

Algunos efectos de los eclipses solares sobre el campo magnético de la Tierra

ARTURO D' COSTA, ENRIQUE MENÉNDEZ, JUAN PÉREZ HERNÁNDEZ,
y LEONID S. ALPEROVICH

RESUMEN

Se estudian las variaciones geomagnéticas observadas durante cinco eclipses solares, hallándose una relación empírica entre la variación de la amplitud del paso diario y el porcentaje de oscurecimiento máximo.

Aplicando un modelo teórico, se calcularon las variaciones del campo magnético que debían registrarse en la estación "Centro Geofísico" (Cuba) y en Crawford Hill (EUA), obteniéndose coincidencias satisfactorias con los datos experimentales. Cálculos teóricos de mayor resolución temporal permitieron predecir la aparición de fluctuaciones del campo en el rango de las pulsaciones geomagnéticas que pudieron localizarse en los registros correspondientes a la estación de "Soroa" (Cuba). La diferencia entre los períodos predichos teóricamente y los determinados en los magnetogramas está dentro del orden del error experimental.

Los resultados obtenidos permiten establecer tres tipos de variaciones geomagnéticas provocadas por un eclipse: (1) variación de la amplitud del paso diario, (2) variación de tránsito, y (3) fluctuaciones del tránsito. Se propone una explicación de estos efectos de acuerdo a un modelo teórico.

1. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de posibles efectos de los eclipses solares sobre el campo geomagnético ha sido intentada por numerosos investigadores desde principios de siglo (BAUER, 1900, 1902, 1920; NORDMAN, 1907), aunque los resultados no han sido concluyentes, debido no sólo a la esporádica ocurrencia de los eclipses solares sino también a la coincidencia de éstos, en algunas ocasiones, con perturbaciones del campo geomagnético provocadas por otras causas. Sin embargo, CHAPMAN (1933) y CHAPMAN y BARTELS (1940), partiendo de consideraciones teóricas, señalaron la importancia de continuar la búsqueda experimental de estos efectos.

El análisis de la literatura (MATSUSHITA, 1967) muestra la coincidencia de perturbaciones ionosféricas apreciables con los eclipses solares,

Manuscrito aprobado el 5 de junio de 1979.

A. D'Costa, E. Menéndez y J. Pérez Hernández pertenecen al Instituto de Geofísica y Astronomía, de la Academia de Ciencias de Cuba. L. S. Alperovich pertenece al Instituto de Física de la Tierra, de la Academia de Ciencias de la URSS.

