrapadas las partículas se aceleran y difunden en los cinturones debido a la interacción entre estas cargas eléctricas en movimiento y el campo magnético estático de la Tierra. Las partículas presentan un movimiento de girorradio alrededor de las líneas campo; a la vez que se mantienen rebotando a lo largo de las líneas del campo en espejos magnéticos y, además, sufren un desplazamiento de deriva lo que da lugar a la forma toroidal de los cinturones, como lo esquematiza la Fig. 2.10.

Las partículas pueden salir o perderse de los cinturones si obtienen una energía de escape suficiente o si se recombinan con la atmósfera neutra. Con este proceso se

asegura que el flujo de partículas no se incremente indefinidamente a pesar de que haya una inyección continua de iones.

En el cinturón de radiación interior las partículas que se crean *in-situ* por el por el impacto de rayos cósmicos primarios a neutrones de la alta atmósfera; mientras que el proceso de pérdida se debe a la interacción con la atmósfera que se localiza cerca de los puntos espejos, ya sea por perdida gradual de energía por ionización, intercambio de carga o por interacción nuclear.

La densidad numérica y la densidad de energía de las partículas varía dentro de los mismos cinturones. La mayor intensidad se detecta cerca del plano ecuatorial, centrándose a 1.5 radios terrestres y decrece con la altitud donde las partículas se recombinan.

El cinturón de radiación exterior tiene su máximo de población a 4 radios terrestres sobre el ecuador magnético y está poblado principalmente por electrones. El flujo de partículas decrece con la altitud y conforme aumenta la latitud, es decir, hacia los polos magnéticos.

Aunque aun no está claro como se crea el cinturón exterior, se sabe que las partículas cargadas provienen principalmente de la magnetosfera exterior y la principal evidencia es el incremento del flujo cuando se inicia la actividad geomagnética; sin embargo, no se descarta la posibilidad de que existan partículas atrapadas provenientes del Sol.

La principal corriente para los fines de este estudio es la corriente del anillo. Esta corriente asociada a la deriva longitudinal de las partículas en el cinturón de radiación, fluye alrededor de la Tierra entre 2 y 7 R_T . Tiene dirección este-oeste debido a la deriva de las partículas atrapadas, principalmente iones de oxígeno y protones, con energías entre 10 y 300 KeV [Gonzalez et al., 1994 y referencias incluidas].

La importancia de la corriente del anillo en la evolución de las TGs reside en el fenómeno de superposición de los campos. El campo magnético inducido por el anillo de corriente, se opone a la componente horizontal del campo magnético inducido por el dínamo terrestre, de forma que el valor final de la componente geomagnética B_H se debe a la superposición de ambos campos. De esta forma, cuando la corriente del anillo se intensifica debido a perturbaciones de gran escala en el MIP, se dá lugar a la TGs.

2.5. Reconexión magnética en la magnetosfera terrestre.

La magnetosfera impide que el viento solar tenga acceso directo a la Tierra, sin embargo, existen varios mecanismos de transmisión de energía y momento del viento solar al interior de la magnetosfera; el principal es la reconexión magnética [Dungey, 1961]. La reconexión magnética es un proceso que permite la conversión de energía magnética en energía cinética y térmica del plasma. De hecho, la reconexión es causada por un cambio en la resistividad del plasma en escalas menores a la longitud característica del plasma, donde la condición de campo congelado se pierde, en lo que se conoce como regiones de difusión donde el campo magnético se aniquila liberando energía magnética almacenada.

Petschek [1964] mostró que la región de difusión es una fuente de ondas MHD de gran amplitud que transportan información a una extensa región del plasma. Hacia afuera de la región de difusión, el plasma es calentado y acelerado por estas ondas resultando en la formación de flujos rápidos de plasma expulsados de la región de difusión. El modelo de Petschek es congruente con simulaciones numéricas más actuales [Birn et al., 2001] y con las observaciones *in-situ* en la magnetosfera terrestre [Russell y Elphic, 1978; Twitty et al., 2004].

El campo magnético terrestre tiene dirección sur-norte en el lado día de la magnetosfera. Como la reconexión magnética requiere que se encuentren campos antiparalelos, es necesario un campo magnético interplanetario con una componente en la dirección norte-sur, B_s , para que se reconecte con el campo magnetosférico. En esta situación, la condición de campo congelado se pierde, y existe una transferencia de flujo de plasma del viento solar a la magnetopausa.

La figura 2.11 esquematiza el proceso de reconexión magnética del viento solar con la magnetosfera. En la imagen, el CMI tiene dirección sur, el punto R1 es la primera región de difusión donde se da la reconexión al frente de la magnetopausa. Las líneas de campo conectadas son arrastradas por el flujo de viento solar hacia la cola magnética, donde las líneas de campo, nuevamente antiparalelas se reconectan en R2, otra región de difusión. Los flujos rápidos de plasma resultantes de la reconexión inyectan partículas hacia el lado noche de la Tierra.

Algunas de las partículas inyectadas profundizan hasta la altura del anillo de corriente. Siendo atrapadas por el campo geomagnético en esta región, se someten a

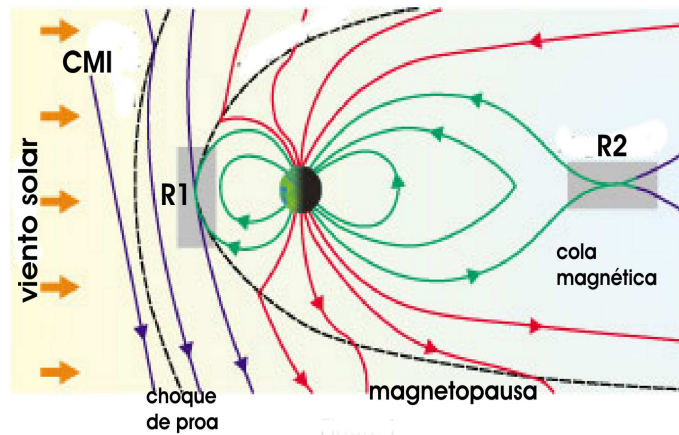


Fig. 2.11: Reconexión magnética entre el CMI dirección sur y la magnetosfera terrestre. La primer reconexión se da en R1, al frente de la magnetopausa y la segunda en R2, en la cola magnética.

movimientos de deriva que las hacen girar alrededor de la Tierra, aumentando la densidad de la corriente del anillo.

2.6. Campo eléctrico inducido por el medio interplanetario

Existen dos fuentes principales de los campos eléctricos en la magnetosfera: el campo eléctrico inducido por el MIP y el campo eléctrico corrotante asociado a la rotación de la Tierra sobre su propio eje. A pesar de que en la magnetosfera el movimiento de las partículas está de alguna forma limitado por el campo magnético (derivadas de gradiente y de curvatura), es posible para las partículas de mayor energía moverse a través del campo magnético bajo la presencia de un campo eléctrico, \mathbf{E} , que es el campo inducido por el movimiento del plasma y CMI en el viento solar, que satisface la condición:

$$\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}$$

donde \mathbf{V} es la velocidad del viento solar y \mathbf{B} el CMI.

Si se considera que durante la reconexión magnética el CMI tiene una dirección preferencial sur, B_s , y que cerca del plano de la eclíptica la velocidad es radial, ($V_x \simeq \mathbf{V}$),

se obtiene que durante los eventos geofecivos, el MIP impone un campo eléctrico a la magnetosfera en dirección este-oeste:

$$E_y = VB_s$$

que es la misma dirección en la que fluye la corriente del anillo. Por lo que además de la inyección de partículas, el anillo de corriente se energiza gracias esta componente eléctrica inducido por el MIP [Burton et al., 1975].

Es por esto que los parámetros en el medio interplanetario B_z y VB_s juegan un papel importante en el desarrollo y la intensidad de las TGs [Gonzalez et al., 1989 y referencia incluidas]. Diversos estudios han mostrado altas correlaciones entre la intensidad de las TGs y el campo eléctrico inducido por el viento solar [p.e Wu y Lepping, 2002, Wang et al., 2003]. Uno de los objetivos de esta tesis es estudiar la correlación entre la geofectividad las distintas secciones en el MIP y el campo inducido E_y .

2.7. Índice D_{st} y tormentas geomagnéticas

Las principales causas de las TGs son perturbaciones en el viento solar cuya velocidad de plasma y orientación de su campo magnético favorece la reconexión entre el viento solar y la magnetosfera, lo que permite la entrada de partículas al interior de la magnetosfera y la energización del anillo de corriente.

La inyección y aceleración de estas partículas en el anillo de corriente causan finalmente un incremento de la densidad de corriente en el anillo, lo que resulta en un decremento neto de la componente geomagnética B_H con respecto a su valor promedio en condiciones no perturbadas. Esta caída en la componente horizontal del campo geomagnético es la característica principal de una TG.

La perturbación en la componente B_H puede cuantificarse a través del índice D_{st} (*Disturbance storm time*). Este índice considera la desviación de la componente respecto a una línea base cuyo valor se obtiene de cinco observatorios geomagnéticos localizados a latitudes medias (entre 20 y 40 grados norte y sur), a diferentes longitudes. La línea base de B_H se calcula con los valores promedio de los días quietos (no perturbados), y es por definición el valor cero del índice D_{st} .

Con respecto a la línea base, se dan variaciones tanto positivas como negativas.

Las positivas están asociadas con la compresión de la magnetosfera por cambios en la presión dinámica del viento solar y las negativas a las TGs consecuencia de la inyección de partículas y el incremento de la corriente del anillo debido a la reconexión en el lado noche de la magnetosfera [Karinen y Mursula, 2005]. Mientras menor sea el índice D_{st} , más intensa será la tormenta.

Según el criterio de Gonzalez et al. [1994], el nivel de actividad geomagnética se clasifica en quieto, débil, moderado o intenso según el valor mínimo alcanzado por el índice D_{st} durante la tormenta. Los intervalos de clasificación se muestran en la Tabla 2.2.

Nivel de actividad geomagnética	índice Dst (nT)
Quietos	$Dst > -30$
Débil	$-30 \geq Dst > -50$
Moderado	$-50 \geq Dst > -100$
Intenso	$-100 \geq Dst$

Tab. 2.2: Nivel de actividad geomagnética según el criterio del índice Dst [Gonzalez et al., 1994].

La figura 2.12 muestra un registro típico de una tormenta geomagnética. En general, en una tormenta geomagnética se pueden reconocer tres etapas: la fase inicial o comienzo repentino (CR), la fase principal, y la fase de recuperación.

El CR se observa como un incremento en promedio de 10 nT en el índice D_{st} , en un lapso que va de minutos hasta una hora. El incremento se debe a la compresión de la magnetosfera en el lado día, cuando la presión dinámica del viento solar se incrementa. No todas las tormentas geomagnéticas comienzan con un CR, pero sí las más intensas [Gonzalez et al., 1994].

La fase principal se reconoce por un decremento súbito en el índice D_{st} y el tiempo que tarda en alcanzar su valor mínimo que es hasta de algunas horas. Esta etapa se debe al incremento en la densidad de corriente del anillo por la entrada de partículas al interior de la magnetosfera, vía reconexión magnética.

En la última etapa se da una recuperación gradual del campo debida a distintos procesos de pérdida de energía, como pérdidas por difusión, o por colisión de iones ace-

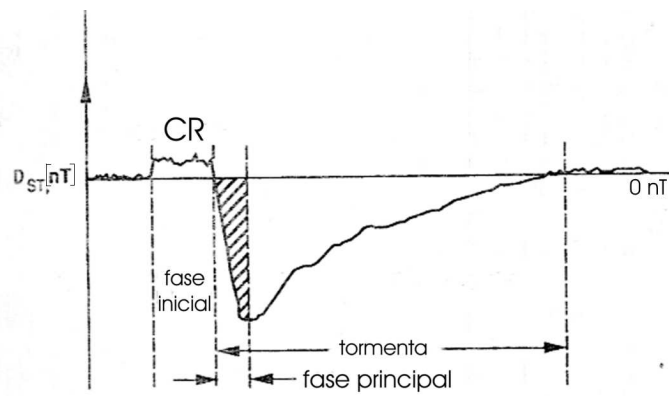


Fig. 2.12: Registro típico de una tormenta geomagnética.

lerados con partículas neutras. Este proceso puede durar desde días hasta una semana.

3. ESTUDIOS PREVIOS DE GEOEFECTIVIDAD DE EVENTOS EN EL MIP

Existen en la literatura diversos trabajos en donde se describe de manera cualitativa y cuantitativa la geoeffectividad de las estructuras de gran escala en el MIP. Los estudios se dividen principalmente en dos grupos: los estudios estadísticos y los estudios de evento por evento. En el primer tipo, generalmente se realiza una asociación temporal entre estructuras de gran escala en el MIP y TGs; mientras que en los estudios de evento por evento además se analiza en detalle qué parte de esta estructura solar causó la máxima caída en el índice D_{st} ¹. En general, estudios buscan la correlación entre los parámetros de plasma y CMI con la intensidad de la TG asociada.

En este capítulo se muestran los resultados principales de algunos estudios previos, que más adelante serán comparados con los obtenidos en este trabajo. Para todos los trabajos que se presentan en esta sección, la fuente para índices geomagnéticos es el *Centro Mundial de Datos para Geomagnetismo en Kyoto* ², misma que se utilizó para la identificación de TGs en esta tesis; mientras que los parámetros de plasma y campo magnético en el MIP provienen de mediciones *in-situ* de distintas naves espaciales, como se especifica en cada estudio. Esto, junto con la metodología seguida en cada estudio son las razones principales de la diferencia entre los resultados obtenidos.

En un estudio estadístico, Yermolaev y Yermolaev [2002] analizaron la asociación entre nubes magnéticas y TGs ocurridas entre los años de 1986 y 2000, utilizando como único criterio una asociación temporal entre dichos eventos. En la figura 3.1 se observa la evolución en el tiempo del índice D_{st} desde 1986 hasta 1990. Sobre cada mínimo local de las caídas del D_{st} , que se refieren a las TGS localizadas en este periodo, se marca la posible causa en el MIP. Para su estudio, Yermolaev y Yermolaev [2002] obtuvieron los

¹ El valor mínimo alcanzado por el índice D_{st} es el valor con el cual se identifica la intensidad de la TG.

² <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp>

datos del *National Space Science Data Center*³, combinaron observaciones de distintas naves espaciales para cubrir dicho periodo. Encontraron que de 618 TGs con un índice $D_{st} < -60$ nt, sólo el 33 % están asociadas al paso de una EMCI, mientras que otro porcentaje igual está asociado a la presencia de RCI. Para 414 TGs intensas ($D_{st} < -100$ nT) en el mismo periodo, el porcentaje de asociación con las EMCIs aumenta al 52 %. Así mismo, en todos los eventos analizados observaron un CMI cuya componente B_z sur alcanzaba magnitudes entre -5 y -15 nT en intervalos de tiempo de 1 a 3 horas; esto independientemente del tipo de estructura que causara la tormenta.

Debido al número de eventos considerados, este estudio tiene un importante resultado estadístico; sin embargo, al tratarse únicamente de una asociación temporal entre eventos en el MIP y TGs, Yermolaev y Yermolaev [2002] no hacen ninguna diferencia cuando la tormenta es causada por la funda detrás del choque IP o por la EMCI en sí misma, así como tampoco se considera una combinación de EMCI, RCI y/o cruces de la hoja de corriente heliosférica. Esta información más detallada se puede obtener bajo estudios de evento por evento, como el que se propone en esta tesis, donde además del criterio temporal se analiza la estructura y la configuración del campo magnético en el MIP, con la desventaja de que el número de eventos es menor.

Huttunen et al. [2002] analizaron 111 TGs ocurridas durante la fase ascendente del ciclo solar 23 y su asociación con diferentes estructuras en el MIP. Utilizando datos de las misiones *Advanced Composition Explorer* (ACE, Chiu et al., 1998) y *Wind*, en un periodo similar al que se analiza en esta tesis, Huttunen et al. clasificaron las tormentas en cuatro categorías de acuerdo a su causa en el MIP, estas son: funda, EMCI, funda y EMCI o ninguna de las anteriores. Para llevar a cabo esta clasificación se tomó en cuenta la asociación temporal entre el máximo de intensidad alcanzado por la tormenta y la estructura que se observa previamente en el MIP. Entre sus resultados obtienen que de 90 TG moderadas ($-50 > D_{st} > -100$), el 32 % se asocia a una EMCI; mientras que de 21 TG con $-100 > D_{st} > -200$, el 50 % están asociadas a la combinación de la funda y la EMCI; sin embargo, no se hace un análisis evento por evento de la configuración del CMI y el tiempo efectivo de interacción entre el viento solar y la magnetosfera como se propone en esta tesis.

