

ANALISIS DE LA VARIACION ESTACIONAL DE SEÑALES DE MBF EN UN  
CIRCUITO NORTE-SUR

Sandro M. Radicella(\*)

Centro Argentino de Radiocomunicaciones y Compatibilidad Electromag-  
nética, Buenos Aires

Olga I. Pintado (\*\*)

Laboratorio de Ionosfera - Instituto de Física - Facultad de Cien-  
cias Exactas y Tecnología - Universidad Nacional de Tucumán

Patricia M. Fernández

Departamento de Computación - Universidad Nacional de Tucumán.

RESUMEN

Se analizan los registros de fase y amplitud de señales de 12,9 KHz emitidas desde la estación Omega-Argentina (43,20°S; 294,60°E) y recibidas en Tucumán (26,90°S; 294,70°E) para estudiar la variación estacional de la altura de la guía de ondas que es representativa del comportamiento de la densidad electrónica a ese nivel. Se compararon los resultados experimentales con los obtenidos utilizando el modelo de la Ionosfera Internacional de Referencia (IRI-79), encontrándose en los primeros una fuerte variación estacional que no se observa en el modelo. Se explican estas discrepancias como fenómenos nocturnos característicos del camino de propagación usado, que no son tenidos en cuenta por el modelo IRI-79.

ABSTRACT

To study the seasonal behaviour of the wave-guide height, the phase and amplitude records of a very low frequency wave (12.9 KHz) emitted from Omega-Argentina (43.20°S; 294.60°E) and received at Tucumán (26.90°S; 294.70°E) have been analyzed. The waveguide height variations are representative of the behaviour of the electron density at that level. The experimental results have been compared with the values obtained using the International Reference Ionosphere model (IRI-79) being found that the experimental data shows a seasonal variation not predicted by the model. The differences are explained as nocturnal phenomena characteristics of the propagation wave-path, that are not taken into consideration by the IRI-79 model

(\*) Miembro de la Carrera de Investigador del CONICET.

(\*\*) Becaria del CONICET

## INTRODUCCION

Utilizando los datos de fase y amplitud de una onda de muy baja frecuencia (MBF) que se propaga en la guía de ondas Tierra-Ionósfera se pueden determinar las variaciones que se producen en el perfil de concentración electrónica en las regiones más bajas de la ionosfera.

En el presente trabajo se usaron los valores de fase y amplitud de una onda de 12,9 KHz emitida por la estación Omega-Argentina (43,20°S; 294,60°E) y recibida en Tucumán (26,90°S; 294,70°E). El circuito tiene dirección norte-sur y se encuentra en la zona afectada por la Anomalía Geomagnética del Atlántico Sur.

A partir de los datos de fase y amplitud se determinan las variaciones de altura y del gradiente de conductividad de la guía de ondas formada por la Tierra y la ionósfera, valores que posteriormente permiten inferir variaciones en el perfil de concentración electrónica de la región D.

Las variaciones de altura son comparadas con las obtenidas con el modelo de Ionósfera Internacional de Referencia (Bilitza, 1981).

## ANALISIS DE LOS DATOS

El campo eléctrico de una onda de MBF que se propaga a una distancia mayor que 500 km, puede escribirse (Wait, 1962):

$$(1) \quad E = A \exp(j\phi)$$

donde A es la amplitud de la intensidad de campo y  $\phi$  la fase de la onda recibida.

A y  $\phi$  dependen de la altura de la guía de ondas y de las propiedades eléctricas de sus paredes.

Se define el parámetro de conductividad:

$$(2) \quad \omega_r = \omega_0/\nu$$

donde  $\omega_0 = Ne^2/m\epsilon_0$  es la frecuencia angular del plasma

e = carga electrónica

m = masa del electrón

$\epsilon_0$  = permitividad del vacío

N = concentración electrónica

$\nu$  = frecuencia de colisión

En este trabajo se supone que N y  $\nu$  varían exponencialmente con la altura. Por lo tanto, el parámetro de conductividad puede escribirse de la siguiente manera:

$$(3) \quad \omega_r = \omega_{r0} \exp \beta (h - h_0)$$

donde  $\omega_{r0} = 2,5 \cdot 10^5$  (determina la altura de reflexión)