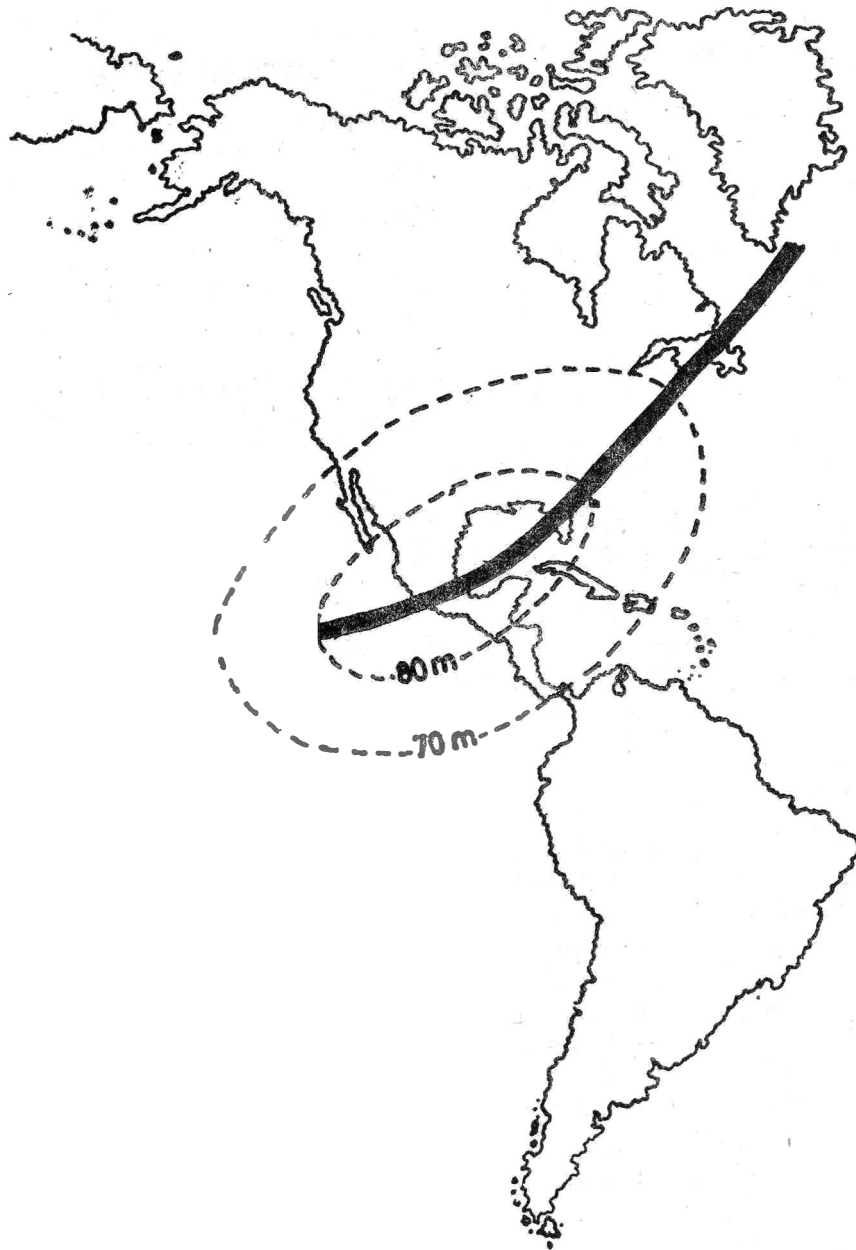


FIG. 1. Trayectoria del eclipse solar del 7 de marzo de 1970.

aunque no en todos los casos es posible atribuir estas perturbaciones exclusivamente a los mismos. En lo referente al campo geomagnético, existe incertidumbre sobre la confirmación experimental de estos efectos.

Diversos autores han estudiado la variación del paso diario (Sq) (VAN DER LAAN, 1970) y la aparición de pulsaciones (LANZEROTTI *et al.*, 1971; KATO, 1965*a*, 1965*b*; V. A. Parkhomov¹) asociadas a los eclipses, pero sus resultados no pueden considerarse concluyentes.

Desde el punto de vista teórico se ha venido trabajando tanto en modelos basados en el surgimiento de un sistema dipolar adicional de corrientes, de sentido contrario al existente en la ionosfera (CHAPMAN, 1933; NAGATA *et al.*, 1955; ABRAMOV *et al.*, 1970; ABRAMOV y ALPEROVICH, 1970), como en modelos hidromagnéticos, para explicar las variaciones del paso diario del campo geomagnético (TAUER, 1964), y en efectos debidos al surgimiento de ondas gravitacionales provocadas por el movimiento supersónico de la sombra del eclipse (CHIMONAS, 1970).

Teniendo en cuenta esta situación, se considera de interés analizar en el presente trabajo los efectos sobre el campo geomagnético de cinco eclipses solares cuyas trayectorias pasaron cerca de nuestras estaciones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para este trabajo se seleccionaron los eclipses del 7 de marzo de 1970, 10 de agosto de 1972, 24 de diciembre de 1973, 13 de diciembre de 1974, y 12 de octubre de 1977. En los cuatro últimos se determinaron las variaciones del paso diario (Sq) de la componente horizontal del campo geomagnético (H), a partir de los magnetogramas de la serie normal de la estación "Centro Geofísico", sita en San José de las Lajas, Cuba ($\varphi = 22^\circ 58' N$, $\lambda = 82^\circ 9' W$), con velocidad de registro de 20 mm/h y factor de escala de 2 γ /mm. Para el eclipse del 7 de marzo de 1970 ello no fue posible debido al carácter fuertemente perturbado del campo geomagnético en ese día. No obstante, en vista de la cercanía de la trayectoria de este eclipse a nuestro país (Fig. 1) y del alto grado de oscurecimiento alcanzado (85%), se calcularon teóricamente las variaciones de menor período del campo para las dos estaciones "Centro Geofísico" y "Soroa", Cuba ($\varphi = 22^\circ 47' N$, $\lambda = 83^\circ 0' W$), así como para un punto situado en $\varphi = 40^\circ 23' N$, $\lambda = 74^\circ 7' W$, con el objeto de comparar las variaciones calculadas con las registradas en los magnetogramas de ambas estaciones cubanas y los publicados para Crawford Hill (LANZEROTTI *et al.*, 1971), respectivamente.

3. RESULTADOS

Según el modelo inicial de CHAPMAN (1933), el efecto de los eclipses solares sobre la ionosfera se debe al surgimiento de una zona circular de conductividad disminuida, como consecuencia del apantallamiento por la Luna de las radiaciones ionizantes provenientes del Sol. Esta zona se sitúa en un flujo de corriente homogéneo y estacionario, y provoca una variación del campo geomagnético que puede modelarse mediante el

¹ Tesis de candidatura (Sibizmir, Irkutsk, URSS), 1974.

establecimiento de un sistema dipolar adicional de corrientes, de sentido contrario al existente en la ionosfera. Debido a ello, la amplitud del S_q durante el eclipse disminuirá con respecto a la observada en un día magnéticamente tranquilo, sin eclipse, y de la misma estación y ciclo lunar.