En un estudio similar de evento por evento, Cid et al. [2004] concluyen que de 48 TGs con $D_{st} < -100$ nT sucedidas entre 1995 y 2001, 71 % de ellas estuvieron asociadas a EMCI y el resto a RCI. La figura 3.2 muestra un un histograma de ocurrencia de TGs causadas por EMCI y RCI y su evolución en el ciclo solar. En nuestro estudio y bajo los

³ Archivo permante de la NASA para datos de misiones espaciales, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov>

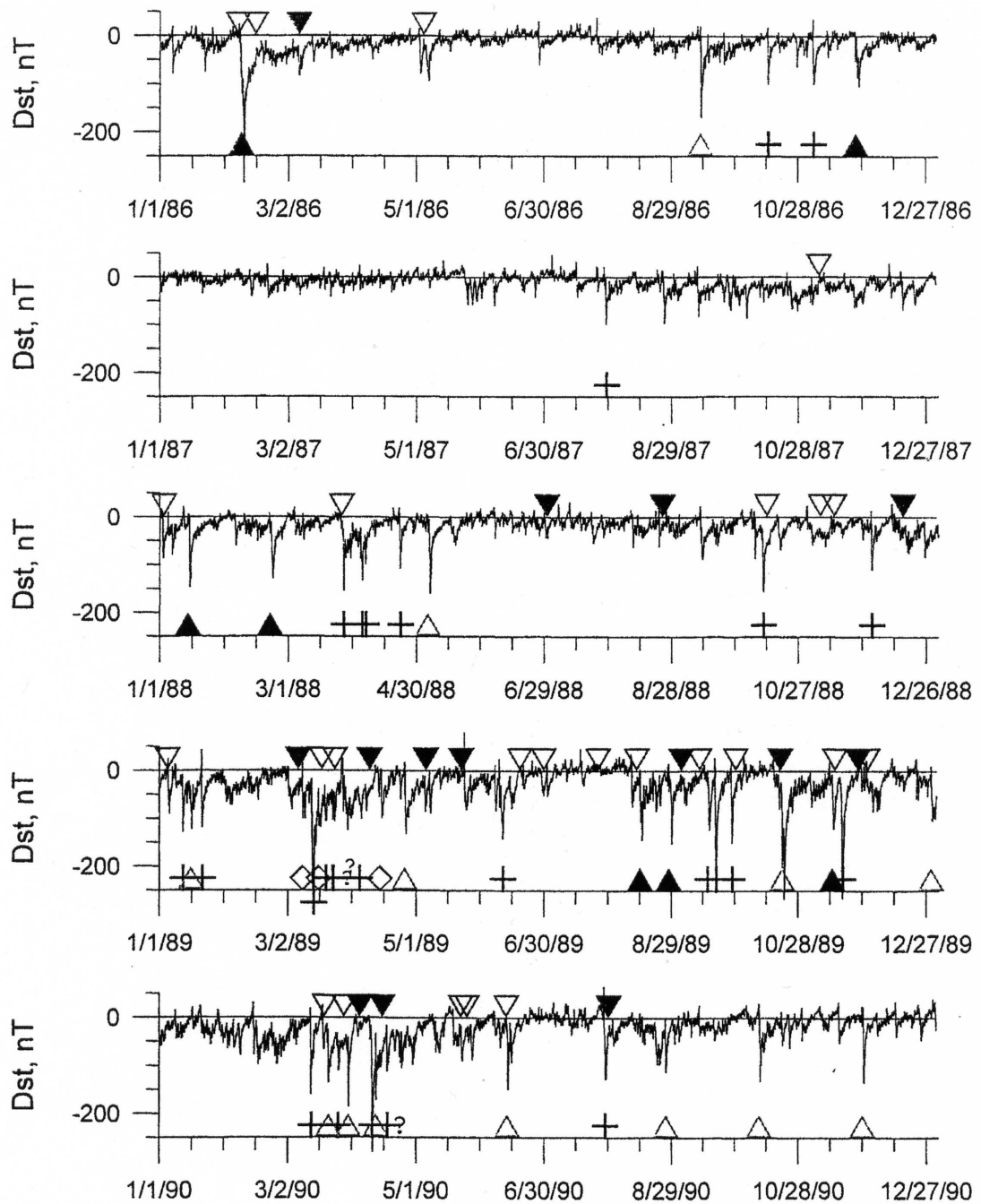


Fig. 3.1: Se observa la evolución en el tiempo del índice D_{st} desde 1986 hasta 1990. Sobre cada mínimo local de las caídas del D_{st} , que se refieren a las TGS localizadas en este periodo, se marca la posible causa en el MIP. La línea sólida es el índice D_{st} , los símbolos en la parte inferior corresponden a la causa en el MIP de cada TG (triángulos sólidos: EMCI, triángulos abiertos: RCI, diamantes: onda de choque interplanetaria, signo de interrogación: desconocida. Figura 1 de Yermolaev y Yermolaev [2002].

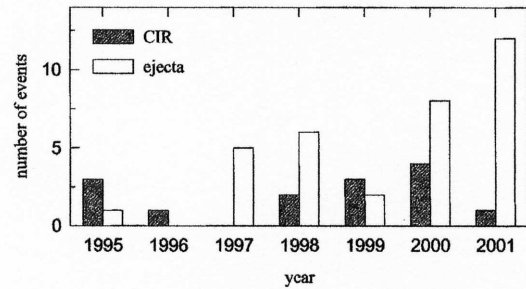


Fig. 3.2: Histograma de frecuencia de TGs intensas causadas por EMCI (en blanco) y RCI (en gris). Figura 7 de Cid et al. [2004].

criterios que se describen en la siguiente sección, sólo se asoció una EMCI al 50 % de las TGs con $D_{st} < -100$ nT. La diferencia principal radica en que nosotros consideramos únicamente EMCIs que impulsaban a una onda de choque, lo que se verá con detalle en el siguiente capítulo. A pesar de identificar a las EMCI como la principal causa, en su trabajo los autores no hacen una diferencia clara entre las TG causadas por la sección de la funda o la EMCI solamente, o la combinación de los dos eventos.

Con un número menor de eventos, pero en un estudio más detallado, Dal Lago et al. [2004] analizaron las 9 TGs de mayor intensidad entre 1997 y 2001 ($D_{st} < -200$ nT) y su asociación con los parámetros del viento solar observados por la nave *ACE*. Encontraron que 7 de las 9 TGs fueron causadas por EMCI de las cuales 5 eran nubes magnéticas. Las 2 TGs restantes se debieron a la región de compresión en la funda detrás de una onda de choque. Siendo que los 9 eventos se asociaban a la presencia de un CMI en dirección sur, B_s , de mayor magnitud a la del viento solar ambiente, analizaron las causas en el MIP por las cuales se intensifica este campo y encontraron cuatro fuentes distintas: (1) la compresión del CMI en la sección de la funda detrás del choque para 3 eventos, (2) la combinación de la compresión del CMI en la funda más el campo magnético interno de la EMCI en 4 eventos, (3) campo magnético interno de la EMCI para 1 evento, y (4) campo magnético interno de la EMCI comprimido por una corriente de viento rápido detrás de ésta para 1 evento.

Otra forma de estudiar la geoefectividad del viento solar, es comenzar por las observaciones de estructuras en el MIP a 1 UA y ver cuáles de ellas fueron seguidas por TGs y cuáles no. Como es de esperarse los porcentajes de geoefectividad obtenidos para distintas estructuras en el MIP serán distintos si se toman inicialmente los eventos en el viento solar y después se les asocia una TG, a que, como en los casos anteriores, si se

consideran primero los eventos de TGs y después se busca su causa en el MIP. Aun así, resulta útil la comparación entre estas dos metodologías en especial cuando se busca, si es que existe, el o la combinación de métodos que permitan el pronóstico del clima espacial.

Echer y Gonzalez [2004] analizan la geoeffectividad de ondas de choque interplanetarias, nubes magnéticas, cruces de la HCH y las combinaciones de éstas. Para este estudio combinaron observaciones de distintas naves y en distintas épocas, de donde obtuvieron 554 ondas de choque entre los años de 1973 a 2000, 1929 cruces de la HCH entre 1957 y 2001, y 149 nubes magnéticas entre 1966 y 2001. Debido al gran número de eventos analizados, este es uno de los estudios estadísticos de mayor relevancia.

De igual manera que los estudios anteriores, el criterio utilizado para la asociación entre los eventos utilizado por Echer y Gonzalez [2004] se da en una ventana temporal del orden de minutos a horas, ubicando a la TG que sigue justo después del paso de la estructura en el MIP. La geoeffectividad de las estructuras es evaluada conforme al porcentaje de TGs moderadas e intensas que éstas causaron. Los porcentajes de geoeffectividad que obtuvieron son: 57% para las ondas de choque, 77% de las nubes magnéticas, 80% de las nubes magnéticas combinadas con cruces de la HCH, 81% de las nubes magnéticas combinadas con una onda de choque y el 100% de las nubes magnéticas combinadas con una onda de choque y un cruce de la HCH. Los detalles de estos resultados se presentan en las figuras 3.3 y 3.4, donde se reportan los porcentajes de tormentas débiles, moderadas e intensas causada por cada estructura y combinación de estructuras en el MIP.

Wang et al. [2003] realizaron otro estudio estadístico para 105 TGs moderadas e intensas ($D_{st} < -50$ nT) en el periodo de 1998 a 2001, las cuales asociaron con los parámetros de plasma y CMI observados por la nave *ACE*. Uno de los principales análisis fue la relevancia del campo eléctrico inducido, VB_s . En su estudio encontraron que para determinar el mínimo D_{st} alcanzado en una TG, es más importante el valor de VB_s , coeficiente de correlación (cc) = 0.92, que el tiempo de interacción Δt . La figura 3.5 muestra las gráficas de dispersión que obtuvieron, donde se observa que valores mayores de VB_s generaron tormentas más intensas, mientras que intervalos de Δt más prolongados no lo hicieron, sugiriendo que es la compresión de la componente del campo B_s el parámetro mejor correlacionado con la geoeffectividad. Encontraron que valores de $VB_s > 5$ mV/m y $\Delta t > 3$ hrs causaron las 33 TGs con mínimo $D_{st} \leq -100$ nT. Los valores umbrales de la componente del campo B_s y el intervalos de tiempo que encontraron son de $\langle Bs \rangle > 3$ nT y $\Delta t > 1$ hr para TGs con -50 nT $> D_{st} > -100$

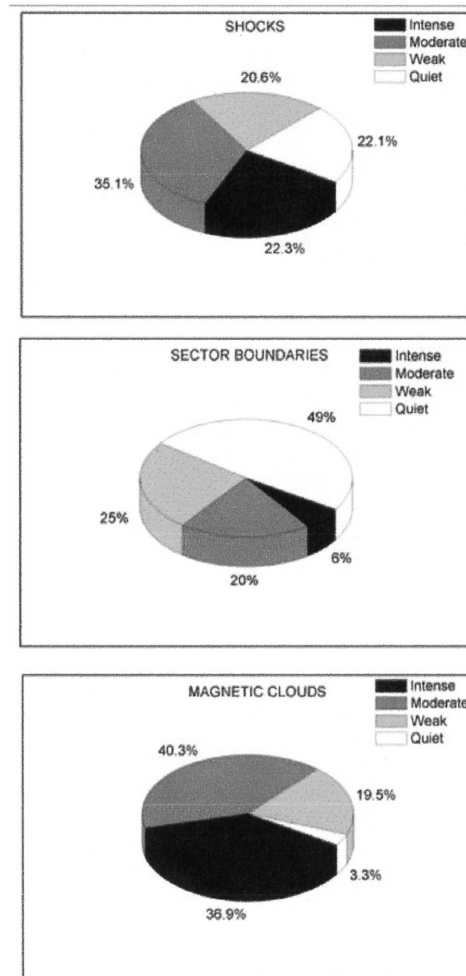


Fig. 3.3: Porcentaje de TGs causadas por diferentes estructuras geoeffectivas de gran escala en el MIP. De arriba a abajo, el primer panel corresponde a TGs causadas por fundas detrás de la onda de choque, el segundo a causadas por cruces de la HCH y el tercero a nubes magnéticas. Figura 1 de Echer y Gonzalez [2004].

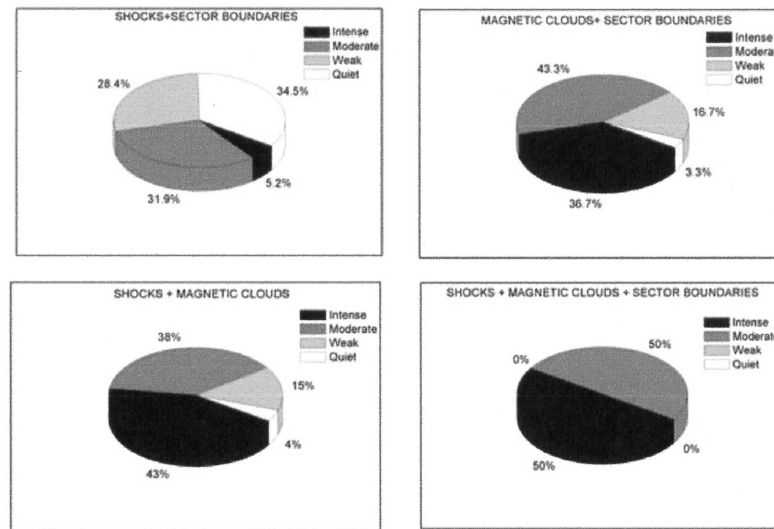


Fig. 3.4: Porcentaje de TGs causadas por la combinación de diferentes estructuras geoeffectivas de gran escala en el MIP. Panel superior izquierdo: TGs causadas por fundas y cruces en la HCH (panel superior derecho: TGs causadas por nubes magnéticas y cruces en la HCH. Panel inferior izquierdo: TGs causadas por fundas y nubes magnéticas. Panel inferior derecho: TGs causadas por fundas, nubes magnéticas y cruces en la HCH. Figura 2 de Echer y Gonzalez [2004].

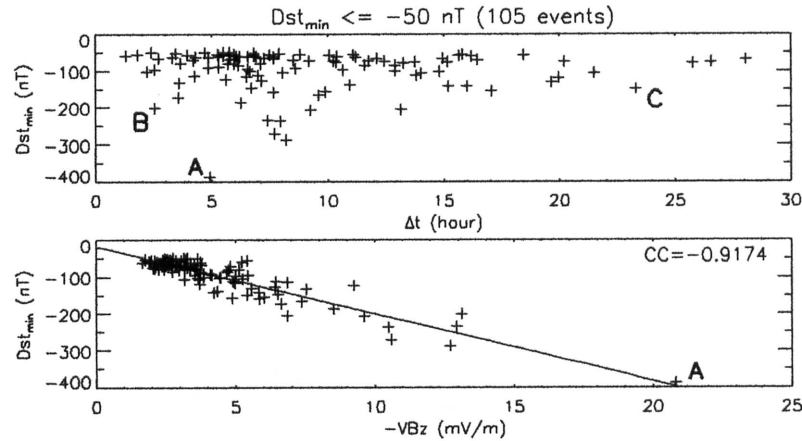


Fig. 3.5: Figura 4 de Wang et al. [2003]. Gráficas de dispersión del índice D_{st} vs Δt (panel superior), e índice D_{st} vs VB_s (panel inferior).

nT, y de $\langle Bs \rangle > 6$ nT y $\Delta t > 3$ hrs para TGs con $D_{st} \leq -100$ nT.

En relación al CMI y al campo eléctrico inducido y su relación con la intensidad de las TGs, el estudio de Wang et al. [2003] es uno de los más completos y detallados; sin embargo, no se hace ninguna diferencia entre el tipo de estructura en el MIP asociada con la TG, ni como influye ésta en sus índices de correlación. Aunque con un número menor de eventos y con distintos criterios para la selección de ellos, este es uno de los puntos que se propuso atacar en esta tesis. Como se verá en el siguiente capítulo, encontramos que las TGs causadas por fundas, EMCI o la combinación de ellas, presentan distintos índices de correlación con el máximo valor de VB_s y otros parámetros asociados a este campo eléctrico.

Srivastava y Venkatakrishnan [2004] analizaron 64 EMC geoeffectivas y su contraparte en el MIP durante los primeros 7 años del ciclo solar 23, el mismo considerado en esta tesis. Este es otro caso en el que el estudio lleva un orden distinto al de esta tesis, ya que comenzaron por considerar los eventos solares. Sin embargo, presentan resultados relevantes para este trabajo cuando se refieren a EMCIs que sí causaron TGs, estos son: una correlación de 0.7 entre el índice D_{st} y el máximo valor de B_s en el MIP, y una correlación de 0.66 entre el índice D_{st} y el máximo valor de $|VB_z|$ (equivalente a VB_s , figura 3.6). Por otra parte, muestran que, aunque la onda de choque es un buen indicador del pasaje de una EMCI a 1 UA, la velocidad del choque presenta una baja correlación con la intensidad de la TG asociada, como se observa en la figura 3.7.

