

LAS CAUSAS SOLARES DE LAS TORMENTAS GEOMAGNETICAS

S. Bravo y A. L. Rivera

Departamento de Física Espacial

Instituto de Geofísica, UNAM

Coyoacán D.F., 04510

México, D. F.

RESUMEN

Es bien sabido que las tormentas geomagnéticas son causadas por perturbaciones que viajan en el medio interplanetario provenientes del Sol, comunmente en la forma de choques seguidos de plasma que contienen un campo magnético con B_z sur de gran intensidad y de larga duración (B^*). Sin embargo, no está claro aún cuáles, de entre todos los eventos solares, son los responsables de estas perturbaciones. En este trabajo se analiza un grupo de 10 tormentas geomagnéticas intensas que ocurrieron entre agosto de 1978 y septiembre de 1979, considerando las perturbaciones interplanetarias que las produjeron y la fuente solar de estas perturbaciones rastreada por medio de centelleo interplanetario. Consideramos que las observaciones son consistentes con la imagen de que el choque y el material con B^* no son parte de la misma estructura y de que tiene un origen diferente en el Sol: el choque es producido por un cambio repentino en la base de un hoyo coronal y el plasma es el resultado de la expulsión simultánea de material de una región cerrada que estalló en las cercanías de hoyo, de acuerdo con Bravo y Lanzagorta (1992). Observamos que para los casos estudiados, que corresponden a plasma con B^* , el material eyectado está asociado con más frecuencia a una protuberancia eruptiva; solo en un caso hubo una ráfaga asociada. La conclusión que obtenemos es que la causa solar de las tormentas geomagnéticas intensas es el estallido de una protuberancia (o en algunos casos de una ráfaga) cerca de un hoyo coronal, que expulsa al espacio interplanetario material con B^* . Se discute también la posibilidad

de pronosticar tormentas geomagnéticas mediante observaciones de centelleo interplanetario.

INTRODUCCION

Desde el siglo pasado se reconoció ya una relación entre ciertas manifestaciones de la actividad solar (específicamente las ráfagas solares) y las perturbaciones del campo magnético en la Tierra. Al descubrirse el viento solar y las ondas de choque que viajan en él a muy altas velocidades, se asociaron, de manera natural, las perturbaciones geomagnéticas con el arribo a la magnetosfera de choques interplanetarios de gran intensidad (e.g. Hundhausen, 1972). De esta manera, la relación entre la actividad solar y las perturbaciones geomagnéticas se enfocó a la determinación del origen en el sol de los choques que viajan en el medio interplanetario. Sin embargo, la asociación originalmente natural entre choques interplanetarios y ráfagas solares resultó no ser satisfactoria, pues es común observar choques sin que haya habido ráfagas y es común también que muchas ráfagas, incluyendo algunas muy intensas, no estén asociadas con perturbaciones importantes en el medio interplanetario. Las agrupaciones repentinas de protuberancias solares también se han sugerido como fuentes de los choques interplanetarios y de las perturbaciones geomagnéticas (Joselyn y McIntosh, 1981; Wright y McNamara, 1983), pero, igualmente se observan choques interplanetarios sin que hayan ocurrido erupciones de protuberancias (ni ráfagas) y muchas protuberancias eruptivas no tienen efectos interplanetarios.

Las corrientes de viento solar de alta velocidad se han identificado sin duda alguna como fuentes de perturbaciones geomagnéticas (Snyder y Neugebauer, 1966). Estas corrientes, que provienen

de hoyos coronales (Krieger et al., 1973), pueden regresar durante varias rotaciones solares y provocar perturbaciones geomagnéticas recurrentes aproximadamente cada 27 días. Sin embargo, las tormentas geomagnéticas más intensas parecen estar asociadas a eventos explosivos en el Sol que producen ondas de choque que viajan radialmente del sol hacia la Tierra en unos cuantos días. Este tipo de ondas de choque también han sido asociadas a los hoyos coronales por Hewish y Bravo (1986), quienes hicieron un rastreo de más de cien perturbaciones de gran escala en el viento solar durante un año mediante técnicas de centelleo interplanetario (IPS). En ese estudio encontraron siempre un hoyo coronal en la región solar fuente de la perturbación interplanetaria y propusieron un cambio repentino en la velocidad del viento solar emitido por el hoyo como la causa de la formación del choque interplanetario (ver también Bravo et al. 1991 a,b).

