

ESTUDIO DE LAS MAREAS SOLARES TERMOSEFERICAS EN EL HEMISFERIO SUR

PARTE I: METODOLOGIA Y MAREAS DE LA DENSIDAD ELECTRONICA

Pablo O. Canziani y Santiago Marinaro

L.I.A.R.A. - PRO.NA.RP.

Vicente López - República Argentina

RESUMEN

Se analizaron los procesos termosféricos en base a la teoría de mareas atmosféricas de J. M. Forbes. Se utilizaron datos de foF2 y h'F, en condiciones de actividad solar media, de sondeadores ionosféricos ubicados en el hemisferio sur.

Del análisis de las frecuencias de oscilación de la densidad electrónica máxima de la capa F2 se confirmó la existencia de mareas diurnas y sus subarmónicos. Por otra parte, se estudió la estructura latitudinal de las mareas diurnas y semidiurnas, así como las variaciones estacionales, tanto en amplitud como en fase. Se observó la presencia del control magnetosférico en altas latitudes en el solsticio de verano.

ABSTRACT

Thermospheric processes were analyzed according to the atmospheric tidal theory, developed by J. M. Forbes. foF2 and h'F ionosonde data, corresponding to the southern hemisphere, under medium solar activity, were used.

The existence of diurnal tides and subharmonics was confirmed, from the analysis of the oscillation frequencies of the F2 layer peak electron density. Furthermore, the latitudinal structure of the diurnal and semidiurnal tides was studied, both in amplitude and phase, as well as their seasonal variations. At high latitudes, during the summer solstice, presence of magnetospheric control was observed.

INTRODUCCION. EL MODELO TEORICO

En la última década se desarrollaron diversos modelos para describir los principales procesos atmosféricos en términos de mareas diarias y sus subarmónicos. El modelo más completo a la fecha es el de J.M.Forbes (1982a,b) basado en el modelo clásico de Chapman y Lindzen (1970).

El análisis del modelo, para la atmósfera neutra, en condiciones de actividad solar media, arroja los siguientes resultados:

a) Marea solar diurna ($n = 1$, periodo 24 hs.)

1. Por debajo de los 100 km, en bajas latitudes se destaca un crecimiento exponencial de la amplitud y progresión de fase con la altura para los vientos y la temperatura.
2. Por debajo de los 100 km, en altas latitudes no se observa prácticamente ningún crecimiento exponencial ni progresión de fase con la altura.
3. A partir de los 200 km las amplitudes y fases se acercan asintóticamente a valores constantes. Esto se debe al fenómeno de equilibrio difusivo, así como a la inexistencia de fuentes de excitación en la alta termosfera.
4. En la región de los 90-150 km, las mareas son excitadas en partes iguales por fenómenos de orden local y propagación ascendente.

b) Marea solar semidiurna ($n = 2$, periodo 12 hs.)

1. Se observa un comportamiento en altura similar al de las mareas diurnas: crecimiento exponencial y progresión de fase por debajo de los 120 km y comportamiento asintótico por encima de los 200 km.
2. En la baja termosfera, en latitudes medias y altas, las mareas de viento semidiurnas tienen por lo menos la misma amplitud que las diurnas.

3. En la alta termósfera los vientos semidiurnos tienden a tener magnitudes similares a los diurnos en bajas latitudes.

La validez del citado modelo desarrollado en base a datos obtenidos esencialmente en el hemisferio norte y extrapolados al hemisferio sur, necesita ser corroborado experimentalmente en ambos hemisferios. En el presente trabajo se procedió a un análisis experimental para latitudes medias en el hemisferio sur.

ANALISIS EXPERIMENTAL DE LAS MAREAS TERMOSEFERICAS

Los sondeadores ionosféricos forman en el hemisferio sur una red apropiadamente densa para el estudio de la alta termósfera. Se disponen de datos de $h'F$, la altura virtual de la capa F y $foF2$ la frecuencia crítica de la capa F2. A partir de $foF2$, se puede deducir la densidad electrónica N_e ($e\ m^{-3}$) según:

$$N_e = \frac{\pi m_e}{e^2} f_c^2 \quad (1)$$

donde m_e : masa del electrón
 e : carga electrónica
 f_c : frecuencia crítica en megaciclos.

Al disponer de series de datos regularmente espaciados, y cuya longitud se puede determinar según los requerimientos indicados más adelante, es posible realizar análisis espectrales de estas para obtener información sobre las frecuencias de oscilación, amplitud y fase. Se estudia entonces el comportamiento de las mareas neutras en base a mediciones del comportamiento de los electrones. En efecto, el movimiento de masa de las partículas neutras mayoritarias (viento neutro) afecta la distribución iónica, oscilando ésta con las mismas frecuencias del viento neutro (Giraldez, 1984).

