

DESARROLLO DE UNA TORMENTA IONOSFERICA
ESENCIALMENTE POSITIVA A LO LARGO DE
LA RED SUDAMERICANA DE SONDADORES

Leila Kurbán, Marta Mosert de González y Rogelio Cejas
Centro de Investigaciones Regionales de San Juan (CONICET)
Ana Martínez de Garat y José R. Manzano
Laboratorio de Ionósfera-Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología
Universidad Nacional de Tucumán

RESUMEN

Un mecanismo híbrido ha sido sugerido por diferentes autores para la dinámica de la región F ionosférica por el cual, posteriormente al depósito de energía durante la iniciación de una tormenta magnética, predomina un proceso de transporte meridional de ionización (fase positiva) sobre un mecanismo de cambio de la relación (O/N_2) (fase negativa), generalmente durante el primer día perturbado.

Sin embargo, la tormenta del 4 de abril de 1967 que se comenta en el presente trabajo muestra dos aspectos interesantes: -1) una fase positiva significativa que se extiende por más de dos días a lo largo de la red americana de sondadores; y -2) una posible reversión del mecanismo híbrido, debido al hecho de que excursiones negativas, que aunque menos significativas son aún importantes, siguen a cambios en la actividad magnética.

Las excursiones negativas correlacionan bastante bien con ascensos de la capa F, hecho aparentemente en conflicto con las ideas acerca de la generación de la fase positiva, indicando una predominancia de los cambios en (O/N_2) al menos durante las pocas horas que siguen a cada incremento de la actividad magnética.

ABSTRACT

Different authors have suggested a hybrid mechanism for the dynamics of the F region by which, following the deposit of energy during the initiation of a magnetic storm, a meridional ionization transport process (positive phase) predominates generally over the mechanism of change of the (O/N_2) ratio (negative phase), during the first perturbed day.

Nevertheless, the storm of the 4 of April 1967, commented in this paper, shows two interesting features: -1) a significant positive phase extending for more than two days along the american sounders network; and -2) a possible reversion of the hybrid mechanism, because of the fact that less significant but still important negative excursions follow changes in magnetic activity.

The negative excursions correlate quite well with ascents of the F-layer, this fact being apparently in conflict with the ideas about the generation of the positive phase, indicating a predominance of the (O/N_2) changes at least

during a few hours following each increase in magnetic activity.

INTRODUCCION

La evidencia experimental actual parece conducir a considerar prácticamente como único mecanismo causante de las fases negativas en tormentas ionosféricas, a los cambios en la relación de concentraciones O/N_2 inducidos por tormentas magnéticas. Una importante puesta al día que da especial énfasis a este aspecto de las tormentas ionosféricas, fue realizada por Prolss (1980) con abundantes citas bibliográficas sobre el tema. Se considera que, el calentamiento colisional directo de iones y la ionización por impacto de neutros producidos ambos por precipitación de partículas energéticas neutras, la elevación de la capa F por vientos neutros intensificados, y la deriva $E \times B$ de plasma, pueden ser considerados como los procesos que contribuyen a la fase positiva de las tormentas ionosféricas (Evans, 1973; Tanaka y Hiraó, 1973; Park, 1974; Anderson, 1976; Prolss y Jung, 1978; Miller y otros, 1979).

Spurling y Jones (1973) sugieren que los efectos positivos y negativos compiten frecuentemente en las primeras 24 horas de la tormenta por lo menos, lo que explicaría el "efecto negativo retardado" en foF2. Ambos mecanismos estarían equilibrándose el primer día, siendo indeciso el resultado. Según estos mismos autores y evidencias adicionales dadas por Bergh (1962), el mecanismo negativo debe predominar a partir del segundo día a latitudes medias.

La tormenta que se analiza en este trabajo, sin embargo, no respeta este esquema por dos razones: -1) es predominantemente positiva a lo largo de tres días; -2) existen excursiones negativas inmediatamente después de cada cambio en la actividad magnética.

Los resultados experimentales nos dicen realmente que el proceso perturbativo es generado, por lo menos, por dos tormentas magnéticas donde la segunda no presenta S.C.

