

ESTUDIO DE LAS MAREAS SOLARES TERMOSEFERICAS EN EL HEMISFERIO SUR

PARTE II: MAREAS DEL VIENTO VERTICAL

Pablo O. Canziani y Santiago Marinaro

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

Vicente López - República Argentina

RESUMEN

Se utilizaron los datos horarios de h'F para estimar las mareas del viento vertical. Se justificó la utilización de la altura de la capa F y sus desplazamientos para obtener el viento vertical.

El análisis latitudinal y estacional de las mareas y su comparación con las mareas simuladas con el modelo de Forbes, indican que este último es apto en latitudes medias, requiriendo sólo ajustes. Se observaron mayores discrepancias en altas latitudes. El modelo de Forbes es aceptable desde el punto de vista cualitativo y semi-cuantitativo.

ABSTRACT

h'F hourly data were used to estimate the vertical wind tides. The use of F layer height and its fluctuations to obtain the vertical wind was justified.

The latitudinal and seasonal analysis of the tides and their comparison with those simulated by the Forbes model, point out that it is an apt description at mid-latitudes, requiring only some fitting. Greater discrepancies were observed at higher latitudes. The Forbes model is valid from a qualitative and semi-quantitative point of view.

## INTRODUCCION

Según la breve reseña teórica presentada en la parte I la dinámica atmosférica puede describirse en términos de fluctuaciones periódicas de tipo diario y sus subarmónicos, modulados estacionalmente y por el ciclo solar. El análisis espectral de la densidad electrónica confirmó la presencia de dichos armónicos.

Habiendo confirmado la existencia de dichas mareas, se procedió a estimar las mareas solares del viento vertical, en condiciones de actividad solar media, utilizando los datos  $h'F$ , correspondientes a la altura virtual de la capa  $F$ , para los mismos períodos de muestreo de la parte I. Estos valores representan una cota superior para el viento ya que los  $h'F$  son ligeramente mayores que la altura real en ciertos períodos del día. Por otra parte, la altura de la capa varía latitudinalmente, pero al encontrarse siempre dentro de la región de equilibrio difusivo, donde el modelo se comporta en forma asintóticamente constante, es posible, dentro de los márgenes del error experimental, comparar los valores de viento vertical para las distintas estaciones.

## DETERMINACION DEL VIENTO VERTICAL: VALIDEZ DE LOS RESULTADOS

El espectro de  $h'F$  indica las oscilaciones en altura. Para determinar el viento vertical se consideró que si la altura  $z$  respecto de la superficie de la capa está dada por:

$$z = \text{Re} \left[ \sum_{n=0}^{\infty} z_n \exp [in(\omega t + \rho_n)] \right] \quad (1)$$

entonces derivando respecto al tiempo, la velocidad vertical  $w'$  será:

$$w' = \text{Re} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} in \omega z_n \exp [in(\omega t + \rho_n)] \right] \quad (2)$$

Ahora bien, el  $w'$  calculado corresponde a la velocidad de desplazamiento vertical de los electrones. El modelo de Forbes corresponde a mareas neutras y podría ocurrir que el desplazamiento de las partículas cargadas difiera del de las neutras. Sin embargo se observa experimentalmente que:

$$V_z \ll U \quad (3)$$

donde:

$V_z$ : velocidad de deriva vertical de los electrones

U: viento zonal neutro.

Por lo tanto, independientemente de la existencia o no de campos eléctricos en la alta atmósfera, trabajando en condiciones magnéticamente no perturbadas, se cumple la condición (3). Luego la velocidad de deriva vertical es despreciable frente al movimiento neutro de la termósfera. Por lo tanto, la utilización de los datos de  $h'F$  es válida para la estimación de mareas del viento vertical.

#### MAREAS DEL VIENTO VERTICAL EN LA CAPA F

##### Análisis cualitativo de los espectros

La Fig.I (construida con la Fig.I de la parte I) muestra los espectros para el  $w'$ . Se observa en la mayoría de los casos una marea diurna, con una relación señal-ruido del orden de 8-10. No se observan desplazamientos en frecuencia y muy poco ruido en frecuencias menores. En el mes de diciembre se observa un incremento importante en el ruido, llegando sobre Islas Argentinas a una relación de 2.4. El ruido se incrementa con el aumento de la frecuencia y disminución de la latitud.

La componente semidiurna muestra un comportamiento más variable, particularmente en el solsticio de verano, con importantes variacio-

nes en amplitud y pequeños corrimientos en frecuencia. Estas variaciones se observan particularmente en diciembre para todas las latitudes.

La teridiurna presenta una aún mayor variabilidad con una relación señal-ruido de 2-2.5 y presencia de picos del mismo orden de magnitud en frecuencias cercanas, indicando el esperable aumento de potencial espectral en el rango acústico-gravitatorio. Se observa, por otra parte, que en bajas latitudes la teridiurna alcanza valores mayores que la semidiurna.

Los espectros más definidos se obtienen en junio mientras que en diciembre la única frecuencia que presenta un comportamiento estable es la diurna, particularmente sobre Malvinas e Islas Argentinas. Estas irregularidades apoyan la tesis del control magnetosférico en la zona antártica en verano.

#### Análisis cuantitativo de las mareas

Dado que para todas las estaciones la capa F se encuentra dentro de la región del equilibrio difusivo, o sea donde el modelo se comporta en forma asintóticamente constante, fue posible comparar las mediciones de los diversos sondeadores sin incurrir en errores. Por otra parte, estas mediciones fueron comparadas con las mareas predichas por el modelo a los 240 km (altura media de la capa) (Forbes et al., 1982).

#### La marea solar diurna

El comportamiento de la marea diurna, a 240 km, tal como lo presenta el modelo de Forbes, está graficado en la Fig.IIa. Se postula para los equinoccios un comportamiento simétrico respecto del ecuador, o, lo que es lo mismo, invarianza entre los equinoccios de primavera y otoño. Las amplitudes decrecen hacia los polos, con un aumento lento de la fase desde el ecuador (10.7 h: hora del máximo)

nas. Estas irregularidades apoyan la tesis del control magnetosférico en la zona antártica en verano.