Considerando el caso particular de la capa F, sea N_e la densi-

dad eléctrica perturbada a primer orden:

$$N_e(z, t) = N_{e,0}(z) + N'_e(z, t) \quad (2)$$

$N_{e,0}$: valor medio de la densidad electrónica.

N'_e : perturbación linealizable de la densidad eléctrica.

Sea \vec{v} el viento neutro perturbado.

$$\vec{v} = \vec{v}_0(z, t) + \vec{v}' \exp [i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})] \quad (3)$$

y v_i , la velocidad inducida en los iones.

$$v_i = (v \cdot \hat{e}_B) \hat{e}_B \quad (4)$$

\hat{e}_B : dirección del campo magnético terrestre de magnitud B .

La ecuación de continuidad es:

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} + \vec{v} \cdot (N_e \vec{v}_i) = Q - L \quad (5)$$

Q : velocidad de producción de electrones

L : velocidad de pérdida de electrones.

Considerando perturbaciones a primer orden:

$$\frac{\partial N'_e}{\partial t} + \vec{v} \cdot (N_{e,0} \vec{v}'_i) + \vec{v}' \cdot (N_{e,0} \vec{v}_i) + \vec{v} \cdot (N'_e \vec{v}_{i0}) = \delta Q - \delta L \quad (6)$$

Si se tiene un medio estratificado, siendo z la altura considerada:

$$\vec{v} N_e = - \frac{\partial N_e}{\partial z} \hat{e}_z \quad (7)$$

y reemplazando v_i en términos de v , se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N'_e}{\partial t} + \{N_{e,0}[-i(\vec{v}' \cdot \hat{e}_B) \hat{e}_B \cdot \hat{e}_z] + \frac{\partial \vec{v}'_{i,z}}{\partial z}\} + (\vec{v}' \cdot \hat{e}_B) \frac{\partial N_{e,0}}{\partial z} \hat{e}_B \cdot \hat{e}_z \\ \cdot \exp[i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})] + (\vec{v}'_0 \cdot \hat{e}_B) \frac{\partial N'_e}{\partial z} \hat{e}_B \cdot \hat{e}_z + N'_e \frac{\partial v_{i,z}}{\partial z} \\ = \delta Q - \delta L. \end{aligned} \quad (8)$$

donde $v_{i,z} : v_x \cos \theta \sin I \cos I + v_y \sin \theta \sin I \cos I$

θ : ángulo polar de B

I : dip magnético.

Por otra parte, foF2 mide la máxima densidad electrónica:

$$\frac{\partial N'_e}{\partial z} = \frac{\partial N_{e,0}}{\partial z} = 0. \quad (9)$$

Dado que v' es proporcional a $\exp(i\omega t)$ y por lo tanto armónico, entonces la perturbación de la densidad es también armónico con la misma frecuencia aunque diferente fase. δQ y δL representan fenómenos cuya escala temporal es mucho menor que la de las mareas, y como dependen en forma lineal de N_e , no afectan la frecuencia. La presencia de los vientos de fondo introduce desfasajes. Se tiene entonces que:

$$N'_e = N_{e,0} \left(v_i \cdot \vec{k} + \frac{\partial v_{i,z}}{\partial z} \right) \exp[i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})] \quad (10)$$

Esto justifica el uso de los datos de sondeadores ionosféricos para el estudio de mareas neutras. Mediante el análisis espectral de las series de foF2 y h'F, se determina la existencia de los armónicos diurnos y subarmónicos, para luego realizar un análisis en la latitud de la amplitud y fase de las mareas diurnas y semidiurnas de

la densidad electrónica y del viento vertical.

Se seleccionaron los sondeadores indicados en la Tabla I. Estos forman aproximadamente una línea en el eje Norte-Sur, evitando así la inclusión de cualquier dependencia longitudinal, incluida en el modelo. Se eligieron los equinoccios y los solsticios en periodos de actividad solar media dada por el número de Wolf del Observatorio de Zurich ($40 < R < 80$). Dado que la dinámica equinoccial tiene una duración breve (aproximadamente un par de semanas antes y después del equinoccio) (Roble et al., 1977), los intervalos de muestreo se eligieron dentro de las cuatro semanas centradas en torno de los equinoccios y solsticios. Los intervalos fueron fijados en 10 días consecutivos (240 valores horarios) lo que permitía, cuando se disponía de valores diarios de R , seleccionar periodos de actividad solar relativamente estable. Cuando sólo se tenían promedios mensuales de R se tomaron los 10 días centrados en los equinoccios o solsticios (Tabla II).

Para el análisis espectral se utilizó la transformada de Fourier, ya que esta permitía elegir la longitud de las series de forma tal que las frecuencias muestreadas coincidieran con las frecuencias buscadas. Dada la longitud de las series, la frecuencia de Nyquist es de 2 horas. Periodos de este orden corresponden a ondas gravitatorias. Son fenómenos aleatorios, de corta duración (~ 3 h). Por lo tanto, no se produce "aliasing" y solo aparecen como ruido en el espectro.