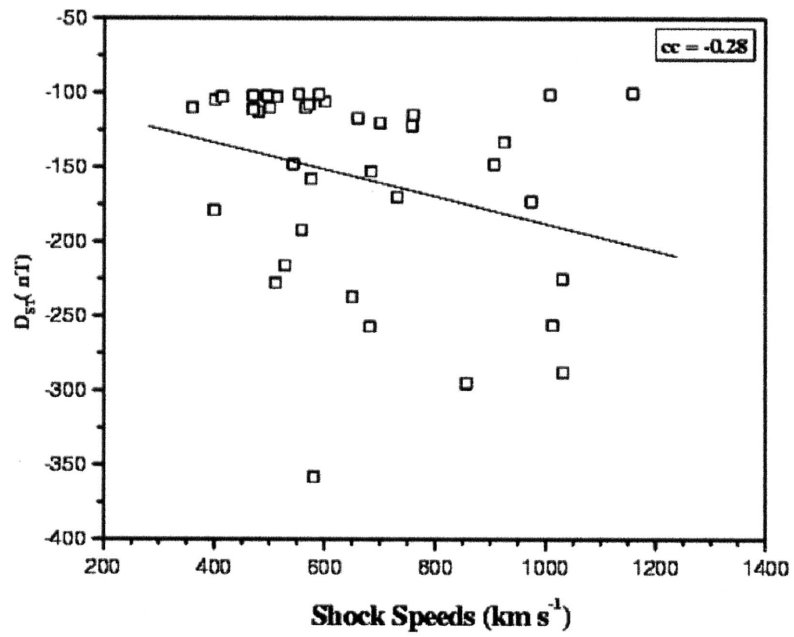


Fig. 3.6: Gráficas de dispersión del índice D_{st} vs $|VB_z|$. Figura 11 de Srivastava y Venkatakrishnan [2004].

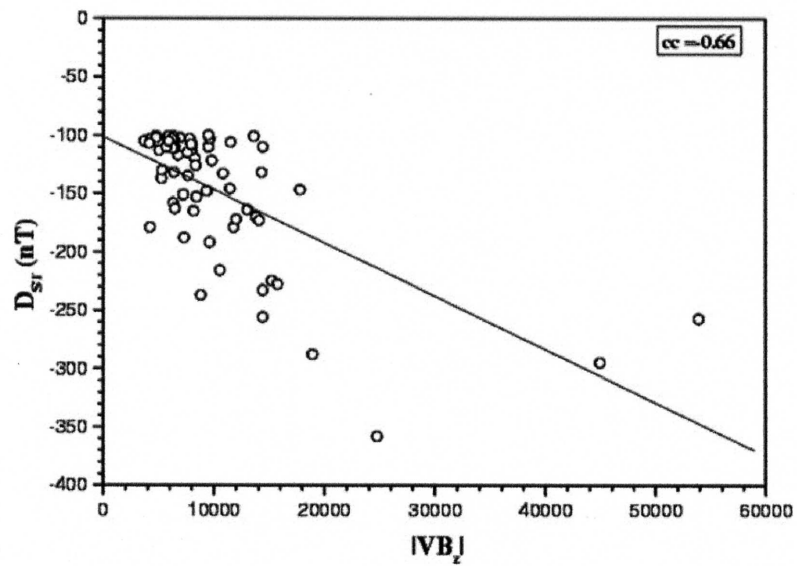


Fig. 3.7: Gráficas de dispersión del índice D_{st} vs la velocidad de la onda de choque en el MIP. Figura 6 de Srivastava y Venkatakrishnan [2004].

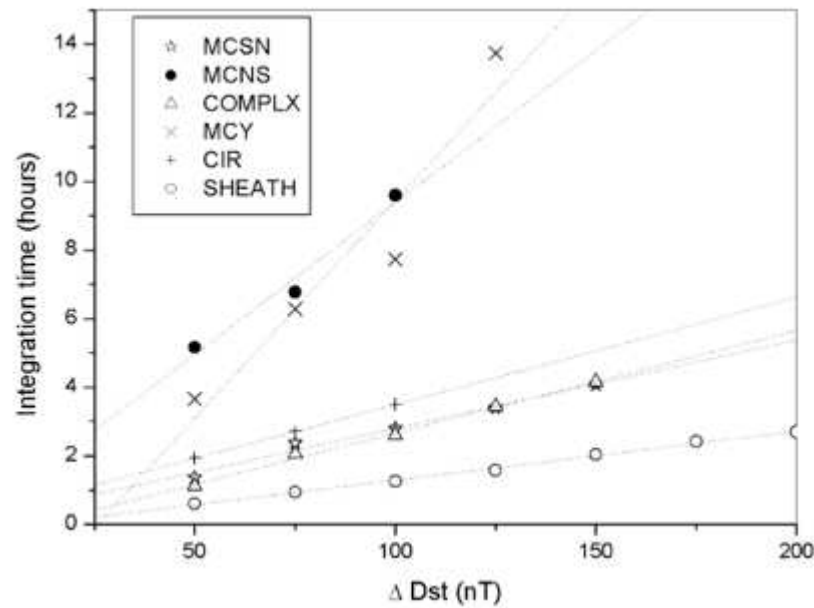


Fig. 3.8: Promedio de Δt vs ΔD_{st} para las distintas causas de TGs en el MIP (MCNS, MCSN y MCY: nubes magnéticas con diferentes rotaciones del CMI. COMPLEX: causas complejas o combinadas. SHEATH: funda detrás de la onda de choque. Figura 1 de Vieira et al. [2004].)

En cuanto a la de inyección de energía al anillo de corriente, Vieira et al. [2004] analizaron esta tasa a través del campo eléctrico inducido por el viento solar entre el intervalo de tiempo en el que él interacciona geoelectivamente con la magnetosfera; asociandola con evolución de la fase principal de 20 TGs intensas causadas por distintas estructuras en el MIP. Una de sus conclusiones más importantes es que las TGs causadas por la funda detrás de la onda de choque tienen una razón de inyección de energía mayor a aquellas causadas por nubes magnéticas, a la vez que la fase principal de las TGs evoluciona más rápido. Este resultado se observa en la figura 3.8 donde las TGs causadas por la funda detrás del choque alcanzan su mínimo valor de D_{st} en un menor intervalo de tiempo a las causadas por nubes magnéticas. Esto los lleva a sugerir que la magnetosfera adopta distintas configuraciones dependiendo de la razón a la cual es inyectada la energía a su interior. Este efecto se refleja también en los resultados de esta tesis, siendo esta razón uno de los parámetros mejor correlacionados con la intensidad de las TGs aquí analizadas.

Los estudios referidos en este capítulo indican que mientras más intensa sea la

tormenta, es más probable que esté asociada a una EMCI, para algunos, en el subconjunto particular de las nubes magnéticas; además de la presencia de intensos campos magnéticos en dirección sur, ratificando a la reconexión magnética entre el CMI y la magnetosfera como la principal contribución para el desarrollo de una TG. Los resultados de esta tesis siguen tendencias similares, pero las comparaciones se presentarán en detalle en el capítulo de conclusiones.

4. SELECCIÓN DE EVENTOS Y METODOLOGÍA

4.1. Criterios de selección

En la selección de eventos el objetivo principal fue obtener un conjunto representativo de TGs asociadas a EMCIs que permitiera: (1) establecer la sección de la EMCI asociada a cada tormenta y (2) realizar un análisis de las correlaciones entre algunos parámetros del plasma y el CMI. Para este trabajo se eligieron eventos ocurridos entre 1998 y 2002, que corresponde a la fase ascendente y el máximo del ciclo solar 23 (1998-2002).

Una primera selección de tormentas se hizo a través del índice D_{st} reportado en la página del *Centro Mundial de Datos para Geomagnetismo en Kyoto*. Siguiendo el criterio de Gonzalez et al. [1994], las tormentas moderadas corresponden en el índice D_{st} a caídas en el intervalo de $-50nT \geq D_{st} > -100$ nT y la tormentas intensas para un índice $D_{st} \leq -100$ nT.

Además del valor mínimo del índice D_{st} como indicador de la intensidad de la tormenta, se tomaron datos del índice Dst previo al inicio de cada tormenta; esto con el fin de conocer las condiciones del campo geomagnético previas y durante el paso por el entorno de la Tierra de la estructura de gran escala en el MIP. Esta distinción se hizo con el fin de esclarecer si la intensidad de las TG depende de las condiciones previas de la magnetosfera.

Por otra parte, el valor previo de índice D_{st} permitió establecer el inicio de la fase principal de las TGs, que es cuando el valor del D_{st} empieza a caer por debajo del valor previo a la llegada de la estructura en el MIP.

La muestra se redujo a las tormentas geomagnéticas asociadas al paso de una EMCI

y que iniciaron con un *comienzo repentino* como fue descrito en el capítulo ???. Éste es un incremento súbito en el índice D_{st} resultado de la compresión de la magnetosfera por el impacto de viento solar con una mayor presión dinámica que la del viento solar ambiente. Sabiendo esto, se pudo asociar cada *comienzo repentino* observado en el índice D_{st} con el inicio de la perturbación en el MIP.

La fecha del *comienzo repentino* (día, hora y minuto) se tomó del artículo *Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996-2002* [Cane y Richardson, 2003]. Al utilizar este artículo cuya principal aportación es una lista de EMCIs observadas a 1 UA, se aseguró que todas las TGs cuyos comienzos repentinos estuvieran en esta lista, a su vez estuvieran asociadas al paso de una EMCI.

De estas tormentas se seleccionaron aquellas cuyo *comienzo repentino* se asocia temporalmente al paso de una onda de choque impulsada por la eyecta en el MIP, esto para poder identificar el inicio del evento en el MIP con el inicio de la tormenta. La fecha del choque (día, hora y minuto) se obtuvo de la lista de la misión ACE¹; donde se estiman las ondas de choque utilizando los parámetros de CMI, velocidad y densidad de protones a 1 UA observados por ACE.

El paso de la onda de choque observado por los instrumentos de la misión ACE está asociado con el *comienzo repentino* de la tormenta; sin embargo, esto no sucede simultáneamente, ya que la onda de choque se registra fuera de la magnetosfera y el comienzo repentino es registrado por observatorios terrestres. Esta diferencia de tiempo es distinta para cada evento ya que depende de la posición de la misión y de la velocidad del viento solar. Para cada tormenta aquí analizada se obtuvo esta diferencia de tiempo, que va desde 15 minutos hasta de 1 hora.

En el último criterio se seleccionaron aquellos eventos que además de cubrir los puntos anteriores, contaron también con datos de plasma y campo observdos a 1 UA, al menos una hora antes de la llegada de la onda de choque y durante el paso de la funda y la EMCI. Los datos se obtuvieron de la página electrónica de la misión ACE en el nivel 2 (datos verificados)². Del instrumento MAG-ACE se tomaron datos del ángulo longitudinal del CMI, B_{λ} , y de la componente B_z en el sistema de coordenadas *Geocéntrico-Solar-Magnetosferico* (GSM)³. Del instrumento SWEPAM-ACE

¹ http://www.bartol.udel.edu/~chuck/ace/ACElists/obs_list.html

² Se agradece a los equipos de los instrumentos MAG-ACE y SWEPAM-ACE, así como al Centro de Ciencias ACE por facilitar los datos, <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2>.

³ El origen de las coordenadas GSM se ubica en el centro de la Tierra. El eje x es la línea que

se obtuvieron los datos de rapidez, densidad y temperatura de protones. Para ambos instrumentos se tomaron los datos a cada 64 segundos.

En resumen, la selección de los eventos analizados en este estudio siguió los siguientes criterios:

- De las TGs entre 1998 y 2002, se eligieron las TGs moderadas e intensas.
- Del conjunto obtenido se tomaron las tormentas que iniciaron con un comienzo repentino y estaban asociadas al paso de una EMCI a 1 UA.
- Se buscó que cada comienzo repentino estuviera asociado a una onda de choque en el MIP impulsada por la EMCI.
- Finalmente, se pidió que los eventos en el MIP contaran con mediciones de plasma y CMI durante el paso de la EMCI para poder analizar los parámetros de plasma y su posible correlación con la intensidad de las TGs.

En la base de datos del centro de Kyoto en el periodo de marzo de 1998 a diciembre de 2002 se identificaron 192 tormentas geomagnéticas (129 moderadas y 63 intensas); de las cuales, los criterios utilizados en este estudio llevaron a seleccionar 54 eventos (22 moderadas y 32 intensas), lo que corresponde al 28.12% de la muestra inicial de tormentas geomagnéticas (tabla 4.1). Cabe resaltar que el subconjunto estudiado de tormentas intensas es una muestra representativa, con más del 50% del número de tormentas totales observadas para este periodo. Todos los eventos, la fecha de ocurrencia (año, mes, día y hora) así como el mínimo valor del índice D_{st} , se reportan en la tabla 4.2.

4.2. Metodología

Para realizar un estudio más detallado, se hizo una subdivisión de las tormentas geomagnéticas según su intensidad. Se conservó un solo grupo para las tormentas moderadas y las tormentas intensas se subdividieron en cinco grupos con intervalos de 50 nT en el índice D_{st} como se indica en la Tabla 4.3.

conecta el origen con el centro del Sol y es positivo hacia el Sol. El eje y es definido como el producto

Intensidad de la tormenta	Número de eventos totales	Número de eventos de estudio	Porcentaje (%)
moderada	129	22	17.0
intensa	63	32	50.8

Tab. 4.1: Número de casos totales de tormentas reportadas en la base de Datos de Kyoto y número de casos de estudio de tormentas moderadas e intensas.

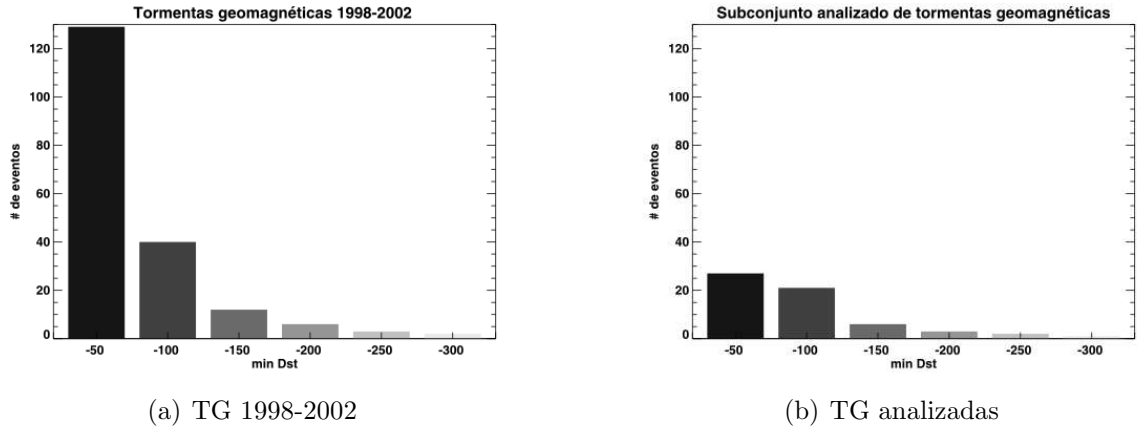


Fig. 4.1: Comparación de las distribuciones del total de tormentas geomagnéticas en el periodo 1998-2002 y los eventos analizados.

Las distribuciones de las TGs totales y de los eventos analizados de la tabla 4.3, se presenta en los histogramas de la figura 4.1. El histograma *a* corresponde a las TGs según la base de datos del centro de Kyoto en el periodo 1998-2002, el histograma *b* corresponde a los eventos seleccionados para este trabajo según los criterios previamente establecidos. Comparando los histogramas de la figura 4.1, se observa que al considerar sólo las TGs asociadas a ondas de choque y EMCIs (histograma *b*), se reduce considerablemente el número de TG moderadas con respecto al histograma *a*; sin embargo, las TGs de mayor intensidad parecen seguir la misma distribución, por lo que consideramos que ésta es una muestra representativa particularmente para las TGs intensas.

