

Influencia de la capa Es de la ionosfera en las Pi2 de latitudes medias*

**Arturo D' COSTA, **Lourdes PALACIO,
***Fidel RODRÍGUEZ,
y ***Guillermo PÉREZ

RESUMEN. *Se analiza la relación entre las pulsaciones geomagnéticas Pi2 y la capa Es esporádica de la ionosfera, a partir de casos seleccionados, en que estas pulsaciones se registraron en los mismos intervalos de tiempo en las estaciones cubanas de Soroa (Pinar del Río) y Río Carpintero (Santiago de Cuba). Se les determinó el espectro de potencia por el método de máxima entropía, la curva de correlación cruzada y las hodógrafas de polarización y fase. Con la muestra escogida se determinó que algunas pulsaciones se registraban simultáneamente en ambas estaciones y otras no. Se comprobó que en el caso de simultaneidad no se observan capas esporádicas de la ionosfera o variaban poco sus parámetros característicos. Los casos de no coincidencia vienen acompañados de aparición y desaparición de capas Es, o de máximas en los valores de fbEs y FoEs. Se analiza también la influencia que ejerce la capa Es en la polarización de las Pi2, y se comprueba que el desarrollo de las hodógrafas es diferente cuando varían los parámetros de esta capa ionosférica. Se propone una interpretación preliminar de este efecto basada en el aumento de la conductividad de Hall a la altura de la capa E de la ionosfera.*

INTRODUCCIÓN

La influencia de la ionosfera en la propagación de las pulsaciones geomagnéticas ha sido poco estudiada. Fundamentalmente, se han determinado dos efectos de la ionosfera sobre dichas pulsaciones: la rotación en 90° de la elipse de polarización a consecuencia de la conductividad de la ionosfera diurna (ANDREWS *et al.*, 1979) y la amortiguación de las pulsaciones al atravesar la ionosfera (NEWTON *et al.*, 1978; MALTSEV y LEONTIEV, 1977; SAKA *et al.*, 1980).

GUTMAN *et al.* (1979) estudiaron teóricamente la posible influencia de la capa E

esporádica sobre las pulsaciones geomagnéticas de largo período y evaluaron sus resultados para condiciones diurnas y latitudes geográficas superiores a las de Cuba.

Existen registros de dos estaciones cubanas, de latitud geomagnética aproximadamente del orden de los 34°, entre las cuales no es necesario considerar diferencias debi-

*Manuscrito aprobado en abril de 1986.

**Instituto de Geofísica y Astronomía, Academia de Ciencias de Cuba.

***Instituto Superior Pedagógico "Enrique José Varona", MINED.

das a influencias de la plasmapausa, dada su cercanía y su distribución casi a lo largo de un paralelo geomagnético, en los cuales las pulsaciones se presentan en un fondo tranquilo, debido a su lejanía de la zona auroral. Esto permitió estudiar los efectos de la capa

E esporádica (Es) sobre las pulsaciones geomagnéticas. En particular, se analiza esta influencia en las Pi2 registradas en horas de la noche, cuando, por ser baja la conductividad de la ionosfera, la presencia de una capa Es es más significativa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron los magnetogramas obtenidos simultáneamente en las estaciones cubanas de Soroa ($\varphi = 22^{\circ}47'N$, $\lambda = 83^{\circ}W$) y Río Carpintero ($\varphi = 19^{\circ}59'N$, $\lambda = 75^{\circ}42'W$), de septiembre de 1977, a junio de 1978. Las características de frecuencia de ambas estaciones eran muy similares y se hicieron las correcciones de tiempo necesarias para garantizar la simultaneidad de los registros comparados.

Se seleccionaron para el estudio pulsaciones irregulares con períodos entre 30 y 150 seg, registradas en momentos en que se tuviesen señales de las componentes NS y EW de ambas estaciones para poder estudiar la polarización de las señales. Se tuvo en cuenta en la selección del material experimental que no hubiese dudas en la clasificación de las señales como pulsaciones irregulares. De esta selección se escogieron 30 casos, de los

cuales la mitad ocurriesen antes de la medianoche local de ambas estaciones y la otra mitad después.