PRESENTACION DE DATOS

La tormenta magnética analizada tuvo su comienzo súbito el día 4 de abril de 1967 a las 03.04 hs. de TU (día 3/4/67 a las 23.04 hs. de TEL). Los datos analizados corresponden a las estaciones que se detallan a continuación

ESTACION	LAT.GEOMAG.	DIP.GEOMAG.	L	LAT. INV.
HUANCAYO	- 0,59	0,05	1,05	12,69
TUCUMAN	- 15,45	-23,40	1,13	19,60
BUENOS AIRES	- 23,21	-33,17	1,22	25,22
CONCEPCION	- 25,15	-35,72	1,23	25,64
Pt. STANLEY	- 40,42	-47,33	1,61	38,04
USHUALA	- 43,33	-50,12	1,71	40,16
ARGENTINE IS.	- 53,76	-57,82	2,38	49,56

La Figura 1 presenta la diferencia entre los valores horarios de foF2 y una curva de control, tomada como promedio de los valores horarios para los días tranquilos 3,11,12,13,14 y 15 de abril de 1967, en función del tiempo estandar local. Todavía existe discrepancia en cuanto a qué debe considerarse como "curva de control", si corresponde a los valores "normales" en los días que rodean al período de tormenta incluyendo los perturbados, por ejemplo: mediana mensual de los valores horarios o si corresponde a promedios de días considerados "tranquilos" elegidos de acuerdo a normas que se sugirieron en el año 1943 y basadas en los valores de la suma Kp. Consideramos razonable emplear promedios de días tranquilos, dado que los mismos son característicos del "estado fundamental" de la magnetósfera, estado que por cierto va modificándose según el momento del ciclo solar. Este es un punto digno de discusiones adicionales.

Conjuntamente con foF2 se representan en Figura 1 los valores del índice Kp trihorario para el mismo período.

La Figura 2 muestra la variación con el tiempo estandar local de las diferencias entre h'F y las correspondientes curvas de control. Aquí también se realiza la comparación con el índice magnético Kp.

En ambas figuras, la flecha indica la hora local del comienzo súbito de la tormenta geomagnética, el rayado señala las excursiones positivas y el sombreado las negativas de los parámetros ionosféricos con respecto a los valores tomados como referencia.

Al compararse los datos de Huancayo y Concepción con los de Kp, debe tenerse la precaución de correr estos últimos una hora hacia la izquierda dado que las estaciones corresponden al huso horario de 75°W.

Dado que h'F puede no ser representativa de la altura real de base de la región F, especialmente de día al formarse F1, se representa en la Figura 3 la variación de la altura del pico de concentración, hpF2, con respecto a la correspondiente curva de control tomada en esta circunstancia como la mediana de abril de 1967.

Infortunadamente, los datos de luminiscencia tomados con un fotómetro todo cielo desde San Juan (Argentina) dentro del período perturbado, son escasos y corresponden a la noche local de los días 5 y 6 de abril. Los mismos se muestran en la Figura 4, para los cielos de El Leoncito (San Juan) y Tucumán. En el primer caso se pudo utilizar una curva de control correspondiente a un promedio de la línea 6300 Å para los meses de marzo y abril de 1967, extraída del trabajo de Perello y otros (1970). En el segundo caso la curva de control surge del promedio de cinco noches tranquilas de marzo y abril de 1967. En la misma Figura 4 se presentan los valores horarios de foF2 y de la curva de control para las estaciones: Concepción, Buenos Aires y Tucumán, todas situadas bajo el cielo rastreado por el fotómetro.

ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En la Figura 1 se observa que a pesar de ser el día 3 de abril magnéticamente tranquilo, la ionósfera está perturbada, lo que puede ser consecuencia de la tormenta magnética del día 1 de abril con S.C. a las 04.07 (TEL). Se ve que este efecto remanente no se manifiesta en forma significativa en la altura de la base de la región F (Figura 2), con excepción de Huancayo que presenta un ascenso de capa previo al comienzo de la tormenta de las últimas horas del día 3 (TEL).

Volviendo a Figura 1 se puede apreciar que en todas las estaciones, salvo Huancayo, empieza a manifestarse una fase negativa 2 a 3 horas después del S.C. Aunque Buenos Aires no presenta una definida excursión negativa referida al nivel cero, se puede considerar que la tormenta es análoga a las de las otras estaciones dado que se observa una brusca bajada desde niveles más altos de perturbación.

