

LA ASIMETRIA DIARIA DE LAS TORMENTAS GEOMAGNETICAS
DE LATITUD MEDIA

Bruna Irene Grimberg y Otto Schneider

Consejo Nacional de Investigaciones Cientificas y Técnicas.
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos
Aires, Ciudad Universitaria, Pab II (1428) Nunez, Cap. Federal.
Argentina.

RESUMEN

El campo geomagnético sufre frecuentes perturbaciones debido a fenómenos vinculados con la emisión particulada del Sol, destacándose entre ellas las tormentas, disturbios prolongados por uno hasta varios días y de amplitud que por lo general excede los 10 nT. La configuración de la perturbación en el tiempo y en el espacio determina la morfología de una tormenta. Una tormenta típica de latitudes bajas y medias se caracteriza por un comienzo sorpresivo de la perturbación en escala mundial (ssc), con un fuerte incremento de la componente H durante algunos minutos. El propósito de este trabajo es estudiar la morfología de las tormentas con ssc, y establecer las similitudes y discrepancias de dos métodos analíticos para el estudio de la asimetría de la variación DS, modulación que experimenta el campo de la tormenta a lo largo de su evolución. Se procesaron los datos correspondientes a tormentas de comienzo brusco para tres ciclos solares: 1941-1951, 1963-1973, 1974-1984, registrados en el Observatorio de Pilar (lat. geomag.: 20 S, long. geomag.: 4 E). Se procedió de acuerdo con el método del análisis de Fourier eliminando previamente la variación solar quieta subyacente (Sq) en forma individual para cada tormenta. De los resultados obtenidos se puede concluir que en latitudes medias la amplitud de la perturbación en la componente H es un orden de magnitud mayor que en las otras dos (D y Z). DS(H) presenta una marcada onda de período cuasi-diario (algo menor que 24 horas), con una fase que varía con el tiempo tormenta, mientras que DS(D) está fuertemente modulada por armónicas superiores, dependiendo su amplitud de la hora de inicio de la tormenta.

ABSTRACT

The geomagnetic field is frequently disturbed by events linked with particule emission from the Sun. Geomagnetic storms represent a special class of perturbations; they typically last one or several days, with amplitudes generally exceeding 10 nT. The configuration of the perturbation in space and time determines the morphology of a storm; in middle and low latitudes the sudden commencement of the perturbation in a worldwide scale (ssc) is a characteristic feature of most storms. The purpose of this work is to study the morphology of ssc storms at middle latitudes, and to establish the similitaries and discrepancies

that exist between two analytic ways for the treatment of the asymmetric field DS during the storm time. The sec storms here processed belong to three solar cycles: 1941-1951, 1963-1973, 1974-1984; they were recorded at Pilar Observatory (qm.lat.: 20 S, qm. long.: 4 E). Fourier analysis was applied to evaluate DS, removing previously the solar quiet variation Sq from each storm. From the results it can be concluded that in middle latitudes the amplitude of the asymmetry in H component is one order larger than in the others (D and Z). DS(H) has a remarkable quasi-daily wave (less than 24 hs.) with a phase that varies systematically during the storm. DS(D) is notably modulated by higher harmonics, with amplitudes that depend on the hour of the beginning.

INTRODUCCION

El campo geomagnético que corresponde a una tormenta puede describirse como la superposición de una componente de carácter planetario y otra dependiente de parámetros locales. La variación del campo $\Delta(\vec{F})$ durante una tormenta geomagnética se puede representar como:

$$\Delta(\vec{F}) = \vec{s}(\theta, T) + \sum \vec{c}_i(\theta, T) \cos(\omega_i t + t)$$

con t : tiempo local

T : tiempo tormenta (TT)

θ : latitud geomagnética.

El primer término de esta expresión, que es independiente del tiempo local, es la componente Dst, mientras que el segundo término representa la asimetría longitudinal del campo, DS.

La descripción de la marcha de DS durante una tormenta, como así también su origen fué objeto de estudio de numerosos autores; Sujiura y Chapman (1960), en particular, analizaron la marcha progresiva de la amplitud y fase de DS de un conjunto de tormentas de una extensa franja latitudinal clasificadas según su intensidad.

El propósito del presente trabajo es describir la morfología de la asimetría longitudinal del campo de tormentas geomagnéticas registradas en el observatorio de Pilar, como así también determinar el vector medio de la perturbación Dst para distintas etapas de la tormenta.

DATOS

Se trabajó con los valores medios horarios de cada una de las componentes del campo geomagnético registradas en el Observatorio de Pilar (lat. geomag. 20° S, long. geomag. 4° E), correspondientes a una selección de tormentas de comienzo brusco (sudden storm commencement, ssc) consignadas en los boletines anuales de la IAGA (Association of Geomagnetism and Aeronomy). Con el propósito de aislar la componente asimétrica de la perturbación se procedió a depurar previamente dichos datos en concepto de Sq, variación solar quieta de período diario, y Dst, perturbación con simetría longitudinal en tiempo tormenta.