A todas las señales escogidas se les determinó el espectro de potencia por el método de máxima entropía, se filtró cada señal por un filtro de ancho de banda no mayor a 15 seg alrededor de su máximo espectral y se obtuvieron sus hodógrafas de polarización. También se obtuvieron elipses con las señales NS de ambas estaciones y con las EW, que hemos denominado elipse de fase (D'Costa *et al.*, en prensa).

Con las elipses de polarización y fase se determinaron los retrasos de fase de las componentes para cada estación y de las estaciones para cada componente, según el método propuesto por D'Costa *et al.* (en prensa) a partir de la expresión:

$$\cos \phi = \frac{\text{sen } 2\theta}{2} \left\{ \frac{a^2 - b^2}{[(a^2 \text{ sen}^2 \theta + b^2 \text{ cos}^2 \theta) (b^2 \text{ sen}^2 \theta + a^2 \text{ cos}^2 \theta)]^{1/2}} \right\}$$

donde:

ϕ , retraso de fase

a , semieje mayor de la elipse

b , semieje menor de la elipse

θ , ángulo formado por el eje mayor de la elipse y el eje horizontal.

También se calcularon las funciones de correlación cruzada entre ambas estaciones

para cada componente de las Pi2 escogidas. Toda esta elaboración se realizó con la ayuda de programas preparados en idioma Basic para microprocesadores NEC.

Para todos los casos estudiados se analizó el estado de las capas F y Es de la ionosfera, y se determinaron los parámetros foF2, h'F2, foEs, fbEs y h'Es, a partir de los ionogramas registrados en la estación "Centro Geofísico" ($\varphi = 22^{\circ}58'N$, $\lambda = 82^{\circ}09'W$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para todos los casos estudiados se obtuvieron las funciones de correlación cruzada entre las dos estaciones para cada componente, los espectros dinámicos de todas las componentes, la hodógrafa de polarización y la hodógrafa de fase.

Se encontró que, en la mayoría de los casos, las Pi2 registradas en las estaciones Soroa y Río Carpintero podían considerarse simultáneas dentro del nivel de error en la determinación del tiempo (4 seg), pero en algunos casos se obtuvieron diferencias notables en las correlaciones cruzadas y las hodógrafas. Estos casos de Pi2 con registros no simultáneos en ambas estaciones se observaron independientemente de la posición de ambas estaciones respecto al meridiano de la medianoche.

Se analizaron los casos de Pi2 registradas simultáneamente en ambas estaciones y se obtuvo que la propagación aparente de una a otra estación tenía el sentido de alejarse del meridiano de la medianoche. Un ejemplo de este tipo de caso lo constituye la Pi2 registrada el 15 de septiembre de 1977, a las 0742 UT. La Fig. 1A muestra los retrasos de fase de la componente NS respecto de la EW en ambas estaciones, y la 1B el retraso de fase de ambas componentes en la estación Soroa. De la figura es evidente la gran similitud en las curvas que señalan la variación sufrida por el retraso de fase de la componente NS en ambas estaciones y por la señal de Soroa en ambas componentes. Este comportamiento similar de las curvas de retraso de fase se obtuvo en todos los casos para los cuales los demás métodos para determinar la diferencia en la hora de llegada a ambas estaciones arrojaban valores dentro del error experimental, como puede verse en la Fig. 2. La Fig. 2A muestra los espectros dinámicos de la componente NS de esta Pi2 en las dos estaciones cubanas, donde se nota la total coincidencia en tiempo de ambos espectros. La Fig. 2B muestra la función de correlación