$\beta$  = gradiente de conductividad

$h_0$  = altura de la guía de ondas

Cuando se producen variaciones en el perfil de concentración electrónica, la altura de la guía de ondas ( $h_0$ ) y el gradiente de conductividad ( $\beta$ ) varían en  $\Delta h$  y  $\Delta \beta$ , que se pueden calcular de la siguiente manera:

$$(4) \quad \Delta h = \left( \Delta A \frac{\partial \phi}{\partial \beta} - \Delta \phi \frac{\partial A}{\partial \beta} \right) \left( \frac{\partial}{\partial h_0} \frac{\partial \phi}{\partial \beta} - \frac{\partial A}{\partial \beta} \frac{\partial \phi}{\partial h_0} \right)^{-1}$$

$$(5) \quad \Delta \beta = \left( \Delta A \frac{\partial \phi}{\partial h_0} - \Delta \phi \frac{\partial A}{\partial h_0} \right) \left( \frac{\partial A}{\partial \beta} \frac{\partial \phi}{\partial h_0} - \frac{\partial A}{\partial h_0} \frac{\partial \phi}{\partial \beta} \right)^{-1}$$

donde  $\Delta A$  y  $\Delta \phi$  son las variaciones de amplitud y fase de la onda que se leen en los registros.

Para determinar las derivadas parciales que aparecen en las ecuaciones (4) y (5) se debe conocer la variación de la velocidad de fase y de la razón de atenuación con la altura de la guía de ondas ( $h_0$ ) y el gradiente de conductividad ( $\beta$ ) (Wait y Spies, 1964; Burgess y Jones, 1967 y Pintado y otros, 1981). Es necesario usar un modelo de concentración electrónica nocturna, para calcular los valores de  $h_0$  y  $\beta$  de referencia. Utilizando el modelo de la Ionósfera Internacional de Referencia (IRI-79) (Bilitza, 1981) se obtuvieron los valores:

$$h_0 = 83,0 \text{ km}$$

$$\beta = 1,14 \text{ km}^{-1}$$

Luego se calcularon las derivadas parciales con los siguientes resultados:

$$\frac{\partial A}{\partial \beta} = -4,71 \cdot 10^2 \text{ dB.Km}$$

$$\frac{\partial A}{\partial h_0} = 13,8 \text{ dB/Km}$$

(6)

$$\frac{\partial \phi}{\partial \beta} = 1,08 \cdot 10^{-2} \text{ rad.Km}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial h_0} = -8,23 \cdot 10^{-2} \text{ rad/Km}$$

Con los datos de fase y amplitud se calcularon las variaciones de altura.

El receptor de Tucumán tiene un patrón de frecuencias inestable, razón por la cual los registros de fase presentan una deriva (drift). Esto hace que no se puedan determinar valores absolutos de fase, y por lo tanto se consideran únicamente las diferencias de fase que corresponden a diferencias de altura.

## MODELO SEGUIN LA IONOSFERA INTERNACIONAL DE REFERENCIA

El perfil de densidad electrónica en la región D, dado por la Ionósfera Internacional de Referencia, es un modelo empírico en donde la concentración electrónica depende del ángulo cenital y de la actividad solar (Bilitza, 1981).

El perfil de densidad electrónica muestra un punto de inflexión debajo del máximo de la región E (Figura 1), cuya altura es Hmax y su concentración electrónica es Nmax.

La densidad electrónica se representa por la siguiente ecuación:

$$(7) \quad N(h) = N_{\max} \exp (F1.X + F2.X^2 + F3.X^3)$$

donde  $X = h - H_{\max}$

$$N_{\max} = F(R) \cdot 10^8 \cdot \exp(-0,1(\cos \chi)^{-2,7})$$

$$F(R) = 6,05 + 0,088 R$$

$\chi$  = ángulo cenital solar

R = número de manchas solares

Para la noche Nmax toma un valor fijo:

$$N_{\max} = 4 \cdot 10^8 \text{ m}^{-3}$$

Las constantes F1, F2 y F3 toman diferentes valores para el día y para la noche, y presentan una dependencia latitudinal. Los valores usados en el cálculo están dados en la Tabla I.

TABLA I			
	DIA	NOCHE	
F1	0,02	0,05	
F2	$-2,10^{-4}$	$-1,25 \cdot 10^{-3}$	
F3	$9,37 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-2}$	si $h < H_{\max}$
F3'	$4,89 \cdot 10^{-4}$	$8,79 \cdot 10^{-3}$	si $h > H_{\max}$
Hmax	81 Km	88 Km	

Como se muestra en la Figura 1, (Bilitza, 1981) este modelo tiene un buen ajuste con los datos experimentales.