Para cada evento se realizó lo siguiente:

cruz del eje x y el eje del campo magnético terrestre. El eje z completa el sistema cartesiano con los ejes x , y

- Se graficó el índice D_{st} horas antes y después de cada una de las TGs seleccionadas. Aquí se localizaron y tomaron los valores del comienzo repentino de la tormenta, el inicio de la fase principal y la máxima caída, así como del valor promedio del D_{st} una hora antes del inicio de cada evento para evaluar las condiciones previas de la magnetosfera.
- Se obtuvieron y graficaron los valores a 1 UA de velocidad, temperatura, densidad, campo magnético total y magnitud de la componente B_z alrededor de cada TG. Este paso permitió ubicar las ondas de choque, el principio y final de las EMCI reportadas por ACE y Cane y Richardson [2003] respectivamente. Con esto se pudo corroborar que el evento en el medio interplanetario efectivamente corresponde a la TG. Así mismo, en las gráficas realizadas se buscaron firmas de cruces de la HCH y/o RCI que pudieran estar involucradas junto con la EMCI con en la evolución de cada TG.
- Se asociaron los datos de parámetros de plasma e índice D_{st} utilizando la diferencia de tiempo entre la onda de choque en el MIP y el comienzo repentino de la tormenta.

Una vez hecha la corrección temporal entre las observaciones de los parámetros en el MIP y las observaciones terrestres para el índice D_{st} , se pudo identificar la sección de la estructura de gran escala que causó cada tormenta. Los tres grupos identificados son:

- Tormentas causadas por la funda detrás de la onda de choque: cuando la fase principal de la TG inicia y alcanza el mínimo D_{st} después de la onda de choque interplanetaria impulsada por una EMCI y antes del inicio de la EMCI.
- Tormentas causadas por una EMCI: cuando no se observa una caída del índice D_{st} con respecto al valor previo durante el paso de la funda, y en su lugar la fase principal de la TG comienza y alcanza su mínimo valor durante el paso de la EMCI.
- Tormentas causadas por la combinación de la funda y la EMCI: cuando la fase principal de la TG comienza previo durante el paso de la funda, pero el índice D_{st} alcanza su valor mínimo en el transcurso del paso de la EMCI.

Las gráficas 4.2, 4.3 y 4.4 muestran un ejemplo de cada uno de los grupos. De izquierda a derecha, la primer línea continua marca la onda de choque en los primeros siete paneles que corresponden a parámetros de plasma y campo

magnético en el MIP y el comienzo repentino de la tormenta en el último panel que es el correspondiente al índice D_{st} . El retraso temporal entre la onda de choque y el comienzo repentino es el tiempo que le toma a la perturbación para ser identificada por observatorios terrestres una vez que se observó en el MIP. Las líneas discontinuas marcan el inicio y final de la EMCI según los criterios de temperatura esperada y la β del plasma. Estas mismas fronteras se ubican en el panel del índice D_{st} con el retraso temporal correspondiente para cada evento. Finalmente, la línea continua gruesa indica el tiempo en el que el índice D_{st} alcanza su mínimo valor.

La gráfica 4.5 muestra como una RCI en la parte trasera de la EMCI contribuye a la formación de la tormenta. La RCI, sin llegar a formar un choque, comprime la parte trasera de la EMCI incrementando la magnitud del campo magnético, esta compresión favorece la reconexión y genera una mayor caída del índice D_{st} que lo que había logrado la funda y la parte delantera de la EMCI.

En la gráfica 4.6 es ejemplo de un evento en el cual se observa la firma del cruce de la HCH que contribuye a la TG.

- Para cada evento se aproximó el *tiempo de interacción* (TI) entre el viento solar y la magnetosfera, como el tiempo que transcurre entre el inicio de la fase principal de la tormenta y la máxima caída del índice D_{st} .

El tiempo inicial del TI es cuando sucede el comienzo repentino para los eventos causados por fundas y los causados por fundas más EMCI. En el caso de los eventos causados por EMCI, el tiempo inicial se tomó cuando el índice D_{st} cae a valores menores al valor previo. El final del TI para todos los eventos se tomó cuando el D_{st} alcanza su mínimo valor.

En este mismo paso se calculó también el *tiempo de efectivo de interacción* (TEI). Este tiempo lo definimos como los intervalos donde el CMI cuenta con una componente B_z negativa, lo que permite la reconexión y por lo tanto la entrada de partículas del viento solar al interior de la magnetosfera. En adelante, la componente B_z negativa será referida como B_{sur} , (B_s), y se tomará como valor positivo ya que se considera sólo su magnitud.

- Se calculó para cada evento el campo eléctrico inducido ($E_y = VB_s$) impuesto por las variaciones del CMI en el viento solar a la magnetosfera terrestre durante el *tiempo de interacción* y durante el *tiempo efectivo de interacción*.

Una vez obtenidos los valores de VB_s se obtuvo su máximo valor, el valor acumulado durante los intervalos de tiempo, y se compararon los resultados con las distintas causas de las TGs.

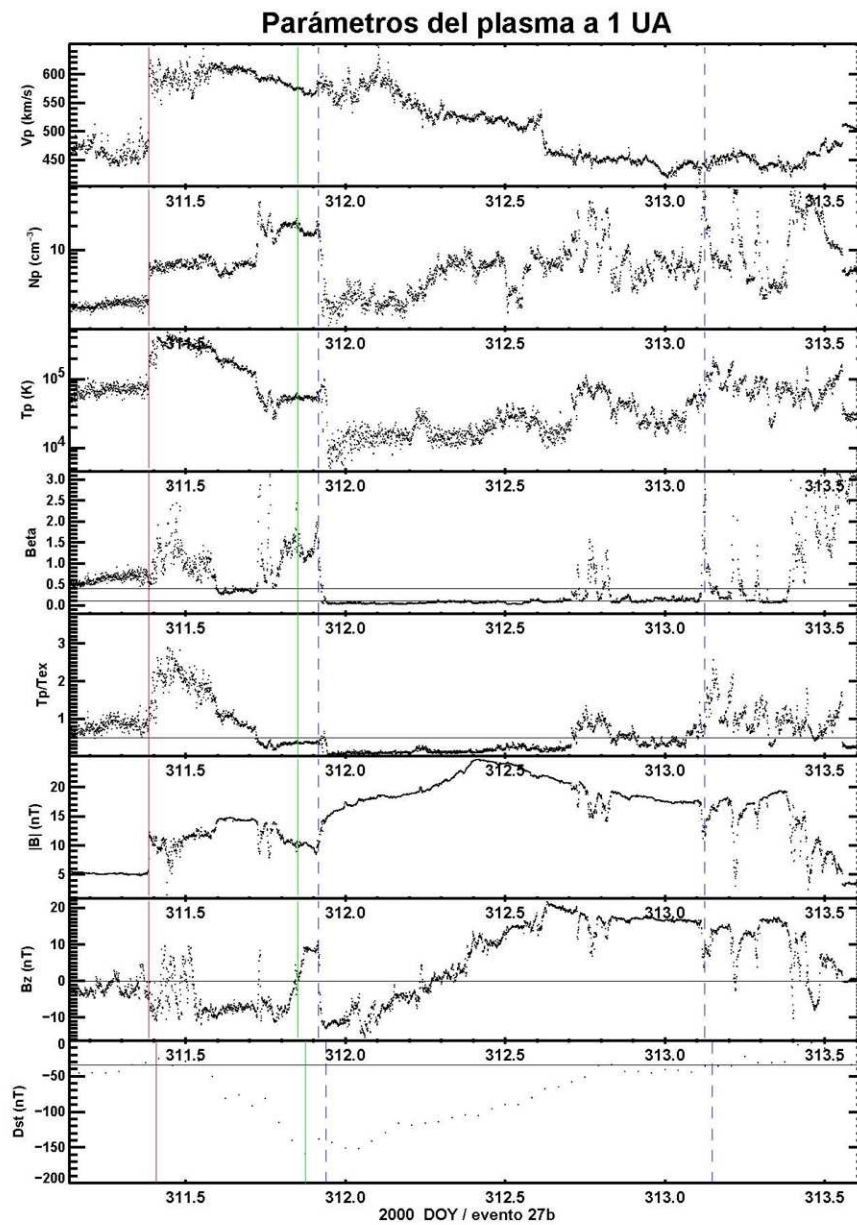


Fig. 4.2: Parámetros de plasma a 1 UA detectados por ACE. TG causada por la funda detrás de la onda de choque.

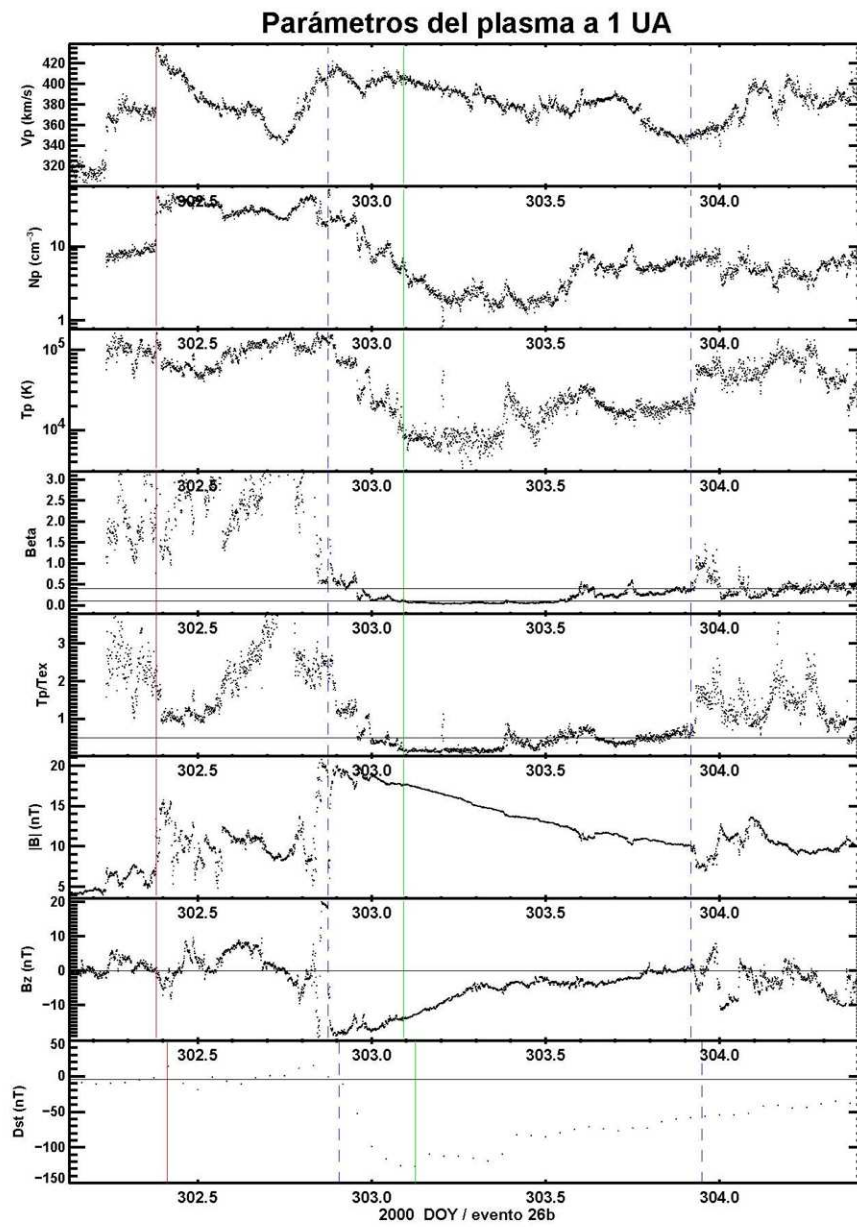


Fig. 4.3: Parámetros de plasma a 1 UA detectados por ACE. TG causada por una EMCI.

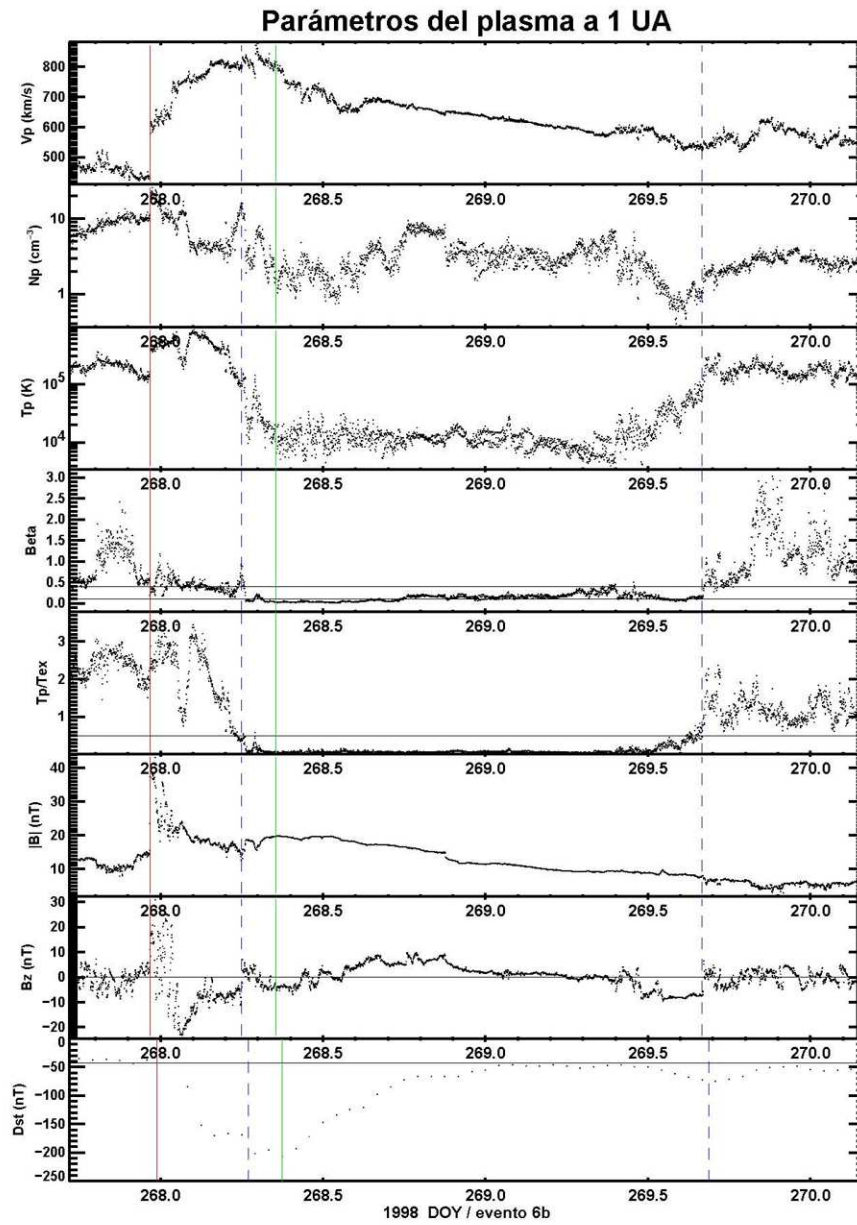


Fig. 4.4: Parámetros de plasma a 1 UA detectados por ACE. TG causada por la combinación de la funda y la EMCI.

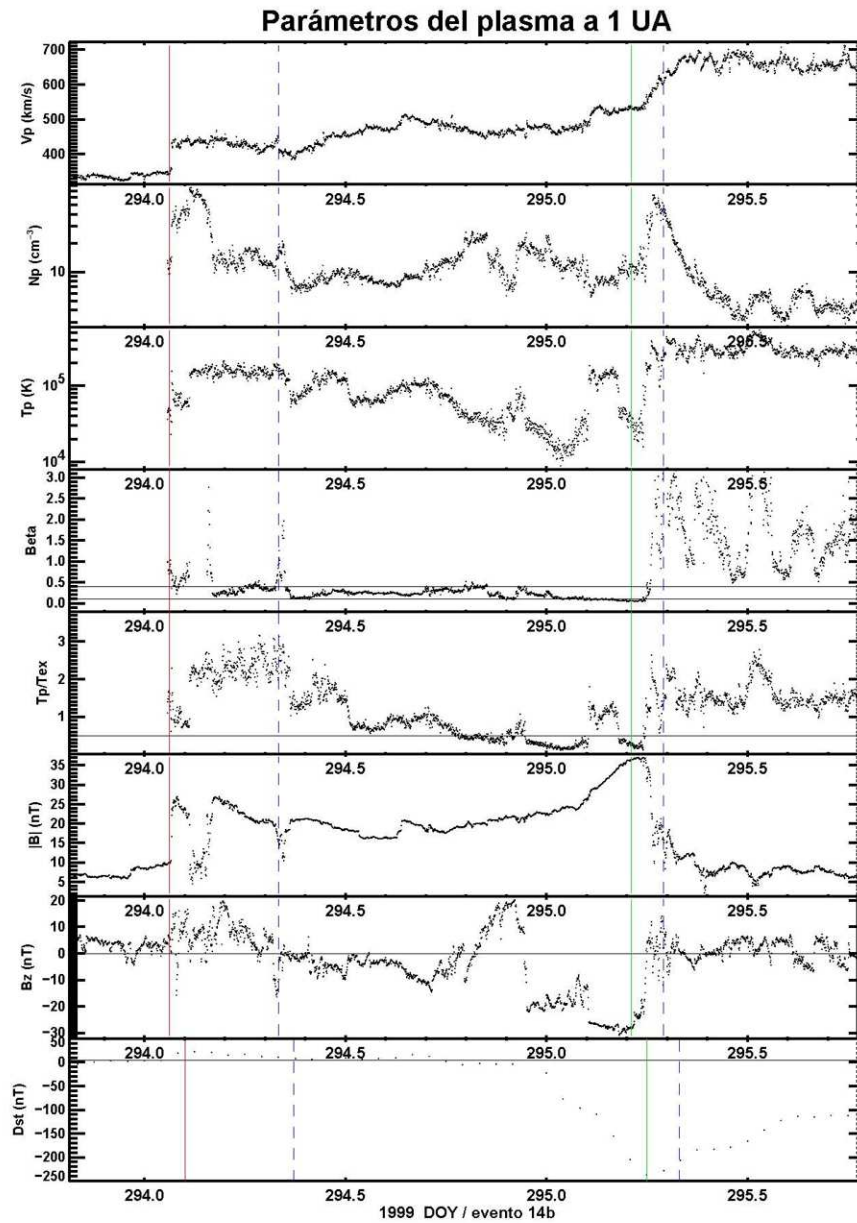


Fig. 4.5: Parámetros de plasma a 1 UA detectados por ACE. La región sombreada indica donde se encuentran las firmas en el MIP de velocidad, densidad y temperatura de una RCI.