Se observa en la misma figura que el "respiro" de la fase negativa no es muy prolongado, pues empieza a predominar entre las 04 y 06 hs en todas las estaciones, una fase positiva que se extenderá prácticamente durante todo el día, hasta la medianoche del día 4 donde empieza a reproducirse un comportamiento análogo al de la noche anterior, con excepción de Tucumán y Huancayo. La fase negativa es algo más extensa en Islas Argentinas y Ushuaia.

En general, se observa que la fase positiva del día 4 se manifiesta como una doble "giba" que reproduce, aunque desplazada en el tiempo la estructura del comportamiento del índice Kp.

La fase positiva del día 5 es reducida en Is. Argentinas y Ushuaia, donde empieza hacia el mediodía. En las otras estaciones es evidente su importancia, especialmente en Tucumán y Huancayo donde no aparece la excursión negativa de la madrugada del día 5. Quizás, usando el mismo criterio intentado para Buenos Aires en el día 4, se insinúa la tendencia negativa en Tucumán entre las 01 y 03 hs. El comportamiento de esta fase positiva del día 5 es algo más complejo que el que sugeriría el índice Kp. dado que se manifiesta hacia la medianoche del día 4 un nuevo incremento en la actividad magnética.

La Figura 2 nos muestra un comportamiento menos complicado en h'F, con coherencia en el ascenso de capa en todas las estaciones salvo Huancayo, que presenta un ascenso pre-S.C. La diferencia en tiempo entre el S.C. y la iniciación de la elevación de la base de la región F, indicaría la propagación de una perturbación ionosférica viajera (TID) pero a muy alta velocidad (aproximadamente 420 m/s). Esta perturbación muestra una periodicidad de unas 24 hs. nuevamente con la excepción de Huancayo.

El segundo incremento rápido en la actividad magnética, indicado por K_p , no ejerce aparente influencia en la altura de la base de la capa F. Se nota, de la magnitud de la variación de altura, que el proceso se amortigua rápidamente en Tucumán. Huancayo no conserva memoria de este evento. El ascenso que ocurre a las 19 hs. del día 3 podría ser un remanente de las perturbaciones magnéticas iniciadas el día 1 de abril.

Tomándose el trabajo de superponer en tiempo las Figuras 1 y 2, se puede observar la perfecta coincidencia del proceso de elevación de capa con la fase negativa, tanto para la madrugada del día 4 (excepto Huancayo) como para la madrugada del día 5 (excepto Huancayo e insinuándose en Tucumán).

En cuanto a la Figura 3, la escasez de información en algunas estaciones no impide, sin embargo, concluir que el comportamiento de $h'F_2$ es similar al de $h'F$ y en consecuencia al de la región F debajo de la altura de pico, al menos.

La Figura 4, si bien está caracterizada por la poca información de la línea de 6300 Å producida por desexcitación de oxígeno atómico a alturas de región F, nos muestra la correcta correlación entre los datos del fotómetro todo cielo de San Juan y los sondadores que se encontraban bajo el cielo barrido por el mismo. En especial se puede destacar el acuerdo entre fases positivas y negativas para El Leoncito (6300 Å) y Concepción (foF₂), cuyo sondador es el más cercano al fotómetro citado.

DISCUSION

Del análisis del comportamiento de la frecuencia crítica de la región F (Figura 1) se haría evidente que el mecanismo que predomina en las primeras horas posteriores al rápido incremento de la actividad magnética sería el que conduce a una fase negativa en la concentración electrónica de la región F, lo que estaría en contradicción con el modelo híbrido sugerido por Miller y otros (1979), basado en los modelos: atmosférico de Harris y Mayr (1977) y el de la circulación termosférica Mayr-Volland. Esto se puede apreciar, a) inmediatamente después del S.C. b) después del rápido incremento en K_p entre las 08 y 11 hs de TEL (aunque en algunas estaciones la fase no llegue a ser negativa en lo que atañe al nivel de referencia elegido, se manifiesta el descenso brusco de la concentración electrónica); c) después del incremento que empieza entre las 20 y 23 hs del día 4; y d) quizás después del incremento de K_p que se inicia entre las 20 y 23 hs del día 5 de abril.