#### Análisis cuantitativo de las mareas

Dado que para todas las estaciones la capa F se encuentra dentro de la región del equilibrio difusivo, o sea donde el modelo se comporta en forma asintóticamente constante, fue posible comparar las mediciones de los diversos sondeadores sin incurrir en errores. Por otra parte, estas mediciones fueron comparadas con las mareas predichas por el modelo a los 240 km (altura media de la capa) (Forbes et al., 1982).

#### La marea solar diurna

El comportamiento de la marea diurna, a 240 km, tal como lo presenta el modelo de Forbes, está graficado en la Fig.IIa. Se postula para los equinoccios un comportamiento simétrico respecto del ecuador, o, lo que es lo mismo, invarianza entre los equinoccios de primavera y otoño. Las amplitudes decrecen hacia los polos, con un aumento lento de la fase desde el ecuador (10.7 h: hora del máximo) hacia los 30°-40° (11.3 h). Para el solsticio de diciembre se proponen vientos cuya amplitud decrece ligeramente hasta los 50° en el hemisferio sur (verano). En el hemisferio norte (invierno), los vientos decrecen más rápidamente con un repunte a partir de los 66°. En el verano la fase teórica es muy estable con valores entre las 11 y 12 horas. En el invierno se observa, a partir de los 30° una rápida disminución en la fase hasta llegar a 1.8 horas en los 72°.

La Fig.III presenta los resultados experimentales. La tabla I compara los valores teóricos ( $w_T'$ ) con los valores medios experimentales ( $w_E'$ , dispersión  $\sigma_w$ ). En junio se observa experimentalmente un fuerte incremento del viento a medida que crece la latitud—0—

hacia los  $30^{\circ}$ - $40^{\circ}$  (11.3 h). Para el solsticio de diciembre se proponen vientos cuya amplitud decrece ligeramente hasta los  $50^{\circ}$  en el hemisferio sur (verano). En el hemisferio norte (invierno), los vientos decrecen más rápidamente con un repunte a partir de los  $66^{\circ}$ . En el verano la fase teórica es muy estable con valores entre las 11 y 12 horas. En el invierno se observa, a partir de los  $30^{\circ}$  una rápida disminución en la fase hasta llegar a 1.8 horas en los  $72^{\circ}$ .

La Fig. III presenta los resultados experimentales. La tabla compara los valores teóricos ( $w_T^i$ ) con los valores medios experimentales ( $w_E^i$ , dispersión  $\sigma_w$ ). En junio se observa experimentalmente un fuerte incremento del viento a medida que crece la latitud mientras que la amplitud teórica decrece salvo en las altas latitudes. La fase disminuye con el incremento de la latitud mucho más lentamente que la teórica.

Para el solsticio de verano se observa la disminución de la amplitud para latitudes crecientes, siempre siendo la experimental aproximadamente el doble de la teórica. La fase crece con la latitud, estando adelantada en unas 6 h. respecto de la fase teórica.

En marzo y septiembre se obtienen, sobre Tucumán amplitudes milares a las propuestas por el modelo, pero estas crecen rápidamente con la latitud y a partir de los  $35^{\circ}$  se observa una estabilización para estas. La fase es menor que la del modelo, creciendo con la latitud, y muestra una gran variabilidad sobre Tucumán. En septiembre estas variaciones son más suaves indicando un posible arrastre estacional del comportamiento invernal. Un efecto de arrastre es también observable en marzo respecto del solsticio de verano.

No se observa relación alguna entre el número de Wolf,  $R$ , y la amplitud o la fase de la marea.

### La marea solar semidiurna

La Fig.IIb presenta las curvas para la marea semidiurna a 240 km según el modelo. Se observan variaciones en latitud mucho más marcadas que para la marea diurna, así como mayores diferencias estacionales. Las mareas semidiurnas son más fuertes en el hemisferio invernal y decrecen en el hemisferio de verano. En los equinoccios se observan máximos secundarios en los  $54^\circ$ . La fase varía en torno del mediodía (o medianoche) estando más adelantada en el ecuador y atrasándose hacia los polos.

La Fig.IV presenta los resultados experimentales, y la tabla II su comparación con los valores teóricos. En junio se encontraron amplitudes aproximadamente el doble de las teóricas. El máximo teórico de los  $48^\circ$  se encuentra desplazado hacia los  $35^\circ$ , salvo para 1972. La fase decrece en lugar de aumentar con la latitud. Se observa un importante corrimiento respecto de la teoría.

Como se observaba en los espectros, la variabilidad en diciembre, tanto en amplitud como en fase, es importante. De todos modos se observa un comportamiento decreciente en latitud, aunque difiriendo en casi un orden de magnitud en altas latitudes.

En los equinoccios se ve claramente el máximo secundario de la amplitud, mayor que el teórico. No se observa el repunte de la amplitud hacia el ecuador a partir de los  $35-40^\circ$ , propuestos por la teoría. Se nota el efecto de arrastre estacional, particularmente sobre Islas Argentinas.

En lo referente a la fase, la de junio es la que más se diferencia de la teórica, adelantándose en latitud, sin presentar inversión de fase. La fase en diciembre tiene un comportamiento próximo al teórico aunque corrido en medio ciclo. La estructura latitudinal experimental de los equinoccios se aproxima bien a la teórica, con variaciones más marcadas y la inversión ligeramente desplazada a los  $35-40^\circ$ .

Las variaciones estacionales no son tan marcadas como en la teoría. Tampoco es posible determinar un comportamiento en función de los valores de  $R$  aquí considerados.

#### CONCLUSIONES

Del análisis que se acaba de realizar, se puede concluir que:

- i) Las amplitudes experimentales son siempre mayores que las teóricas. Sin embargo, el uso hecho del modelo de Forbes en este trabajo muestra que los resultados logrados por él proveen una buena aproximación, en relación a modelos anteriores. Era común obtener diferencias de por lo menos un orden de magnitud.
- ii) Las fases experimentales presentan comportamientos bastante distintos respecto de los teóricos, con corrimientos de medio ciclo o más. Estos corrimientos podrían ser debidos a la existencia de vientos de fondo que modifican la fase considerablemente. Otra causa podría ser la utilización de los  $h'F$  que se ven influenciados por el plasma ionosférico de las capas inferiores.
- iii) En algunos casos se observaron comportamientos en latitud distintos, con crecimiento de la amplitud en lugar de decrecimientos. Las mareas semidiurnas, si bien presentaron mayor variabilidad, se aproximan más a las predicciones teóricas.
- iv) En altas latitudes las mareas no son adecuadamente descritas por el modelo postulado, puesto que durante el verano en estas se puede notar el control magnetosférico de la termosfera.