Pero la asociación entre perturbaciones geomagnéticas y choques interplanetarios tampoco es clara. No todos los choques son efectivos en producir una tormenta geomagnética y se ha demostrado que éstas solo ocurren cuando tiene lugar un acoplamiento entre el campo magnético interplanetario (IMF), transportado por el viento solar, y el campo magnetosférico, como propuso originalmente Dungey (1961). Para esto es necesario que el IMF tenga una componente Bz orientada hacia el sur respecto al plano del ecuador geomagnético. La importancia de esta componente sur en el desarrollo de la fase principal de una tormenta geomagnética ha sido puesta en evidencia por Rostoker y Falthamar (1967) y Burton et al. (1975), entre otros, y actualmente no existe ninguna duda del papel principal que esta componente juega en la determinación de la intensidad de la tormenta. Recientemente, González y Tsurutani (1987) analizaron en detalle las diez tormentas geomagnéticas más intensas (para las cuales el valor pico de Dst fue menor o igual que -100 nT) que ocurrieron durante el periodo de agosto de 1978 a diciembre de 1979 que correspondió a la fase ascendente del ciclo solar 21. Su interés fue relacionar las características de las tormentas con las características del viento solar y encontraron una relación de uno a uno entre estos eventos y la presencia de una componente Bz sur en el viento

solar de gran magnitud (> 10 nT) y por un periodo de más de 3 horas; en lo sucesivo llamaremos Bz* a un campo interplanetario con estas características.

Encontraron un coeficiente de correlación de 0.75 entre el valor del flujo de esta Bz* integrado a todo el periodo de su duración y los valores pico del índice Dst. Sin embargo, también encontraron que, aunque en nueve de los diez casos el plasma con Bx* estuvo precedido por una onda de choque, la intensidad del choque (medida por su número de Mach) no estaba correlacionada en absoluto con la intensidad de la tormenta, medida por el valor pico de Dst. Así pues, aunque las tormentas geomagnéticas se pueden asociar a la llegada de los choques interplanetarios, el papel de éstos en la tormenta no es claro y más bien se ha tratado de encontrar el papel que juega el choque en la producción de la Bz* que a veces lo sigue y que es la que sí tiene relación directa con la tormenta. En este trabajo volvemos a analizar esos mismos diez casos, pero añadiendo información sobre las fuentes solares de las perturbaciones que los produjeron, obtenida a partir de las observaciones de IPS realizadas durante ese periodo.

LOS EVENTOS ANALIZADOS

En la tabla siguiente se muestran algunos parámetros de las diez tormentas geomagnéticas más intensas del periodo del 16 de agosto de 1978 al 28 de diciembre de 1979 y los parámetros correspondientes del viento solar, junto con el evento solar explosivo asociado.

La primera columna de la Tabla indica el número dado al evento. Las columnas segunda y tercera indican el día, el mes, el año y la hora en tiempo universal del arribo del choque al vehículo espacial ISEE-3 a la altura de la órbita de la Tierra, de acuerdo con González y Tsurutani (1987); en el décimo caso, no hubo un choque sino una intensificación no compresiva de densidad (NCDE); en los casos de choque, el tiempo registrado para su llegada correspondió al del comienzo repentino de la tormenta (SC), pero en el caso de la NCDE, no hubo SC. Las columnas cuatro y cinco muestran la fecha y hora del arribo del material con Bz* al satélite ISEE-3, de acuerdo con Tsurutani et al. (1988) el cual coincide con el momento en que el valor de Dst empieza a disminuir en la fase principal de la

TABLA 1.

