

INCIDENCIA DE LAS TORMENTAS GEOMAGNETICAS SOBRE EL COMPORTAMIENTO
TRANQUILO DE LA IONOSFERA

Ana Martínez de Garat (*)

Laboratorio de Ionósfera - Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología - Universidad Nacional de Tucumán

RESUMEN

Se realiza un estudio del comportamiento tranquilo de la Ionósfera para poder poner de manifiesto las deformaciones que ella sufre durante el desarrollo de las tormentas geomagnéticas. Este análisis se efectúa para la cadena australiano-japonesa de sondadores, habiéndose seleccionado los que están a una longitud aproximadamente constante. Se consideran los meses de verano del año 1975, y tres tormentas que tienen lugar en esos meses.

Se estudia la variación de la concentración electrónica máxima en función de la latitud geomagnética. Se concluye que: a) se encuentran presentes los mecanismos que dan origen a la formación y existencia de la anomalía ecuatorial y b) las tormentas magnéticas afectan severamente la ionósfera produciendo en ella cambios significativos; en particular alteran notablemente la estructura de la anomalía ecuatorial.

ABSTRACT

A study of the ionosphere during quiet conditions has been made in order to make evident the deformations occurring during the development of geomagnetic storms. This analysis is performed for the Australian-Japanese ionosonde network, having been selected those located around the same longitude. The 1975 summer months and three storms occurring during those months have been considered. The maximum electron concentration variation as a function of the geomagnetic latitude is studied. The conclusions are: a) the mechanisms responsible for the equatorial anomaly formation and existence are present; b) the magnetic storms affect severely the ionosphere producing significant changes; particularly they notably alter the equatorial anomaly structure.

(*) Becaria del CONICET.

INTRODUCCION

Bajo la acción de las tormentas geomagnéticas, la ionósfera aparece severamente perturbada presentando desviaciones a veces muy marcadas de su comportamiento normal. Para interpretar correctamente estos fenómenos conocidos como tormentas ionosféricas, es necesario encontrar un "sistema de referencia" que permita establecer con razonable confiabilidad cuál es la magnitud de la perturbación analizada. Es importante poder decidir con claridad si los hechos observados son "normales" o debidos a la tormenta. En consecuencia, el análisis de la ionósfera de base debe acompañar siempre los estudios que se hagan sobre las perturbaciones ionosféricas.

En particular resulta de especial interés estudiar el comportamiento de la anomalía ecuatorial, sus horas de aparición y desaparición así como las modificaciones que ella sufre durante las tormentas.

La producción de la ionización en la zona ecuatorial tiene lugar en la baja región F en su mayor parte y el pico de producción está alrededor de los 200 km sobre el ecuador magnético (Anderson, 1971, 1973). La ionización producida se transporta por deriva electromagnética a mayores alturas, difundiéndose luego a lo largo de líneas de campo hacia zonas de latitud geomagnéticas aproximada $\pm 15^\circ$. El campo eléctrico ionosférico, que posibilita el movimiento vertical de la ionización con velocidad $\vec{E} \times \vec{B}$, juega un papel dominante en la electrodinámica de bajas latitudes (Woodman, 1970; Woodman y otros, 1977; Fejer, 1981; Martínez de Garat, 1982). De esta manera el transporte electromagnético de la ionización ha sido tomada como un proceso básico en la formación de la anomalía ecuatorial.

Por otra parte se sabe que las tormentas geomagnéticas tienen una influencia profunda sobre la morfología global de la atmósfera superior ionizada y neutra (Pröhl, 1980). A pesar de los esfuerzos realizados durante largos años, los mecanismos que causan las perturbaciones ionosféricas no han sido aún definitivamente identificados. Las tormentas ionosféricas están determinadas fundamentalmente por apartamientos de los valores normales tanto de las concentraciones electrónicas como de las alturas de las regiones ionizadas (Martínez de Garat y Manzano, 1981; 1982 b). El comportamiento de la ionósfera perturbada tiene múltiples aspectos que deben ser justificados tales como fases positivas simultáneas o no con el SC de la tormenta; fases negativas a veces exclusiva de la ionósfera de altas latitudes y otras veces presente en estaciones de baja latitud y

oscilaciones en la altura que se propagan como perturbaciones ionosféricas viajeras.