MAREAS DE LA DENSIDAD ELECTRONICA EN LA CAPA F2

Análisis cualitativo de los espectros

La Fig. I muestra los espectros para la densidad electrónica. Fueron construidos con las estaciones ordenadas por latitud, de mayor a menor, graficando para cada una todos los espectros obtenidos

para el período bajo consideración.

Un rasgo destacable de las mareas de densidad electrónica es la fuerte componente diurna (D) observada en todas las estaciones y para los 4 períodos del año. La relación señal-ruido es del orden de 10 para la diurna en todas las épocas del año aunque en verano el ruido es ligeramente mayor. Esta componente alcanza valores máximos en los equinoccios, intermedios en diciembre y mínimos en junio. Se observa siempre un crecimiento en magnitud hacia el ecuador.

Para la semidiurna (SD) se observa un comportamiento similar aunque mucho más suave. La marea teridiurna (TD, período 8 h) tiende a desaparecer en altas latitudes. Se observa que en Islas Argentinas, en diciembre, la semidiurna no está bien definida.

Análisis cuantitativo de las mareas

Las densidades electrónicas medias (Fig.II) tienen valores del orden de 10^{12} e m^{-3} mientras que a 250 km la densidad neutra es del orden de 3.1×10^{15} part. m^{-3} . La estructura latitudinal es similar para los cuatro períodos bajo consideración, con valores máximos sobre Tucumán y valores mínimos sobre Islas Argentinas. Como para la componente diurna, los valores medios máximos se obtienen en los equinoccios, salvo en Malvinas e Islas Argentinas donde estos se observan en diciembre. Salvo en marzo, no se observa ningún ordenamiento según el valor de R .

La marea solar diurna

En líneas generales las mareas diurnas (Fig.III) se comportan en amplitud como las densidades medias. En el solsticio de invierno las amplitudes valen aproximadamente $3/4$ de los valores de la densidad media. La fase (indicada por la hora del máximo) se ubica

entre las 13 y las 15 hora local.

En el solsticio de verano se obtiene la mayor diferencia entre las amplitudes y la densidad media. Sobre Malvinas solo es $1/5$ del valor medio, mientras que para las demás estaciones la relación es de $1/2$ aproximadamente. La fase presenta una fuerte variación latitudinal, con unas catorce horas de diferencia entre Tucumán e Islas Argentinas. Aquí se destaca claramente la desaparición del control atmosférico y su reemplazo, en altas latitudes, por el control magnetosférico. Este último predice un máximo a las 6 UT, o sea en torno de las 2 hora local. Esto corrobora las variaciones observadas en los espectros de diciembre en altas latitudes.

Los equinoccios presentan un comportamiento similar tanto en amplitud como en fase. La amplitud es aproximadamente $2/3$ de la densidad media. El comportamiento de la fase es similar al de junio aunque retrasadas en por lo menos una hora. La estructura latitudinal es menos marcada.

La relación entre las amplitudes y el número de Wolf es el mismo que la de las densidades medias. No se observa ninguna relación para la fase.

La marea solar semidiurna

Es mucho menor que la diurna y presenta una mayor variabilidad tanto en amplitud como en fase. En términos generales presenta una tendencia decreciente de norte a sur con poca variación en amplitud entre los equinoccios y el solsticio de verano. En junio se observa una tendencia al aumento de la amplitud sobre Malvinas.

La fase de junio se ubica en el primer cuarto de ciclo. En los equinoccios y en diciembre la fase está montada sobre la medianoche (y mediodía).

En ningún caso es posible relacionar las amplitudes o las fases con la actividad solar.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha presentado una nueva forma de utilizar los datos de sondeadores ionosféricos, que forman una amplia base de datos tanto en el orden temporal como espacial, para el estudio de la dinámica termosférica. Aquí se los utilizó para corroborar las predicciones del modelo teórico de Forbes.

En esta parte, mediante el análisis espectral de la densidad electrónica se corroboró la presencia de mareas diurnas y sus subarmónicos. Salvo en diciembre, para altas latitudes, están siempre bien definidas las mareas diurnas y semidiurnas. Los trabajos realizados muestran que:

1. La marea diurna de la densidad electrónica es muy fuerte y su amplitud se comporta en latitud como la densidad electrónica media.
2. La fase diurna presenta una fuerte variabilidad estacional. Se observa la presencia del control magnetosférico en latitudes altas en verano. Este fenómeno no ha sido incluido en el modelo teórico.
3. La componente semidiurna, con mayores dispersiones en todas las estaciones, presenta poca variabilidad estacional.
4. No fue posible observar una dependencia en R . Esto podría deberse a que existen fenómenos de mayor peso que cubren la respuesta a las fluctuaciones solares. O bien, es posible que en el rango aquí considerado para R , no se produzcan variaciones notables en la respuesta atmosférica.