**PARAMETROS DE LAS TORMENTAS GEOMAGNETICAS MAS INTENSAS
Y DEL VIENTO SOLAR CORRESPONDIENTE**

Evento No.	Choque Fecha	TU	Inicio de B* Fecha	TU	Δt (h)	V_{vs} (km s^{-1})	V_{B^*} (km s^{-1})	B_z^*/B (%)	Evento solar
1	27/8/78	02	27/8/78	18	16	450	460	97	F
2	28/9/78	21	29/9/78	08	11	700	900	98	R
3	25/11/78	12	25/11/78	12	0	500	500	86	F
4	21/2/79	02	21/2/79	15	13	530	580	80	F
5	9/3/79	05	10/3/79	18	37	400	450	86	F
6	28/3/79	08	29/3/79	05	21	650	550	92	*
7	3/4/79	09	3/4/79	19	10	550	550	82	*
8	24/4/79	23	25/4/79	01	2	600	600	49	F
9	29/8/79	05	29/8/79	07	2	620	620	68	F
10	(17/9/79)	(21)	18/9/79	06	9	425	425	100	*

tormenta. La sexta columna (Δt) contiene el lapso de tiempo entre el arribo del choque (o NCDE) y el arribo del plasma con B_z^* : La columna siete nos da un valor representativo de la velocidad del plasma detrás del choque mientras que la columna ocho nos da la velocidad del plasma con B_z^* . La columna nueve indica la razón en porcentaje del valor de la componente B_z^* respecto a la magnitud total del campo y la columna diez indica si hubo el estallido de un filamento (F) o de una ráfaga (R) en la región fuente estimada mediante observaciones de IPS en la fecha aproximada de ocurrencia del evento solar responsable de la perturbación geomagnética de acuerdo con Hewish y Bravo (1986); es importante recordar que en todos los casos se encontró también un hoyo coronal en la región; un asterisco en esta columna indica que no se cuenta con observaciones de centelleo para estos casos. Todos los datos del viento solar fueron tomados de King (1983).

DISCUSION Y ANALISIS

De la inspección de la Tabla anterior y de los análisis previos se pueden ver varias cosas interesantes.

1) La "nube" con B_z^* no parece estar dinámicamente relacionada con el choque interplanetario pues ésta lo mismo aparece exactamente detrás del choque que 37 horas después (ver la cuarta columna en la Tabla): Además, la velocidad de la nube suele ser en ocasiones diferente de la del viento solar detrás del choque (ver columnas 5 y 6) y todo esto conduce en algunos casos a tiempos distintos de partida del Sol para el viento solar rápido y para la nube de B_z^* . Cabe hacer notar que en todos los casos estudiados

por IPS ocurrió la desaparición brusca de un filamento o el estallido de una ráfaga cerca de un hoyo coronal en la región fuente. Esto coincide con los resultados de Bravo y Lanzagorta (1992) quienes estudiaron los choques y las nubes interplanetarias durante todo el año y concluye que los choques son originados por cambios bruscos de velocidad e el viento emitido por el hoyo y las nubes corresponden al material del fenómeno explosivo (ráfaga o estallido del filamento) el cual puede ser lanzado hacia el medio interplanetario gracias a su cercanía a las líneas de campo abiertas del hoyo coronal.

2) Desde el punto de vista de sus efectos geomagnéticos, la llegada del choque a la magnetosfera solo produce la compresión de ésta que se refleja en un aumento súbito en el valor de Dst a lo cual se le ha llamado el comienzo repentino de la tormenta geomagnética (SC). Sin embargo, como la tormenta se inicia propiamente hasta la llegada del plasma con B_z^* y esto puede ocurrir mucha horas después, consideramos que es inapropiado llamarle a este aumento el "comienzo" de la tormenta. Así pues, el choque en sí no tiene influencia en la tormenta y esto explica por qué González y Tsurutani (1986) no encontraron ninguna correlación entre la intensidad del choque y la intensidad de la tormenta geomagnética. El choque puede considerarse en algunos casos como "precursor" de la nube de plasma B_z^* , aunque muchos choques no son seguidos de plasma con B_z^* y en algunas ocasiones, como en el evento No. 10, el plasma B_z^* no está precedido por un choque.