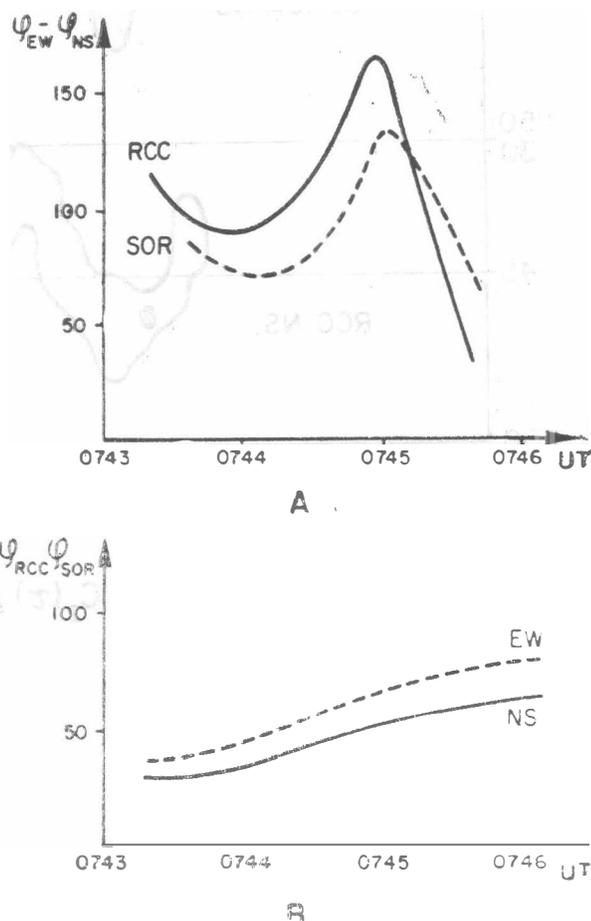


Fig. 1. Retraso de fase de la componente NS (A) y de los componentes de la estación Soroa (B), para la Pi2 registrada el 15 de septiembre de 1977, a las 0742 TU.

cruzada entre estas componentes, dando un máximo en los 4 seg, lo que coincide con el error experimental en la determinación del tiempo.

A las Pi2 registradas en Soroa y Río Carpintero, con características similares a las mencionadas para el caso del 15 de septiembre de 1977, a las 0742 UT, las llamaremos simultáneas.

Se presentaron también casos de pulsaciones no simultáneas, es decir, con características diferentes a las arriba presentadas.