BIBLIOGRAFIA

- Banks, P.M. y Kockarts, G. (1973) *Aeronomy*, Academic Press.
- Canziani, Pablo O. (1985) Tesis de Licenciatura, U.B.A.
- Forbes, J.M. (1982a) *Atmospheric Tides, 1, Model description and results for the solar diurnal component*, *J. Geophys. Res.*, 87, 5222-5240.

Forbes, J.M. (1982b) Atmospheric Tides, 2, The solar and lunar semi-diurnal components, J.Geophys.Res., 87, 5241-5252.

Giraldez, A.E. (1984) Evolución de ondas gravitatorias en las regiones E y F de la ionósfera, Geoacta, 12, 31-46.

Roble, R.G., Dickinson, R.E. y Ridley, E.C. (1977) Seasonal and solar cycle variations of the zonal mean circulation in the thermosphere, J.Geophys.Res., 82, 5493-5504.

| ESTACION | LATITUD GEOGRAFICA | LONGITUD GEOGRAFICA | LATITUD GEOMAGNETICA | MERIDIANO HORARIO |
|-------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| TUCUMAN-T | 26.90°S | 64.40°O | 15.42°S | 60°O |
| SAN JUAN- SJ | 31.50°S | 69.90°O | 20.02°S | 60°O |
| BUENOS AIRES-BA | 34.55°S | 58.50°O | 23.21°S | 60°O |
| CONCEPCION-C | 36.60°S | 73.00°O | 25.29°S | 75°O |
| PUERTO ARGENTINO -PS | 51.78°S | 57.85°O | 40.40°S | 60°O |
| ISLAS ARGENTINAS -IA | 65.25°S | 64.25°O | 53.73°S | 60°O |

Tabla I: Red de sondeadores ionosféricos.

| AÑO | MES | INTERVALO | R | σ_n |
|------|-----|-----------|----|------------|
| 1966 | 6 | 17 - 26 | 45 | — |
| 1966 | 9 | 17 - 26 | 63 | — |
| 1966 | 12 | 17 - 26 | 73 | — |
| 1972 | 3 | 1 - 9 | 80 | 9.21 |
| 1972 | 6 | 16 - 25 | 64 | 6.21 |
| 1972 | 9 | 16 - 25 | 50 | 12.33 |
| 1972 | 12 | 14 - 23 | 58 | 11.84 |
| 1973 | 3 | 8 - 17 | 71 | 9.87 |
| 1973 | 6 | 17 - 26 | 40 | — |
| 1973 | 9 | 21 - 30 | 68 | 15.58 |
| 1973 | 12 | 17 - 26 | 57 | 15-69 |
| 1974 | 3 | 27 - 25 | 44 | — |
| 1974 | 6 | 6 - 15 | 56 | 13.95 |
| 1974 | 9 | 11 - 20 | 69 | 15.26 |
| 1977 | 6 | 21 - 30 | 56 | 15.92 |
| 1977 | 9 | 16 - 25 | 52 | 7.1 |
| 1977 | 12 | 7 - 16 | 50 | 14.73 |

Tabla II: Períodos de muestreo.