Sobre este problema puede consultarse una bibliografía muy frondosa, por ejemplo, Mendillo (1971, 1973), Matuura (1972), Davies (1974), Ruster y King (1976), Manzano (1978), Prolss (1980), Turunen y Mukunda Rao (1980), Alamelu y otros (1982).

OBSERVACIONES

El presente trabajo tiene por objeto estudiar, al menos parcialmente, cómo responde la ionósfera a las tormentas geomagnéticas. Se ha trabajado con una extensa cadena de sondadores que se extiende desde las zonas aurorales del hemisferio sur hasta las del hemisferio norte, pasando a través de la región ecuatorial. Las estaciones de sondadores, ubicadas todas aproximadamente a la misma longitud, son: Terre Adelie, Hobart, Canberra, Brisbane, Townsville y Vanimo (pertenecientes a Australia), Manila (Filipinas), Okinawa, Yamagawa Akita y Wakkanaí (del Japón) y finalmente Yakutsk (Unión Soviética). Los datos completos correspondientes a estas estaciones se dan en la tabla I.

Se han considerado los meses de verano del año 1975 (enero, febrero, noviembre y diciembre) analizando primero el comportamiento tranquilo de la ionósfera y luego las tormentas.

El parámetro con el que se ha trabajado es NmF2, o sea la concentración electrónica máxima de la capa F2, calculado a partir de la frecuencia crítica foF2 mediante la expresión

$$NmF2 = \frac{(foF2)^2}{80.6}$$

donde NmF2 queda expresado en m^{-3} si foF2 se expresa en Hz. Los datos, considerados en tiempo local, se grafican en función de la latitud geomagnética, lo cuál permite obtener una sección longitudinal

bastante completa de lo que ocurre en la ionósfera que cubre esta cadena de sondadores.

La figura 1 muestra el comportamiento tranquilo para los meses de enero y febrero. Este no es simétrico respecto del ecuador geomagnético y el pico correspondiente al hemisferio de invierno es más alto que el de verano. La anomalía se insinúa a las 10 hs TL, a las 12 TL ya está formada y entre las 14 y las 16 hs TL (excepto quizás en enero) alcanza su máximo de aproximadamente 18×10^{11} elec/ m^3 . La asimetría existente entre ambos hemisferios puede ser explicada

por la acción de los vientos neutros.

También se observa que a las 00 hs TL la concentración se mantiene bastante alta todavía y alcanza el mínimo recién alrededor de las 04 hs.

En la figura 2, para los meses de noviembre y diciembre, la anomalía no se manifiesta tan nítida como para los meses anteriores. Las curvas de diciembre han sido construidas con las medianas mensuales, por carecer de los datos necesarios para hacer los promedios. Aún así puede concluirse que los picos de la anomalía se forman, en estos meses sobre Vanimo, en el hemisferio sur, a los 12° de latitud geomagnética y sobre Okinawa en el hemisferio norte, a los 15° de latitud. A diferencia de los meses de enero y febrero los valores mayores en concentración aparecen en el hemisferio sur.

Tormenta del 10 de febrero (fig. 3)

Esta tormenta presenta su SC (Comienzo Súbito) el día 10 de febrero a las 00.40 TL (hemos considerado TL = TU + 9, correspondiente al meridiano de 150° E).

Para tener una idea de la magnitud de la tormenta es conveniente considerar los valores que presenta el índice auroral magnético AE. A las 01 hs TL su valor es muy bajo, de apenas unos 65 δ y ocho horas después a las 09 hs TL alcanza unos 400 δ ; a las 15 hs TL su valor es de unos 600 δ . En consecuencia esta tormenta puede clasificarse como moderada.

En horas de la mañana el efecto más notable es la desaparición del pico de las 12 horas en el hemisferio norte. En horas de la tarde igualmente, los efectos de la tormenta son más notables en el hemisferio de invierno que en el de verano. Existe una pugna entre los mecanismos generadores de la anomalía ecuatorial y los fenómenos ocasionados por la tormenta. En este caso la tormenta es capaz de eliminar las elevadas concentraciones que aparecen fundamentalmente sobre Okinawa durante los días tranquilos del mes de febrero a las 12, 14 y 16 horas.