Asumiendo un radio de 800 km para la zona circular, CHAPMAN y BARTELS (1940) estimaron, para el punto situado debajo del centro de dicha zona, una variación del S_q del 28 al 22 %, según que el sistema de corrientes perturbador se encuentre a 100 km (capa E) ó 240 km (capa F) de altura, respectivamente. VAN DER LAAN (1970) obtuvo una variación del 25 % para el eclipse anular del 23 de noviembre de 1965, a partir de los magnetogramas de la estación de Bangkok.

Partiendo de los magnetogramas de la estación "Centro Geofísico", se determinaron las variaciones del paso diario (S_q) para los eclipses del 10 de agosto de 1972, 24 de diciembre de 1973, 13 de diciembre de 1974, y 12 de octubre de 1977, utilizando como referencia el paso del día inmediato anterior o posterior al eclipse, ya que siendo la estación "Centro Geofísico" una estación subfocal, no es posible hacer la comparación con el paso de días tranquilos alejados del día del eclipse, ni con el promedio de los días tranquilos de una misma estación y ciclo lunar (HENRÍQUEZ *et al.*, 1977).

La Fig. 2 muestra un ejemplo de las variaciones del paso diario durante el eclipse del 13 de diciembre de 1974.

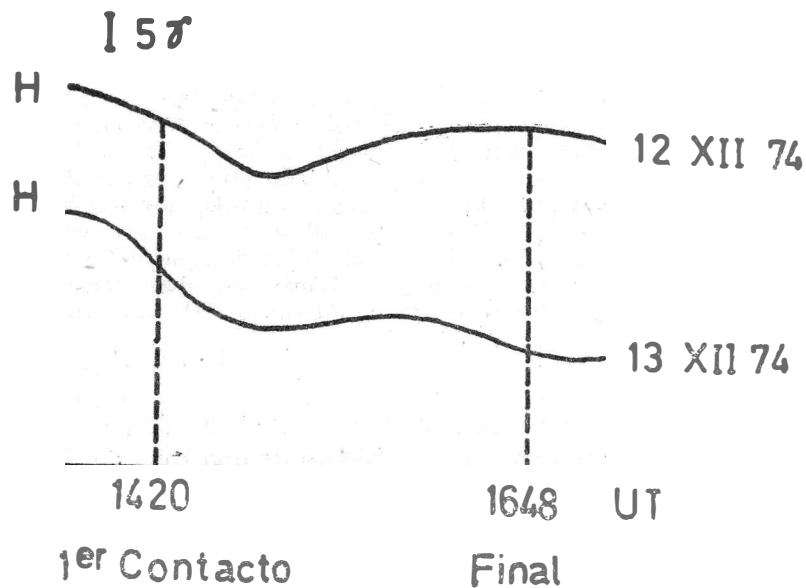


FIG. 2. Comparación del paso diario (S_q) durante el eclipse del 13 de diciembre de 1974 con el del día anterior.

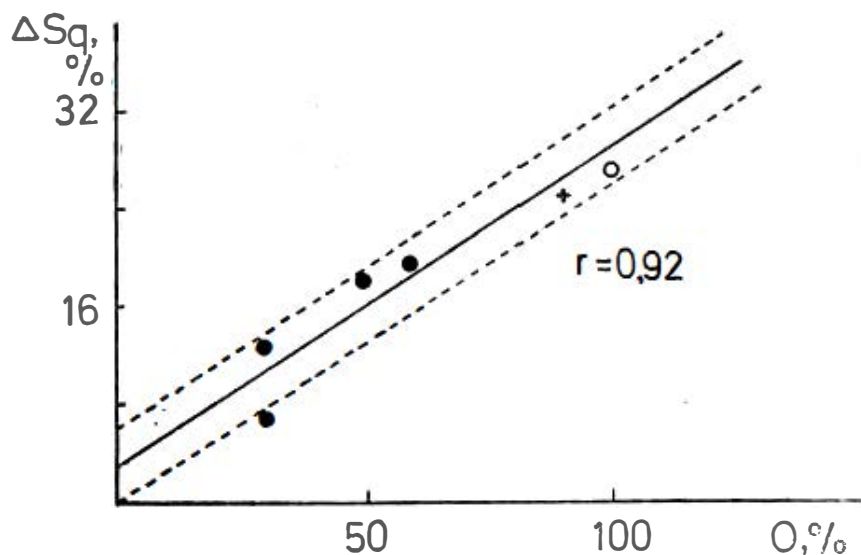
El gráfico de la variación del paso diario (en %) contra el porcentaje de oscurecimiento (0) reportado en La Habana para los eclipses mencionados y para el eclipse anular del 23 de noviembre de 1965 (según los datos de Bangkok) se muestra en la Fig. 3. Para estos puntos, empleando el método de los mínimos cuadrados, se obtiene la relación:

$$S_q = 0,26 \quad 0 + 3 \quad r = 0,92$$

$$S_y = \pm 3 \%$$

El valor extrapolado a partir de esta relación, para un 100 % de oscurecimiento, difiere sólo en un 3 % del calculado teóricamente por Chapman para la capa E, según puede observarse en la Fig. 3.