Las tormentas de comienzo brusco que se consideraron para el análisis fueron aquellas cuya intensidad, durante las fases inicial y principal, superaran un valor umbral prefijado definido en función del índice de actividad geomagnética Kp (tal que la suma de los ocho Kp sucesivos a partir de la hora de inicio de la tormenta sea mayor que 25), y que hayan sucedido en forma aislada (es decir que la distancia temporal entre el inicio de dos

tormentas sea mayor que 72 horas si la primera cumple el requisito anterior), estipulándose, además, que dentro de los 31 días anteriores y posteriores al inicio de la tormenta se hayan registrado sendos días de baja actividad geomagnética, que puedan servir de apoyo para la interpolación del Sq subyacente durante la tormenta (Van Zele y Schneider, 1988). Resultaron así un total de 255 tormentas para los tres ciclos solares undecenales: 1941-1951, 1963-1973, 1974-1984.

MÉTODOS

Se sustrajo individualmente a cada tormenta la variación solar quieta subyacente, que fué determinada por interpolación a partir de dos días aledaños al inicio de la tormenta (anterior y posterior) que presentaran la secuencia diaria de más bajos índices de actividad geomagnética a partir de un valor establecido ($Kp < 2+$). La variación del Sq subyacente se impone porque dicha variación diaria proviene de procesos ionosféricos (mareas e ionización fotónica) distintos que los responsables de las perturbaciones. El procedimiento aquí adoptado a falta de un conocimiento objetivo del Sq difiere del que aplicaron Sugiura y Chapman (1960), quienes se basaron en el promedio de los 5 días quietos del mes respectivo. Independientemente de los méritos relativos de uno y otro método debe reconocerse que ambos son puramente numéricos y, por ende, perfectibles; en efecto es probable que las mareas y la ionización fotónica causantes del Sq subyacente estén a su vez alteradas sistemáticamente durante la perturbación. El problema merece un estudio ulterior profundizando con miras a evitar que residuos no eliminados de Sq contaminen la variación diaria DS.

La perturbación simétrica en tiempo tormenta Dst fué caculada promediando la totalidad de las tormentas, dado que para latitudes medias la hora de inicio de estas se halla equidistribuida en el tiempo local. Se obtuvo así la perturbación Dst sólo dependiente del tiempo tormenta y de la latitud, $Dst = s(B, T)$.

La componente que resulta de sustraer a los datos originales las dos magnitudes antes descritas, Sq y Dst, representa la contribución con asimetría longitudinal DS. Estos valores fueron sometidos a un análisis armónico buscando una modulación de 24 hs. según dos procedimientos diferentes:

- i) Método I, el seguido por Sugiura y Chapman (1960).
- ii) Método II, el considerado por Vecchi y otros (1986).

Ambos métodos exploran la variación diaria superpuesta a Dst, analizando la progresiva modificación de dicha variación diaria en amplitud y fase en el curso de la tormenta.

En el primer procedimiento (Método I) se realiza el análisis armónico de la marcha diaria en tiempo local, de un conjunto limitado de horas sucesivas de la evolución de la tormenta. En condiciones ideales, suponiendo un volúmen estadístico abundante,

se definiría cada una de dichas etapas evolutivas por un valor fijo de TT (73 etapas). De hecho se definen sólo once etapas, agrupando de la siguiente manera: 6 horas consecutivas en las primeras ocho etapas y 8 horas en las restantes tres. Las sucesiones de 24 horas fueron corregidas en concepto de marcha no cíclica.

El segundo método (Método II) consiste en un análisis armónico sobre un intervalo de 24 hs. corrido cada 6 horas durante 73 horas de TT contados a partir del inicio de la perturbación, sobre cada una de las tormentas involucradas. Se realizó previamente, al igual que en el procedimiento anterior, una corrección por marcha no cíclica cada 24 horas. El dial armónico que se obtuvo resultó de promediar en él los vectores individuales de todas las tormentas, correspondientes a cada una de las nueve sucesiones obtenidas a partir de considerarlas en forma corrida, rotados según un ángulo que contempla la hora de inicio, para así expresar el resultado en tiempo local (TL).

RESULTADOS

La marcha de Dst durante los tres primeros días de la tormenta, para cada componente del campo y para el conjunto de los tres ciclos analizados se consigna en la figura 1. En Dst(H) se distinguen nitidamente las tres etapas de una tormenta seca: fase inicial, principal, y de recuperación. Sin embargo Dst(D) y Dst(Z) muestran un comportamiento indefinido en TT. Aquí y en adelante, siguiendo el procedimiento usual, los valores originales de la declinación, que son angulares, se han convertido a unidades de campo (nT), significando entonces la componente en el plano horizontal, normal al vector medio H.

A fin de visualizar la marcha de la variación DS en TT fijando su dependencia longitudinal, se agruparon las tormentas según su hora de inicio en intervalos de seis horas, alrededor de las horas 6, 12, 18 y 24 para cada una de las componentes del campo; los resultados se consignan en la figura 2. En el caso de la componente H y en menor grado de D se aprecia un comportamiento cíclico de un período de aproximadamente 24 horas, con un decrecimiento exponencial de la amplitud durante el desarrollo de la tormenta. Se nota claramente la constancia aproximada de la fase de DS en tiempo local (t) a través de la sucesión vertical de los diagramas parciales, manifiesta aquí por el corrimiento progresivo, dada la relación $t = T + HC$, con HC hora de inicio en TL. Las componentes D y Z presentan una modulación de período semidiario, siendo su amplitud comparable con la onda diaria para la componente D de las tormentas que comenzaron durante la noche.