El hemisferio de verano no es afectado prácticamente por la tormenta.

Tormenta del 23 de febrero (fig. 4)

El SC se presenta el 23/2 a las 17.30 hs TL. A las 18 hs TL el índice AE muestra un valor relativamente bajo, de unos 170 δ , a las 20 hs TL vale 500 δ y a las 21 hs TL ha superado los 1400 δ .

Esta tormenta es, por lo tanto, sensiblemente más fuerte que la primera.

Como en los casos anteriores se ha graficado la concentración electrónica máxima en función de la latitud geomagnética. Para las distintas horas se han considerado los días 23 y 24 de febrero para apreciar mejor el desarrollo de la tormenta, teniendo en cuenta su horario de comienzo.

Puede observarse que en horas de la tarde del día 23, la tormenta ha "barrido", prácticamente, con la anomalía ecuatorial, quedando ésta reducida a un único pico totalmente desplazado hacia el hemisferio sur magnético y casi centrado con el ecuador geográfico. Solamente desde las 18 hs. se manifiesta un efecto de anomalía. Es evidente el retardo de este mecanismo por la tormenta. En horas de la mañana, los valores son sustancialmente menores que los de la ionósfera de base. En la mañana del día 24/2 los efectos de la tormenta son todavía muy pronunciados, puesto que las curvas de las 10 y 12 hs se encuentran totalmente deformadas e invertidas en su comportamiento. Aún en horas de la tarde es muy apreciable la distorsión sufrida por la concentración electrónica. En general, las líneas se entrecruzan, aunque se nota la tendencia a recuperar el comportamiento normal.

Tormenta del 22 de noviembre (fig. 5)

Esta tormenta comienza a las 08.05 hs TL del día 22 de noviembre y, como en las anteriores, el valor de AE en este momento es bajo, de unos 90 γ , siete horas después, sobrepasa los 500 γ y 10 hs después del SC los 1400 γ . Aunque va desencadenándose de una manera escalonada, esta tormenta puede ser catalogada como fuerte y aún a pesar de que en horas de la mañana el comportamiento de la ionósfera es casi normal, a la tarde pueden observarse picos muy pronunciados a la altura de Okinawa, del orden de 24×10^{11} elec. m^{-3} . Estos valores de N son sensiblemente mayores que lo normal. En este caso se presentan los mecanismos causantes de la anomalía exageradamente reforzados por los fenómenos responsables de la tormenta ionosférica.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Son tantos, y a veces contradictorios, los efectos producidos sobre la ionósfera por las tormentas geomagnéticas, que se hace muy difícil de explicar la estructura fina de estos procesos. Se arriesgan algunas ideas tentativas, susceptibles obviamente de ser mejoradas.

La producción de la ionización tiene su lugar en la baja región F en su mayor parte, aproximadamente a los 200 km sobre el ecuador geomagnético. La ionización producida es elevada por un proceso electromagnético a mayores alturas difundiendo luego a lo largo de líneas de campo geomagnético hacia zonas de latitud aproximada $\pm 15^\circ$ (Anderson, 1973). De esta manera son formadas las crestas norte y sur de la anomalía ecuatorial. En el presente trabajo (en relación al comportamiento tranquilo) puede observarse la existencia de asimetría en las crestas. En los meses de enero y febrero los picos más altos son los del hemisferio norte, más alejados del ecuador geográfico. En los meses de noviembre y diciembre, la cresta más próxima al ecuador geográfico es la mayor.

Puede notarse que los mecanismos que dan origen a la formación y existencia de la anomalía se encuentran perfectamente vigentes bajo las circunstancias particulares estudiadas aquí. El pico se forma a proximadamente a los 15° de latitud geomagnética aunque esto no es siempre respetado rigurosamente, ya que puede sufrir tanto un corrimiento hacia mayores latitudes como en ensanchamiento.