En la Figura 2 se muestran perfiles calculados diurnos para las 12.00 TML y los meses de diciembre de 1980, abril y junio 1981, junto con un perfil nocturno. Se han considerado latitudes bajas.

### PRESENTACION DE LOS RESULTADOS

Con el fin de estudiar la variación estacional de la altura de la guía de ondas Tierra-Ionosfera para el camino de propagación utilizado en el presente trabajo, se analizan los datos obtenidos entre los meses de noviembre de 1980 y octubre de 1981.

Para calcular las variaciones de altura día a día, se tomaron las diferencias día-noche de fase y amplitud como valores representativos de cada mes. Se consideraron las medianas mensuales. La línea de trazos en la parte inferior de la Figura 3 muestra la variación estacional encontrada con los datos experimentales. Se determinaron también las variaciones de altura día-noche correspondientes al modelo IRI-79 para las mismas condiciones de la Fig.2, haciendo cumplir la condición de que el parámetro de conductividad  $\omega_p$  debe tomar el valor  $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  para que ocurra la reflexión. Estas curvas se representaron también en la Figura 3 con línea llena. En la parte superior de la misma se muestra el ángulo cenital ( $\chi$ ) y el número de manchas solares R. Comparando los resultados obtenidos con los datos experimentales y con el modelo IRI-79, puede observarse que los primeros muestran una variación estacional distinta a los segundos.

En las figuras 4a, b y c se representaron las variaciones de altura ( $\Delta h$ ) obtenidas experimentalmente para un mes de verano (diciembre, 1980), uno de equinoccio (abril, 1981) y uno de invierno (julio, 1981). En las mismas figuras se representó el índice magnético As. En estas gráficas se observa una marcada variación día a día del parámetro  $\Delta h$ , según los resultados experimentales.

### DISCUSION

Los resultados experimentales muestran dos características principales:

a) una pronunciada variación estacional distinta a la observada usando los perfiles del modelo IRI-79, con valores experimentalmente más bajos en primavera y verano.

b) una marcada variación día a día de  $\Delta h$  en todos los meses.

Las diferencias entre el modelo IRI y los datos experimentales, pueden atribuirse tanto a variaciones estacionales de la región de reflexión diurna, inversas a las previstas por el modelo IRI, como a variaciones nocturnas de la misma región. Esta indeterminación se debe a que los datos de  $\Delta h$  no permiten identificar de por sí los valores absolutos de altura durante el día y la noche.

Teniendo en cuenta los datos de base, a partir de los cuales se determinaron los perfiles de densidad electrónica en la capa D para el modelo IRI (Bilitza, 1981), se puede suponer que el modelo diurno es suficientemente representativo de las condiciones reales no perturbadas. En particular el valor de  $M_{3000}$  de la ecuación (7) responde adecuadamente a los valores experimentales obtenidos por medio de cohetes y distintas técnicas. Una posible fuente de variación estacional no tenida en cuenta por el modelo puede ser la variación del coeficiente  $F_2$  de la misma ecuación, que es considerado constante. Una variación estacional del mismo puede indicar variaciones de la química de iones negativos en la región de reflexión, que se encuentran a alturas en donde la variación del contenido de esos iones es un factor importante para el perfil de electrones (Arnold, 1981). Si el gradiente de la densidad electrónica diurna sufre importantes variaciones estacionales, estas deberían reflejarse en cambios equivalentes del gradiente de conductividad  $\beta$  (ecuación 3). Sin embargo, estas variaciones no son observadas en los valores experimentales, lo que permite considerar que el comportamiento estacional no corresponde a cambios de los perfiles de densidad electrónica diurna.

Por lo anterior, es necesario considerar que la causa de esas variaciones está en el comportamiento de la región de reflexión durante la noche.

Las condiciones nocturnas de la región D que asume el modelo IRI son basadas en un número reducido de observaciones (Bilitza, 1981), lo que permite justificar que la posible variabilidad estacional de los mismos, no sea tenida en cuenta por el modelo.

El origen de importantes cambios estacionales en la región D nocturna, particularmente en el nivel de transición entre las alturas en donde los iones negativos son numéricamente importantes y aquellos en donde dominan los electrones, debe buscarse en cambios aeronómicos que involucran particularmente a las especies menores neutras. Estas son responsables de los procesos de intercambio de cargas que originan iones negativos estables, que sólo desaparecen por recombinación ión-ión por medio de reacciones de adhesión.