3) Respecto al plasma Bz* en sí, es interesante notar que en casi todos los casos la componente Bz representa una proporción muy alta del campo magnético total. Esto es, más que una componente o que una fluctuación, la aparición de este campo corresponde a una estructura de plasma de muy grandes dimensiones en las que el campo magnético es muy intenso y tiene una orientación cercana a la dirección sur. También es notable que en casi todos los casos el fenómeno explosivo asociado haya sido el estallido de una protuberancia que es una estructura solar bastante definida y magnéticamente ordenada. Esto corrobora la idea de que la nube Bz* es material de la protuberancia (o, en algunos casos, de la región activa) emitido por su estallido que salió hacia el medio interplanetario debido a que ésta se encontraba cerca de un hoyo coronal. Cabe hacer notar que en los casos 6 y 7, para los que no tienen registros de IPS que localicen su región fuente en el Sol, ocurrieron el estallido de una protuberancia y de una ráfaga, respectivamente, muy cerca también de un hoyo coronal y aunque sin la información de IPS no se puede asegurar que la perturbación interplanetaria se produjo ahí, las observaciones son consistentes con la imagen presentada aquí. El evento No. 10, sin embargo, no es claro. Por desgracia, tampoco se registraron ráfagas o estallidos de protuberancias en los días adecuados para ser asociados con el evento interplanetario. Tang et al. (1989) lo asocian con una ráfaga detrás del limbo este, pero sin observaciones de centelleo no se puede asegurar. Es importante recordar que en este caso no se tuvo ningún choque antecesor del Bz*, sino que se registró una NCDE; este tipo de fenómenos ha sido muy poco estudiado y no se comprende aún su origen.

CONCLUSIONES

La conclusión principal de este estudio es que las causas solares de las tormentas geométricas son principalmente los estallidos de protuberancias y ocasionalmente también de ráfagas lo suficientemente cerca de hoyos coronales como para que el material expulsado por la explosión puede salir al medio interplanetario y ser transportado por el viento solar hasta la Tierra. Para que este material sea geomagnéticamente efectivo, es necesario que transporte un campo magnético

con una orientación predominantemente sur que pueda acoplarse con el campo magnetosférico. La aparición del frente de choque interplanetario antes de este material es simplemente un fenómeno colateral debido a que la misma alteración de la estructura magnética del Sol que produce el estallido de la protuberancia o de la ráfaga altera también la forma del hoyo coronal cercano y por lo tanto cambia la velocidad de flujo del viento solar que éste emite. En particular la "apertura" de nuevas líneas de campo aumentará el área en la base del hoyo, disminuirá su divergencia y aumentará la velocidad de su flujo. Una descripción detallada del escenario solar en el que todos estos eventos asociados resultan de las respuestas de diversas estructuras cromosféricas y coronales a una desestabilización magnética de gran escala en la atmósfera del Sol se puede encontrar en Bravo (1992).

PRONOSTICO DE TORMENTAS GEOMAGNETICAS POR MEDIO DE IPS

Aunque no entraremos en detalle en este asunto, si mencionaremos que la posibilidad de rastrear las perturbaciones interplanetarias durante su tránsito del Sol hacia la Tierra mediante el IPS nos permite, por un lado, ver si en su región fuente estalló un filamento o una ráfaga cuyo campo magnético esté adecuadamente orientado y, por otro lado, prevenir (aproximadamente) su tiempo de arribo a la magnetosfera. Esto último en realidad no es aún muy claro pues la región efectiva es la que transporta el Bz* y no el frente de la perturbación delimitado por la onda de choque. La técnica de rastreo por centelleo deberá mejorarse para permitir una estimación más precisa del tiempo esperado para el inicio de la tormenta geomagnética.

REFERENCIAS

- Bravo, S., B. Mendoza y R. Pérez-Enríquez, Coronal holes as sources of large-scale solar wind disturbances and geomagnetic perturbations, J. Geophys. Res., 96, 5387, 1991a.
- Bravo, S., B. Mendoza y R. Pérez-Enríquez, Geomagnetic storm sudden commencements and their possible sources at the Sun, Geofis. Int., 30, 23, 1991b.
- Bravo, S. y M. Lanzagorta, Características magnéticas y de plasma del viento solar detrás de

una onda de choque interplanetaria, GEOS, Bol. Unión Geof. Mex., 12(2), pp 22-25, 1992
Bravo, S., The SC event of 6 June 1979 and related

solar and interplanetary observations, Adv. Space Res., (enprensa) 1992.

Burton, R.K., R.L. McPherron, and C.T. Russell, An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst, J. Geophys. Res., 80, 4204, 1975.

Dungey, J.W., Interplanetary magnetic fields and the auroral zone, Phys. Rev. Lett., 6, 47, 1961.

González, W. y B. T. Tsurutani, Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($Dst < -100nT$), Planet, Space Sci., 35, 1101, 1987.

Hewish, A. y S. Bravo, The sources of large-scale heliospheric disturbances, Solar Phys., 106, 185, 1986.