Anderson (1973) demuestra que las crestas de la anomalía son afectadas por los vientos neutros y los campos eléctricos. Así mismo hace un detallado estudio sobre los efectos del campo geomagnético. Tanto la atmósfera neutra como los vientos neutros que se consideren son simétricos respecto al ecuador geográfico y debido al desplazamiento entre los dos ecuadores, probablemente sean los generadores de la asimetría en la distribución de la ionización.

Por otra parte, todos los procesos que pueden ser importantes para explicar el comportamiento de una tormenta ionosférica, se piensa que ya son básicamente conocidos (Matuura, 1972; Rishbeth, 1974; Prölss, 1980). Los vientos neutros, los campos eléctricos y la composición neutra son las variables más importantes que entran en juego en cualquier modelo físico, pero, desafortunadamente, de estos parámetros sólo los datos de la composición química están disponibles en gran escala.

En términos generales puede indicarse que las tormentas geomagnéticas afectan muy fuertemente a la ionósfera, la que pareciera ser extremadamente sensible a alteraciones muy pequeñas en el campo geomagnético. A través del índice AE se ha tratado de estimar la magnitud de la tormenta, ya que este índice está relacionado con la intensidad de las corrientes ionosféricas en las zonas aurorales. La tormenta del 10 de febrero, que se ha calificado como moderada, pre

senta apartamientos menos pronunciados respecto de los valores normales que las otras tormentas.

Sin embargo, resulta bastante difícil sacar conclusiones muy definitivas, al menos con lo que se ha visto hasta ahora, ya que la respuesta de la ionósfera a estas tres tormentas analizadas, muestra algunas características diferentes.

Como se dijo anteriormente, la tormenta del 10 de febrero, si bien no presenta efectos excesivamente notables, consigue barrer las crestas del hemisferio norte. La tormenta del 23 de febrero reduce la anomalía a un único pico ubicado en el hemisferio sur (al día siguiente, 24 de febrero, ya se observa una tendencia a la recuperación en horas de la tarde). En la tormenta del 22 de noviembre se observa una tendencia muy marcada, y quizás un poco extraña a reforzar los fenómenos asociados con la anomalía ecuatorial. Su depresión a la altura del ecuador geomagnético se hace muy marcada, más que durante los días tranquilos y los picos se acentúan exageradamente, sobre todo el del hemisferio norte.

Las variaciones ocurridas durante estas tormentas en la ionósfera de altas latitudes no son tan significativas como las que aparecen en la ionósfera ecuatorial y subecuatorial.

La disímil característica de las tormentas está indicando una evidente competencia entre el "efecto fuente" generador de la anomalía ecuatorial y la circulación de aire neutro con arrastre iónico generada en zonas aurorales después de la inyección de energía.

Agradecimientos. Quiero agradecer muy especialmente al Dr. José Roberto Manzano la inapreciable colaboración prestada a través de sus valiosas sugerencias y lectura del manuscrito.

También quiero agradecer la colaboración de la Sra. Sonia P. de Lascano en la reducción de los datos experimentales.

BIBLIOGRAFIA

- Anderson, D.N., 1971: Daily variation of the ionosphere F2 equatorial anomaly in the American and Asian sectors; N.C.A.R. Univ. of Colorado, Thesis.
- Anderson, D.N., 1973: A theoretical study of the Ionospheric F region equatorial anomaly - II Results in the American and Asian sectors; Planet. Space Sci., 21, 421.