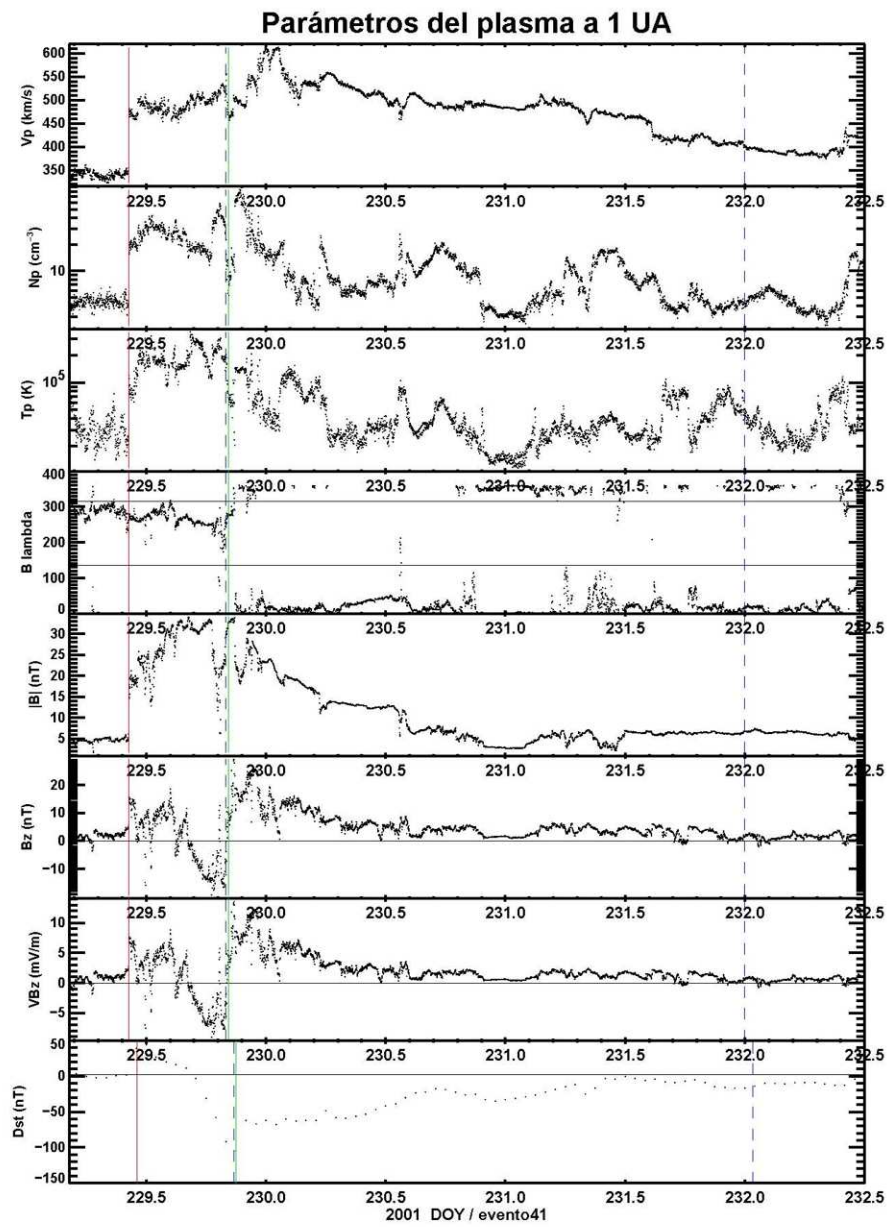


Fig. 4.6: Parámetros de plasma a 1 UA detectados por ACE. El cruce coincide con la fase principal de la TG

- Finalmente, utilizando los resultados anteriores, se establecieron los valores mínimos que deberían ser observadas en algunos parámetros del plasma y campo magnético en el MIP para provocar una TG moderada o intensa.

Pese a que la selección de eventos es comparable a la realizada en estudios previos de evento por evento, una diferencia fundamental es el análisis que se sigue. En esta tesis se propone, además de evaluar correlaciones previamente reportadas entre la intensidad de las TG y algunos parámetros en el MIP, el ver como varían estas correlaciones cuando las tormentas se asocian a distintas regiones dentro de la EMCI. Uno de los resultados más importantes y que se detallará en el siguiente capítulo es como varía la correlación entre la intensidad de las TGs con el campo eléctrico inducido VB_s .

No. de evento	fecha año/mes/día/hr	min Dst nT
1	1998050217	-85
2	1998061410	-55
3	1998062604	-101
4	1998082020	-67
5	1998082709	-155
6	1998092509	-207
7	1998101915	-112
8	1998110917	-142
9	1999011323	-112
10	1999021809	-123
11	1999031008	-81
12	1999041707	-91
13	1999092223	-173
14	1999102206	-237
15	1999121309	-85
16	2000021211	-133
17	2000040700	-288
18	2000060819	-90
19	2000072009	-93
20	2000072911	-71
21	2000081209	-235
22	2000100420	-143
23	2000100513	-182
24	2000101305	-71
25	2000101414	-107
26	2000102903	-127
27	2000110621	-159
28	2000112701	-80
29	2000112808	-73
30	2000112913	-119
31	2001012418	-61
32	2001030502	-73
33	2001032013	-149
34	2001032815	-87
35	2001033108	-387
36	2001040906	-62
37	2001041123	-271
38	2001041315	-77
39	2001041806	-114
40	2001042215	-102
41	2001081721	-105
42	2001100108	-148
43	2001101212	-71
44	2001102121	-187
45	2001102811	-157
46	2001123005	-58
47	2002030101	-71
48	2002032409	-100
49	2002041807	-127
50	2002042008	-149
51	2002052317	-109
52	2002080113	-51
53	2002080205	-102
54	2002082106	-106

Tab. 4.2: Las 54 tormentas geomagnéticas analizadas en este estudio. Se reporta la fecha de ocurrencia (año, mes, día y hora), así como el mínimo valor alcanzado por el índice D_{st}

Tormentas geomagnéticas	índice Dst (nT)	Número de eventos	Porcentaje (%)
Grupo 1	$-50 \geq Dst > -100$	27	45
Grupo 2	$-100 \geq Dst > -150$	21	35
Grupo 3	$-150 \geq Dst > -200$	6	10
Grupo 4	$-200 \geq Dst > -250$	3	5
Grupo 5	$-250 \geq Dst > -300$	2	3.3
Grupo 6	$-300 \geq Dst$	1	1.7
Total		60	100%

Tab. 4.3: Agrupación de las tormentas geomagnéticas seleccionadas para este estudio según el valor mínimo alcanzado por el índice Dst.

5. RESULTADOS

En este capítulo se reportan los resultados correspondientes a cada etapa en el análisis de datos. En particular se estudió la correlación entre la intensidad de las TGs con: (1) el campo eléctrico inducido, VB_s , acumulado durante el tiempo de interacción y (2) la razón de VB_s entre el tiempo de interacción. Como se describe más adelante, el campo eléctrico inducido resultó el mejor indicador de la intensidad de las TGs asociadas a la funda detrás de la onda de choque; mientras que este campo entre el tiempo de interacción es el indicador de mayor regularidad, ya que presentó índices de correlación similares para cualquiera que fue la sección asociada a la TG.

Algunos resultados son esperados o congruentes con estudios previos, como la alta correlación entre la intensidad de las TGs y el máximo valor del campo eléctrico inducido VB_s , mientras que en otros casos no presentan correlaciones con la intensidad de las TGs o la geoelectividad de las estructuras en el MIP.

5.1. *Condiciones previas de la magnetosfera.*

Para cada evento se obtuvo el valor promedio del índice D_{st} una hora antes del comienzo repentino, como una aproximación a las condiciones previas de la magnetosfera. Utilizando el mismo criterio de Gonzalez et al. [1994], se consideró una magnetosfera previamente perturbada cuando el D_{st} es menor a -20 nT. Según este criterio, una perturbación de menor magnitud, podría no estar asociada con eventos de gran escala en el MIP, además de que no tendría repercusiones serias en el clima espacial.

Se puede ver una tendencia a que las TGs de mayor intensidad se dan cuando la magnetosfera ha sido previamente perturbada. Los histogramas de la figura 5.1 muestran la frecuencia de eventos para cada caso. El valor promedio de la caída máxima

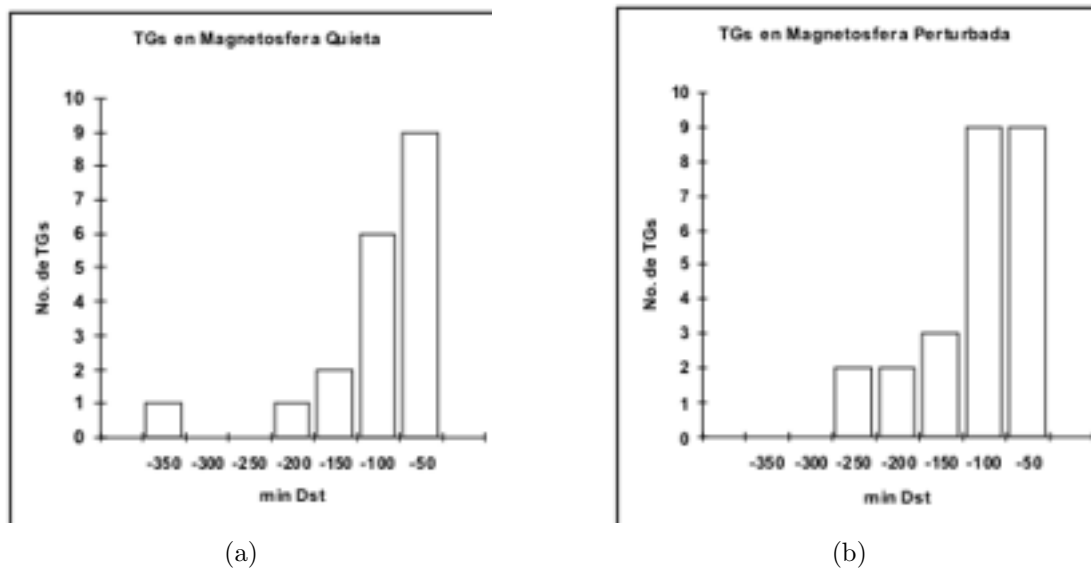


Fig. 5.1: Número de TGs que sucedieron bajo (a) una magnetosfera previa quieta, (b) una magnetosfera previamente perturbada

del índice D_{st} fué de $-114,3$ nT para las TGs que sucedieron bajo una magnetosfera quieta y de $-136,2$ nT para las TGs que sucedieron cuando la magnetosfera estaba previamente perturbada.

De las 22 tormentas moderadas, 13 fueron eventos con condiciones de magnetosfera quieta (59%) y 9 con condiciones de magnetosfera previamente perturbada (41%); mientras que de las 32 tormentas intensas, se obtuvo un 50% para cada caso. Esto muestra una ligera tendencia a que una magnetosfera previamente perturbada contribuya a que ocurran TGs de mayor intensidad, sin importar la sección geoelectiva que las esté causando.

5.2. Sección Geoelectiva

Cualitativamente nuestros resultados muestran a las EMCIs son la principal causa de las TGs moderadas (63%), seguidas de la sección de la funda (23%) y de la combinación de funda y EMCI (14%). Las TGs intensas son causadas principalmente por la combinación de funda más la EMCI (44%), seguidas de la sección de la funda (31%) y

de las EMCIs (25 %). Los resultados para cada sección geoefectiva, según los grupos de intensidad propuestos, se resumen en la tabla 5.1, donde se observa que la combinación de funda y EMCI está asociada a la mayor caída del índice D_{st} . Este resultado es congruente con los estudios previos mencionados, donde para todos ellos, es ésta la combinación de mayor geoefectividad.

El valor promedio del índice D_{st} , así como el de la TG más intensa asociada con diferentes secciones geoefectivas, se resumen en la tabla 5.2. La combinación de funda y EMCI aparece como la sección de mayor geoefectividad, causando la tormenta de mayor intensidad y con un promedio de caída en el D_{st} de al menos 33 nT más con respecto a las otras secciones. Es evidente que el D_{st} no tiene tiempo suficiente para recuperarse de la caída causada por la funda cuando el inicio de la EMCI también cuenta con una componente importante de campo magnético B_s , generando entonces una tormenta más intensa. Esto es similar a que una sección geoefectiva se encuentre con una magnetosfera previamente perturbada; es decir, cuando la sección delantera de la EMCI es geoefectiva, el resultado final se ve magnificado si la funda previa a la EMCI hubiese ocasionado previamente una caída en el D_{st} , y ya que la magnetosfera no tiene tiempo e recuperar su estado no perturbado.

Estos resultados son comparables al estudio de Huttunen et al. [2002]. En ambos estudios consideraron TGs asociadas a EMCIs y la similaridad en los porcentajes, indica que nuestra muestra, a pesar de tener un número menor de eventos, sigue siendo una muestra representativa de este tipo de tormentas. De igual forma, comparamos nuestro resultado con los de Wang et al. [2003] y Echer y Gonzalez [2004], corroborando que las TGs más intensas están asociadas a la combinación de funda y EMCI. Sin embargo, los porcentajes no pueden ser comparados ya que en los otros estudios también se consideran TGs que no están asociadas a EMCIs.

Sección geoefectiva	Tormentas Moderadas (nT)			Tormentas Intensas (nT)		
	$-50 \geq D_{st}$	$-100 \geq D_{st}$	$-150 \geq D_{st}$	$-200 \geq D_{st}$	$-250 \geq D_{st}$	$-300 \geq D_{st}$
Funda	5	6	3	0	1	0
EMCI	14	6	1	1	0	0
Funda + EMCI	3	8	2	2	1	1

Tab. 5.1: Principales estructuras geoefectivas en el MIP. La intensidad de las tormentas se encuentran separadas según los grupos propuestos en la sección de metodología.

Sección geoefectiva	Valor promedio D_{st} (nT)	TG más intensa D_{st} (nT)
Funda	-125.2	-288
EMCI	-97.6	-237
Funda + EMCI	-158.6	-387

Tab. 5.2: Valor promedio del mínimo alcanzado por el índice D_{st} para cada sección y la TG más intensa generada.

Debido a la forma en la que se seleccionaron los eventos, donde todas las TG están asociadas al paso de una EMCI, no existe en el conjunto de datos ninguna TG que fuera causada únicamente por una RCI o por el cruce de la HCH; sin embargo, dentro de las tormentas causadas por EMCI se identificaron algunos eventos que se combinaban con firmas de plasma en el MIP correspondientes a RCI o cruces de la HCH. Los resultados de este análisis se resumen en la tabla 5.3.

Se encontraron 12 eventos donde el cruce de la HCH coincide con la fase principal de la TG. EL incremento de densidad en la HCH permite que un mayor número de partículas contribuyan a intensificar la corriente del anillo; sin embargo, según los casos aquí estudiados, el cruce de la HCH no determina la intensidad de la TG, ya que está asociada tanto a tormentas moderadas como intensas.

Se encontraron casos de tormentas asociadas con la combinación de una RCI detrás de la EMCI. La geoefectividad de ésta última se debe a la corriente de viento solar rápido que comprime la parte trasera de la EMCI, intensificando su campo magnético. Mientras que estudios previos indican que las RCIs están asociadas principalmente a tormentas débiles y moderadas, en este análisis se observa que las TGs que son asociadas a la combinación de RCI y EMCIs son principalmente TGs intensas.