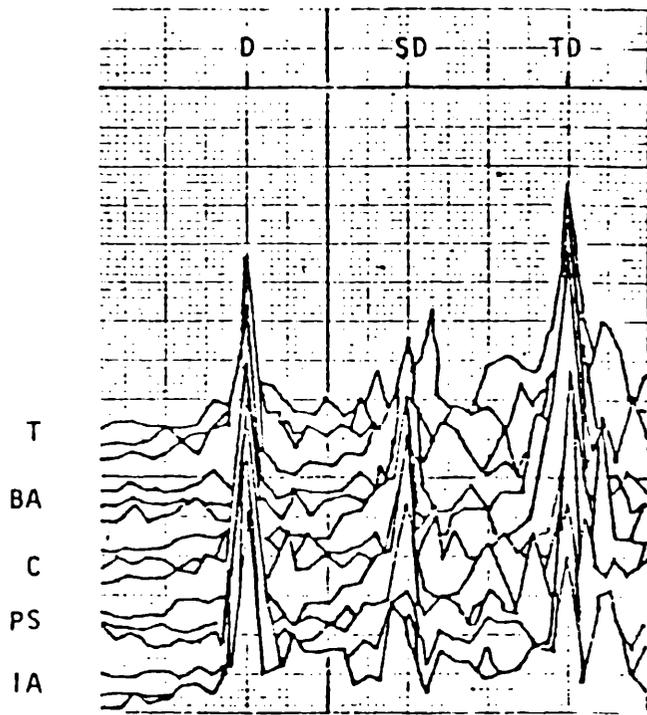
Lo expuesto muestra que la aplicación del modelo de Forbes, en la región termosférica requiere ser ajustado principalmente en latitudes altas y ser afinado en latitudes medias y bajas. De todos modos, es aceptable desde el punto de vista cualitativo y semicuantitativo.

Agradecimientos

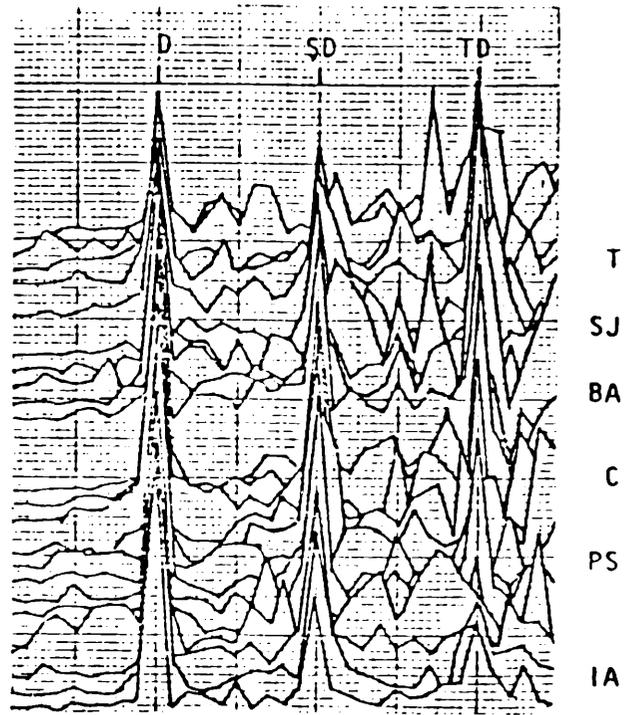
Los autores agradecen el paciente asesoramiento del Dr. Giraldez en la realización del presente trabajo y la colaboración de la Srta. Mercedes Alsó en la realización de los espectros gráficos.

## BIBLIOGRAFIA

- 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.
- Forbes, J.M. y Gillette, D.F. (1982) A compendium of Theoretical Atmospheric Tidal Structures, Part I: Model Description Due to Realistic Thermal and Gravitational Excitation, Environmental Research Papers Na 780 (1), USAF.
- Forbes, J.M. (1982b) Atmospheric Tides, 2, The solar and lunar semi-diurnal components, J.Geophys.Res., 87, 5241-5252.
- Forbes, J.M. y Gillette, D.F. (1982) A compendium of Theoretical Atmospheric Tidal Structures, Part I: Model Description Due to Realistic Thermal and Gravitational Excitation, Environmental Research Papers Na 780 (1), USAF.