Las fases positivas posteriores indicarían que los mecanismos que las generan muestran una evidente inercia en el comienzo de su acción. También se hace evidente que el mecanismo positivo supera con el transcurso del tiem-

po en intensidad al negativo, dado que no hay dudas de que al menos en algún momento ambos se superponen.

La inercia posible en la aparición del mecanismo positivo daría cuenta del hecho de que, a pesar de existir elevación de capa, se manifiesta coincidentemente en el tiempo una fase negativa y no la positiva que correspondería a la elevación de plasma a zonas de menor recombinación. Sin embargo, esa coincidencia conflictiva también podría ser explicada, al menos cualitativamente, suponiendo que la elevación brusca de temperatura en el momento del máximo calentamiento (incremento brusco de la actividad magnética) eleva el valor del coeficiente de la reacción de formación $N_2^+ + O^{kl} \rightarrow NO^+ + N$, donde NO^+ es una de las fuentes principales de pérdida de electrones. Trabajos recientes de Torr (1979) demuestran que en oposición de resultados de laboratorio. (Mc Farland y otros, 1974), una determinación aeronómica de kl indicó un incremento del valor de este coeficiente con la temperatura. Con todo, ese incremento no es significativo como para justificar la fase negativa de la tormenta que nos preocupa, por lo cual tenderíamos a descartar este mecanismo.

Spurling y Jones (1976) empleando datos de Brisbane para tormentas positivas y comparando con el modelo numérico de Jones (1973), demuestran que la elevación de ionización por vientos neutros constituye el mecanismo más importante involucrado en la formación de la fase positiva diurna observada en Brisbane. Consideran que este mecanismo es más probable que el de entrada de ionización desde la plasmasfera. Esta conclusión es obtenida en base a la diferencia de fase entre la elevación de hmF2 y el incremento en el contenido electrónico total. Para el mecanismo de acción de vientos el desfase debería ser de unos 40 minutos. En cuanto al proceso de difusión de plasma desde la plasmasfera hacia la inoósfera, involucraría un adelanto de algo menos de 2 horas de hmF2 respecto a Nt. Sin embargo en nuestro caso, el desfase entre la elevación de h'F y h_pF2 y el incremento en foF2 es superior en la casi totalidad de los casos a los tiempos mencionados anteriormente.

Es evidente entonces que durante las pocas horas que siguen a la variación fuerte del campo magnético, la "lucha" entre mecanismos negativos y positivos es aún más compleja que la sugerida por Miller y otros (1979) Spurling y Jones (1973) y Bergh (1962).

No es mucho lo que se puede mencionar respecto a la Figura 4. Solo concluir que para el breve lapso analizado se correlaciona el comportamiento de foF2 para las estaciones bajo el cielo del fotómetro, con los datos de luminiscencia en 630 nm indicativos de la presencia del oxígeno atómico excitado. Su disminución, indicada por la fase negativa en I, contribuiría a la disminución de la relación O/N_2 (está claro que desconocemos el comportamiento del N_2) y en consecuencia a la fase negativa en foF2.