Hundhausen, A., Coronal expansion and solar wind, Springer-Verlag, Berlin, 1972.

Jocelyn, J.A. y P.S. McIntosh, Disappearing solar filaments: a useful predictor of geomagnetic activity, J. Geophys. Res., 86, 4555, 1981. King, J. H., Interplanetary Medium Data Book, Supplement 2, NSSDC/83-01, 1983 Krieger, A.S., A.F. Timothy,

and E.C. Roelof, a coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream, Solar Phys., 29, 505, 1973.

Rostoker, G. y C.G. Falthamar, Relationships between changes in the interplanetary magnetic field and variations in the magnetic field at the Earth's surface, J. Geophys. Res., 72, 5853, 1967.

Snyder, C.W. y M. Neugebauer, en The Solar Wind, R. J. Markin Jr. y M. Neugebauer (eds.) Pergamon Press, Nueva York, 1966.

Tang, F., B.T. Tsurutani, W.D. González, S.I. Akasofu y E. J. Smith, Solar sources of interplanetary southward Bz events responsible for major magnetic storms (1978-1979), J. Geophys. Res., 94, 3535, 1989.

Tsurutani, B.T., W.D. González, F. Tang, S. I. Adasofu y E. J. Smith, Origin of interplanetary southward magnetic fields responsible for major magnetic storms near solar maximum (1978-1979), J. Geophys. Res., 93, 8519, 1988

Wright, C.S. y L.F. McNamara. The relation between disappearing solar filaments, coronal mass ejections, and geomagnetic activity, Solar Phys., 87, 401, 1983.

**Reunion anual de la sociedad
Sismologica norteamericana**

Abril 14-16 1993
Ixtapa-Zihuatanejo

Informes

SSA headquarters
201 Plaza Profesional Building
El Cerrito CA 94530 USA

7ª Asamblea científica IAGA

Agosto 7 - 20 1993
Buenos Aires -Argentina

Informes

M. Gadseb IAGA, Phys. Unit
Fraser Noble Building
Aberdeen Univ.
Aberdeen AB9 8ZUE Scotland U.K.

**Novena Conferencia tematica
sensores remotos en geologia**

8 - 11 Febrero 1993
Pasadena, California USA

Informes:

Erim
P.O. Box 134001
Ann Arbor MI 48113-4001 USA
Tel 3131 994-1200 Ext 3234
Fax: 313 994-5123



Maestría y Doctorado en Ingeniería Hidráulica



La División de estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM ofrece cursos de maestría y doctorado en Ingeniería Hidráulica en sus instalaciones de Progreso, Morelos.

Las asignaturas que se imparten son, entre otras:

Hidráulica general
Métodos Matemáticos
Mecánica de Fluidos
Hidrología de Superficie

Irrigación y drenaje
Geohidrología
Métodos Numéricos
Obras Hidráulicas

La maestría y el doctorado están dirigidos a egresados de ingeniería civil, ciencias agropecuarias y carreras afines. Estos cursos están apoyados por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua a través de becas, biblioteca, computadoras y laboratorios.

Informes al (73) 19-40-49 o 19-40-00 ext. 532 con el Dr. Alvaro Muñoz en Paseo Cuauhnáhuac #8532, Progreso, Mor. C.P. 62550

POSGRADO EN Geofísica



Unidad Académica de los Ciclos
Profesionales y de Posgrado del
Colegio de Ciencias y Humanidades

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

El instituto de Geofísica y la Unidad Académica de los Ciclos Profesional y de Posgrado del CCH de la UNAM ofrecen a todos los profesionales en Física, Geofísica, Geología, Ingeniería, Química, o alguna área académica afín, los Posgrados de Maestría y Doctorado de Geofísica dentro de las siguientes áreas:

AGUAS SUBTERRANEAS
EXPLORACIÓN GEOFÍSICA
SISIMOLOGÍA Y FÍSICA DEL INTERIOR DE LA TIERRA
ESTUDIOS ESPACIALES
MODELACIÓN MATEMÁTICA Y COMPUTACIONAL DE SISTEMAS GEOFÍSICOS

Informes: Instituto de Geofísica UNAM
Cd. Universitaria
México 04510 D.F.
Tel 662-4130 y 622-4137 Fax 550-2486