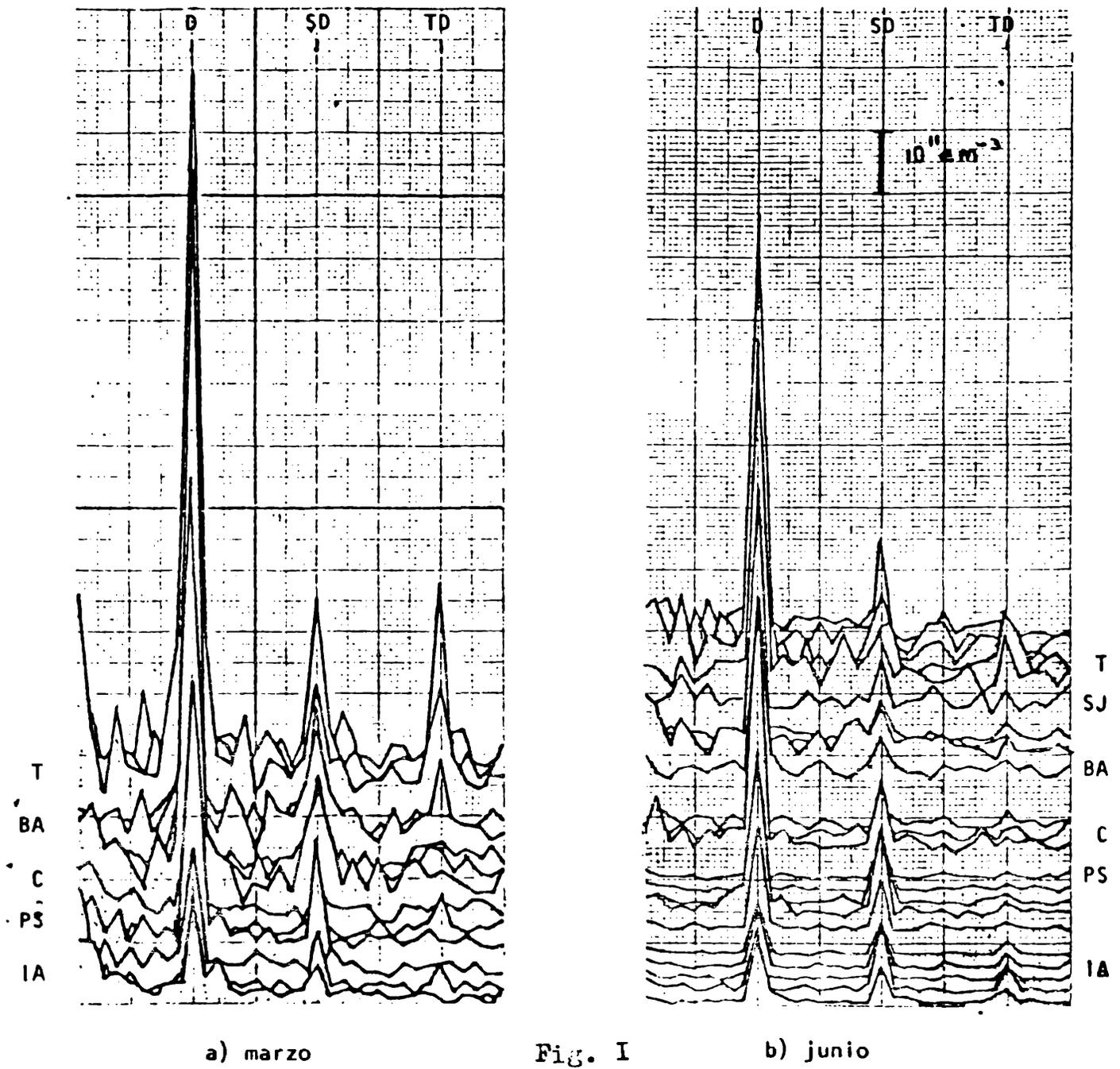
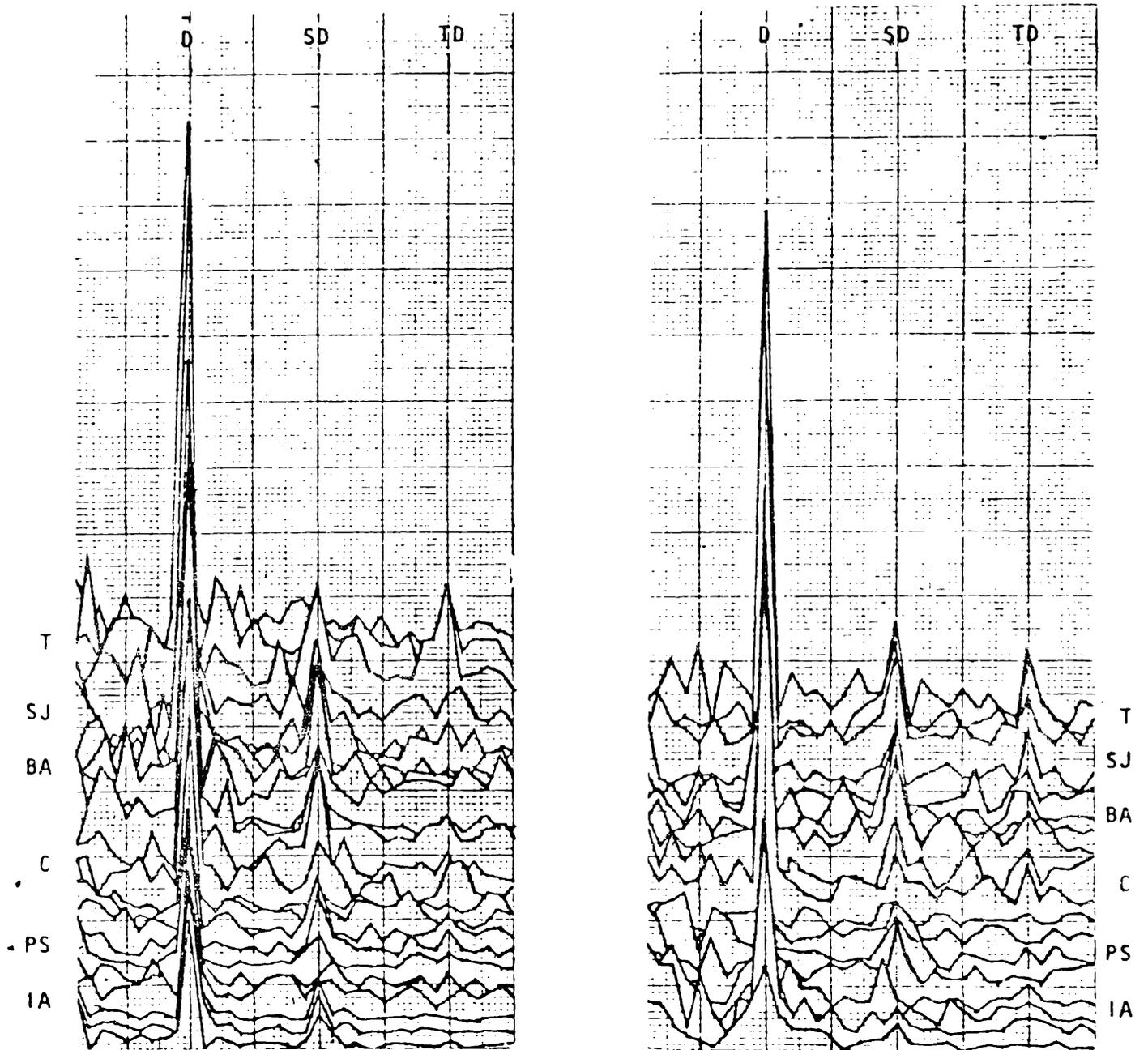