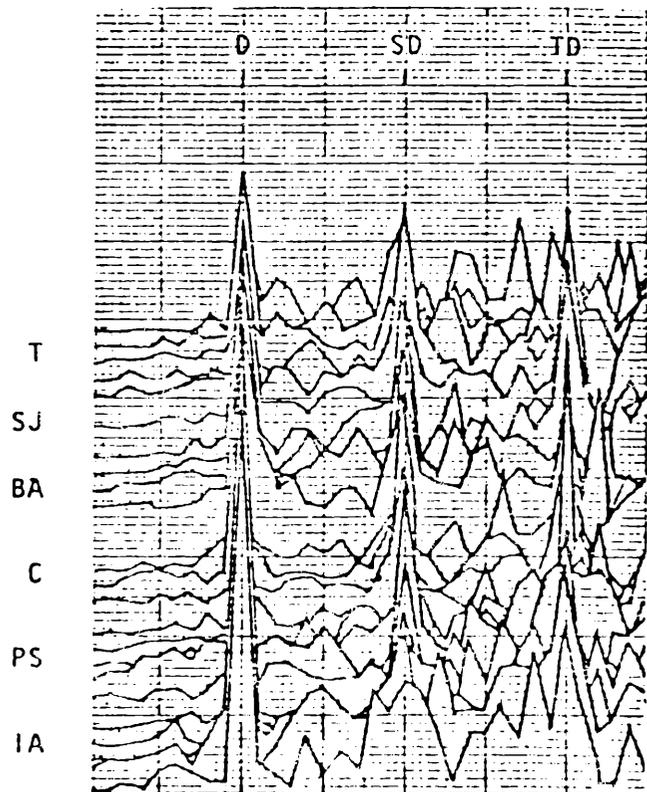


a) marzo

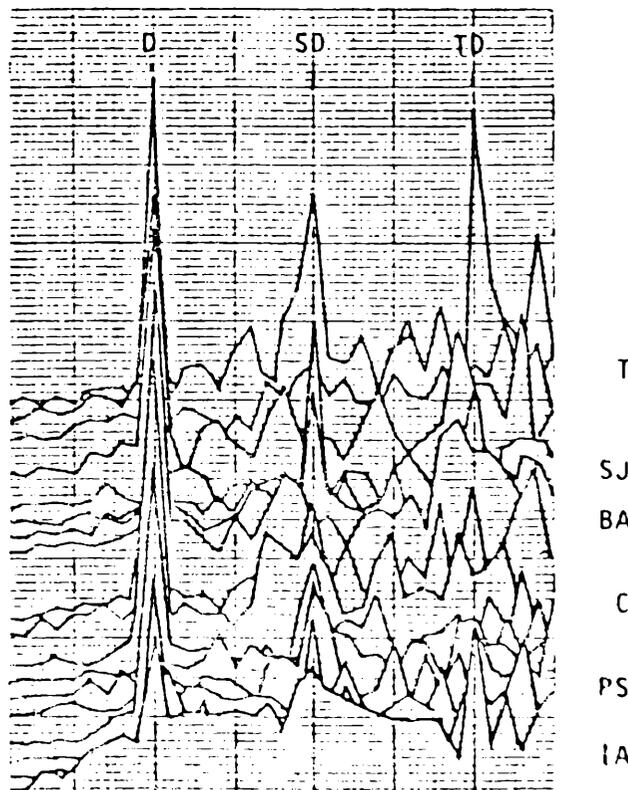


b) junio

I 1 ms<sup>-1</sup>

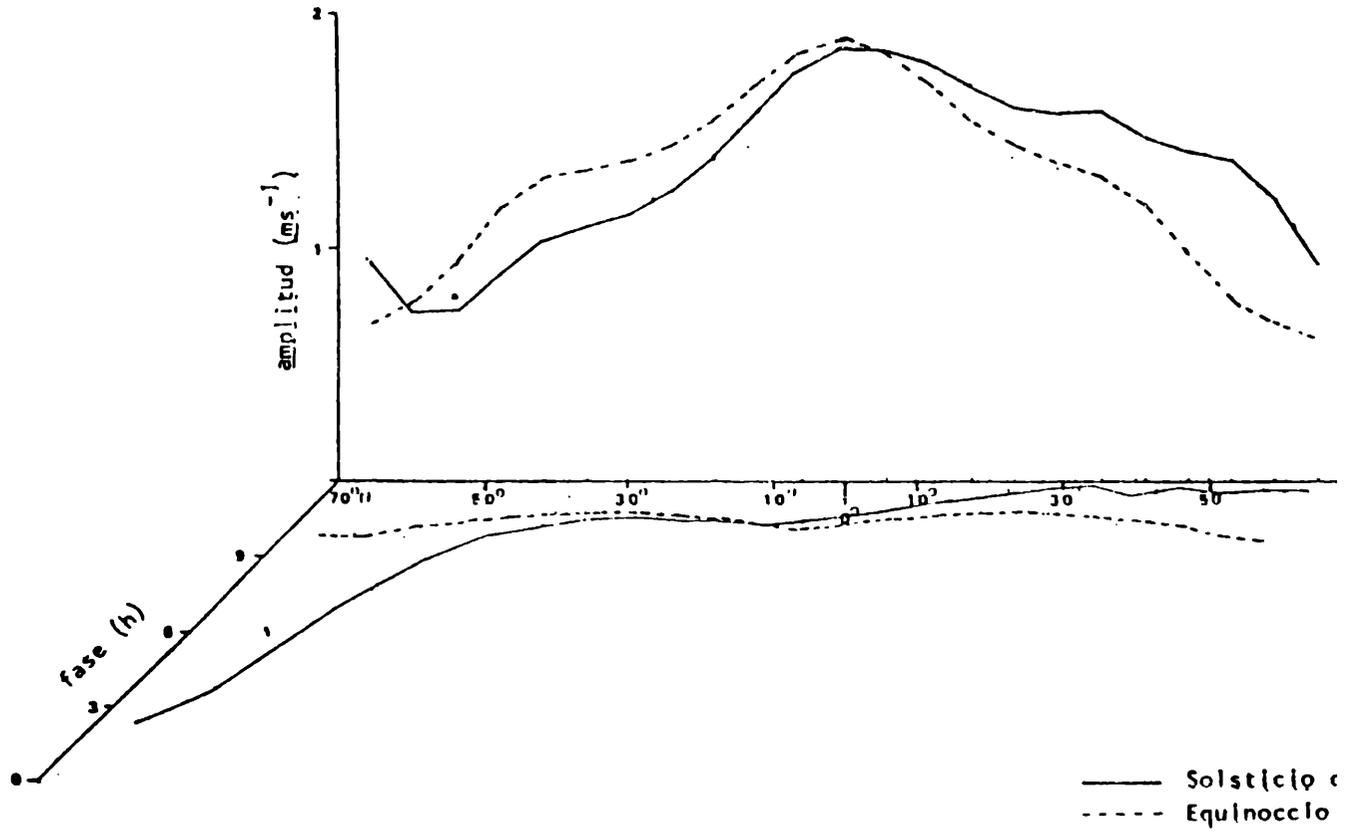


c) septiembre