Además del efecto producido por el eclipse sobre la variación S_q , es de esperar que en el momento de la llegada de la sombra a una zona determinada de la ionosfera, se produzca una variación geomagnética de tránsito, análoga a la que se produce al cerrar un circuito eléctrico,



- Eclipse (Habana)
- + Eclipse (Bangkok)
- Valor calculado por Chapman (teórico)

FIG. 3. Relación entre la variación del paso diario (ΔS_q) y el porcentaje de oscurecimiento (0) reportado en La Habana para los eclipses del 10 de agosto de 1972, 24 de diciembre de 1973, 13 de diciembre de 1974, y 12 de octubre de 1977, y para el eclipse anular del 23 de noviembre de 1965 (según datos de Bangkok).

lo que en este caso corresponde al surgimiento del sistema dipolar adicional de corrientes.

Para estimar la forma de esta variación fueron empleadas las expresiones obtenidas por ABRAMOV y ALPEROVICH (1970) para el cálculo del campo magnético anómalo en la superficie terrestre, en fracciones del campo magnético horizontal no perturbado (H_0):

$$h'_r = (H_r - H_{0r})/H_0 = (2a/\Delta) \{ [2\rho_0(\rho_0 + \rho_1) - \Delta] \sin \theta - M \} \times \\ \times [r^{-1} I(1,1, -1, r, z) - I(1,0,0, r, z)] \quad (1)$$

siendo $M \stackrel{\text{def}}{=} 2\rho_0(\delta_0 - \delta_1) \cos \theta$

$$h'_\theta = (H_\theta - H_{0\theta})/H_0 = -r^{-1} (2a/\Delta) \{ [2\rho_0(\rho_0 + \rho_1) - \Delta] \cos \theta + N \} \times \\ \times I(1,1, -1, r, z) \quad (2)$$

siendo $N \stackrel{\text{def}}{=} 2\rho_0(\delta_0 - \delta_1) \sin \theta$

donde: $I(\mu, \nu, p, r, z) = \int \lambda^\mu J_\nu(a\lambda) J_\nu(r\lambda) \exp(-\lambda z) d\lambda$

H_0 – intensidad del campo magnético horizontal no perturbado,

H_{0r} y $H_{0\theta}$ – componentes radial y azimutal del campo magnético, lejos de la sombra,

$$\rho_{0,1} = \frac{\Sigma_{0,1}}{(\Sigma_{0,1})^2 + (G_{0,1})^2} \quad \delta_{0,1} = \frac{G_{0,1}}{(\Sigma_{0,1})^2 + (G_{0,1})^2}$$

$\Sigma_{0,1}$, $G_{0,1}$ – conductividades de Pedersen y de Hall fuera y dentro (0,1) de la sombra,

$$\Delta = (\rho_0 + \rho_1)^2 + (\delta_0 - \delta_1)^2$$

a – radio de la sombra a la altura de la ionosfera.

En este trabajo se asume que las conductividades de Pedersen y de Hall, dentro y fuera de la sombra, cumplen las siguientes relaciones:

$$\frac{G_1}{\Sigma_1} = 1 \quad , \quad \frac{G_0}{\Sigma_1} = \frac{\Sigma_0}{\Sigma_1} = 2 \quad (3)$$

lo cual equivale a considerar que los valores de las conductividades de Pedersen y de Hall fuera de la sombra, son el doble de los valores correspondientes dentro de ella. En las expresiones arriba relacionadas puede verse que la conductividad de Hall contribuye sensiblemente a la variación en magnitud y dirección del campo geomagnético.

Utilizando las condiciones (3), las expresiones (1) y (2) se convierten en:

$$h'_r = [0,4 \cos \theta - 0,8 \sin \theta] [(r/a)^{-1} I(1,1, -1,r,z) - a I(1,0,0,r,z)] \quad (4)$$

$$h'_\theta = (r/a)^{-1} [0,8 \cos \theta + 0,4 \sin \theta] I(1,1 - 1,r,z) \quad (5)$$

Para la determinación de los valores de $I(\mu, \nu, p, r, z)$, tabulados por EASON *et al.* (1955), se tomó la relación de la altura Z de la capa portadora de corriente al radio de la sombra, igual a 0,2. Como $Z \approx 100$ km para la capa E, entonces el radio de la sombra sería ~ 500 km.

A pesar de que durante el eclipse del 7 de marzo de 1970 nuestras estaciones se encontraban en la zona de penumbra, el alto grado de oscurecimiento alcanzado y el decrecimiento de la concentración electrónica, del orden del 25 % durante el máximo (RANGASWAMY y SCHMIDT, 1971), debían provocar una variación considerable de la conductividad y, por consiguiente, influir notablemente sobre el campo geomagnético. Por ello se calculó la variación de tránsito de éste, utilizando las expresiones (4) y (5), para diferentes valores de r/a y del ángulo θ .