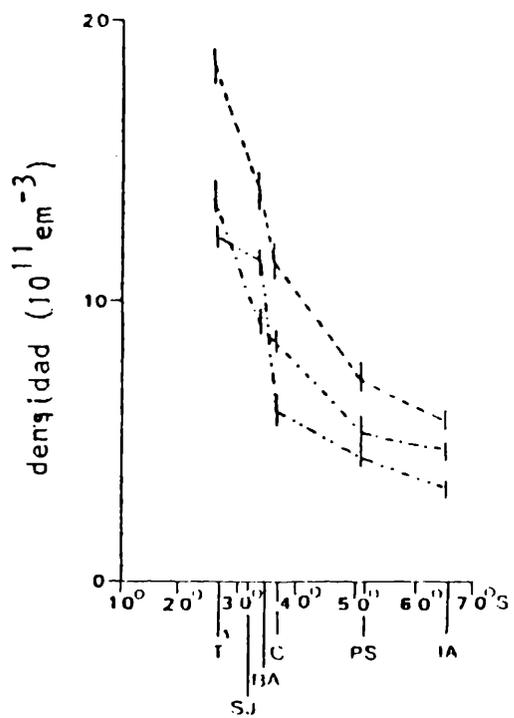
Fig. I y Ia.: Espectros de la densidad electrónica total. (Para cada estación se presentan juntos los espectros de distintos años para el período bajo consideración.)