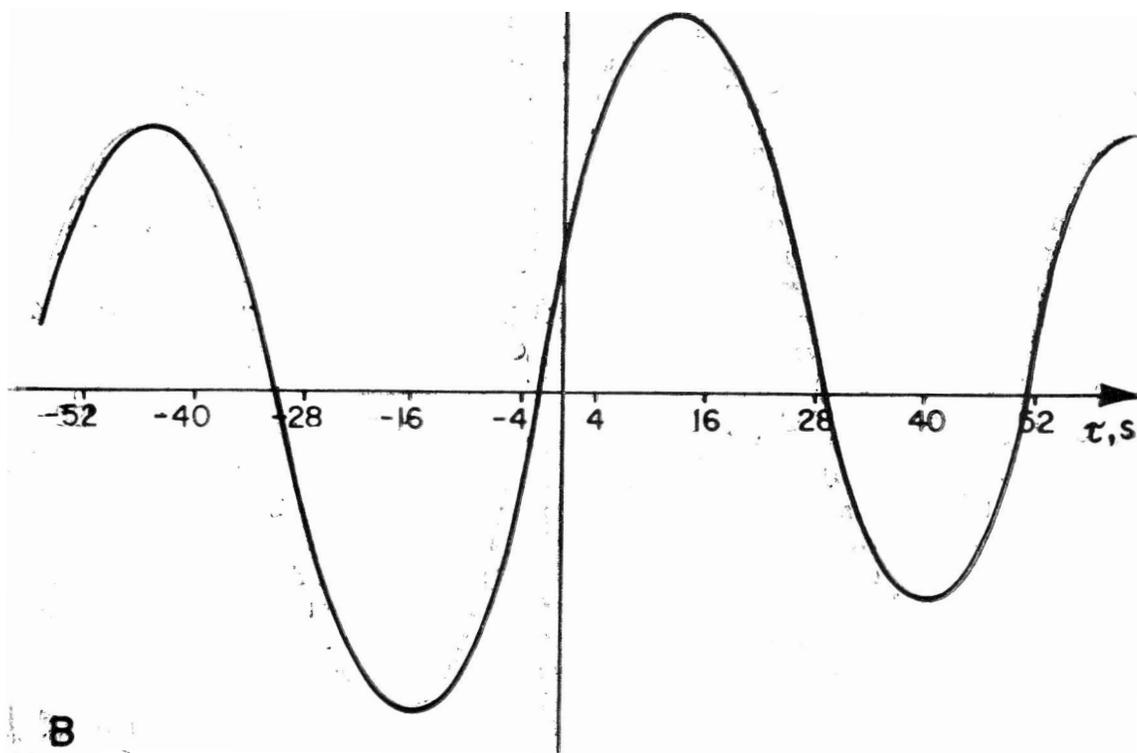
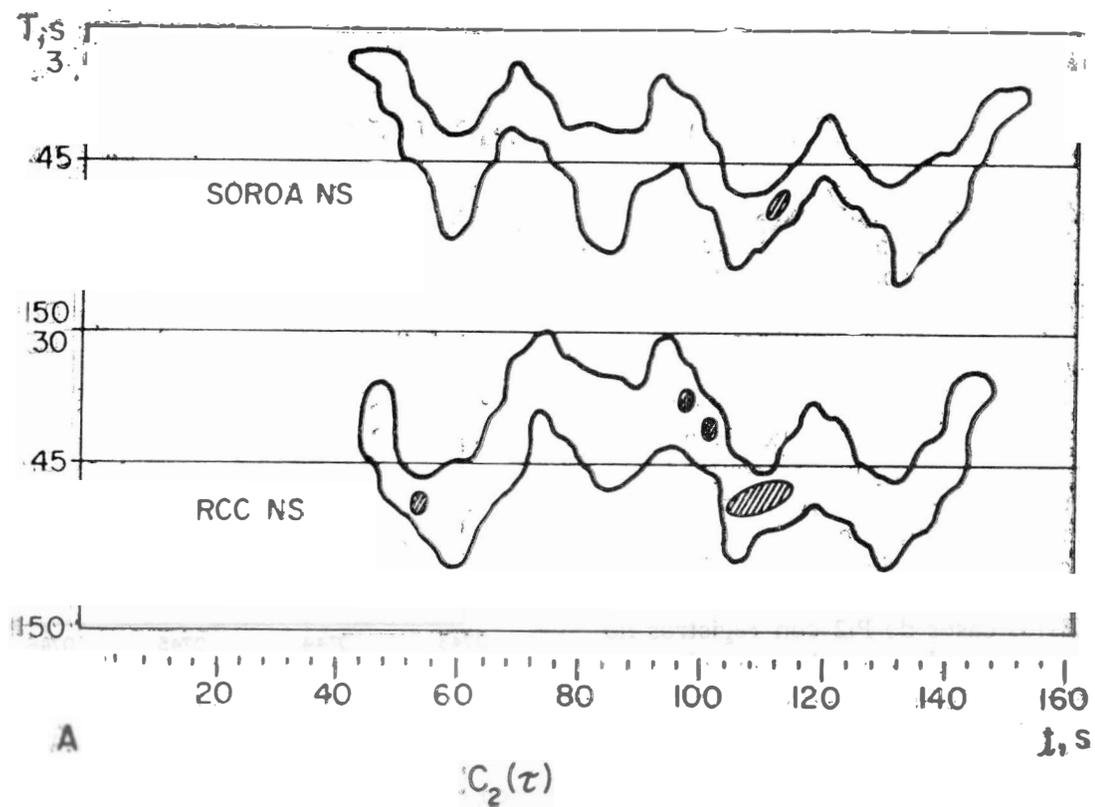


Fig. 2. a) Espectros dinámicos de la componente NS (A) y función de correlación cruzada de la componente NS (B), de la Pi_2 registrada en Soroa y Río Carpintero el 15 de septiembre de 1977, a las 0742 UT.