Los diales armónicos que resultaron para las componentes H y D del campo según el Método I se presentan en las figuras 3a y 3b. Los once puntos graficados representan una onda de período

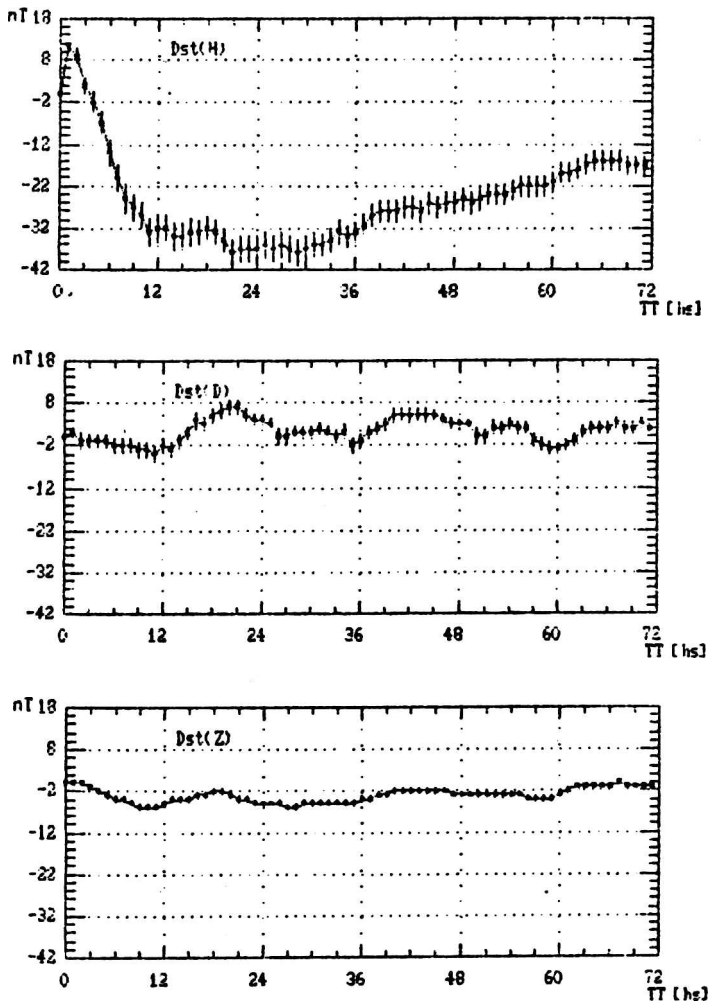


Fig. 1 Marcha media de la variación simétrica Dst para las tres componentes del campo. Observatorio de Filar 1941-1951; 1963-1984.

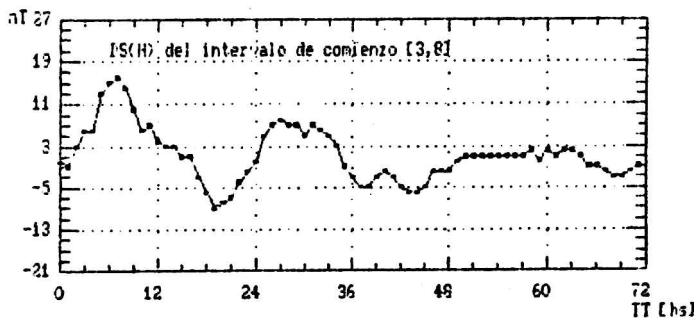
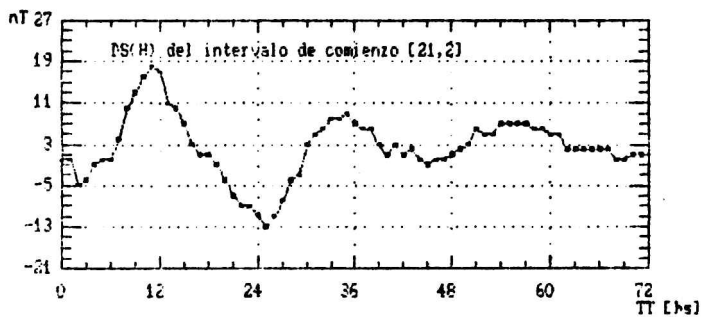
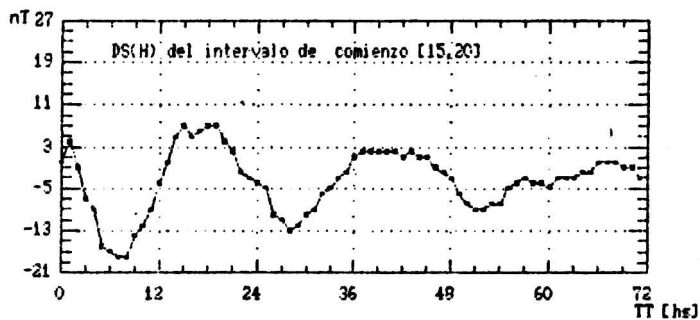
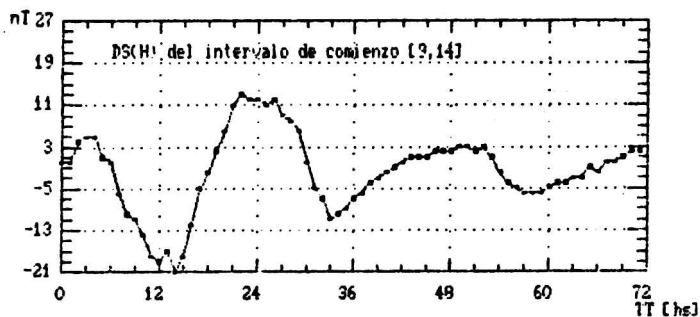