- Alamelu. V., Mukunda Rao M., Srinivasa Charya K.G. y Sethuraman R., 1982: Effect of severe auroral disturbances on the equatorial ionosphere; *J. Atmos. and Terr. Physics.*, 44, 161.
- Davies K., 1974: A model of ionospheric F2 region storms in middle latitudes; *Planet. Space Sci.*, 22, 237.
- Fejer B.G., 1981: The equatorial ionospheric electric fields. A review; *J. Atmos. Terr. Phys.*, 40, 377.
- Manzano J.R., 1978: F-region oscillations produced by sudden commencements of Space Research XVIII, 285.
- Martínez de Garat A. y Manzano J.R., 1981: Respuesta hemisférica de ionósfera a las fuertes perturbaciones magnéticas de agosto de 1972; *Geoacta*, 11, 339 - 349.
- Mendillo M., 1971: La ionósfera de base en el hemisferio sur; *Nature*, Lond., 234, 23.
- Mendillo M., 1973: A study of the relationship between geomagnetic storms and ionospheric disturbances at mid-latitudes; *Planet. Space Sci.*, 21, 349.
- Matuura N., 1972: Theoretical models of ionospheric storms; *Space Sci. Rev.*, 13, 124.
- Pröls G.W., 1980: Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere: recent results obtained by satellite - borne gas analyzers; *Rev. of Geoph. and Sp. Phys.*, 18, 183.
- Rishbeth H., 1974: Some problems of the F region; *Radio Sci.*, 9, 183.
- Ruster R. y King J.W., 1976: Negative ionospheric storms caused by thermospheric winds; *J. Atmos. Terr. Phys.*, 38, 539.
- Turunen T. y Mukunda Rao M., 1980: Examples of the influence of strong magnetic storms on the equatorial F-layer; *J. Atmos. Terr. Phys.*, 42, 323.
- Woodman R.F., 1970: Vertical drift velocities and east-west electric fields at the magnetic equator; *J. Geophys. Res.*, 75, 6249
- Woodman R.F., Rastogi R.G. y Calderon C., 1977: Solar cycle effects on the electric fields in the equatorial ionosphere; *J. Geophys. Res.*, 82, 5257.

TABLA 1RED AUSTRALIANA - JAPONESA - RUSA

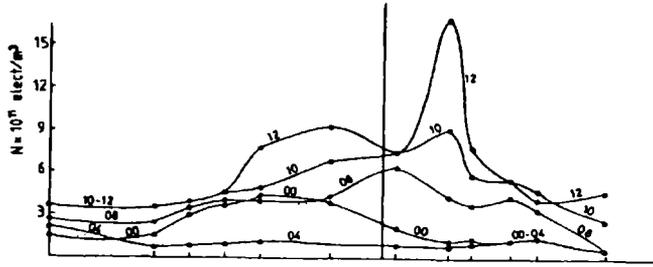
Estación	Latitud		Longitud		Tiempo medio
	Geog.	Magn.	Geog.	Magn.	
Terre Adelle	-66.70	-75.60	140.00	231.50	135°
Hobart	-42.90	-51.61	147.40	224.92	150°
Canberra	-35.30	-43.90	149.00	224.80	150°
Brisbane	-27.50	-35.65	152.90	227.36	150°
Townsville	-19.30	-28.39	146.70	219.28	150°
Vanimo	- 2.70	-12.53	141.30	211.57	150°
Manila	14.70	3.41	121.10	190.24	120°
Okinawa	26.30	15.30	127.80	196.02	135°
Yamagawa	31.20	20.36	130.60	198.25	135°
Akita	39.70	29.53	140.10	205.87	135°
Wakkanai	45.40	35.33	141.70	206.45	135°
Yakutsk	62.00	50.99	129.60	194.10	120°

EPIGRAFES DE LAS FIGURAS

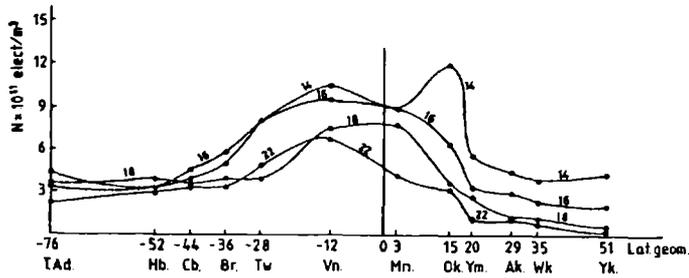
- Fig. 1 Representa la concentración electrónica máxima en función de la latitud geomagnética en condiciones tranquilas para las distintas horas del día para los meses de enero y febrero de 1975.
- Fig. 2 Idem anterior para los meses de noviembre y diciembre.
- Fig. 3 Representa la concentración electrónica máxima en función de la latitud geomagnética para las distintas horas del día para la tormenta del 10 de febrero de 1975.
- Fig. 4 Idem anterior para la tormenta del 23 de febrero. Se han representado los días 23 y 24 de febrero.
- Fig. 5 Idem fig. 3 para la tormenta del 22 de noviembre.