Las dos especies menores de mayor importancia son el monóxido de nitrógeno (NO) y el oxígeno atómico. Radicella y otros (1981) han mostrado que cambios importantes del primero deben estar acompañados por variaciones igualmente importantes del gradiente de la densidad electrónica. Estas variaciones deben ser visibles en el gradiente de conductividad calculado a partir de los datos de MBF. Esto no es observado, permitiendo descartar los cambios estacionales de NO como causa de las variaciones descritas.

Dickinson y otros (1980), con observaciones experimentales simultáneas de concentración de oxígeno y de densidad electrónica, y Radicella y Restbergs (1981) con análisis teóricos, han demostrado por otra parte, que el perfil de la densidad electrónica en la región D nocturna es muy sensible a las variaciones

en el perfil de oxígeno atómico. En las mediciones experimentales (Dickinson y otros, 1980) aparece claramente que la densidad electrónica nocturna sigue de cerca en altura a las variaciones del oxígeno atómico. Estas mediciones muestran también que el nivel en el cual se produce la transición entre dominio de iones negativos y el dominio de electrones es básicamente el mismo a partir del cual se hace no detectable la concentración de oxígeno atómico. Por otra parte, este nivel varía en 5 Km o más de una medición nocturna a otra, acompañando variaciones similares en el perfil de densidad electrónica, sin observarse, cambios de gradiente, sino desplazamientos de todo el escalón del nivel de transición.

Cabe destacar que Pintado y otros (1981) y Radicella y otros (1981) han considerado que algunas anomalías de fase observadas en circuitos transecuatoriales de MBF sólo parecen ser explicadas como efecto de variaciones de la distribución vertical de oxígeno atómico.

Del análisis realizado más arriba, se hace evidente que una causa de las variaciones estacionales observadas en  $\Delta h$  para el circuito de MBF estudiado, puede ser la variación estacional del oxígeno atómico mesosférico. Este debería encontrarse a alturas más bajas en primavera y verano y más altas en otoño e invierno. Acompañando a este componente menor neutro, la densidad electrónica nocturna necesaria para la reflexión de las ondas de MBF se encontraría a mayor altura durante estas últimas estaciones. Como resultado, los valores de  $\Delta h$  serían mayores en otoño e invierno, según lo observado experimentalmente.

Una mención especial merece el mes de mayo de 1981 (Figura 3), para el cual el valor de  $\Delta h$  es 2 Km menor que en los meses de abril y junio. Cabe mencionar que el promedio de la actividad geomagnética medida por el índice As durante ese mes fue un 50% por encima que el de los meses mencionados. Abdu y otros (1981) y Pintado y Radicella (1981) han mostrado que el efecto de las tormentas geomagnéticas sobre  $\Delta h$ , en la región de influencia de la Anomalía del Atlántico Sur, es el de una disminución de su valor, atribuible a un aumento de la ionización nocturna debida al incremento de la precipitación de partículas. En consecuencia, lo observado en mayo, que indica una disminución de  $\Delta h$ , puede atribuirse a la mayor actividad geomagnética registrada durante ese mes.

La variación día a día de  $\Delta h$  que se observa en todo el período en estudio indica también un fuerte control aeronómico que puede atribuirse tanto a variaciones de las fuentes de ionización como a cambios en la distribución de especies menores neutras. Esto último parece más probable, dado que las variaciones de las fuentes de ionización deberían correlacionarse con variaciones de la actividad geomagnética, cosa que no ocurre (Figuras 4a, b, c).

### CONCLUSIONES

- 1.- En las latitudes cubiertas por el circuito de MBF estudiado, se observa una pronunciada variación estacional de la diferencia de altura de reflexión día-noche, con máximos valores en otoño e invierno y mínimos en primavera y verano. Cuando se utiliza el modelo IRI-79, la variación estacional observada es menos marcada y contraria, con valores máximos en otoño e invierno.
- 2.- El origen de la variación observada es atribuida a cambios en la región de reflexión nocturna, vinculados a variaciones de la distribución vertical de oxígeno atómico mesosférico.
- 3.- Se observan marcadas variaciones día a día en todas las estaciones, las que se consideran vinculadas a cambios en las concentraciones de componentes menores neutros mesosféricos.