Agradecimientos: Los autores agradecen al World Data Center de Boulder (EE.UU.) y a Radio and Space Research Station de Slough (Inglaterra), por facilitarnos parte de la información usada en el presente trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- Anderson, D.N., 1976; Modeling the mid-latitude F-region ionospheric storm using east-west drift and meridional wind; Planet. Space Sci. 24, 69.
- Bergh, H.W., 1962: The time-lag between magnetic and ionospheric changes; J.Atmos.Terr.Phys. 24, 949.
- Evans, J.V., 1973: The causes of storm time increases of the F-layer at mid-latitudes; J.Atmos.Terr.Phys. 35, 593.
- Harris, I and Mayr, H.G., 1977: Magnetic storm dynamics of the ionosphere; FDS Trans. AGU. 58, 458.
- Jones, K.L.- 1973: Wind, electric field and composition perturbations of the mid-latitude F-region during magnetic storm; J.Atmos.Terr.Phys. 35, 1515.
- Mc Farland, M., Albritton, D.L., Fehsenfeld, F.C., Ferguson, E.E. y Schemelkopf, A.L., 1974: Energy dependence and branching ratio of the $N_2^+ + O$ reaction; J.Geophys.Res. 79, 2925.
- Miller, N.J., Grebowky, J.M., Mayr, H.G. y Harris, I., 1979: F-larger positive response to a geomagnetic storm-June 1972; J.Geophys.Res. 84, 6493.
- Park, C.G., 1974: A morphological study of substorm-associated disturbances in the ionosphere; J.Geophys.Res. 79, 2821.
- Perello, R.A., Polimeni, R., 1970: Luminiscencia de la atmósfera (OI) 5577 Å - NA I 5890-96 Å - (OI) 6300 Å. Comisión Nacional de Estudios Geoheliosfísicos- Centro Nacional de Luminiscencia (San Juan).
- Prolss, G.W., 1980: Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere: recent results obtained by satellite-borne gas analyzers; Rev.Geophys.Space Phys. 18, 183.
- Prolss, G.W. y Jung, M.I., 1978: Travelling atmospheric disturbances as a possible explanation for daytime positive storm effects of moderate duration at middle latitudes; J.Atmos.Terr.Phys. 40, 1351.
- Spurling, P.H. y Jones, K.L., 1973: The nature of seasonal changes in the effects of magnetic storms on mid-latitude F-layer electron concentration; J.Atmos.Terr.Phys. 35, 921.

- Spurling, P.H. y Jones, K.L., 1976: The observation of related F-region height and electron content changes at mid-latitudes during magnetic storm and their comparison with a numerical model; J.Atmos.Terr.Phys. 38, 1237.
- Tanaka, T. y Hirao, K., 1973: Effects of an electric field on the dynamical behaviour of the ionosphere and its application to the storm time disturbance of the F-layer; J.Atmos.Terr.Phys. 35, 1443.
- Torr, D.G., 1979: Refinement of the aeronomically determined rate coefficient for the reaction of N_2^+ with O; J.Geophys.Res. 84, 1939.

EPIGRAFE DE LAS FIGURAS

- Figura 1: Representación de Δf_oF_2 (desviación del valor instantáneo de la frecuencia crítica, desde la curva de control) para la red sudamericana de sondadores verticales ionosféricos y correspondientes al período que rodea a la tormenta magnética del día 4 de abril de 1967 (S.C.: 03.04 hs de TU). El histrograma del tope corresponde al índice magnético trihorario planetario Kp. El eje horizontal corresponde a tiempo estandar local.
- Figura 2: Idem Figura 1, pero para $\Delta h'F$ (desviación de la altura virtual de base de la capa F).
- Figura 3: Idem Figuras 1 y 2, pero para $\Delta h_p F_2$ (desviación de la altura de pico de concentración de la capa F).
- Figura 4: Breve período de tiempo en el cual existen datos de luminiscencia, corresponde al fotómetro todo cielo de El Leoncito (San Juan). La curva de control de El Leoncito fue tomada de un promedio de la línea de 6300 Å para los meses de marzo y abril de 1967. Para Tucumán se tomó un promedio de 5 noches tranquilas de marzo y abril de 1967.