Un ejemplo de Pi2 no simultánea lo constituye la pulsación registrada el día 13 de septiembre de 1977, a las 0717 UT. La Fig. 3 muestra las señales registradas en Soroa y Río Carpintero y el retraso de fase de la componente NS respecto de la EW en ambas estaciones. Es evidente que las curvas de la Fig. 3B tienen curvaturas opuestas, a diferencia de lo observado en las curvas de la Fig. 1A. Esta diferencia de curvatura en las curvas de retraso de fase caracteriza las pulsaciones no simultáneas.

Los casos de Pi2 simultáneas se registran en momentos en que el estado de la ionosfera no mostraba alteración, no se observaban capas esporádicas, o, en caso de observarse, la fbEs se mantenía baja y constante.

Las Pi2 no simultáneas, por el contrario, coincidieron con la aparición y desaparición de capas Es y con máximos en los valores de fbEs y foEs.

La Fig. 4 muestra las variaciones de las frecuencias de apantallamiento y límite de la capa Es (fbEs y foEs), la frecuencia crítica y la altura virtual de la capa F2 (foF2 y h'F2). De la figura es evidente que a las 0715 UT, coincidiendo con la Pi2 antes mencionada, señalada con una saeta, se observa un aumento en los parámetros de frecuencia de la capa Es, más marcadamente en foEs, sin que haya variaciones significativas en la capa F2.

Dos casos de interés se registraron los días 11 y 12 de septiembre de 1977, en los cuales se estudiaron trenes de Pi2 que comenzaban antes del aumento de la fbEs y terminaban después de haber retornado este parámetro a su valor medio nocturno. La Fig. 5 muestra una superposición de los valores de fbEs para los intervalos analizados y las variaciones del defasaje de la componente NS respecto de la EW en los registros de las estaciones Soroa y Río Carpintero. Es evidente que cuando fbEs variaba poco alrededor de su valor medio, los defasajes evolucionaban igual en ambas estaciones (pulsaciones 3, 4, y 5 del día 12, y 1, 2, y 4 del día