5.3. Intervalo de interacción

Para considerar el tiempo en el que una estructura en el MIP interacciona con la magnetosfera se consideraron dos intervalos de tiempo: el tiempo de interacción (TI) y el tiempo efectivo de interacción (TEI). En esta parte del trabajo se intentó establecer

Sección geoefectiva	Tormentas Moderadas	Tormentas Intensas
EMCI+ HCH	7	5
EMCI+ RCI	1	4

Tab. 5.3: Combinaciones geoefectivas de EMCIs con HCH y RCI asociadas a TGs moderadas e intensas.

una relación entre los intervalos TI, TEI y el cociente TEI/TI con la intensidad de la tormenta asociada.

La tabla 5.4 muestra que los valores promedio, tanto de TI como de TEI son mayores para las tormentas intensas que para las moderadas. Los valores mínimos de TI y TEI para una tormenta moderada son de 1.9 y 1.6 hrs respectivamente, mientras que para causar una tormenta intensa, los valores fueron 3.4 y 2.3 hrs. Si consideramos estos valores como cotas mínimas de tiempo de interacción para los eventos moderados e intensos, este resultado apunta que los eventos en el MIP de mayor escala temporal; es decir, los que tardan más tiempo en atravesar el entorno terrestre, causan TGs más intensas, aún sin considerar la magnitud de la componente B_s en el CMI.

Tipo de tormenta	promedio TI (hrs)	promedio TEI (hrs)	mínimo TI (hrs)	mínimo TEI (hrs)	TEI/TI
moderada	10.0	7.4	1.9	1.6	0.74
intensa	13.6	10.5	3.4	2.3	0.77

Tab. 5.4: Valores promedios y mínimos de TI y TEI para tormentas moderadas e intensas

5.4. Campo eléctrico inducido VB_s

Utilizando el intervalo de tiempo TEI se calculó para cada evento la componente $E_y = VB_s$ del campo eléctrico inducido o impuesto por el viento solar a la magnetosfera y que es el responsable de acelerar partículas en el anillo de corriente. Los valores

considerados fueron: (1) El máximo valor de VB_s alcanzado dentro del intervalo TEI, y (2) el valor acumulado de VB_s durante todo el intervalo TEI.

5.4.1. VB_s máximo

El valor máximo de VB_s en el TI es una de las principales correlaciones reportadas en estudios previos; sin embargo, en este estudio encontramos que las correlaciones varían dependiendo de la estructura en el MIP que causa la TG, como se reporta en la tabla 5.5. Con los resultados obtenidos es posible considerar al valor máximo de VB_s como un buen indicador de la intensidad de las TG causadas por EMCI y por la combinación de funda y la EMCI. De los resultados obtenidos es evidente que la intensidad de las TG cusadas por la funda detrás de la EMCI no está correlacionada con el máximo valor alcanzado de VB_s , y esto se debe a la que en la sección de la funda el CMI varía rápidamente, por lo que un valor alto del campo eléctrico inducido, VB_s , no se mantiene por mucho tiempo y por lo tanto no refleja el comportamiento general de la sección ni de su efecto geomagnético.

	Todos los eventos	TG causadas por fundas	TG causadas por EMCI	TG causadas por funda+EMCI
índice de correlación	-0.73	-0.26	-0.81	-0.89

Tab. 5.5: Índices de correlación entre el valor máximo de VB_s y el valor mínimo del índice D_{st} , para todos los eventos y para cada una de las causas en el MIP.

La gráfica 5.2 muestra la dispersión de todos los eventos al comparar el mínimo D_{st} alcanzado durante la tormenta con el máximo valor de VB_s en el TI. El índice de correlación es de $cc=-0.73$ y se observa que la dispersión de los datos es mayor conforme mayor es el valor máximo de VB_s . Aunque son pocos los eventos que rebasan los 15 mV/m, esto es un indicio de que la respuesta de la magnetosfera y en particular del anillo de corriente, no es lineal.

En las gráficas 5.3 a 5.5 se comparan los mismos valores, pero para cada grupo de causa en el MIP. Los mejores ajustes a una correlación lineal se observan para las TG causadas por EMCI y por la combinación de funda más la EMCI. A pesar de que son

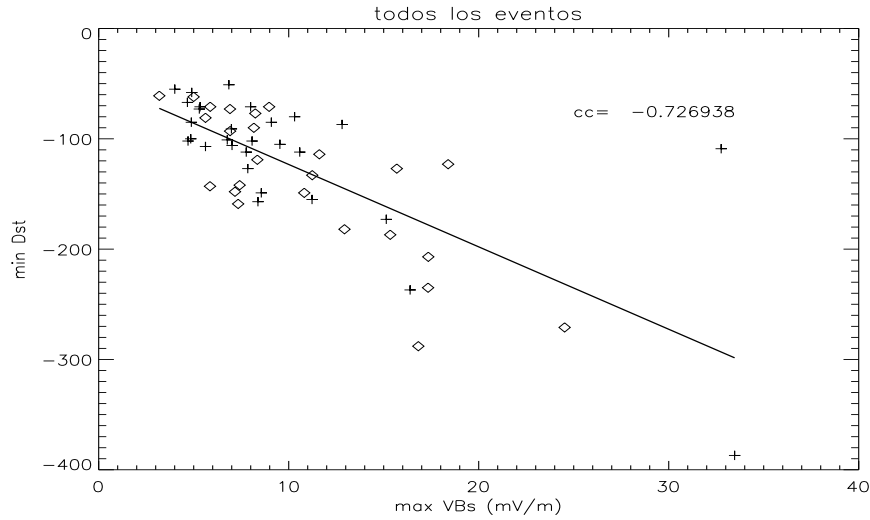


Fig. 5.2: VB_s max vs D_{st} todos los eventos para TGs en magnetosfera quieta (+), y para TGs en magnetosfera previamente perturbada (◇).

pocos eventos, sabemos de la comparación con los estudios anteriores, que la muestra de TGs es representativa del total de TGs intensas y de las causadas por EMCIs.

Para explicar porqué no observamos una buena correlación con las TGs causadas por fundas sería importante considerar las diferencias en el campo magnético de la funda y el campo magnético de la EMCI. El primero es un campo desordenado, con variaciones importantes en magnitud y dirección, mientras que el campo en la EMCI, es estable por periodos de tiempo más largos.

Este resultado, a excepción de la asociación con las fundas, es congruente con los obtenidos por Wang et al. [2003] y Srivastava y Venkatakrisnan [2004], en particular para las TGs asociadas a la sección principal de las EMCIs, reafirmando los parámetros en el MIP más relevantes para la generación de TGs, son la combinación de CMI y velocidad en el viento solar.

5.4.2. VB_s acumulado

Se encontró una alta correlación ($cc = -0,9$) entre la intensidad de la TG y el valor acumulado de VB_s cuando la TG es causada por la sección de la funda. Esta

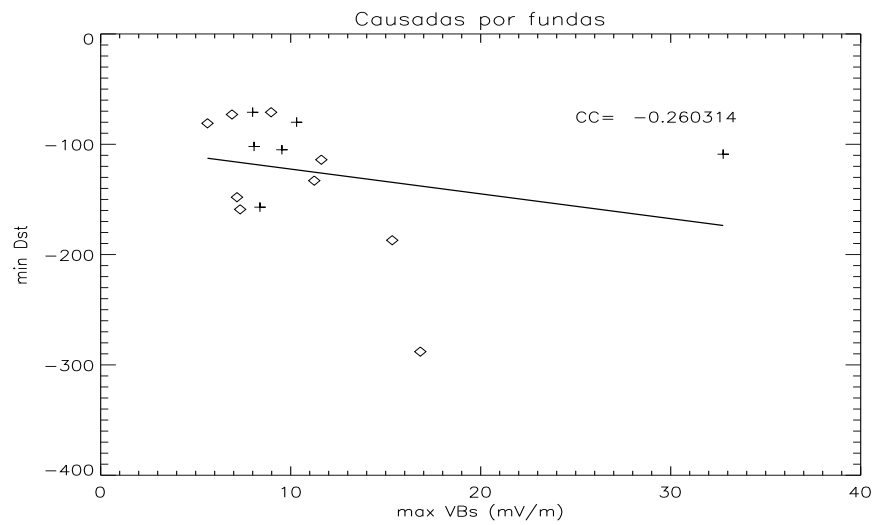


Fig. 5.3: VB_s max vs D_{st} causados por funda para TGs en magnetosfera quieta (+), y para TGs en magnetosfera previamente perturbada (◇).

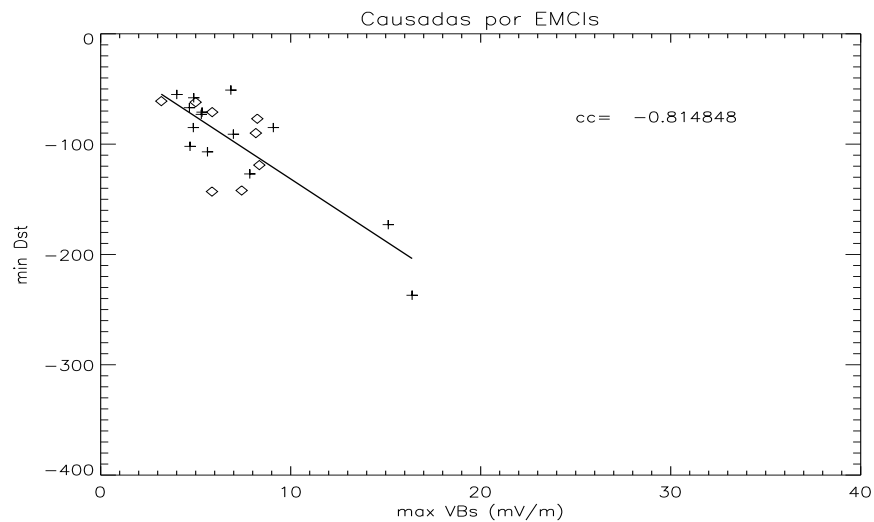


Fig. 5.4: VB_s max vs D_{st} causados por EMCIs para TGs en magnetosfera quieta (+), y para TGs en magnetosfera previamente perturbada (◇).

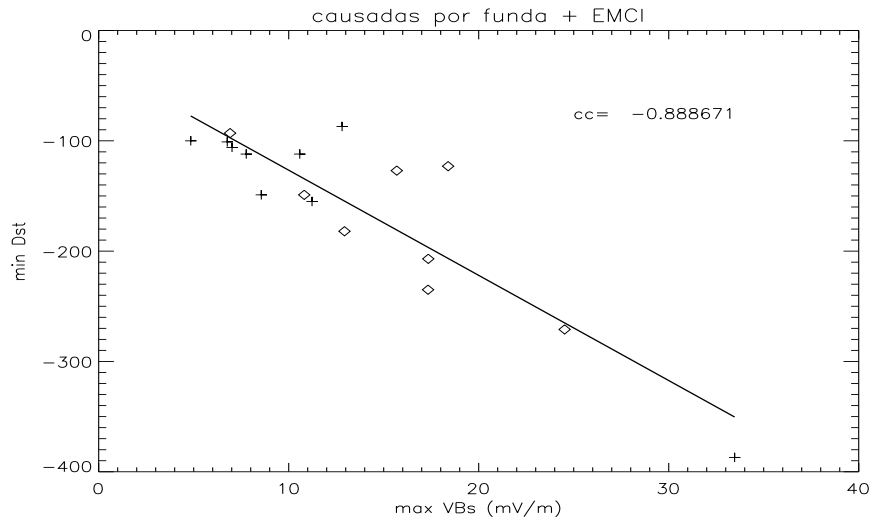


Fig. 5.5: VB_s max vs D_{st} causadas por fundas+EMCI para TGs en magnetosfera quieta (+), y para TGs en magnetosfera previamente perturbada (◇).

correlación es la más alta para las TGs causadas por esta sección. Como se reporta en la tabla 5.6, no existe una correlación aparente entre la intensidad de las TGs y el valor acumulado de VB_s cuando se considera otra sección como causa de la TG, por lo que se podría considerar a este parámetro como un indicador de la intensidad exclusivo de las TGs asociadas a ondas de choque en el MIP.

	Todos los eventos	TG causadas por fundas	TG causadas por EMCI	TG causadas por funda+EMCI
índice de correlación	-0.57	-0.90	-0.58	-0.35

Tab. 5.6: Índices de correlación entre el valor acumulado de VB_s durante el TE y el valor mínimo del índice D_{st} , para todos los eventos y para cada una de las causas en el MIP.

Análogamente al análisis anterior, las gráficas 5.6 a 5.9 muestran la dispersión de los eventos al comparar el mínimo D_{st} con el valor acumulado de VB_s durante el intervalo TEI. En la gráfica 5.6 de todos los eventos, nuevamente se ve una mayor dispersión para valores mayores del campo acumulado, reafirmando la idea de la respuesta no

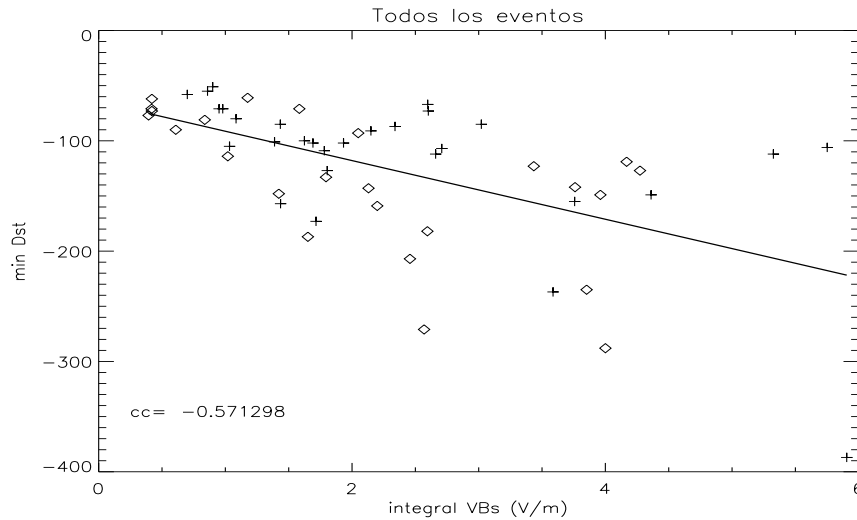


Fig. 5.6: Valor acumulado de VB_s vs D_{st} para todos los eventos. (+) TGs en magnetosfera quieta, (◇) TGs en magnetosfera previamente perturbada.

lineal de la magnetosfera. También es importante observar que, en general, los eventos que suceden bajo condiciones de magnetosfera previamente perturbada (marcados por un rombo), son los que se alejan más de la aproximación lineal.

En las gráficas 5.8 y 5.9 no se observa una buena correlación entre la intensidad de las TGs y el valor acumulado de VB_s . Con este resultado es posible considerar al valor acumulado de VB_s como un buen indicador solo para eventos de corta duración y alta velocidad, como lo es la funda cuando pasa por el entorno terrestre, comparado con el paso de la sección de la EMCI.

Con el fin de encontrar un parámetro en el MIP asociado a la intensidad de las TGs, que no dependiera de la sección asociada, se consideró la razón a la cual se inyecta energía al anillo de corriente, como la razón del valor acumulado de VB_s entre el TI. Las gráficas 5.10 a 5.13 muestran la dispersión de los eventos.

El índice de correlación para todos los eventos entre el índice D_{st} y el parámetro VB_s/TI (figura 5.10), es de $-0,73$. Nuevamente son los eventos que sucedieron bajo condiciones de magnetosfera previamente perturbada son los que, en general, se separan más de la aproximación lineal.

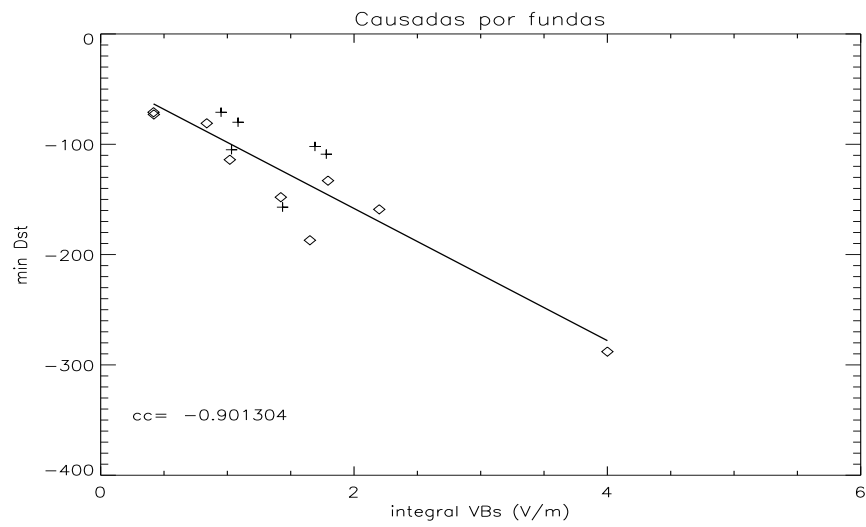


Fig. 5.7: Valor acumulado de VB_s vs D_{st} para TGs causadas por fundas (+) TGs en magnetosfera quieta, (◇) TGs en magnetosfera previamente perturbada.