DIAS TRANQUILOS

ENERO 1975

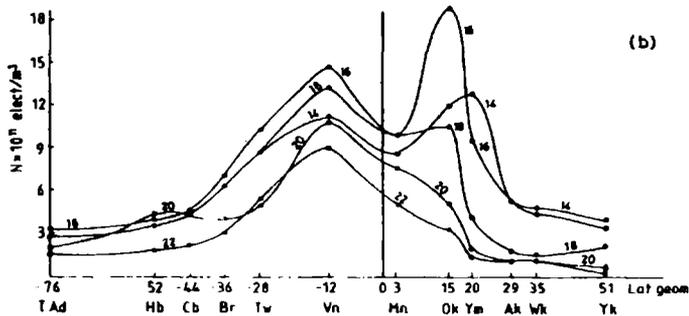
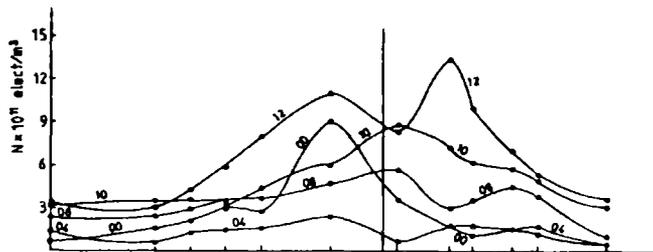


(a)



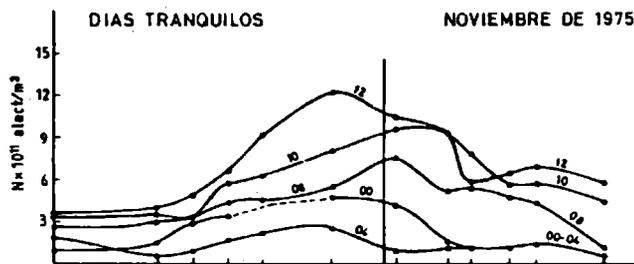
DIAS TRANQUILOS

FEBRERO 1975

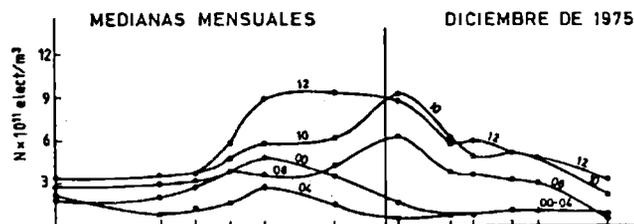
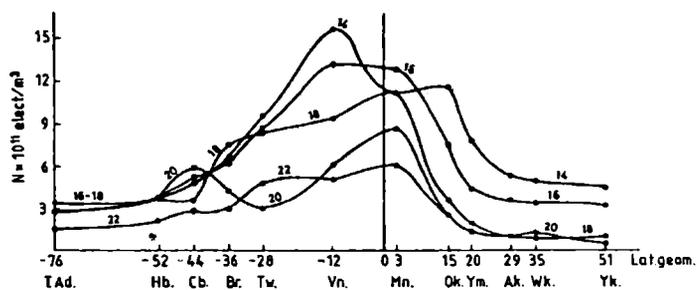


(b)

Fig 1



(a)



(b)

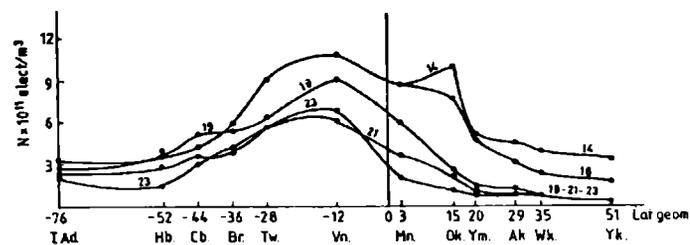


Fig. 2

TORMENTA DEL 10 DE FEBRERO DE 1975

SC 00,40 T.L.