Las Figs. 4 y 5 muestran, en unidades relativas, los valores de la variación de las componentes NS (Fig. 4) y EW (Fig. 5), calculados para la estación "Centro Geofísico" (San José de las Lajas), asumiendo un radio de 500 km para la sombra. Al mismo tiempo, se muestran las variaciones

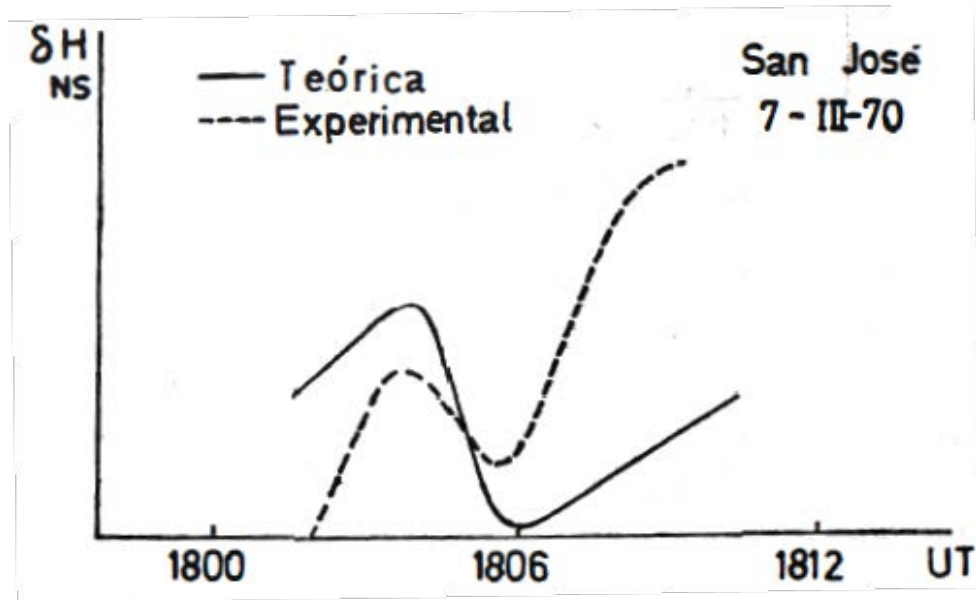


FIG. 4. Comparación de la variación temporal de la componente NS, registrada en la Estación "Centro Geofísico" (línea discontinua) durante el eclipse del 7 de marzo de 1970, con la variación calculada según el modelo teórico (línea continua).

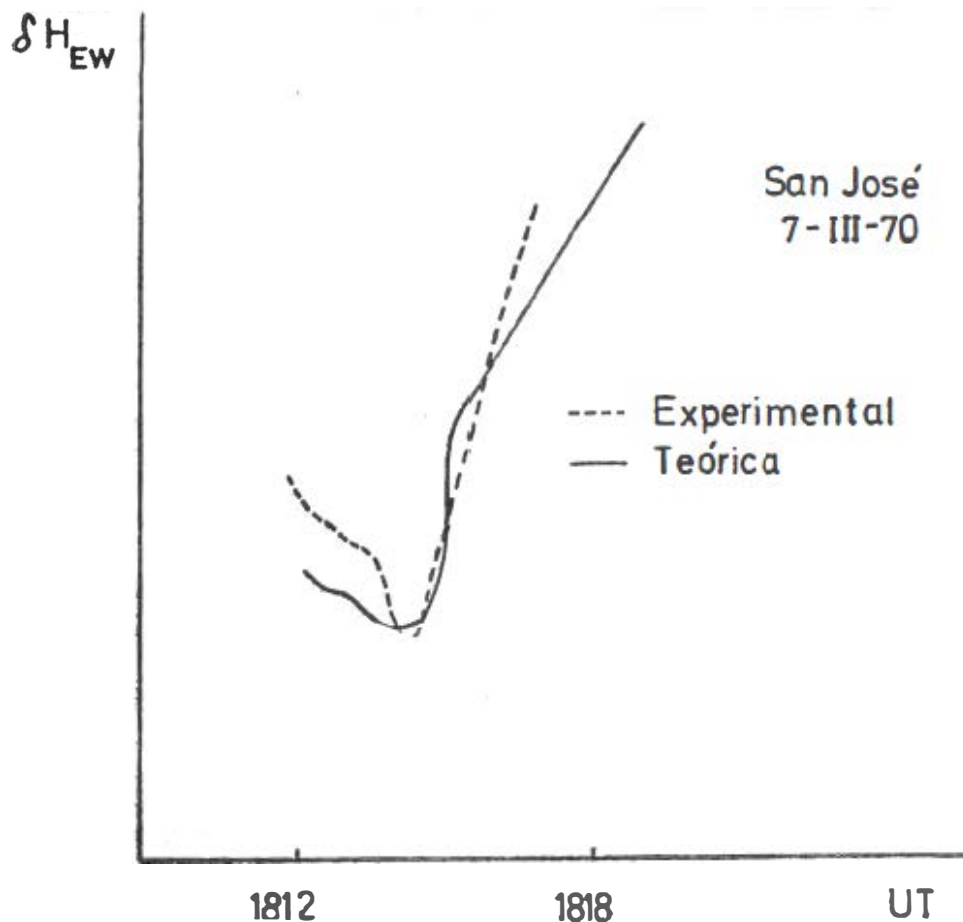


FIG. 5. Comparación de la variación temporal de la componente EO, registrada en la Estación "Centro Geofísico" (línea discontinua) durante el eclipse del 7 de marzo de 1970, con la variación calculada según el modelo teórico (línea continua).