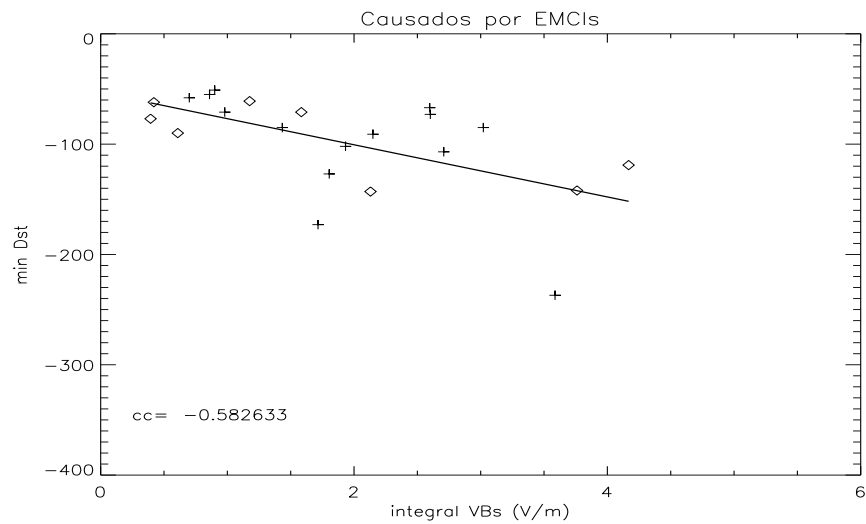


Fig. 5.8: Valor acumulado de VB_s vs D_{st} para TGs causadas por EMCIs (+) TGs en magnetosfera quieta, (◇) TGs en magnetosfera previamente perturbada.

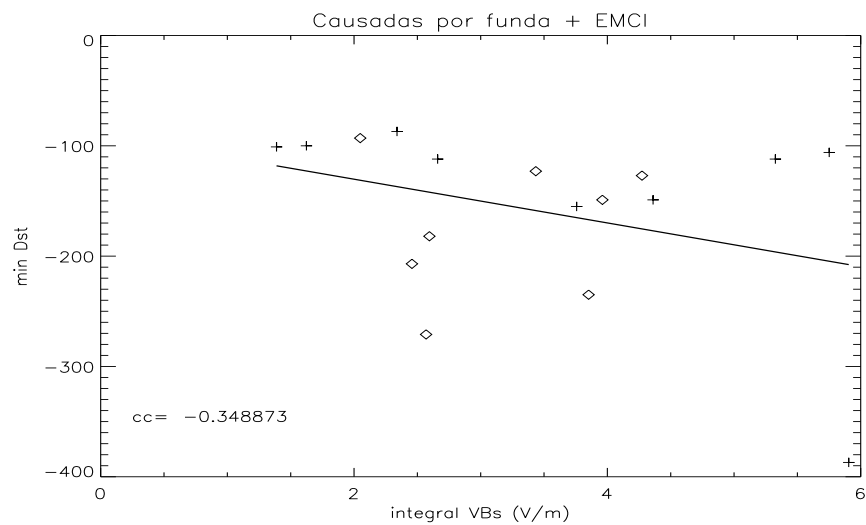


Fig. 5.9: Valor acumulado de VB_s vs D_{st} para TGs causadas por fundas y EMCI. (+) TGs en magnetosfera quieta, (◇) TGs en magnetosfera previamente perturbada.

Al comparar los índices de correlación obtenidos para las distintas secciones geoeffectivas en el MIP y hacer una comparación cualitativa en la dispersión de los eventos de las gráficas 5.11, 5.12 y 5.13, que se refieren a las distintas secciones causantes de las TGs, podemos decir que la respuesta final de la magnetosfera, depende no sólo de la inyección de energía, sino también de la velocidad a la cuál el viento solar le transfiere ésta energía.

Sin ser la correlación más alta de este estudio, es importante resaltar que los índices de correlación entre la intensidad de las TGs y su causa son comparables para las distintas secciones (los valores de los índices se reportan en la tabla 5.7). Esto hace entonces a VB_s/TI el parámetro más general indicador de la intensidad de las TGs asociadas a EMCIs y su onda de choque impulsada, independientemente de la sección involucrada.

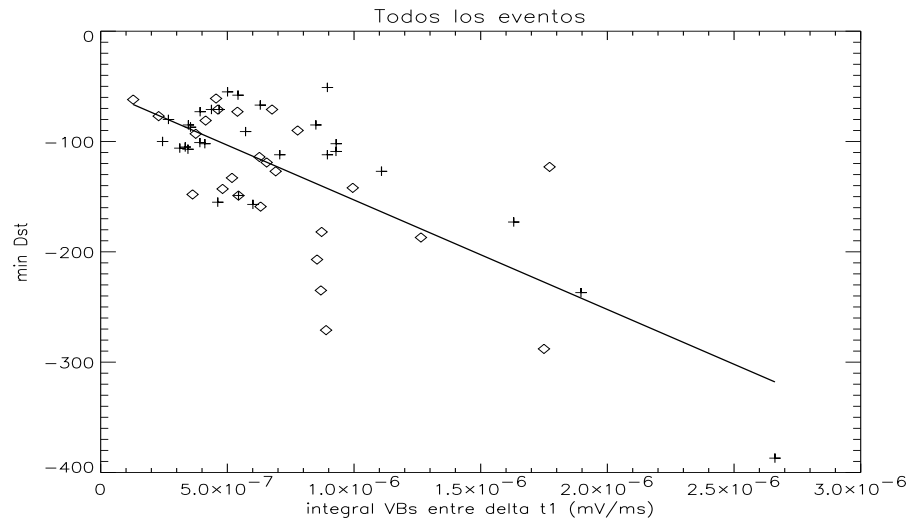


Fig. 5.10: Razón de inyección de energía al anillo de corriente (VB_s/TI) vs D_{st} para todos los eventos.

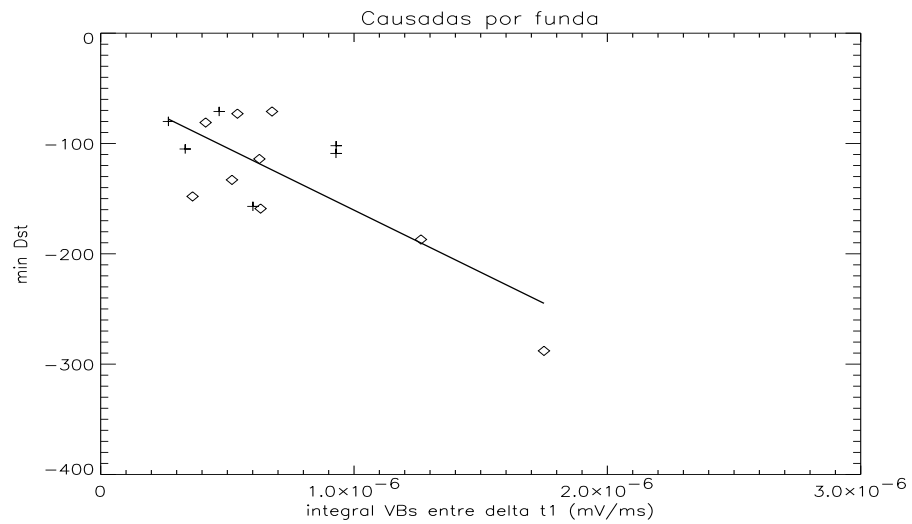


Fig. 5.11: Razón de inyección de energía al anillo de corriente (VB_s/TI) vs D_{st} para TGs causados por fundas.

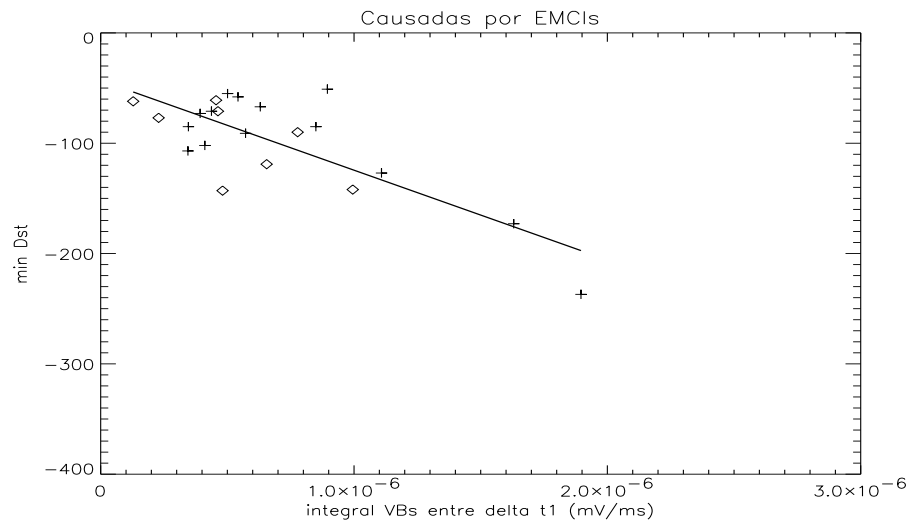


Fig. 5.12: Razón de inyección de energía al anillo de corriente (VB_s/TI) vs D_{st} para TGs causadas por EMCI.

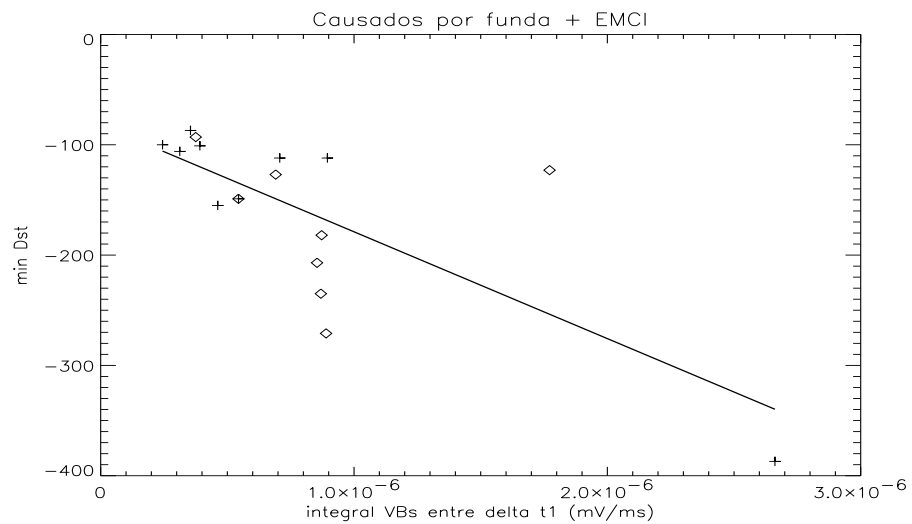


Fig. 5.13: Razón de inyección de energía al anillo de corriente (VB_s/TI) vs D_{st} para TGs causadas por fundas y EMCI.

	Todos los eventos	TG causadas por fundas	TG causadas por EMCI	TG causadas por funda+EMCI
índice de correlación	-0.73	-0.77	-0.78	-0.74

Tab. 5.7: Índices de correlación entre el valor acumulado de VB_s entre el TI y el valor mínimo del índice D_{st} , para todos los eventos y para cada una de las causas en el MIP.

5.5. Valores mínimos en los parámetros de plasma y campo magnético en el MIP para tormentas moderadas e intensas

Finalmente establecimos cotas mínimas de la magnitud de los parámetros de plasma y campo magnético en el MIP capaces de generar TGs moderadas e intensas, según el subconjunto estudiado. Se tomaron como cotas inferiores los valores mínimos de los parámetros mejor correlacionados con la intensidad de una TG, estos son: B_s promedio, TEI , VB_s máximo y VB_s acumulado.

De acuerdo con los resultados obtenidos y acorde con los estudios previos, una TG intensa requiere de mayor tiempo de interacción entre el viento solar y la magnetosfera que una TG moderada, así como una mayor inyección de energía a través del campo eléctrico convectivo VB_s . Sin embargo, el valor máximo de la componente B_s en el viento solar puede ser menor para TGs intensas que para TGs moderadas, si es que la presión dinámica del viento solar (ρv^2) y el tiempo de interacción es alto. La tabla 5.8 muestra las cotas mínimas obtenidas, según los eventos analizados este estudio.

Valor mínimo de	TG moderadas	TG intensas
B_s (nT)	5.0	2.0
TEI (hrs)	1.6	2.3
VB_s máximo (mV/m)	3.2	4.7
VB_s acumulado (mV/m)	393.7	1019.6

Tab. 5.8: Valores mínimos de B_s , tiempo efectivo de interacción y campo eléctrico inducido VB_s capaces de generar al menos una TG, según los eventos de este estudio.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó la relación entre la intensidad de 54 TGs ocurridas entre 1998 y 2002, y los parámetros del plasma y CMI en el viento solar con el fin de encontrar las secciones geoeffectivas en el MIP. La intensidad de las TGs se obtuvo a través de los valores del índice D_{st} reportado por el *World Data Center for Geomagnetism*, mientras que los parámetros de plasma y CMI en el viento solar se obtuvieron de la base de datos de la misión espacial *ACE*.

Los principales objetivos para este trabajo consistieron en calificar la geoeffectividad de las secciones asociadas al paso de una EMCI a 1 UA; así como las correlaciones más relevantes entre la intensidad de las TGs y algunos parámetros de plasma y campo magnético en el MIP.

La muestra de este estudio corresponde a TGs asociadas al paso de una EMCI observadas a 1 UA y representan un 28.12% del total de TG reportadas por el *Centro Mundial de Datos para Geomagnetismo en Kyoto*. El porcentaje es comparable al encontrado en otros estudios de TGs asociadas a EMCI [p.e. Yermolaev y Yermolaev, 2002], por lo que consideramos se trata de una muestra representativa de este tipo de TGs.

Del estudio evento por evento, concluimos que:

- Aproximando las condiciones previas de la magnetósfera por el índice D_{st} promedio una hora antes de la llegada de una estructura geoeffectiva a la Tierra, se encontró que hay una tendencia a que sucedan tormentas intensas bajo condiciones perturbadas (índice D_{st} previo mayor a -20 nT) y moderadas bajo condiciones no perturbadas (índice D_{st} previo mayor a -20 nT).
- Se consideraron dos distintas secciones en la estructura de gran escala asociada a la EMCI como precursoras de TGs, la funda detrás de la onda de choque y le

EMCI en sí. Bajo esta clasificación concluimos que, para el conjunto de TGs de este estudio:

La sección en la estructura de gran escala en el MIP de mayor geoefectividad es la combinación de la funda más la EMCI, que causaron un 43.7% de las tormentas intensas, con un promedio en la caída mínima de índice D_{st} de $-158,6$ nTS.

Las EMCIs son la principal causa de las tormentas moderadas (63.6%) con un promedio de mínimo D_{st} de $-97,6$ nT. La combinación de la funda más la EMCI, y la sola sección fundas detrás de la onda de choque causan principalmente tormentas intensas con un promedio de mínimo valor alcanzado D_{st} de $-158,6$ nT y $-125,2$ nT respectivamente.

- De los resultados anteriores se confirma en este conjunto de estudio, a la combinación de la funda más la EMCI como la sección de mayor geoefectividad, causando el mayor número de TGs intensas.

De las correlaciones más relevantes entre los parámetros de plasma y CMI y magnitudes derivadas concluimos:

- Las más altas correlaciones entre los parámetros de plasma y CMI con la intensidad de la TG se obtuvieron con los valores del campo eléctrico inducido VB_s que se superpone a la magnetosfera.
- El máximo valor de VB_s tiene coeficientes de correlación de $cc=-0.81$ y $cc=-0.89$ con el mínimo valor del índice D_{st} para TG causadas por EMCI y para las causadas por la combinación de funda y EMCI respectivamente.

Estos índices son menores al encontrado por Wang et al. [2003] ($cc=0.95$), e inclusive los eventos asociados a la funda detrás del choque no presentaron ninguna correlación aparente con este parámetro. Consideramos que la diferencia principal radica en que en el estudio de Wang et al. [2003] no se hizo diferencia entre las diferentes secciones que causan las TGs, y aparentemente sólo consideraron las TGs causadas por EMCIs, lo que disminuye la dispersión en sus datos.