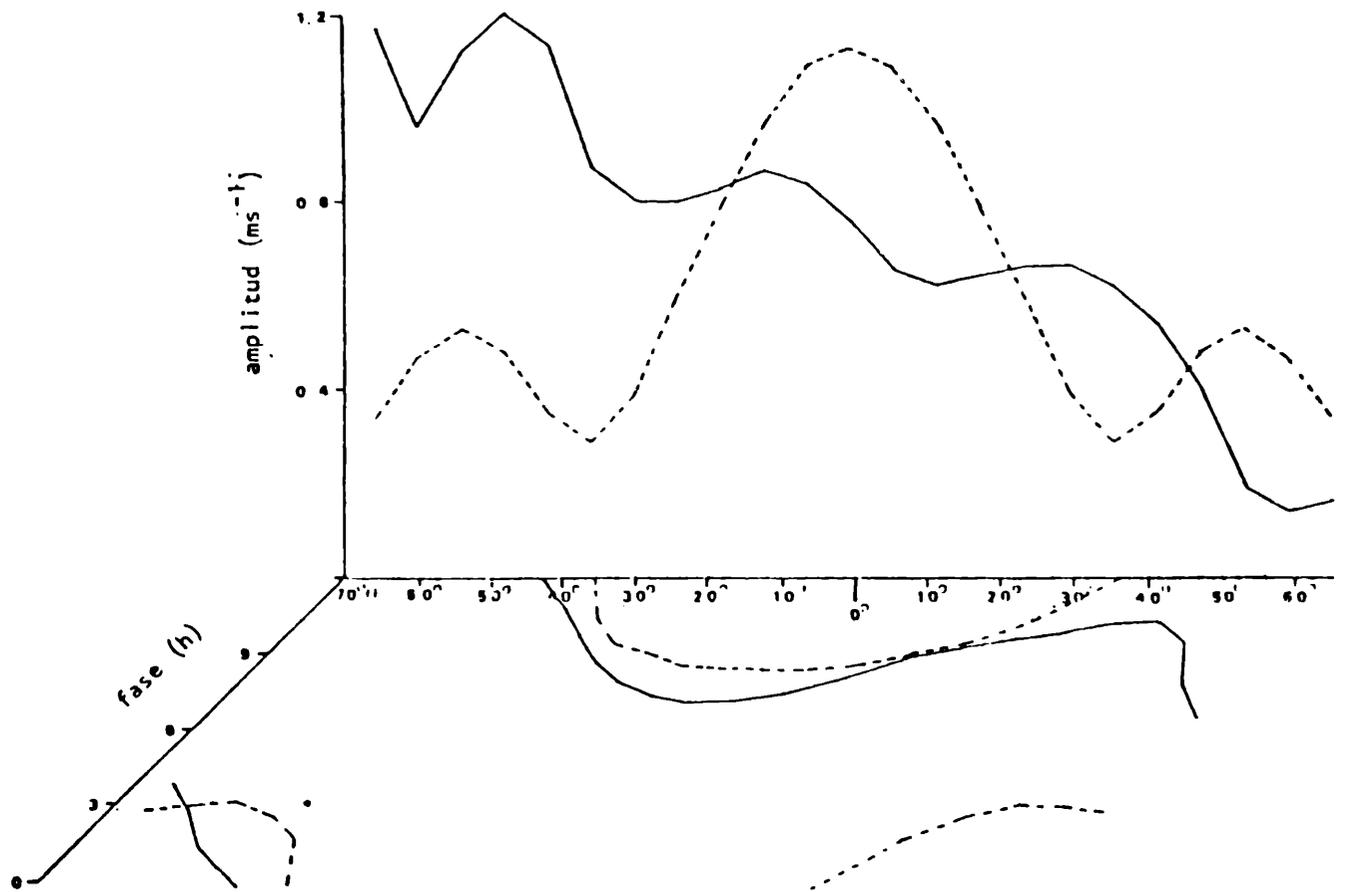


d) diciembre

Fig.I: Espectros del viento vertical  $w'$



a) Marea diurna.



b) Marea semidiurna.

Fig.II: Mareas del viento vertical a 240 km según el modelo Forbes.