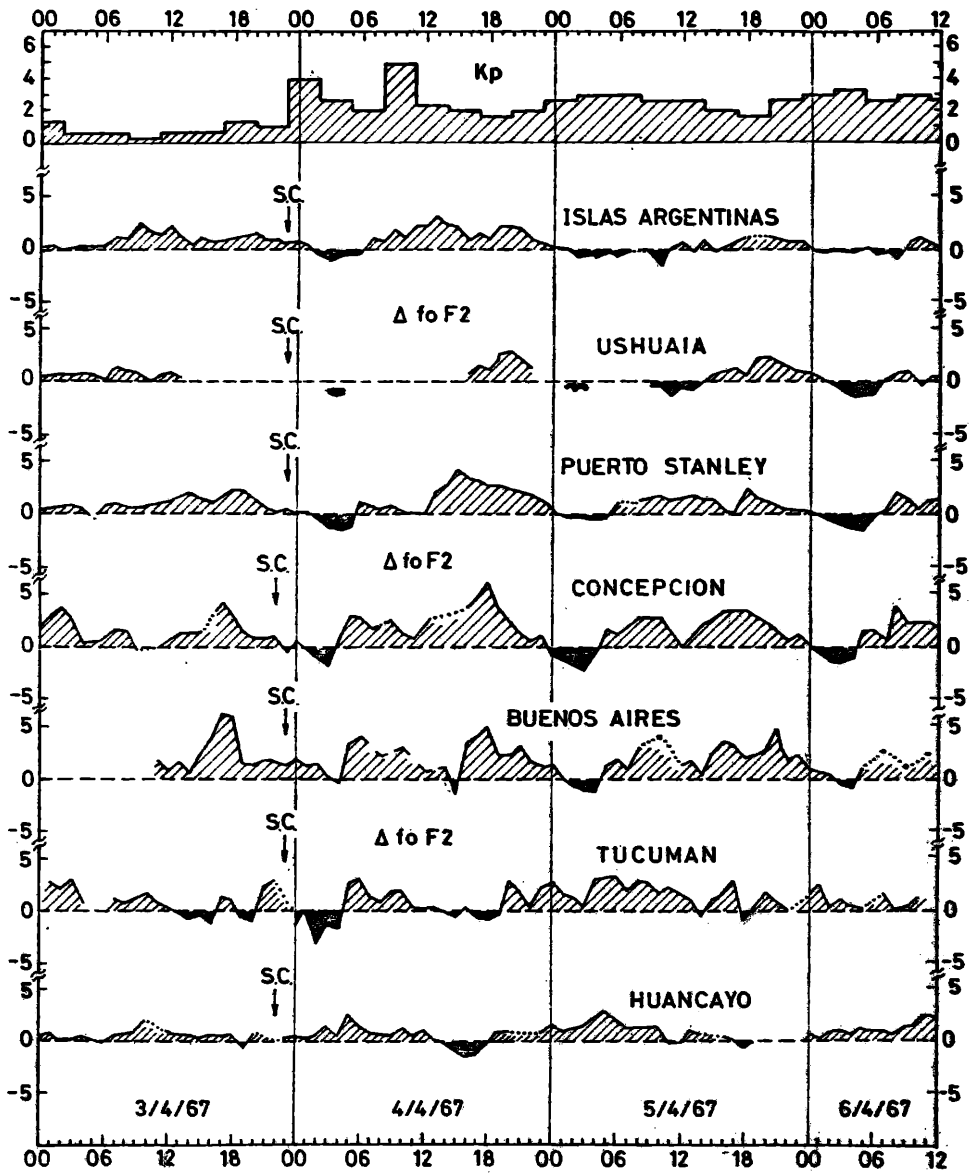


Figura 1