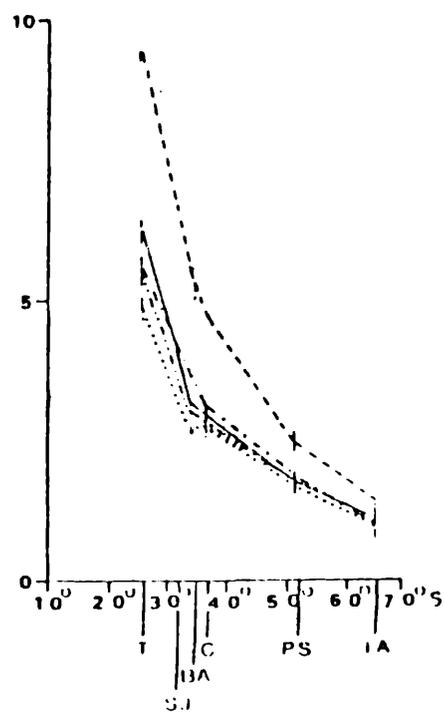
a) septiembre

Fig. 1a

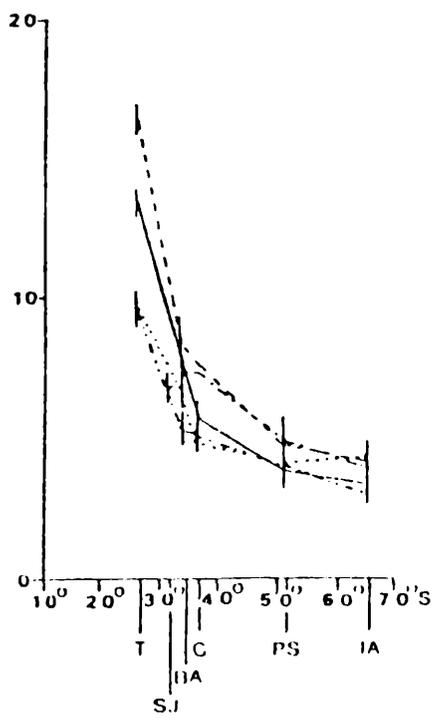
b) diciembre



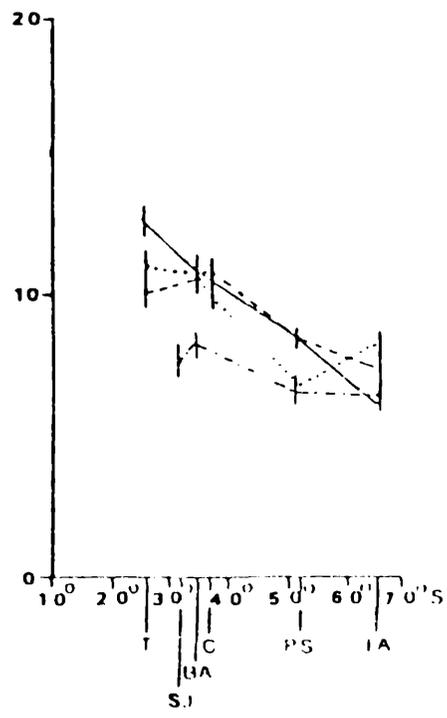
a) marzo



b) Junio



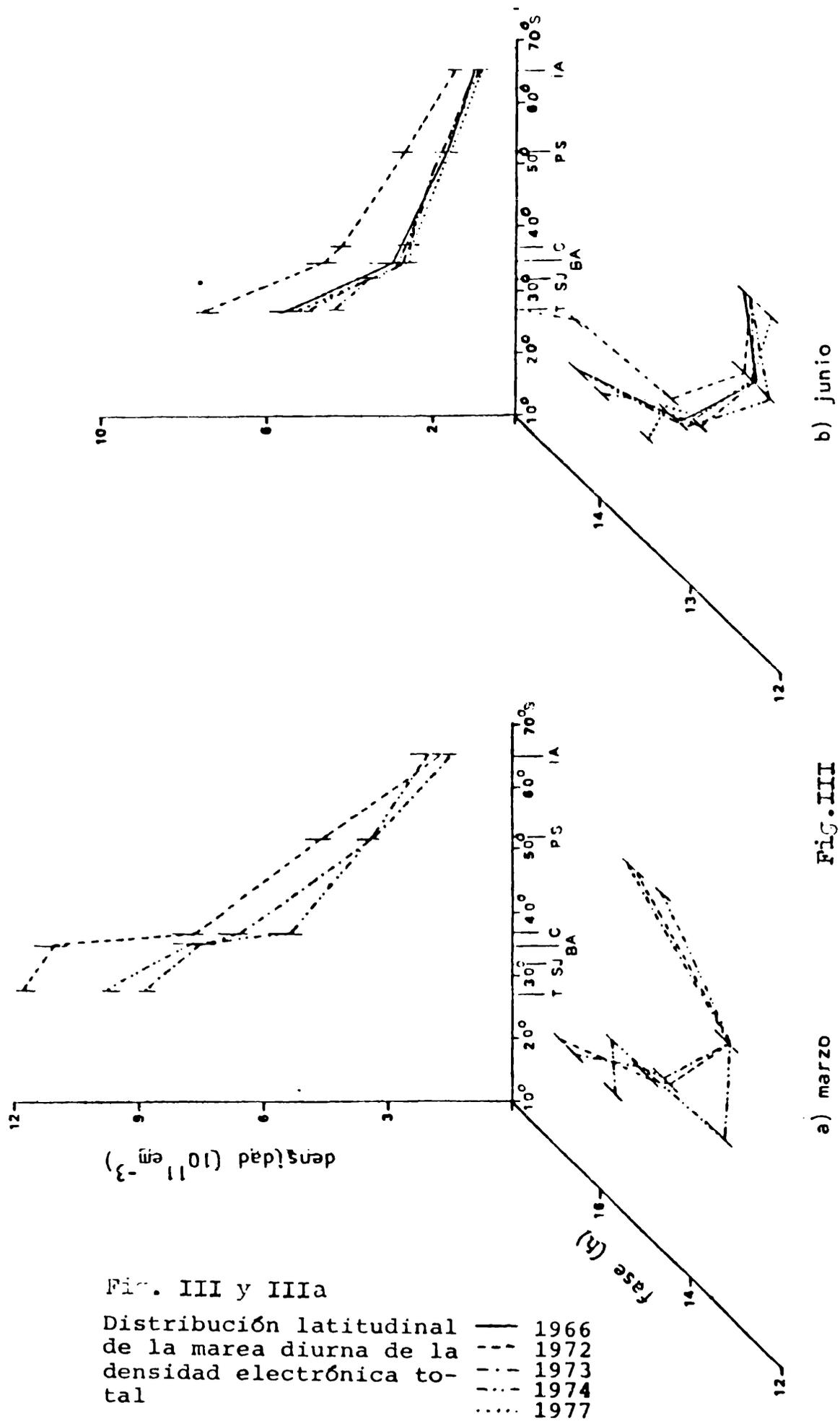