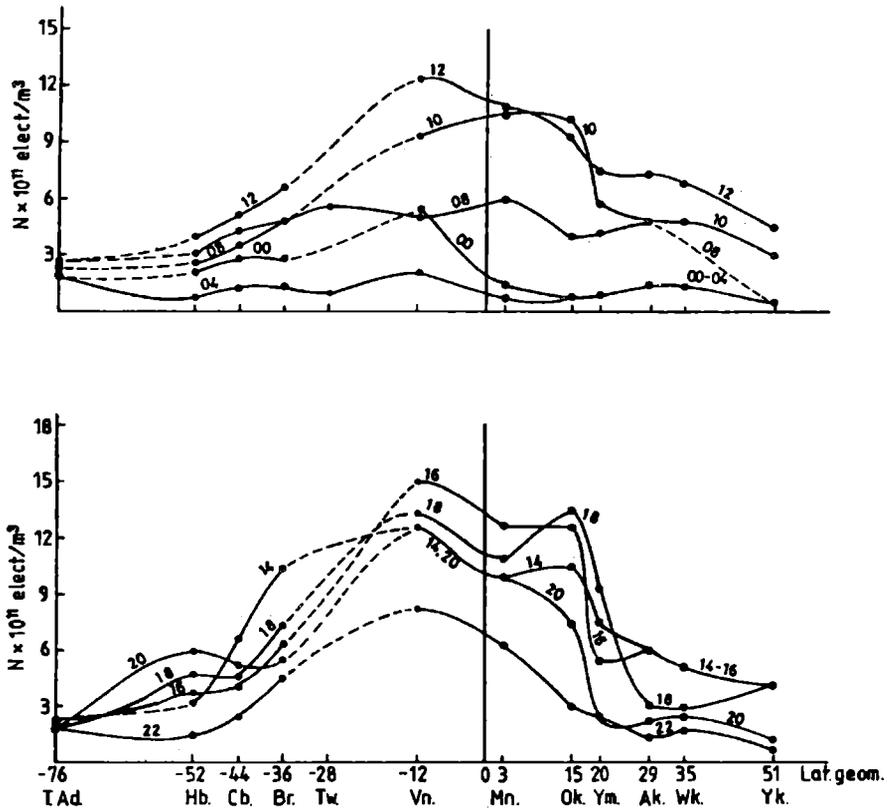
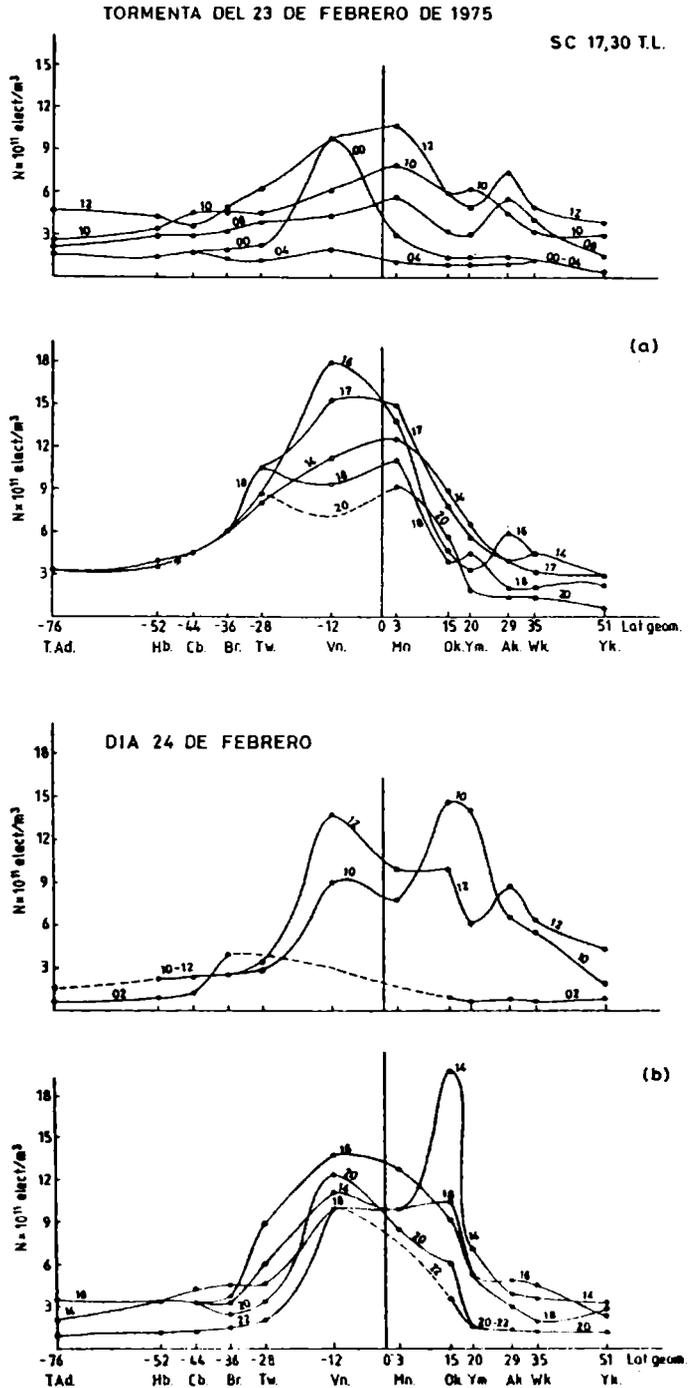