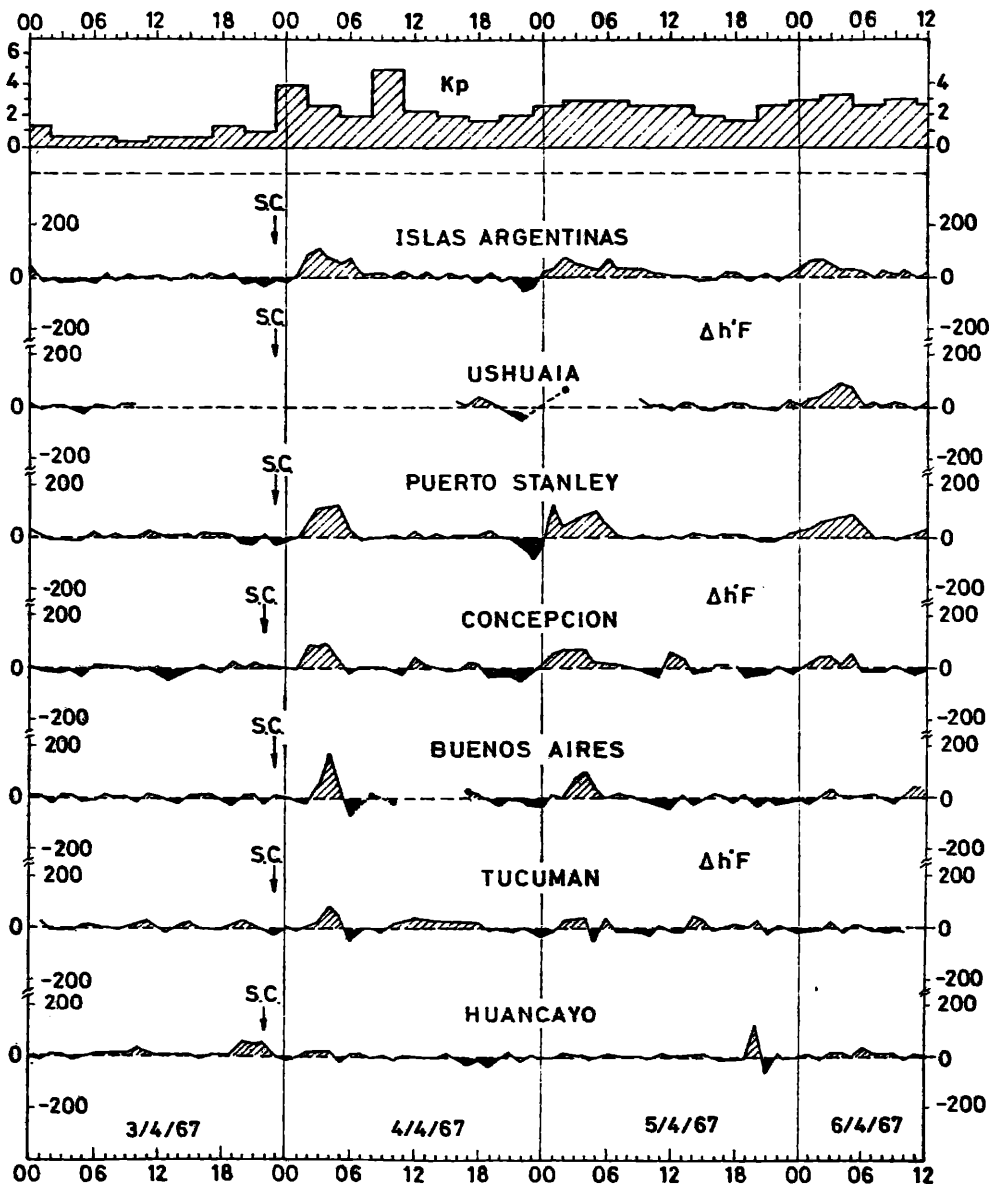


Figura 2

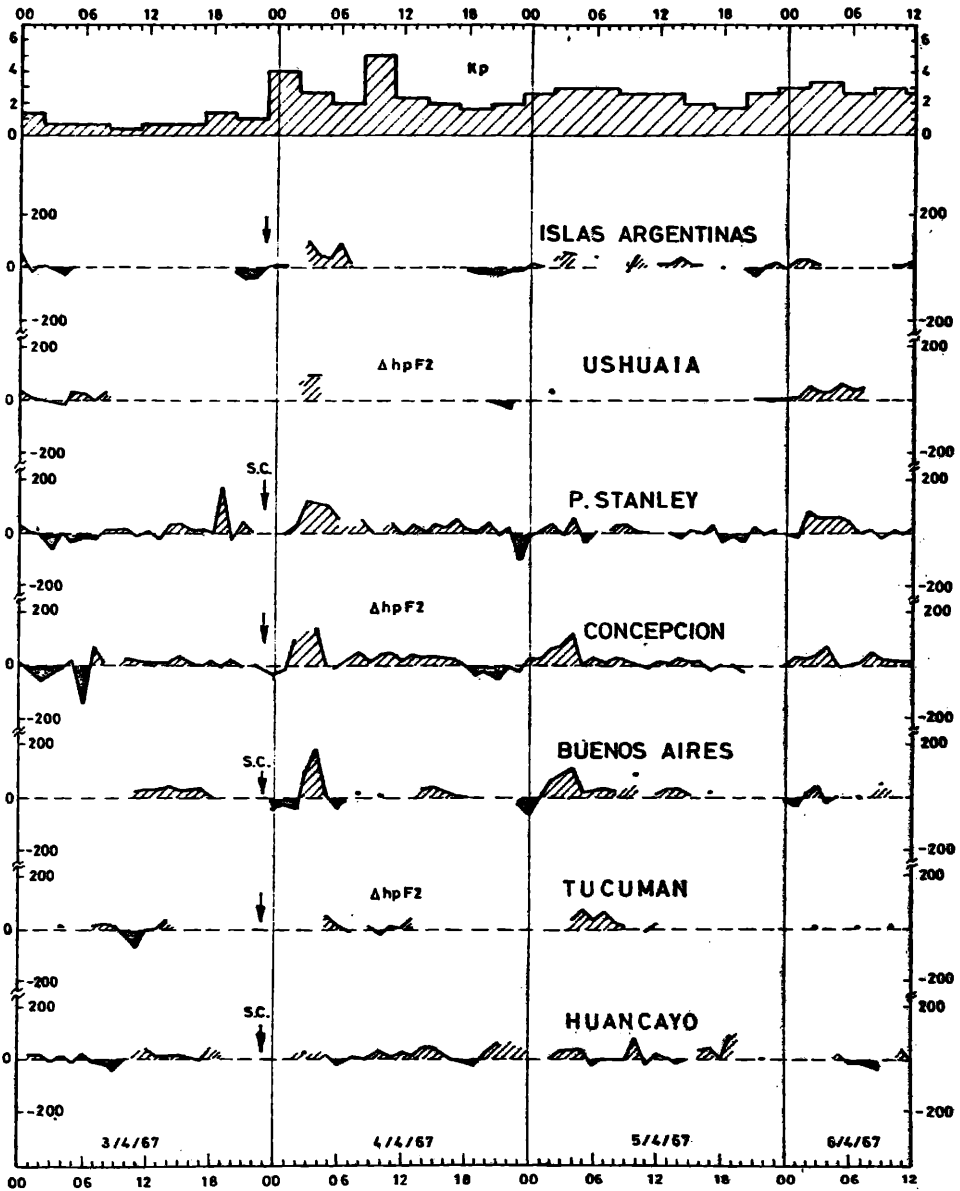