c) septiembre

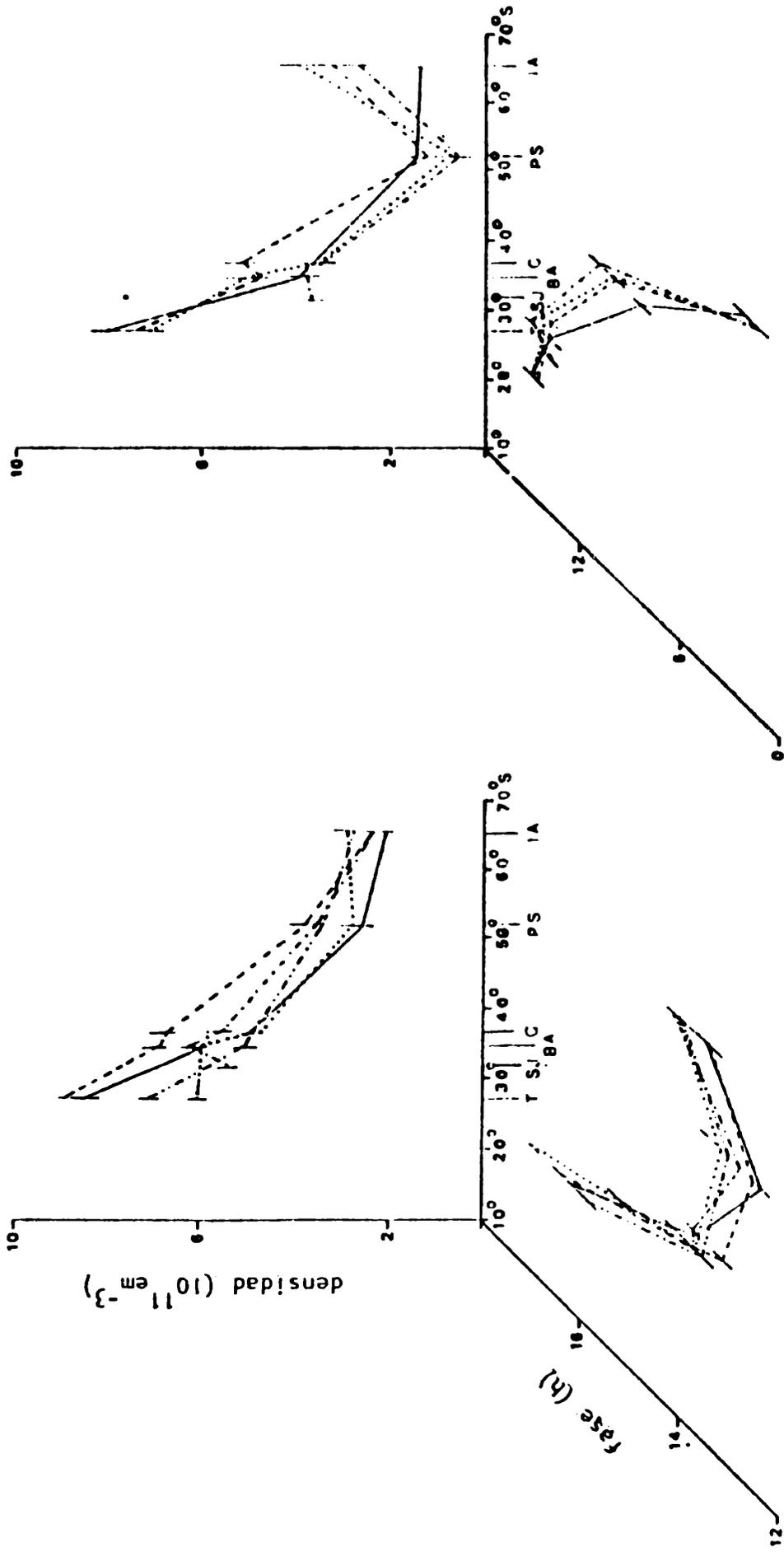


d) diciembre

— 1966
 - - - 1972
 - - - 1973
 - - - 1974
 ···· 1977

Fig.II: Distribución latitudinal de la densidad electrónica media.





b) diciembre

Fig. IIIa

a) septiembre