determinadas experimentalmente en la propia estación. Aunque las unidades de las curvas experimentales no son compatibles con las de las curvas teóricas, se puede apreciar una gran similitud morfológica entre ambas.

En la Fig. 6 se compara la variación calculada teóricamente para la componente NS en el punto situado en $\varphi = 40^{\circ} 23' N$, y $\lambda = 74^{\circ} 7' W$, con los resultados experimentales extraídos del magnetograma de la estación situada en Crawford Hill durante este eclipse (LANZEROTTI *et al.*, 1971). Las curvas teórica y experimental presentan una gran semejanza morfológica, aunque están graficadas en unidades no compatibles.

Si se realiza el cálculo de la variación de tránsito ocasionada por el eclipse, escogiendo intervalos de tiempo suficientemente pequeños, apa-

recen fluctuaciones de bajo período asociadas a las funciones armónicas contenidas en las expresiones (4) y (5). Estas oscilaciones podrían considerarse como las fluctuaciones propias del tránsito surgido como consecuencia de la "conexión" del sistema dipolar adicional de corrientes antes mencionado. En la Fig. 6 se muestran, en línea de puntos, las fluctuaciones alrededor del valor medio de la variación de tránsito, calculadas para Crawford Hill, con una resolución temporal de 5 s. Estas fluctuaciones presentan un período de 45 s desde las 18:18 UT hasta las 18:20 UT, momento en que comienzan las fluctuaciones con $T \approx 19$ s de una amplitud de ~ 400 m γ .

En los momentos en que ocurren estas fluctuaciones de 19 s, calculadas para la región de Crawford Hill, se registraron en "Soroa" pulsaciones de 18 s con una amplitud de ~ 200 m γ , lo que constituye una evidencia, si bien no concluyente, al menos a favor de la generación de pulsaciones geomagnéticas como consecuencia del comportamiento de tránsito de la ionosfera durante un eclipse solar.

Con el objeto de ampliar este análisis, se realizó el cálculo teórico de las fluctuaciones para la estación "Soroa", empleando la misma reso-

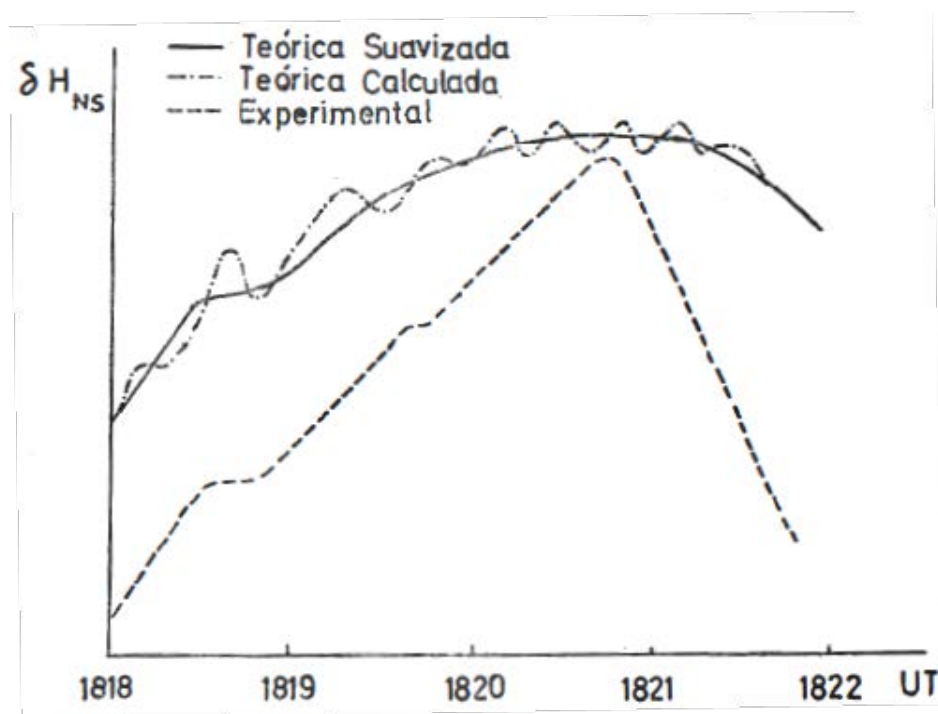


FIG. 6. Comparación de la variación temporal de la componente NS, registrada en Crawford Hill (LANZEROTTI *et al.*, 1971) (línea discontinua) durante el eclipse del 7 de marzo de 1971, con la variación calculada según el modelo teórico (línea continua). Superpuesta a esta última se muestra la variación calculada para intervalos de 5 s.