Fig. 2a Marcha media de la variación asimétrica DS(H) agrupada por hora de comienzo. Observatorio Pilar 1941-1951; 1963-1984.



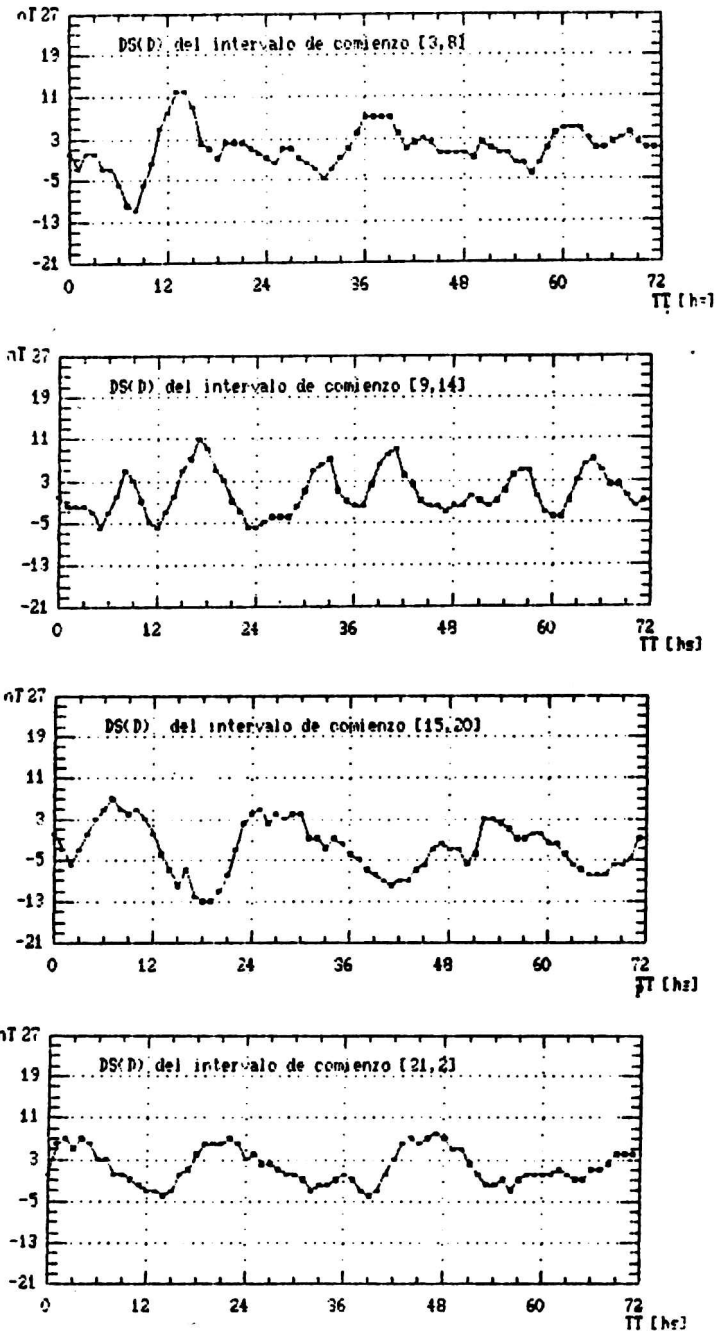


Fig. 2b Marcha media de la variación asimétrica $DS(D)$ agrupada por hora de comienzo. Observatorio Pilar 1941-1951; 1963-1984.