Figura 3

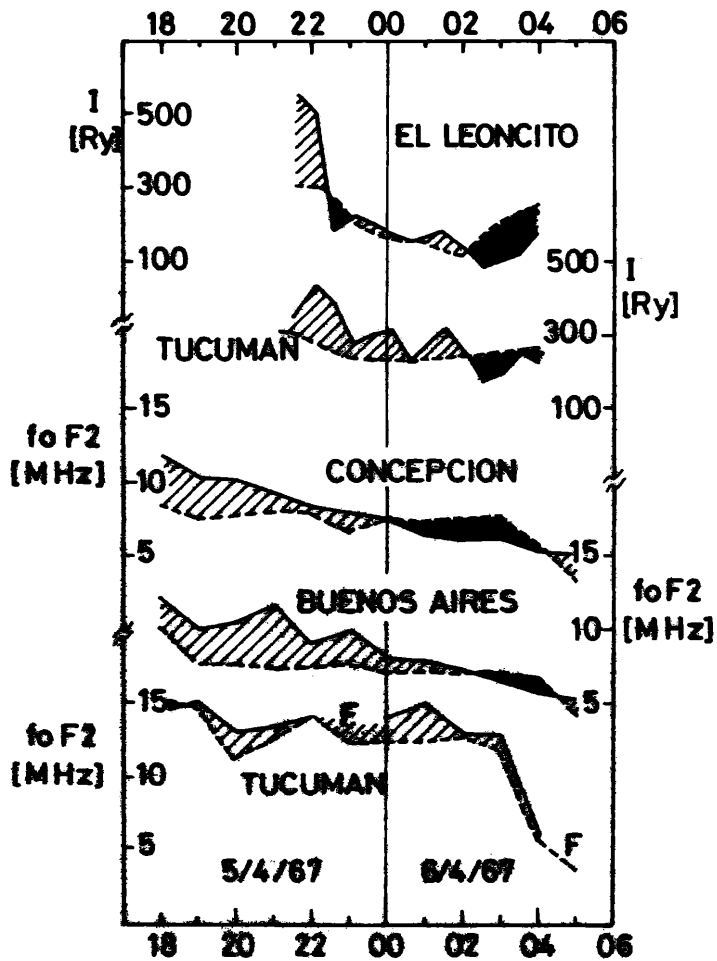


Figura 4