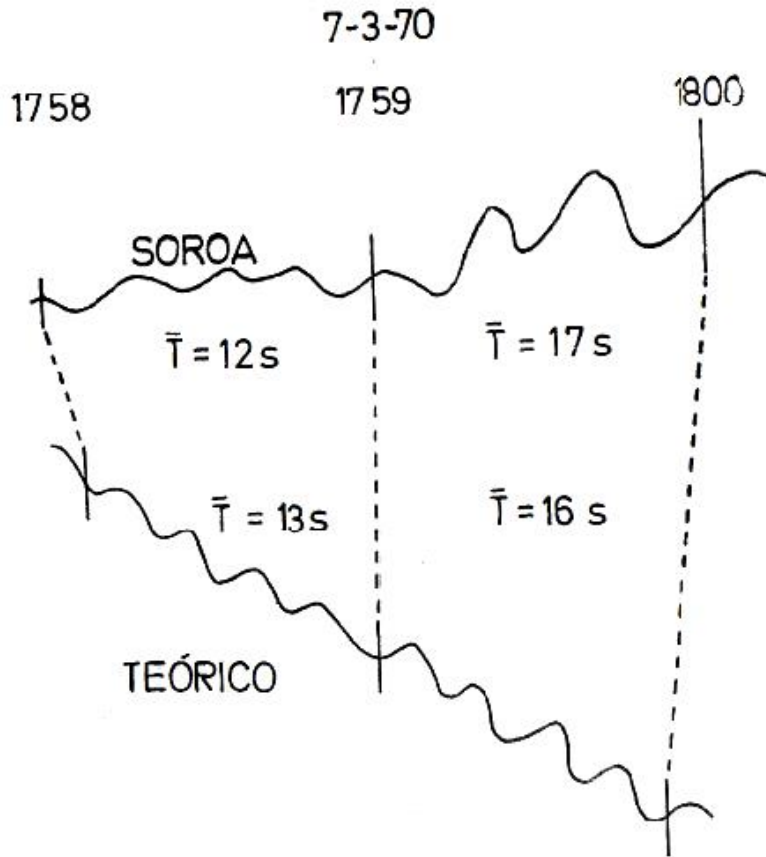


FIG. 7. Pulsaciones de la componente NS registradas en la estación de "Soroa" (Cuba) y fluctuaciones de corto período calculadas según el modelo teórico.

lución temporal antes mencionada, obteniéndose para las 17:58 UT y 17:59 UT fluctuaciones con períodos de 13 s y 16 s, respectivamente, mientras que en la estación fueron registradas pulsaciones de 12 s y 17 s sucesivamente, según se muestra en la Fig. 7.

La notable coincidencia entre las fluctuaciones obtenidas al calcular la variación de tránsito producida por el surgimiento rápido del sistema adicional de corrientes y las pulsaciones registradas experimentalmente, plantea la necesidad de realizar un estudio más detallado sobre este particular, empleando datos procedentes de varias estaciones, que permitan establecer el posible carácter regional de las pulsaciones.

4. CONCLUSIONES

Existe evidencia experimental a favor de tres clases diferentes de variaciones del campo geomagnético provocadas por un eclipse solar: (1) la variación de la amplitud del paso diario (S_q) durante todo el eclipse (efecto del régimen estacionario del sistema de corrientes adicional), (2) la variación inicial de tránsito del paso diario (efecto del régimen de tránsito), y (3) la aparición de variaciones rápidas (pulsaciones) como fluctuaciones del tránsito.

Los resultados obtenidos permiten relacionar las variaciones del paso diario (S_q) durante un eclipse solar con la disminución de la conductividad en la capa E de la ionosfera, provocada por el apantallamiento de las radiaciones ionizantes.

Aun cuando las variaciones de corta duración no son de gran magnitud y constituyen un efecto de segundo orden con respecto a las variaciones de la amplitud del paso diario, pueden determinarse en los casos de eclipses con alto grado de oscurecimiento, incluso en condiciones de campo magnético relativamente perturbado.

La coincidencia obtenida entre las fluctuaciones calculadas y las pulsaciones registradas apoya la utilización de un modelo sencillo, tal como el establecimiento de un sistema dipolar adicional de corrientes, para describir los efectos de los eclipses solares sobre el campo geomagnético, inclusive en el rango de las pulsaciones. Además, brinda un posible mecanismo de generación de pulsaciones en la ionosfera, el cual, aunque no puede considerarse definitivamente establecido y necesita mayor evidencia experimental, explica satisfactoriamente los efectos detectados.

RECONOCIMIENTO

Los autores desean agradecer al compañero Jorge Pérez Doval, del Departamento de Astronomía del Instituto de Geofísica y Astronomía, el habernos facilitado amablemente los datos relativos a los eclipses solares.