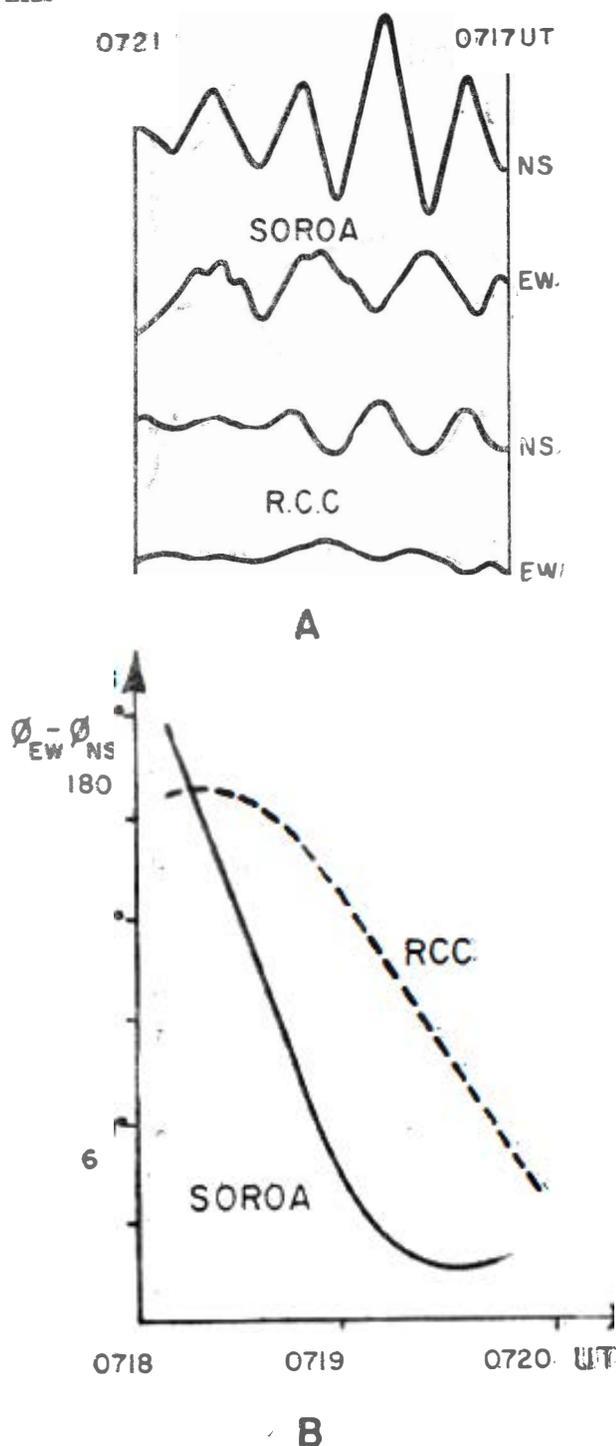


Fig. 3. Pi2 registrada en Soroa y Río Carpintero (RCC) el 13 de septiembre de 1977, a las 0717 UT (A) y sus correspondientes variaciones de retraso de fase de las componentes NS (B).

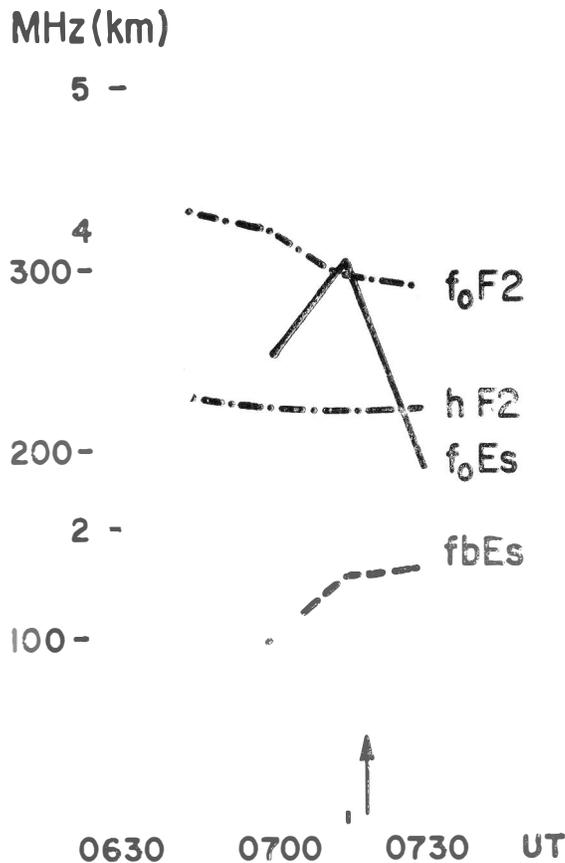


Fig. 4. Variación de las características de la ionosfera el 13 de septiembre de 1977, de 0645 a 0730 UT.

11), mientras que al aumentar fbEs el retraso de la componente NS en Soroa aumentaba y en Río Carpintero disminuía (pulsaciones 1 y 2 del día 12, y 3 del día 11).

Esta influencia de las capas esporádicas sobre la polarización de las Pi2 se observó sólo cuando la capa F mostraba un comportamiento no perturbado, ya que en casos de alteración de la capa F, las Pi2 registradas presentaban superpuesto un ruido de fondo que no permitía la elaboración de la pulsación con la precisión requerida.