Fig. 3



TORMENTA DEL 22 DE NOVIEMBRE DE 1975

S.C. 08.05 T.L.

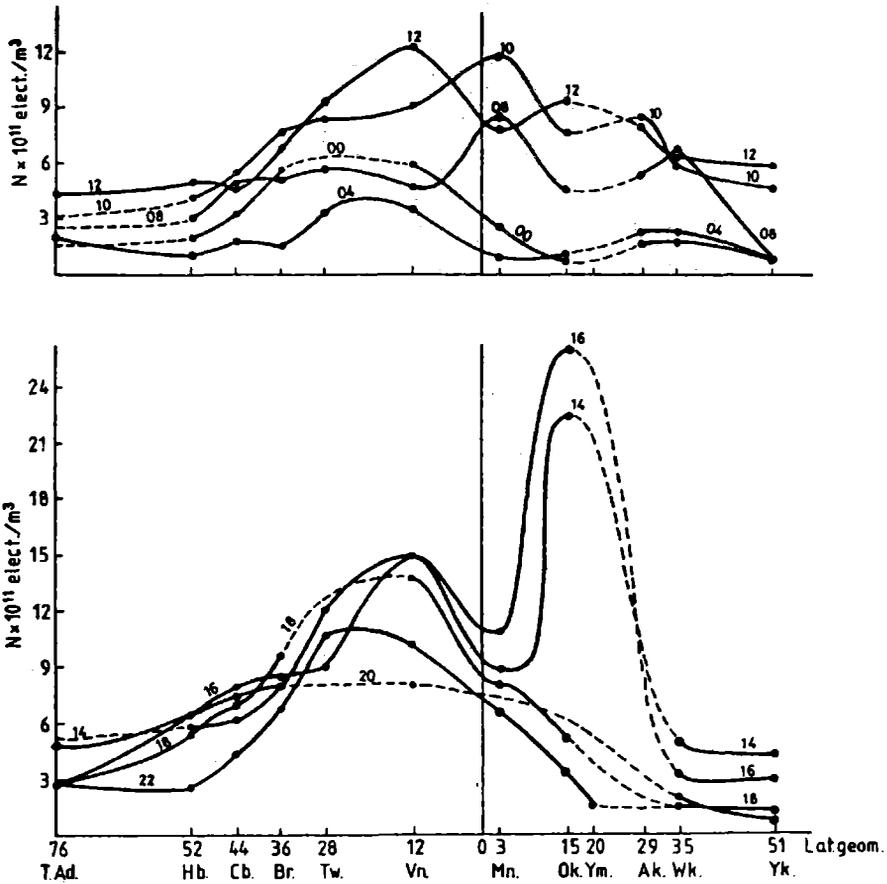


Fig. 5