REFERENCIAS

- ABRAMOV, L. A., y ALPEROVICH, L. S. (1970): Evaluación de la influencia de las inhomogeneidades locales sobre el sistema de corrientes ionosféricas. *Kosmicheskie Issledovania*, 8(1):80-84.
- ABRAMOV, L. A., ALPEROVICH, L. S., y VANIAN, L. L. (1970): Evaluación de la influencia de las inestabilidades ionosféricas en un sistema de corrientes de tipo dipolar. *Geomagnet. Aeron.*, 10(6):1009-1018.
- BAUER, L. A. (1900): Résumé of magnetic observations made chiefly by the United States Coast and Geodetic Survey on the day of the total solar eclipse, May 28, 1900. *Terrest. Magnet. Atmosph. Electr.*, 5:143-165.
- (1902): Results of international magnetic observations made during the total eclipse of May 18, 1901, including results obtained during previous solar eclipse. *Terrest. Magnet. Atmosph. Electr.*, 7:155-192.
- (1920): Results and analysis of magnetic observations during the solar eclipse of May 29, 1919. *Terrest. Magnet. Atmosph. Electr.*, 25:81-98.

- CHAPMAN, S. (1933): The effect of solar eclipse on the earth's magnetic field. *Terrest. Magnet. Atmosph. Electr.*, 38:175-183.
- CHAPMAN, S., y BARTELS, J. (1940): *Geomagnetism*. Oxford Univ. Press, Clarendon, 1049 pp.
- CHIMONAS, O. (1970): Internal-gravity waves motions induced in the earth's atmosphere by a solar eclipse. *J. Geophys. Res.*, 75(28):5545-5551.
- EASON, G., NOBLE, B., y SNEDDON, I. N. (1955): On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel Functions. *Phil. Trans. Roy. Soc. London., A*, 247(935):529.
- HENRIQUEZ, V. B., HERNÁNDEZ, A. M., y VEGA, M. E. (1977): Clasificación morfológica de la variación solar diaria del campo geomagnético en días tranquilos (Sq) en Cuba para 1965. *Inf. Cien. Téc.*, 27:1-6.
- KATO, Y. (1965a): The effect on the geomagnetic micropulsations of the solar eclipse of 20 July, 1963. *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, 5ta ser., 16:49-62.
- (1965b): The effect on the geomagnetic field of total solar eclipse of 5 February, 1962, and the corpuscular eclipse of the solar corpuscular beam on the surface on the boundary of geomagnetic cavity. *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, 5ta ser., 16:63-77.
- LANZEROTTI, J. L., MAC LENNAN, C. G., MEDFORD, L. V., y TARTAGLIA, N. A. (1971): Midlatitude geomagnetic pulsations during the march 7, 1970, solar eclipse. *J. Geophys. Res.*, 76(16):3684-3691.
- MATSUSHITA, S. (1967): *Physics of geomagnetic phenomena*. Academic Press, Nueva York, vol. 1, 1398 pp.
- NAGATA, T., NAKATA, Y., RIKITAKE, T., y YOKOYAMA, I. (1955): Effect of the solar eclipse on the lower parts of the ionosphere and the geomagnetic field. *Rep. Ionosph. Res. Japan.*, 9:121-135.
- NORDMAN, C. (1907): Contribution to the study of the effects produced on the magnetic declination by the total solar eclipse of August 30, 1905. *Terrest. Magnet. Atmosph. Electr.*, 12:15-26.
- RANGASWAMY, S., y SCHMIDT, P. E. (1971): Measurement of TEC with a geostationary satellite during the solar eclipse of March 7, 1970. *Radio Sci.*, 6(8-9):769-773.
- TAUER, J. (1964): A hidromagnetic model of the solar eclipse effect on the diurnal variation of the geomagnetic field. *Studia Geophys. Geod.*, 8(3):314-316.
- VAN DER LAAN, J. E. (1970): Ionospheric and magnetic observations during the annular solar eclipse of November 23, 1965. *J. Geophys. Res.*, 75(7):1312-1318.

ABSTRACT

Geomagnetic variations observed during five solar eclipses have been studied, a good empirical relation between the daily variation amplitude and the percentage of maximal darkening was determined.

The magnetic field variations for station "Centro Geofísico" (Cuba), and for Crawford Hill (U.S.A.), were calculated through a theoretical model, and a satisfactory agreement with the experimental data was obtained. Higher time resolution theoretical calculations allowed the prediction of field fluctuations in the range of geomagnetic pulsations. Such pulsations were found in the Soroa station magnetograms for the predicted time intervals. Observed differences between theoretically predicted periods and the observed ones fall within experimental error.

Three different geomagnetic variations: (1) amplitude changes in the daily variation, (2) transient changes, and (3) transient fluctuations, are observed during eclipses. An explanation of these effects according to a theoretical model is proposed.

CDU 581.82:550.385.001.32