### BIBLIOGRAFIA

- Abdu, M.A., Batista, I.S., Rizzo Piazza, L. y Massambani, O.; 1981: "Magnetic storm associated enhanced particles precipitation in the South Atlantic Anomaly. Evidence from VLF phase measurements", Comunicación privada.
- Arnold, F.; 1981: "Structure and Composition of the Middle Atmosphere Ionized Component", Report UAG-82, World Data Center for Solar and Terrestrial Physics, 19-25.
- Bilitza, D.; 1981: "Electron density in the D-region as given by the International Reference Ionosphere", Report UAG-82, World Data Center for Solar and Terrestrial Physics, 7-10.
- Burges, B. y Jones, T.B.; 1967: "Solar flares effects and VLF radiowaves observations of the lower ionosphere", Radio Science, 2, 619-626.
- Danilov, A.D. y Simonov, A.G.; 1981: "Seasonal Variations of the D-region aeronomical parameters", IAGA General Assambly - Edimburgh, Inglaterra.
- Dickinson, P.M.G., Bain, W.C., Thomas, L., Williams, E.R., Jenkins, D.B. y Twiddy, N.D.; 1980: "The determination of the atomic oxygen concentration and associated parameters in the lower ionosphere", Proc.Royal Soc. London, 369,379-408.
- Pintado, O.I. y Radicella, S.M.; 1981: "Respuesta de la ionósfera inferior a tormentas geomagnéticas". Enviado a la Revista Geofísica del IPGH.
- Pintado, O.I., Ezquer, R.G., Radicella, S.M. y Restbergs, V.; 1981: "Las anomalías nocturnas de fase y el O atómico en la mesósfera. Parte I: Datos experimentales", GEOACTA, Vol. 1 N°1, 285-296.

- Radicella, S.M. y Restbergs, V.; 1981: "Oxygen allotropes concentration and electron density profiles in the nighttime D-region", Jour. of Atm. and Terr. Phys., 43, pag. 1.
- Radicella, S.M., Restbergs, V., Pintado, O.I. y Ezquer, R.G.; 1981: "Las anomalías nocturnas de fase y el oxígeno atómico en la mesósfera. Parte II: Procesos Aeronómicos Involucrados", GEOACTA, Vol. 11, N°1, 297-308.
- Wait, J.R.; 1962: "Electromagnetic waves in stratified media", Pergamon Press New York.
- Wait, J.R. y Spies, K.; 1964: "Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radiowaves", NBS Technical Note N°300.

#### EPIGRAFES DE LAS FIGURAS

Figura 1: Perfiles experimentales de la región D, comparados con el modelo IRI (Bilitza, 1981).

Figura 2: Perfiles de concentración electrónica obtenidos con el modelo IRI. Los perfiles diurnos se calcularon para las 12 TL y latitudes medias.

Figura 3: Variaciones de altura día-noche, obtenidas con el modelo (línea llena) y a partir de datos experimentales (línea de trazos). También se representan el ángulo cenital ( $\chi$ ), y el número de manchas solares (R).

Figura 4: Variaciones de altura día-noche obtenidas con el modelo (línea llena) y a partir de datos experimentales (línea de trazos). También se representa el índice magnético As.