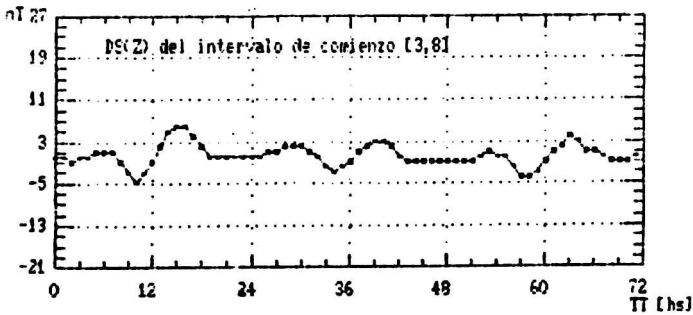
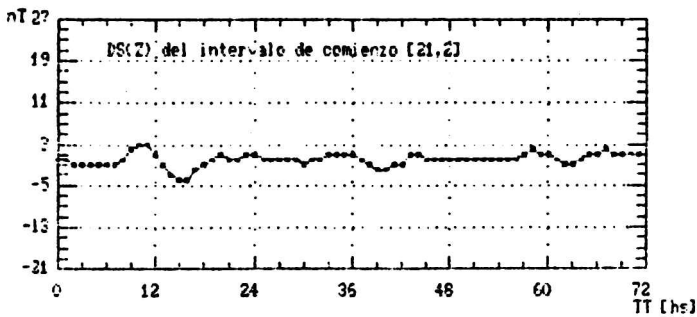
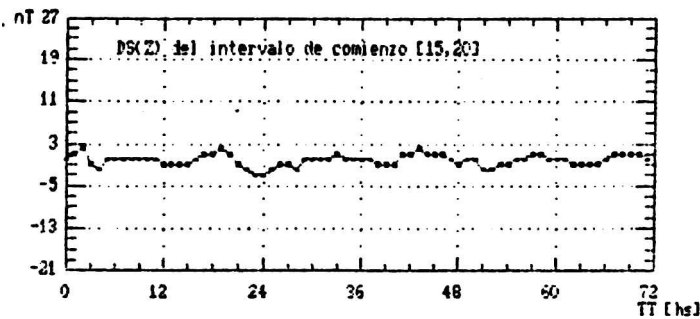
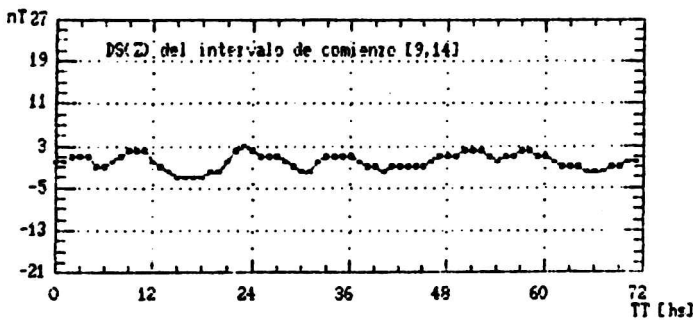


Fig. 2c Marcha media de la variación asimétrica DS(Z) agrupada por hora de comienzo. Observatorio Pilar 1941-1951; 1963-1984.



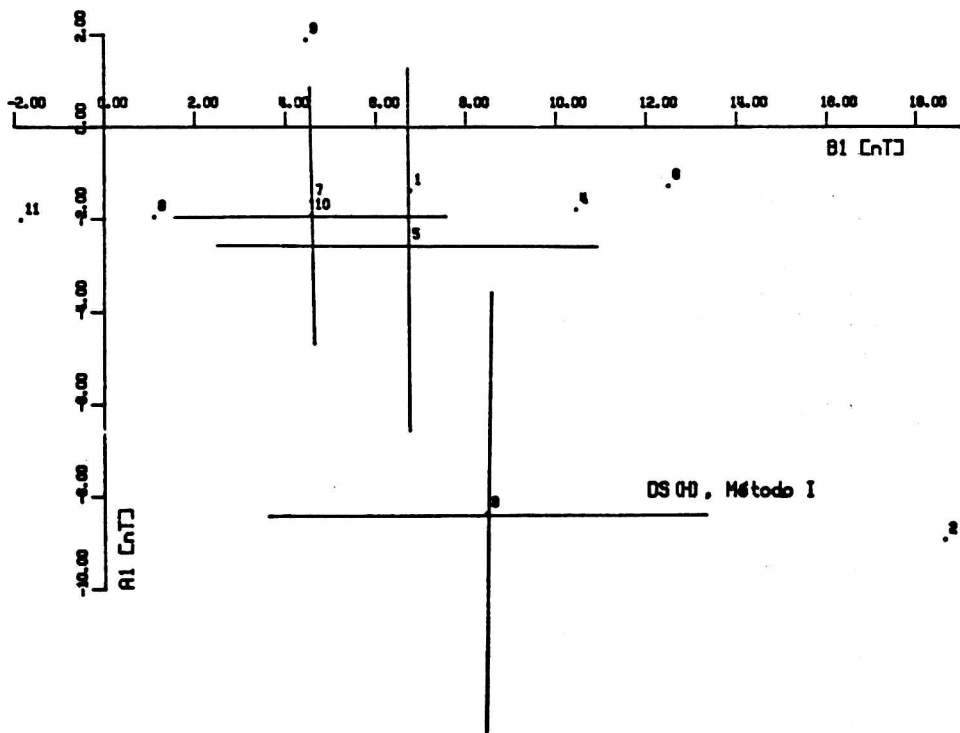


Fig. 3a Dial Armónico correspondiente a la onda diaria de la variación asimétrica DS(H) según el método I. Observatorio Pilar 1941-1951; 1963-1984.