En un estudio estadístico de la polarización de las Pi2 registradas en Soroa y Río Carpintero, se encontró que, en un elevado porcentaje, estas señales presentan sentido de giro (levogiro) contrario al movimiento

de las manecillas del reloj (D'Costa *et al.*, en prensa), y, además, que la elipse de polarización evoluciona durante el desarrollo de la pulsación de forma que su eje mayor cambia su inclinación de la dirección NE inicial a NW al final, o viceversa (D'Costa *et al.*, en prensa). Este cambio de inclinación del eje implica, como se señala en este trabajo, un aumento o disminución, respectivamente, del retraso de fase de la componente NS. En los casos de Pi2 registradas simultáneamente en Soroa y Río Carpintero hemos visto con anterioridad (Fig. 1A) que el retraso de fase evoluciona igual en ambas estaciones; no así en el caso de las no simultáneas, donde el retraso de fase va disminuyendo en la estación que se encuentra debajo de la capa Es.

Esta acción de la capa esporádica sobre la polarización de las pulsaciones puede explicarse analizando los efectos de los aumentos de la conductividad de Hall (ya que las Es consideradas se encontraban a 100 km de altura), que provocan un aumento de la com-

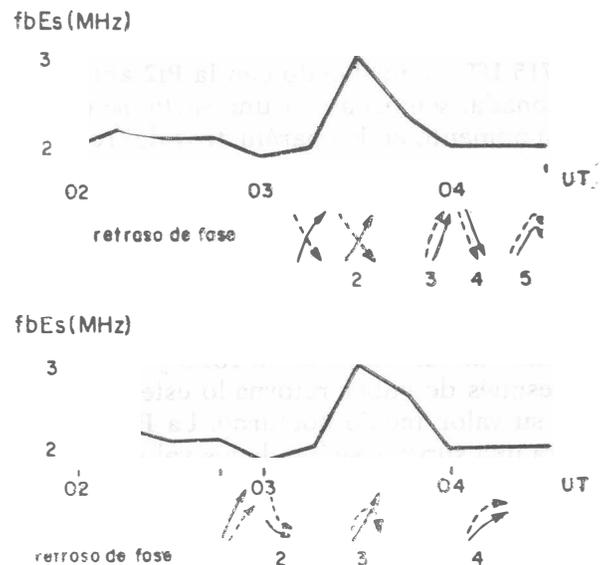


Fig. 5. Comparación de las variaciones de fbEs con la evolución del retraso de fase de la componente NS en Soroa (saeta discontinua) y Río Carpintero (saeta continua) para trenes de Pi2, los días 11 (abajo) y 12 (arriba) de septiembre de 1977.

ponente NS que viene dada por la fórmula (GUTMAN *et al.*, 1979):

$$\delta = \frac{|b_{YT}|}{\sqrt{b_{XM}^2 + b_{YM}^2}}$$

donde b_{YT} es la componente NS de la perturbación en la superficie terrestre y b_{XM} y b_{YM} son las componentes EW y NS de la perturbación a la altura de la magnetosfera, respectivamente.

El valor de b_{YT} viene dado por la expresión:

$$b_{YT} = \frac{\Sigma_P + iY}{\Sigma_P^2 + Y^2} X$$

donde: $Y = 4 \pi \omega \text{ sen}^2 I c^{-2} (\Sigma_H' \Sigma_H - \Sigma_P' \Sigma_P)$

$$X = \Sigma_H b_{XM} \text{ sen } I + \Sigma_P b_{YM}$$

$$\Sigma_H = \int \sigma_H dZ$$

$$\Sigma_H' = \int \sigma_H Z dZ$$

$$\Sigma_P = \int \sigma_P dZ$$

$$\Sigma_P' = \int \sigma_P Z dZ$$

σ_H y σ_P son las conductividades de Hall y Pedersen, respectivamente; I inclinación del vector de campo magnético. Evaluando para condiciones nocturnas la relación entre la delta calculada por GUTMAN *et al.* (1979) y el valor de ese mismo índice calculado para las Pi2 estudiadas δ_c , se obtiene:

$$\delta_c = D\delta$$

ya que en Cuba la inclinación magnética $I = 54^\circ$ y ω (Pi2) = 0,02 seg^{-1} . Estas evaluaciones teóricas explican las causas por las que ha sido posible detectar estas alteraciones de las Pi2 debidas a las variaciones de fbEs en los registros de estaciones cubanas (de latitudes medias), en las cuales, al presentarse un fondo tranquilo en comparación con las estaciones subaurorales y aurorales, son mucho mayores los efectos de las capas esporádicas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados mostrados evidencian una clara influencia de la capa E esporádica sobre los defasajes de las componentes de las pulsaciones geomagnéticas tipo Pi2. Esta relación debe tenerse en cuenta para los estudios de la propagación de este tipo de pulsaciones y para la comparación de magnetogramas de diferentes estaciones.

Aunque la influencia de la capa Es ha sido demostrada en este trabajo, se requiere un estudio de mayor número de casos para tratar de establecer alguna relación entre los parámetros que caracterizan las Pi2 y las capas Es.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen la desinteresada y valiosa colaboración en este trabajo del Lic. Juan Pérez Hernández, quien, además, nos facilitó los programas de filtros digitales y

de espectros por el método de máxima entropía, confeccionados por él para microprocesador NEC.

REFERENCIAS

Andrews, M. K., L. J. Lanzerotti, y C. G. MacLennan (1979): Rotación de las ondas hidromagnéticas

entre la magnetosfera y la tierra. *J. Geophys. Aeron.*, 84A(12):7267-7270.

- D'Costa, A., F. Rodríguez, G. Pérez, y L. Gil [en prensa]: Variación de las elipses de polarización durante el desarrollo de una pulsación geomagnética tipo Pi2. *Orbita Cient.*, MINED, ISPEJV, Cuba.
- Gutman, L. N., S. P. Charnisheva, y V. M. Sheftel (1979): Capas esporádicas E y pulsaciones geomagnéticas de largo período. *Geomag. Aeron.*, 19(3):556-558.
- Maltsev, Y. P., y S. V. Leontiev (1977): La conductividad de la ionosfera y la amortiguación de las pulsaciones Pi2. *Geomag. Aeron.*, 17(1):142-144.
- Newton, R. S., D. J. Southwood, y W. J. Hughes (1978): Amortiguación de las pulsaciones geomagnéticas por la ionosfera. *Planet. Space. Sci.*, 26(3):201-209.
- Saka, O., T. J. Iijima, y T. Kitamura (1980): Control ionosférico de las micropulsaciones geomagnéticas de baja latitud. *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 42(5):517-520.

INFLUENCE OF THE IONOSPHERIC Es LAYER ON Pi2 PULSATIONS OF MEAN LATITUDES

ABSTRACT. *Relationships between Pi2 geomagnetic pulsations and the ionospheric Es layer are analyzed using magnetograms from two Cuban observatories (Soroa and Río Carpintero) and ionograms obtained at station "Centro Geofísico" (Cuba). Power spectra of the pulsations by the maximum entropy method, their crosscorrelation functions, and ellipses of polarization and phase were calculated for each Pi2 studied. From the chosen sample it was possible to establish that in 90% of the events pulsations were recorded synchronously and in phase at both magnetic observatories, but in the rest of the cases notable difference in arrival time and phase evolution were obtained for Pi2 registered in both stations. During synchronous type signals either ionospheric Es layers were not observed or they were registered with few changes in their characteristic parameters. Nonsynchronous type Pi2 were registered coinciding with starting or ending of Es layers or with a considerable increase in foEs and fbEs values. The influence of the Es layers over the evolution of the polarization of Pi2 pulsations is also analyzed, showing that the development of hodographs is different for pulsations registered at both magnetic observatories when increases of foEs and fbEs occur. A preliminary interpretation of this effect is given, based on Hall conductivity increase at ionospheric E-layer height.*