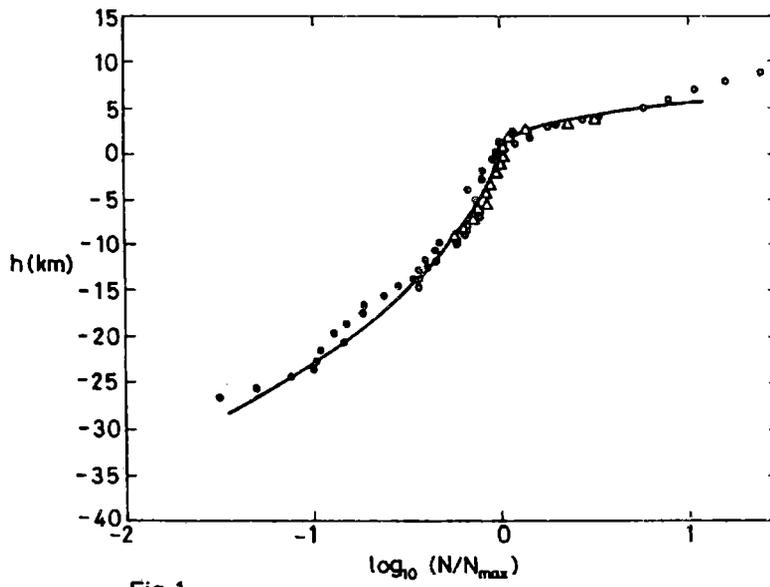


Fig. 1

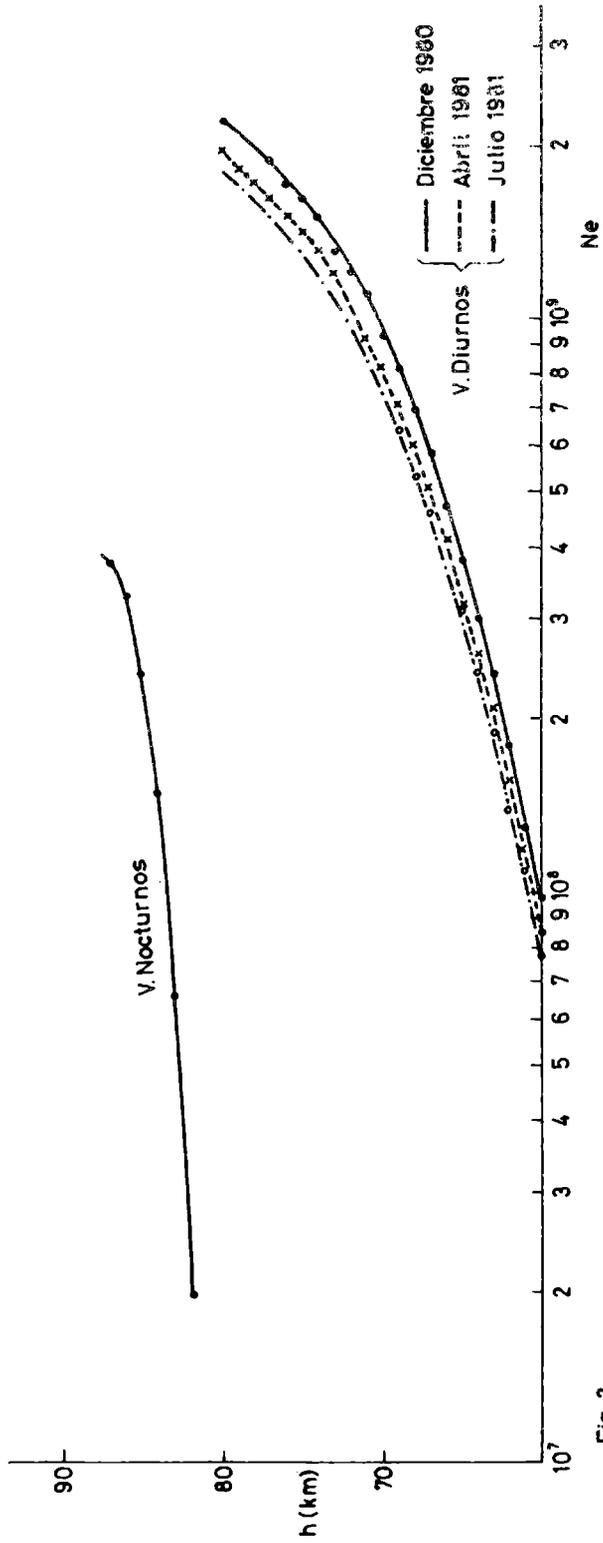


Fig. 2