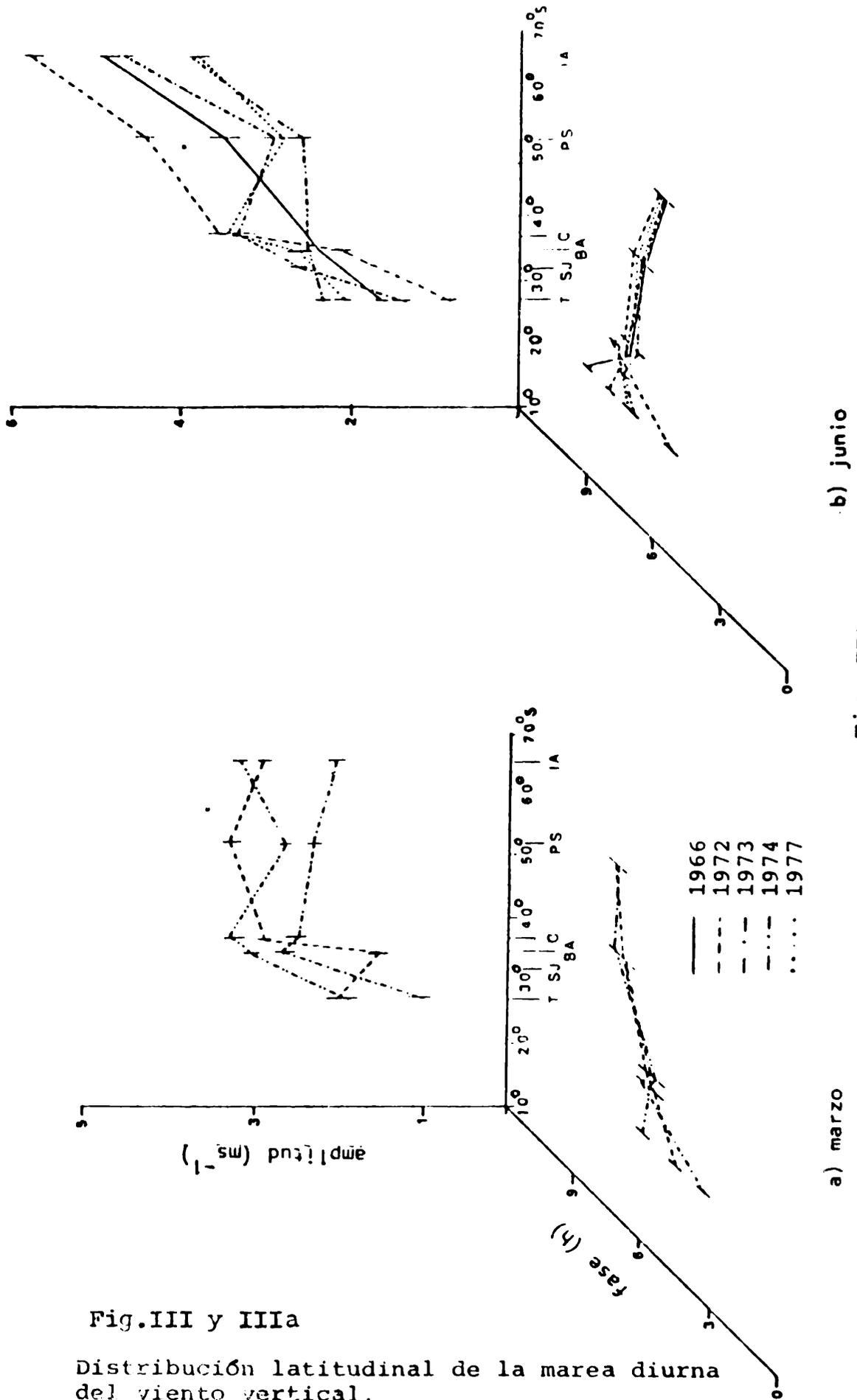
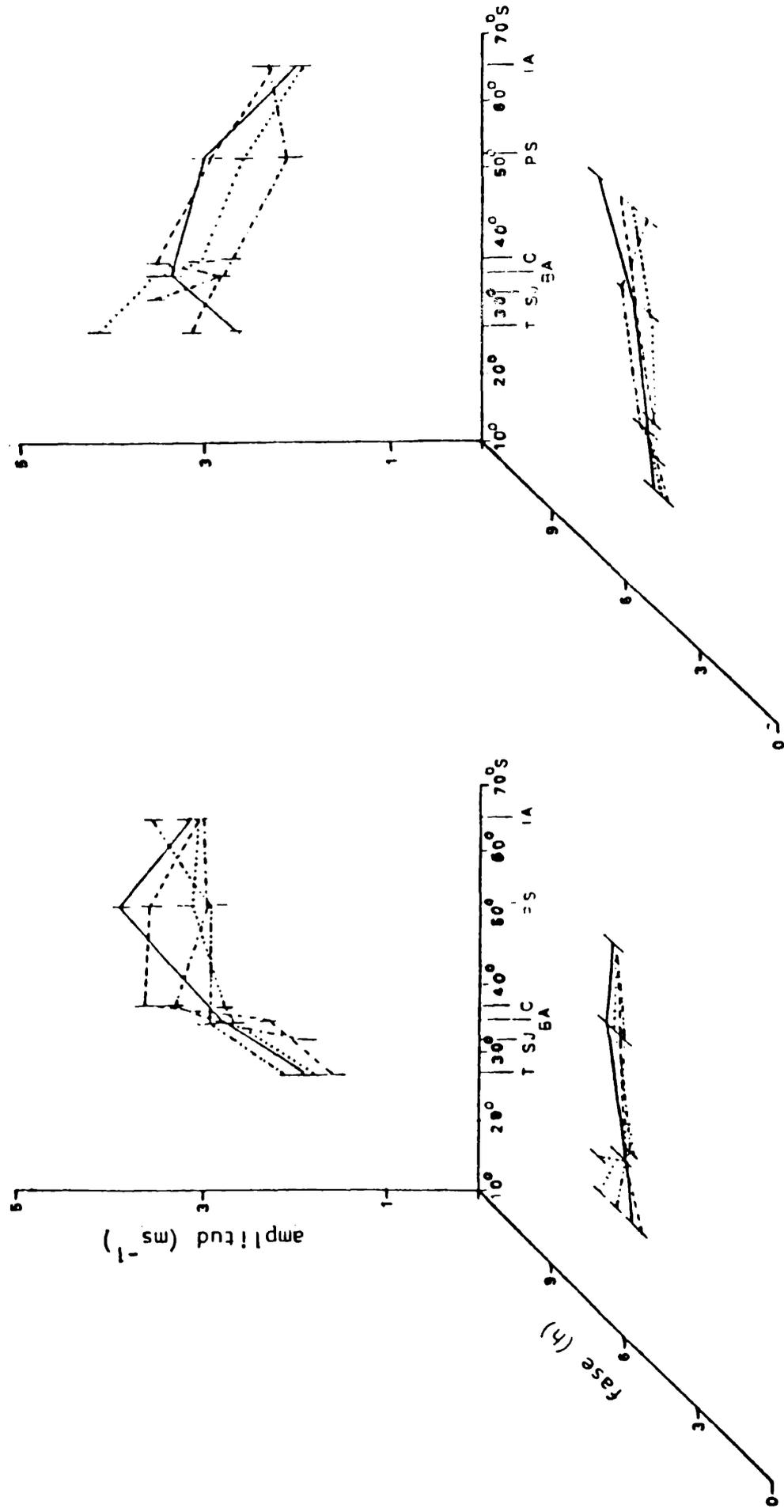


Fig. III

Fig. III y IIIa

Distribución latitudinal de la marea diurna del viento vertical.