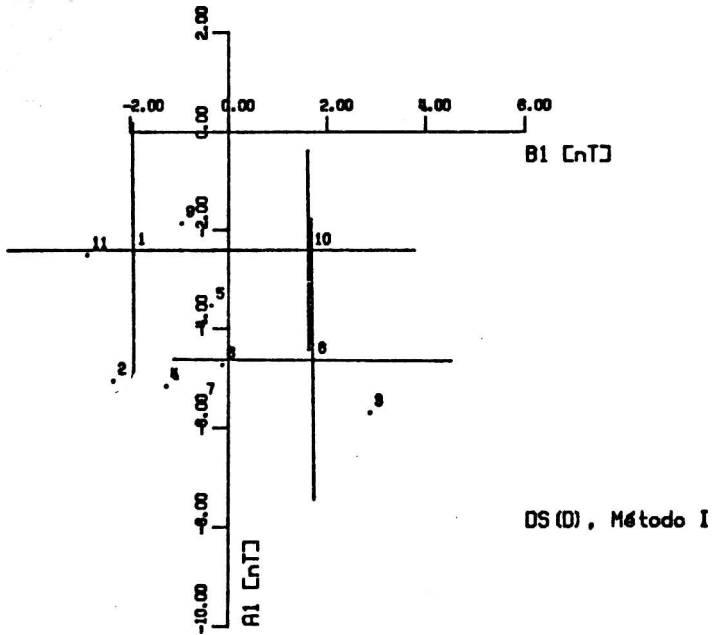


Fig. 3b Dial Armónico correspondiente a la onda diaria de la variación asimétrica DS(D) según el método I. Observatorio Pilar 1941-1951; 1963-1984.

diario en TL para cada uno de las once etapas de TT consideradas, consignándose también, para algunos de los puntos, las dispersiones medias. En el dial correspondiente a DS(H) (fig. 3a) la máxima amplitud corresponde a la segunda etapa considerada (horas 6-11 del TT), y se registra aproximadamente a las 7 hs. del TL. En las etapas posteriores de la tormenta la onda diaria es menos intensa y culmina alrededor de las 6 hs. del TL, a excepción de las últimas ocho horas de la tormenta en que la amplitud de la onda diaria es mínima y se registra un poco después de las 12 hs. del TL. La marcha diaria de la componente DS(D) (fig. 3b) presenta una máxima amplitud para la tercera etapa de la tormenta (hora 12-17 del TT) pocas horas antes del mediodía local, mientras que la mínima amplitud corresponde al grupo de las primeras seis horas del TT y al grupo comprendido entre las 48 y 54 hs. del TT, culminando alrededor de las 16 hs. y 13 hs., respectivamente del TL. Si bien es común a DS(H) y a DS(D) que la mínima amplitud de la onda diaria se verifique después del mediodía local y la máxima durante la mañana, difieren notablemente en la marcha de las fases.

Los diales armónicos que resultan para las componentes H y D del campo por el Método II se presentan en la figura 4. El dial correspondiente a la componente H presenta una considerable modulación en el período diario, con una fase que varía en forma sistemática durante la tormenta, y con un ligero incremento de la amplitud de esta onda durante la etapa principal de la tormenta y un decrecimiento pronunciado en las etapas posteriores. En el dial de DS(D) la onda se presenta menos acentuada, con una máxima amplitud a las 6 horas del inicio de la tormenta y con una marcha sistemática de las fases, pero rotado 90° respecto del correspondiente a DS(H).

La variación del vector perturbación Dst se consigna en la figura 5. La orientación espacial del mismo está graficado en un sistema cenit-horizonte, su posición está representada por los ángulos acimutal (ϵ) y de altura de los puntos que en la bóveda celeste resultan de prolongar hasta ella dicho vector. En la figura 5a. están graficados los vectores Dst correspondientes a cada hora individual de la tormenta geomagnética media del período analizado. Durante las primeras seis horas de iniciada la tormenta el vector Dst presenta una amplia deriva de su posición; en las dos primeras horas del TT es horizontal y orientado aproximadamente en la dirección del Polo Geomagnético Austral (PGA); un pequeño incremento de la componente vertical orientado hacia el norte y una desviación angular respecto del PGA caracteriza al vector perturbación de la tercera hora del TT, mientras que el correspondiente a la cuarta hora del TT presenta una considerable inversión de su altura (acercándose al Polo Sur) y de una desviación angular respecto del PGA, recuperando en las horas posteriores de la tormenta su posición inicial (puntos I y III de la figura 5b.) En la figura 5b. el punto A representa la posición del Polo Geomagnético Austral (polo del campo dipolar no perturbado, que no coincide con el plano del meridiano geográfico del lugar); el punto I representa el vector perturbación medio de