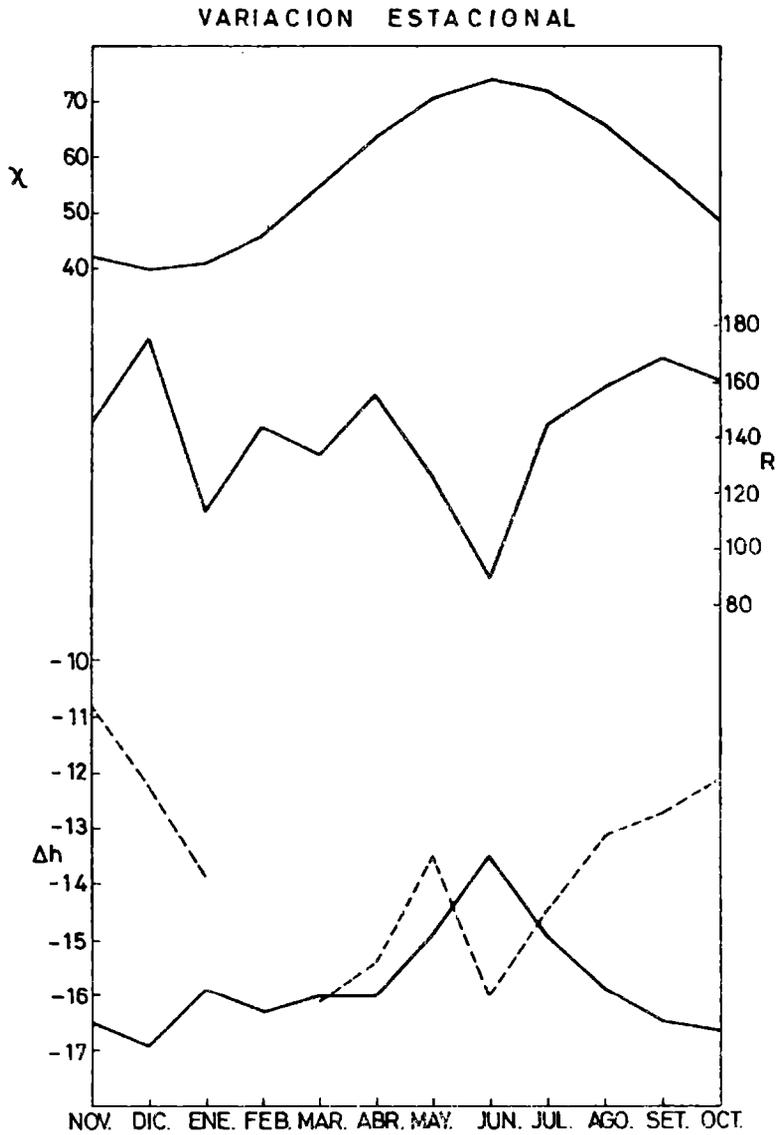


FIG. 3

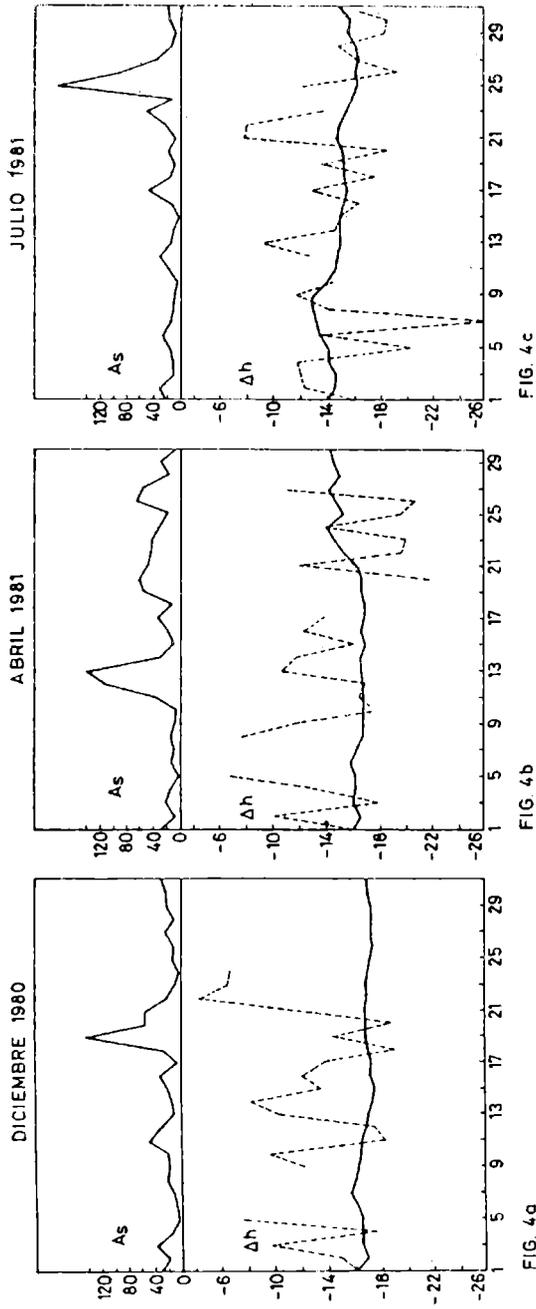


FIG. 4c

FIG. 4b

FIG. 4a