- En su lugar, las TGs causadas por fundas presentan una mejor correlación ($cc=-0.9$) entre el valor acumulado de VB_s durante el tiempo de interacción con el mínimo alcanzado por el índice D_{st} .

En nuestro conocimiento, esta correlación no ha sido reportada previamente y debido a que no se presenta con las TGs causadas por EMCIs, consideramos a

este parámetro como un indicador de la intensidad exclusivo de las TGs asociadas a ondas de choque en el MIP.

- La razón a la cual se inyecta energía al interior de la magnetosfera aproximada por el campo eléctrico inducido VB_s entre el tiempo de interacción (VB_s/TI) tiene la mejor correlación con la intensidad de las TGs cuando no se hace distinción entre la sección asociada.

Para las TG causadas por la funda detrás del choque se tiene un coeficiente de correlación de -0.77, para las causadas por EMCI es de -0.78, y para las causadas por la combinación de éstas dos es de -0.74.

Aunque estos índices de correlación son menores que los anteriores encontrados, resulta ser este parámetro el de mayor regularidad al ser similar entre las distintas causas. Igualmente, no se encontró un antecedente comparable a este análisis.

Finalmente, la combinación de cotas mínimas en los valores de plasma y CMI que provocaron las TG. Para los eventos aquí estudiados, se cumple al menos una de las siguientes opciones:

- Para generar al menos una tormenta moderada:
 1. CMI B_s de al menos 5 nT por un intervalo de TEI de 1.6 hrs.
 2. Un valor máximo de VB_s de al menos 3.2 mV/m dentro del intervalo de TEI.
 3. Un valor acumulado de VB_s de al menos 393.7 mV/m durante del intervalo de TEI.
- Para generar una tormenta intensa:
 1. CMI B_s de al menos 2 nT por un intervalo de TEI de 3.4 hrs.
 2. Un valor máximo de VB_s de al menos 4.7 mV/m dentro del intervalo de TEI.
 3. Un valor acumulado de VB_s de al menos 1019.6 mV/m durante del intervalo de TEI.

Los valores de TEI y valor máximo de VB_s son comparables a los obtenidos por Wang et al. [2003]. Los valores de VB_s acumulado no han sido reportados previamente, pero son esperados ya que indican una mayor inyección de energía para TGs más intensas.

6.1. Trabajo a Futuro

Uno de los resultados más relevantes, ya que no se han presentado en estudios previos, es la alta correlación entre el valor acumulado del campo eléctrico inducido durante el tiempo de interacción y la intensidad de las TGs, cuando se asocian a la sección de la funda detrás de la onda de choque. Por lo que proponemos como trabajo a futuro realizar éste mismo análisis con respecto a las TGs asociadas al paso de cualquier onda de choque en el MIP, aunque ésta no sea seguida de las firmas típicas de una EMCI.

En lo que podría ser un resultado importante para la predicción del clima espacial, proponemos también realizar el análisis de la razón de inyección de energía a la magnetosfera VB_s/TI con respecto a TGs asociadas a cualquier estructura de gran escala, de forma que se pueda dar un indicador de la intensidad de las TGs congruente con cualquiera que sea la perturbación en el viento solar.

Finalmente, para verificar la regularidad de estas relaciones, se propone realizar un análisis similar al presentado en esta tesis para TGs sucedidas en la fase descendente del ciclo solar.

BIBLIOGRAFÍA

- «The Pioneer Mission to Jupiter. NASA-268». *NASA Special Publication*, 1971, **268**.
- ALVES, M. V.; ECHER, E. y GONZALEZ, W. D.: «Geoeffectiveness of corotating interaction regions as measured by Dst index». *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 2006, **111**, p. 7.
- AXFORD, W. I.: «The Interaction between the Solar Wind and the Earth's Magnetosphere». *Journal of Geophysical Research*, 1962, **67**, pp. 3791–+.
- BAME, S. J.; MCCOMAS, D. J.; BARRACLOUGH, B. L.; PHILLIPS, J. L.; SOFALY, K. J.; CHAVEZ, J. C.; GOLDSTEIN, B. E. y SAKURAI, R. K.: «The ULYSSES solar wind plasma experiment». *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1992, **92**, pp. 237–265.
- BIRN, J.; DRAKE, J. F.; SHAY, M. A.; ROGERS, B.Ñ.; DENTON, R. E.; HESSE, M.; KUZNETSOVA, M.; MA, Z. W.; BHATTACHARJEE, A.; OTTO, A. y PRITCHETT, P. L.: «Geospace Environmental Modeling (GEM) magnetic reconnection challenge». *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**, pp. 3715–3720.
- BRUECKNER, G. E.; HOWARD, R. A.; KOOMEN, M. J.; KORENDYKE, C. M.; MICHELS, D. J.; MOSES, J. D.; SOCKER, D. G.; DERE, K. P.; LAMY, P. L.; LLEBARIA, A.; BOUT, M. V.; SCHWENN, R.; SIMNETT, G. M.; BEDFORD, D. K. y EYLES, C. J.: «The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO)». *Solar Physics*, 1995, **162**, pp. 357–402.
- BRUNO, R. y VICENZO, C.: «The Solar Wind as a Turbulence Laboratory». *Living Rev. Solar Phys.*, 2005, **2**.
- BURLAGA, L.; SITTLER, E.; MARIANI, F. y SCHWENN, R.: «Magnetic loop behind an interplanetary shock - Voyager, Helios, and IMP 8 observations». *Journal of Geophysical Research*, 1981, **86**, pp. 6673–6684.

- BURLAGA, L. F. y LEPPING, R. P.: «The causes of recurrent geomagnetic storms». *Planetary and Space Science*, 1977, **25**, pp. 1151–1160. doi: 10.1016/0032-0633(77)90090-3.
- BURTON, R. K.; MCPHERRON, R. L. y RUSSELL, C. T.: «An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst». *Journal of Geophysical Research*, 1975, **80**, pp. 4204–4214.
- CANE, H. V. y RICHARDSON, I. G.: «Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996-2002». *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 2003, **108**, pp. 6–1.
- CHAPMAN, S. y BARTELS, J.: *Geomagnetism*. Oxford University Press, New York, 1940.
- CHIU, M. C.; VON-MEHLEM, U. I.; WILLEY, C. E.; BETENBAUGH, T. M.; MAYNARD, J. J.; KREIN, J. A.; CONDE, R. F.; GRAY, W. T.; HUNT, J. W., JR.; MOSHER, L. E.; MCCULLOUGH, M. G.; PANNETON, P. E.; STAIGER, J. P. y RODBERG, E. H.: «ACE Spacecraft». *Space Science Reviews*, 1998, **86**, pp. 257–284.
- CID, C.; HIDALGO, M. A.; SAIZ, E.; CERRATO, Y. y SEQUEIROS, J.: «Sources of intense geomagnetic storms over the rise of solar cycle 23». *Solar Physics*, 2004, **223**, pp. 231–243. doi: 10.1007/s11207-004-1243-3.
- CROOKER, N. U. y CLIVER, E. W.: «Postmodern view of M-regions». *Journal of Geophysical Research*, 1994, **99**, pp. 23383–+.
- DAL LAGO, A.; VIEIRA, L. E. A.; ECHER, E.; GONZALEZ, W. D.; DE GONZALEZ, A. L. C.; GUARNIERI, F. L.; BALMACEDA, L.; SANTOS, J.; DA SILVA, M. R.; DE LUCAS, A. y SCHUCH, N. J.: «Great Geomagnetic Storms in the Rise and Maximum of Solar Cycle 23». *Brazilian Journal of Physics*, 2004, **34**, no. **4B**, pp. 1542–1546.
- DOMINGO, V.; FLECK, B. y POLAND, A. I.: «The SOHO Mission: an Overview». *Solar Physics*, 1995, **162**, pp. 1–37.
- DUNGEY, J. W.: «Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zone». *Physical Review Letters*, 1961, **6**, pp. 47–48.
- DURNEY, A. C. y OGILVIE, K. W.: «Introduction to the ISEE Mission (Article published in the special issues: Advances in Magnetospheric Physics with GEOS- 1 and ISEE - 1 and 2.)». *Space Science Reviews*, 1978, **22**, pp. 679–+.

- ECHER, E. y GONZALEZ, W. D.: «Geoeffectiveness of interplanetary shocks, magnetic clouds, sector boundary crossings and their combined occurrence». *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**, p. 9808.
- FISK, L. A. y LEE, M. A.: «Shock acceleration of energetic particles in corotating interaction regions in the solar wind». *The Astrophysical Journal*, 1980, **237**, pp. 620–626. doi: 10.1086/157907.
- GONZALEZ, W. D.; GONZALEZ, A. L. C.; TSURUTANI, B. T.; SMITH, E. J. y TANG, F.: «Solar wind-magnetosphere coupling during intense magnetic storms (1978-1979)». *Journal of Geophysical Research*, 1989, **94**, pp. 8835–8851.
- GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T. y VASYLIUNAS, V. M.: «What is a geomagnetic storm?» *Journal of Geophysical Research*, 1994, **99**, pp. 5771–5792.
- GOPALSWAMY, N.; LARA, A. y KAISER, M. L.: «An Empirical Model to Predict the Arrival of CMEs at 1 AU». *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2000, **32**, pp. 825–+.
- GOSLING, J. T.; MCCOMAS, D. J.; PHILLIPS, J. L. y BAME, S. J.: «Geomagnetic activity associated with earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections». *Journal of Geophysical Research*, 1991, **96**, pp. 7831–7839.
- HEPPNER, J. P.; NESS, N. F.; SCEARCE, C. S. y SKILLMAN, T. L.: «Explorer 10». *Journal of Geophysical Research*, 1963, **68**, pp. 1–+.
- HEWISH, A. y BRAVO, S.: «The sources of large-scale heliospheric disturbances». *Solar Physics*, 1986, **106**, pp. 185–200.
- HUNDHAUSEN, A. J.: «The Origin and Propagation of Coronal Mass Ejections (R)». En: V. J. Pizzo; T. Holzer y D. G. Sime (Eds.), *Sixth International Solar Wind Conference*, p. 181, 1987.
- : «The Solar Wind». En: M. G. Kivelson y C. T. Russell (Eds.), *Introduction to Space Plasma Physics*, Cambridge, 1995.
- HUTTUNEN, K. E. J.; KOSKINEN, H. E. J. y SCHWENN, R.: «Variability of magnetospheric storms driven by different solar wind perturbations». *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 2002, **107**, pp. 20–1.

- ISRAELEVICH, P. L.; GOMBOSI, T. I.; ERSHKOVICH, A. I.; HANSEN, K. C.; GROTH, C. P. T.; DEZEEUW, D. L. y POWELL, K. G.: «MHD simulation of the three-dimensional structure of the heliospheric current sheet». *Astronomy and Astrophysics*, 2001, **376**, pp. 288–291.
- KARINEN, A. y MURSULA, K.: «A new reconstruction of the Dst index for 1932–2002». *Annales Geophysicae*, 2005, **23**, pp. 475–485.
- KLEIN, L. W. y BURLAGA, L. F.: «Interplanetary magnetic clouds at 1 AU». *Journal of Geophysical Research*, 1982, **87**, pp. 613–624.
- LANZEROTTI, L. J.: «Space Weather Effects on Technologies». En: P. Song; H. Singer y G. Siscoe (Eds.), *AGU Monograph, 125, Space Weather*, , 2001.
- NEUGEBAUER, M. y GOLDSTEIN, R.: «Particle and Field Signatures of Coronal Mass Ejections in the Solar Wind». En: N. Crooker; J. A. Joselyn y J. Feynman (Eds.), *AGU Geophysics Monograph 99, Coronal Mass Ejections*, AGU, Washington, D.C., 1997.
- NEUGEBAUER, M. y SNYDER, C. W.: «Solar Plasma Experiment». *Science*, 1962, **138**, pp. 1095–1097.
- PARKER, E.Ñ.: «Suprathermal Particle Generation in the Solar Corona.» *The Astrophysical Journal*, 1958, **128**, pp. 677–+.
- : *Interplanetary dynamical processes*. New York, Interscience Publishers, 1963., 1963.
- PARKINSON, W. D.: *Introduction to Geomagnetism*. Elsevier Science Plublisher Co., EU, 1983.
- PETSCHEK, H. E.: «Magnetic Field Annihilation». En: W.Ñ. Hess (Ed.), *The Physics of Solar Flares*, pp. 425–+, 1964.
- ROSENBAUER, H.; MIGGENRIEDER, H.; MONTGOMERY, M. y SCHWENN, R.: «Preliminary results of the HELIOS plasma measurements». En: D. J. Williams (Ed.), *Physics of Solar Planetary Environments*, pp. 319–331, 1976.
- RUSSELL, C. T. y ELPHC, R. C.: «Initial ISEE magnetometer results - Magnetopause observations». *Space Science Reviews*, 1978, **22**, pp. 681–715.

- RUSSELL, C. T. y LUHMAN, J. G.: «Earth: Magnetic Field and Magnetosphere». En: J. H. Shirley y R. W. Fainbrdge (Eds.), *Encyclopedia of Planetary Sciences*, Chapman and Hall, New York, 1997.
- RUSSELL, C. T.; MCPHERRON, R. L. y BURTON, R. K.: «On the Cause of Geomagnetic Storms». *Journal of Geophysical Research*, 1974, **79**(7), pp. 1109–1974.
- RUSSELL, C. T. y SHINDE, A. A.: «ICME Identification from Solar Wind Ion Measurements». *Solar Physics*, 2003, **216**, pp. 285–294.
- SCHWENN, R.: *Physics of the Inner Heliosphere II*. Springer/Verlag, Germany, 1991.
- SMITH, E. J.; TSURUTANI, B. T. y ROSENBERG, R. L.: «Observations of the interplanetary sector structure up to heliographic latitudes of 16 deg - Pioneer 11». *Journal of Geophysical Research*, 1978, **83**, pp. 717–724.
- SPREITER, J. R.; SUMMERS, A. L. y ALKSNE, A. Y.: «Hydromagnetic flow around the magnetosphere». *Planetary and Space Science*, 1966, **14**, pp. 223–+.
- SRIVASTAVA, N. y VENKATAKRISHNAN, P.: «Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms during 1996-2002». *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 2004, **109**, p. 10103. doi: 10.1029/2003JA010175.
- STONE, E. C.: «The Voyager Missions to the Outer System». *Space Science Reviews*, 1977, **21**, pp. 75–+.
- TSURUTANI, B. T.; SMITH, E. J.; GONZALEZ, W. D.; TANG, F. y AKASOFU, S. I.: «Origin of interplanetary southward magnetic fields responsible for major magnetic storms near solar maximum (1978-1979)». *Journal of Geophysical Research*, 1988, **93**, pp. 8519–8531.
- TWITTY, C.; PHAN, T. D.; PASCHMANN, G.; LAVRAUD, B.; RÈME, H. y DUNLOP, M.: «Cluster survey of cusp reconnection and its IMF dependence». *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**, p. 19808.
- VIEIRA, L. E. A.; GONZALEZ, W. D.; ECHER, E. y TSURUTANI, B. T.: «Storm-intensity criteria for several classes of the driving interplanetary structures». *Solar Physics*, 2004, **223**, pp. 245–258. doi: 10.1007/s11207-004-1163-2.
- VOURLIDAS, A.; BUZASI, D.; HOWARD, R. A. y ESFANDIARI, E.: «Mass and energy properties of LASCO CMEs». En: *ESA SP-506: Solar Variability: From Core to Outer Frontiers*, pp. 91–94, 2002.

- WANG, Y.; SHEN, C. L.; WANG, S. y YE, P. Z.: «An empirical formula relating the geomagnetic storm's intensity to the interplanetary parameters: $-VB_z$ and Δt ». *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**, pp. 2–1.
- WU, C.-C. y LEPPING, R. P.: «Effect of solar wind velocity on magnetic cloud-associated magnetic storm intensity». *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 2002, **107**, pp. 3–1. doi: 10.1029/2002JA009396.
- YASHIRO, S.; GOPALSWAMY, N.; MICHALEK, G.; ST. CYR, O. C.; PLUNKETT, S. P.; RICH, N. B. y HOWARD, R. A.: «A catalog of white light coronal mass ejections observed by the SOHO spacecraft». *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 2004, **109**, p. 7105.
- YERMOLAEV, Y. I. y YERMOLAEV, M. Y.: «Statistical relations between solar, interplanetary and geomagnetic disturbances during 2.3 solar cycles (1976-2000)». En: H. Sawaya-Lacoste (Ed.), *ESA SP-477: Solspa 2001, Proceedings of the Second Solar Cycle and Space Weather Euroconference*, pp. 579–582, 2002.