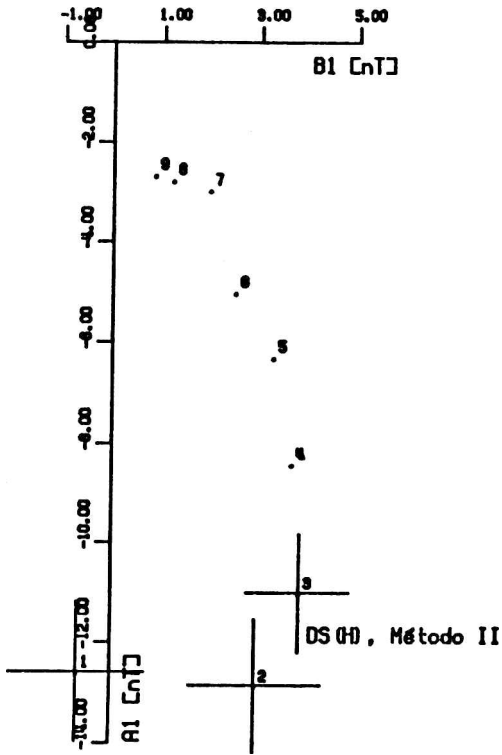
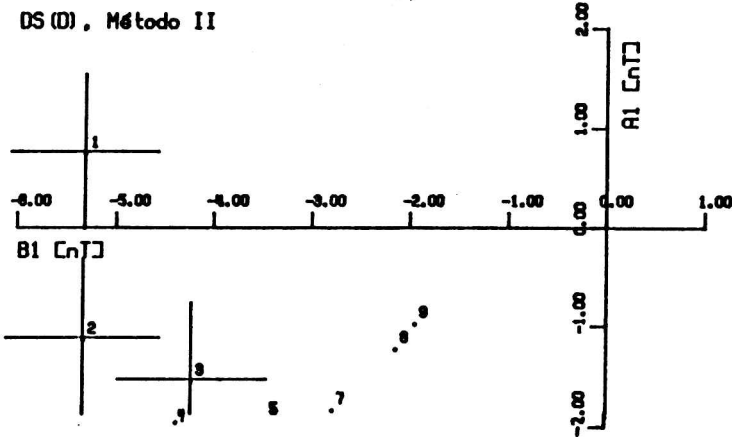


Fig. 4 Dial Armónico correspondiente a la onda diaria de la variación asimétrica según el método II. Arriba DS(H), abajo DS(D). Observatorio de Pilar 1941-1951; 1963-1984.



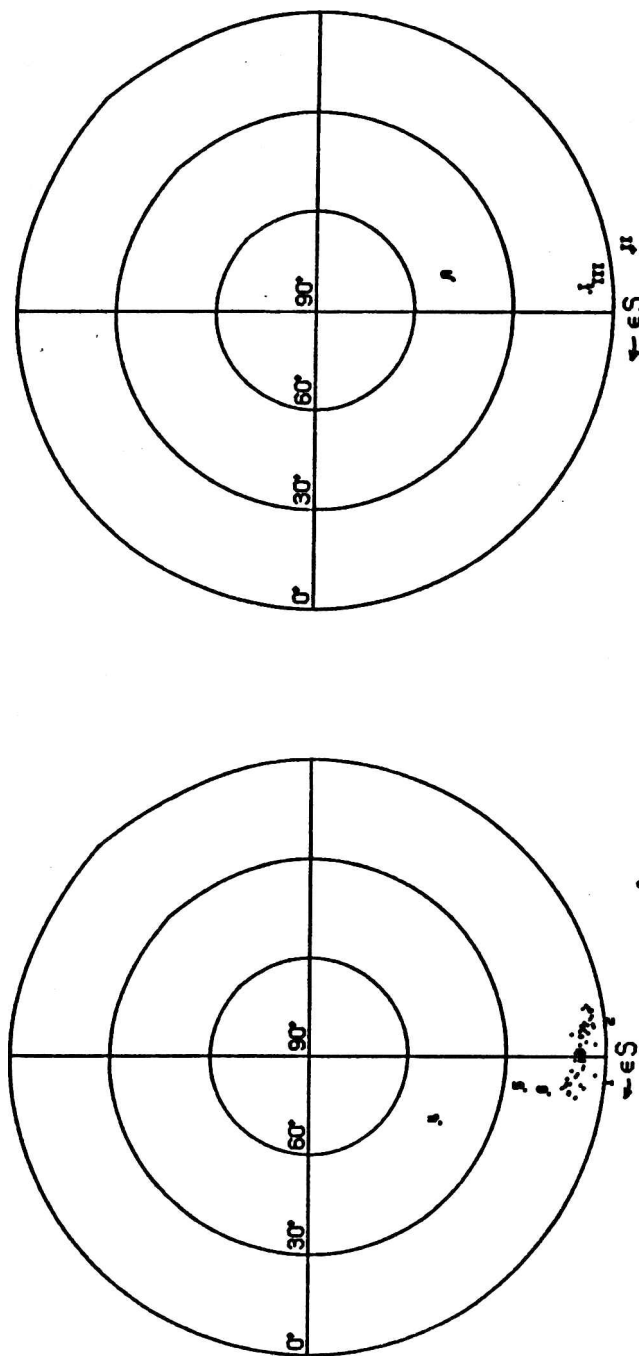


Fig. 5 Vector perturbación de la variación simétrica Dst. Fig. 5a vector perturbación correspondiente a cada hora de Tiempo Tormenta (II). Fig. 5b vector perturbación medio de la totalidad de la tormenta (I), vector perturbación medio de la fase inicial (II), vector perturbación medio de la fase de recuperación (III). A, Polo Geomagnético Austral.

las 72 horas del TI; el punto II representa el vector perturbación correspondiente a la fase inicial de la tormenta (las primeras tres horas a partir del inicio de la tormenta) y por último el punto III representa el vector perturbación medio de la fase de recuperación de la tormenta (el promedio de las últimas 48 horas). El vector I es principalmente horizontal, como así también el correspondiente a la fase de recuperación, mientras que para la fase inicial la perturbación presenta una componente vertical orientada hacia el Hemisferio Norte.