b) diciembre

Fig. III.3

a) septiembre

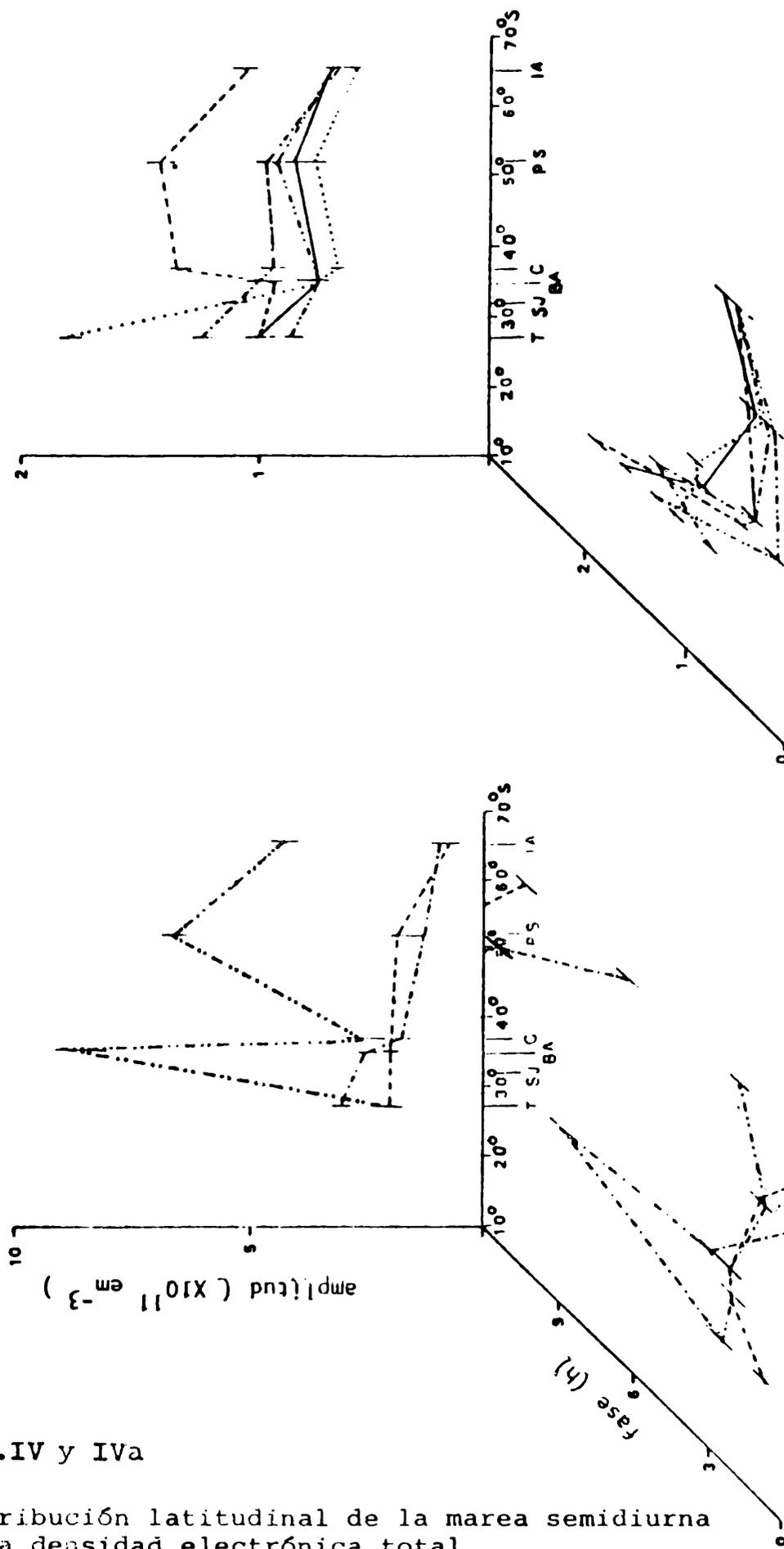


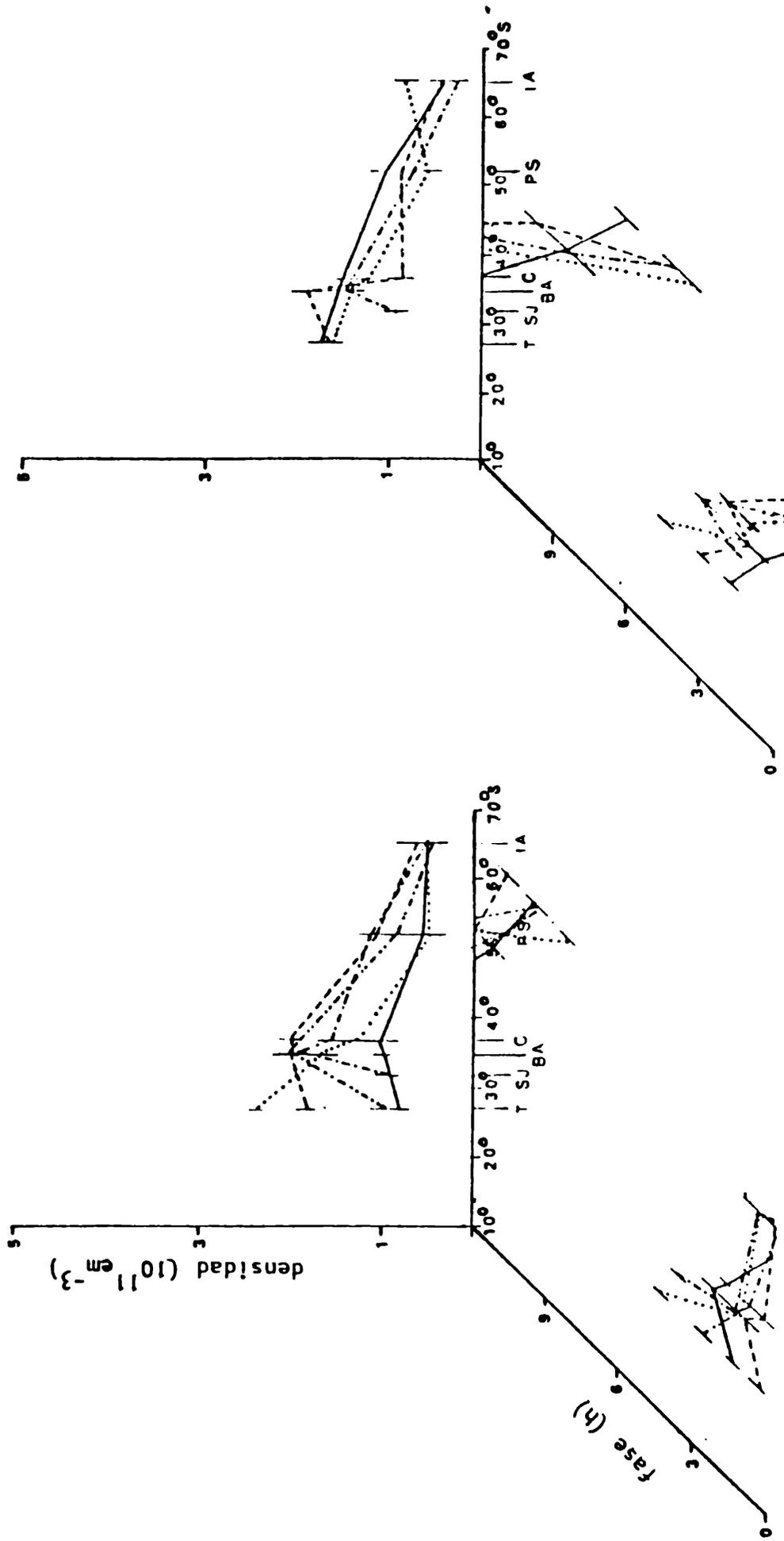
Fig.IV y IVa

Distribución latitudinal de la marea semidiurna de la densidad electrónica total

Fig. IV

a) marzo

b) junio



b) diciembre .