CONCLUSIONES

1) La componente más afectada por la perturbación en Pilar es H, resultado típico de un lugar de latitud media. Esta preponderancia se manifiesta tanto en la contribución simétrica, Dst, como en la asimétrica, DS. En efecto, analizadas según el Método II las magnitudes de Dst(H), Dst(D) y Dst(?) están en una proporción aproximada de 1: 1/5: 1/10 y las correspondientes a DS en la proporción de 1: 2/3: 1/3.

2) En la variación con simetría longitudinal, Dst, se distinguen con nitidez las tres fases que caracterizan a una tormenta de comienzo brusco, con una depresión máxima típica de 38 nT en la componente horizontal durante la fase principal.

3) La variación asimétrica DS de una periodicidad aproximada de 24 horas, presenta en la primera etapa de la evolución de la tormenta una amplitud de un orden comparable con la de Dst, como también una posterior recuperación de su nivel pretormenta, aunque más rápida que la componente simétrica.

4) La onda cuasidiaria en la variación asimétrica DS(H) culmina pocas horas antes del mediodía local analizándola según el Método II y alrededor de las 7 hs. del TL según el Método I; este último resultado coincide con lo obtenido por Sugiura y Chapman (1960). En el caso de DS(D), tal concordancia es menos clara dado que su marcha en tiempo tormenta está fuertemente modulada por armónicas de segundo y tercer orden, cuyas amplitudes dependen de la hora de inicio de la tormenta. En un estudio posterior se profundiza el análisis de la componente DS(D) en latitudes medias.

5) En la declinación D, la tormenta se manifiesta particularmente en la contribución asimétrica DS(D), pero su magnitud es inferior a DS(H), aún cuando ambas presentan una evolución morfológica similar en el curso de la tormenta.

6) La componente vertical, Z, no presenta una variación asimétrica apreciable. Los resultados obtenidos por los Métodos I y II no son estadísticamente significativos; para la primera armónica la relación del módulo con su dispersión es 0.654, y la onda de período semidiario tiene una amplitud del orden de la

anterior pero con una relación amplitud-dispersión de 0.9042. La escasa respuesta de Z se puede atribuir al hecho de que en las latitudes aquí consideradas el sistema de corrientes equivalentes es esencialmente horizontal.

7) Los Métodos I y II aquí empleados analizan diferentes aspectos de la variación asimétrica durante una tormenta; el primero determina la parte asimétrica para sucesivas etapas evolutivas de la perturbación, cada una de ellas caracterizada por un valor (aproximadamente) constante de tiempo tormenta (aunque fenomenológicamente diferente para las primeras etapas), en tanto que el segundo es de carácter híbrido, ya que contempla el progreso simultáneo de la perturbación en tiempo tormenta y tiempo local. Una consecuencia de esta diferencia conceptual es el comportamiento más errático de la fase del DS resultante con el Método I. En un trabajo anterior los autores establecen un modelo que permita dilucidar analíticamente las implicancias de ambos procedimientos y la posibilidad de reducir los resultados de uno al otro (Grimberg y Schneider, 1988).

8) La inversión de la altura del vector perturbación correspondiente a la fase inicial (punto II en la fig. 5b) está asociada a la fase principal de la componente Z de la perturbación, adelantada respecto de la variación de $Dst(H)$. La desviación angular respecto del PGA que presenta la fase inicial está vinculada con la variación simétrica de la componente D, sensible a la perturbación de tormenta durante las primeras 24 horas de la perturbación, aunque adopta un valor constante para la fase de recuperación. Esta razón explica la alineación del vector perturbación medio de la tormenta y del correspondiente a la fase de recuperación con el plano meridional geomagnético local, resultado coincidente con lo señalado por Vecchi y Schneider (1987) en un estudio de tormentas correspondientes a una latitud geomagnética mayor que la del observatorio de Pilar.

Agradecimientos. Manifestamos nuestro agradecimiento al Servicio Meteorológico Nacional, Centro de Geofísica, por las facilidades brindadas para la compilación de datos. En las primeras etapas del procesamiento de los mismos colaboró la Sra. María del Carmen Vecchi. También es grato dejar constancia del apoyo recibido por parte del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, en forma de los subsidios y la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, por las facilidades otorgadas en el ámbito de su Departamento de Ciencias Geológicas.

BIBLIOGRAFIA

- IAAG Bulletin: Geomagnetic Data.
- Grimberg, B. I., O. Schneider: Un modelo de la asimetría longitudinal del campo de las tormentas geomagnéticas. Inédito, 1988.
- Sugiura, M. y S. Chapman: The average morphology of geomagnetic storms with sudden commencement. Abh. Akd. Wissensch. Gottingen, Math. Phys. Klasse., Sonderheft No 4, 1960. University of Alaska, Scientific Report No 2, Serie B #50.
- Van Zele, M.A., M.C. Vecchi y O. Schneider: Tormentas geomagnéticas en un observatorio subauroral: Islas Argentinas. Inédito, 1988.
- Vecchi, M. C., M.A. Van Zele y O. Schneider: Tormentas magnéticas en Isla Año Nuevo. Geospecta, Vol 13, No 2, 1986, pág.279-290.
- Vecchi, M. C. y O. Schneider: Vector Perturbación de las Tormentas geomagnéticas en Isla Año Nuevo. Geospecta, Vol 14, No 1, 1987, pág. 81-86.