Fig. IVa

a) septiembre

AMPLITUD PARA:	M A R Z O			J U N I O			S E P T I E M B R E			D I C I E M B R E		
	$w'_E$ (ms <sup>-1</sup> )	$w'_T$ (ms <sup>-1</sup> )	$w'_E/w'_T$	$w'_E$ (ms <sup>-1</sup> )	$w'_T$ (ms <sup>-1</sup> )	$w'_E/w'_T$	$w'_E$ (ms <sup>-1</sup> )	$w'_T$ (ms <sup>-1</sup> )	$w'_E/w'_T$	$w'_E$ (ms <sup>-1</sup> )	$w'_T$ (ms <sup>-1</sup> )	$w'_E/w'_T$
ESTACION												
TUCUMAN	1.60 0.55	1.45	1.1	1.62 0.60	1.24	1.31	1.85 0.21	1.45	1.28	3.37 0.63	1.65	2.04
BUENOS AIRES	2.40 0.73	1.39	1.73	2.44 0.23	1.15	2.12	2.66 0.25	1.39	1.91	3.14 0.42	1.61	1.95
CONCEPCION	2.87 0.41	1.39		3.42 0.11	1.13	5.09	3.21 0.25	1.39	2.31	3.29 0.42	1.61	2.04
PUERTO ARGENTINO	2.76 0.47	1.09	2.53	3.25 0.73	0.86	3.78	3.18 0.27	1.09	2.92	2.67 0.40	1.42	1.88
ISLAS ARGENTINAS	2.73 0.52	0.72	3.79	4.59 0.81	1.01	4.54	3.16 0.21	0.72	4.39	2.15 0.16	0.97	2.22
FASE PARA:												
ESTACION	$f_E$ (h)	$f_T$ (h)	$f_E - f_T$ (h)									
TUCUMAN	5.02 0.87	10.8	-5.78	7.22 1.41	10.55	-3.33	6.26 0.82	10.80	-4.54	4.86 0.63	11.50	-6.64
BUENOS AIRES	5.65 0.20	10.63	-4.98	7.43 0.29	10.25	-2.85	6.01 0.20	10.63	4.62	5.47 0.16	11.70	-6.23
CONCEPCION	5.77 0.22	10.7	-5.02	7.07 0.29	10.2	-3.13	5.97 0.26	10.7	-4.73	5.07 0.02	11.70	-6.63
PUERTO ARGENTINO	7.00 0.15	10.28	-3.28	6.66 0.20	8.95	-2.29	6.26 0.16	10.28	-4.02	5.79 0.43	11.62	-5.83
ISLAS ARGENTINAS	7.18 0.04	9.7	-2.61	5.73 0.16	2.4	3.33	6.37 0.09	9.7	-3.33	6.17 0.79	11.60	-5.43

Tabla I: Comparación entre la marea diurna del viento vertical  $w'_E$  y la marea diurna  $w'_T$  a 240 km.

AMPLITUD PARA: ESTACION	MARZO			JUNIO			SEPTIEMBRE			DICIEMBRE		
	$w'_E$ (ms <sup>-1</sup> )	$w'_T$ (ms <sup>-1</sup> )	$w'_E/w'_T$	$w'_E$ (ms <sup>-1</sup> )	$w'_T$ (ms <sup>-1</sup> )	$w'_E/w'_T$	$w'_E$ (ms <sup>-1</sup> )	$w'_T$ (ms <sup>-1</sup> )	$w'_E/w'_T$	$w'_E$ (ms <sup>-1</sup> )	$w'_T$ (ms <sup>-1</sup> )	$w'_E/w'_T$
TUCUMAN	1.08 0.52	0.49	2.20	1.35 0.73	0.81	1.67	1.24 0.42	0.49	2.53	1.82 0.99	0.66	2.76
BUENOS AIRES	1.63 0.39	0.31	5.26	1.92 0.21	0.86	2.23	1.97 0.50	0.32	6.35	1.58 0.94	0.63	2.51
CONCEPCION	1.83 0.45	0.29	6.31	2.22 0.22	0.88	2.52	1.72 0.68	0.29	5.93	1.37 0.02	0.62	2.21
PUERTO ARGENTINO	2.40 0.17	0.51	4.71	1.72 0.46	1.16	1.48	2.42 0.44	0.51	4.75	1.11 0.31	0.28	3.96
ISLAS ARGENTINAS	1.35 0.10	0.34	3.97	1.51 0.41	1.18	1.28	1.93 0.30	0.34	5.68	1.38 0.31	0.17	8.12
FASE PARA: ESTACION	$f_E$ (h)	$f_T$ (h)	$f_E - f_T$ (h)									
TUCUMAN	7.77 2.38	10.10	-2.33	7.67 2.20	9.2	-1.53	8.41 2.93	10.10	-1.69	3.81 4.79	9.45	-5.64
BUENOS AIRES	3.56 1.36	11.60	-8.04	3.71 0.35	10.53	-6.82	3.29 0.67	11.60	-8.31	2.88 1.57	9.75	-6.87
CONCEPCION	2.78 0.69	0.00	2.78	3.59 0.89	10.80	-7.21	2.44 0.94	0.00	2.44	1.78 0.30	9.80	-8.02
PUERTO ARGENTINO	3.63 0.54	2.91	0.72	3.30 1.20	1.06	2.24	3.62 0.31	2.91	0.71	3.71 0.89	9.81	-6.1
ISLAS ARGENTINAS	4.85 0.23	2.80	2.05	0.33 0.51	3.9	-3.57	3.51 1.00	2.80	0.71	3.83 0.78	6.5	-2.57

Tabla II: Comparación entre la marea semidiurna del viento vertical y la marea semidiurna  $w'_T$  a 240 km.