

Comportamiento espacial de la ionosfera exterior nocturna en la región del Caribe en condiciones tranquilas*

**Giselle GIL MORENO
y **Berta MELENDEZ OLIVEROS

RESUMEN. *A partir de los ionogramas registrados por el satélite IK-19 se analiza el comportamiento espacial de la densidad electrónica de la ionosfera exterior nocturna en la región del Caribe bajo condiciones magneto-tranquilas. Se estudiaron las variaciones longitudinales de N_{max} y β en esta región mediante la confección de mapas de isolinias de estos parámetros. En los mapas obtenidos se observó una dependencia longitudinal en el desarrollo de la cresta de la anomalía ecuatorial en las latitudes subtropicales. Se determinaron perfiles promedios característicos de la región y la zona de validez de cada uno de ellos así como un perfil medio para todo el Caribe de aplicación en las radiocomunicaciones.*

INTRODUCCIÓN

La puesta en órbita del satélite Alouette I, en 1962, con una estación de sondeo vertical a bordo, determinó el rápido desarrollo de las investigaciones del comportamiento de la densidad electrónica por encima del máximo de la capa F2. La reducción de los ionogramas de los Alouette I y II permitió la realización de estudios sinópticos globales de la ionosfera exterior (Chan, 1966; Chan y Colin, 1969).

En 1979 la URSS puso en órbita el satélite IK-19 dentro del marco del programa INTERCOSMOS con una estación de sondeo vertical a bordo, aportando una gran

cantidad de datos cuyo análisis permitió mejorar la caracterización existente de los perfiles por encima del máximo de la capa F2 (Benkova *et al.*, 1983; Benkova *et al.*, 1984).

En Cuba se registraron los sondeos del IK-19 desde 1979 hasta 1981, y González *et al.*, en 1985, culminaron los trabajos preliminares donde muestran la reducción de ionogramas a perfiles tanto para días

*Manuscrito aprobado en diciembre de 1990.

**Instituto de Geofísica y Astronomía de la Academia de Ciencias de Cuba.

tranquilos como para días perturbados, y el acoplamiento de perfiles $N(h)$ calculados a partir de ionogramas del IK-19 con los perfiles calculados a partir de los ionogramas terrestres registrados por la estación de sondeo vertical Centro Geofísico (Cuba). Posteriormente, también con datos del IK-19, se realizó un análisis de la dependencia latitudinal de la densidad electrónica a alturas fijas por encima de h_{\max} (Gil *et al.*, en prensa).

El efecto longitudinal, o sea, la variación de los parámetros de la ionosfera para una hora local, latitud, nivel de actividad magnética y solar dada, se conoce desde la década del 60 en las latitudes ecuatoriales. Sin embargo, la mayoría de los resultados se obtuvieron al comparar dos zonas de longitud: La asiática y la americana, ya que la distribución longitudinal irregular de las estaciones terrestres de sondeo ionosférico existentes, no permitía un estudio

que posibilitara separar claramente el efecto longitudinal.

La incorporación de una gran cantidad de datos provenientes de satélites, permite retomar el análisis detallado de la variación longitudinal planetaria, realizándose ya en la década del 80 varios trabajos no sólo de las latitudes ecuatoriales, sino también de las latitudes medias tanto en horas diurnas como nocturnas (Karpachov y Machkova, 1983; Deminov y Karpachov, 1983, 1988; Kochenova, 1987, 1988; Karpachov, 1988; Deminov *et al.*, 1988).

El objetivo de este trabajo es detectar la posible existencia de un efecto longitudinal en la región limitada del Caribe que se encuentra en la zona de las latitudes de transición entre latitudes ecuatoriales y medias; además, obtener las variaciones espaciales del perfil de densidad electrónica por encima de N_{\max} en horas nocturnas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos de partida para realizar este estudio fueron los ionogramas registrados por la estación ionosférica a bordo del satélite IK-19. Estos ionogramas fueron digitalizados y reducidos a perfiles de variación de la densidad electrónica con la altura mediante el programa TOPSIDE, desarrollado a partir del algoritmo propuesto por Jackson (1969).

La selección de ionogramas nocturnos para el estudio se realizó a partir del estado del campo magnético utilizando los días magneto-tranquilos. En este caso no nos limitamos a escoger registros con un índice tri-horario magnético, k , inferior a 3, sino que se analizaron los magnetogramas correspondientes rechazándose aquellos en los cuales se observan perturbaciones, aunque fueran ligeras.

Los ionogramas seleccionados corresponden a seis vueltas del satélite cuyas características se relacionan en la Tabla 1. Estos pases del satélite se escogieron para diversas longitudes dentro de la zona del Caribe entre los 65-100 grados de longitud oeste, con el objetivo de obtener un cuadro general de esta zona.

En total se procesaron 221 ionogramas obteniéndose para cada uno de ellos, un perfil de densidad electrónica con la altura entre los 300 a 1 000 km aproximadamente.

A cada uno de estos perfiles se le ajustó una variación exponencial del tipo:

$$\frac{N}{N_{\max}} = \exp \left[-\beta (h - h_{\max}) \right]$$

TABLA 1. *Datos principales de las vueltas utilizadas.*

FECHA	VUELTA	HORA		LONG		LAT		$F_{10,7}$	k_p	A_p
		Local	INI	FIN	INI	FIN				
2-4-80	5777	00	273	282	1,8	34,2	181,1	1	3	
15-7-80	7286	04	284	290	11,9	33,0	218,4	2	6	
17-7-80	7315	04	274	285	8,3	42,1	250,2	1 ₀	6	
23-8-80	7862	22	265	272	7,3	32,2	164,3	2	4	
7-9-80	8359	04	267	272	9,5	25,9	183,2	2	6	
2-7-81	12406	22	274	278	13,6	29,4	163,3	1 ₊	9	
3-7-81	12421	22	261	266	19,1	33,1	165,9	1 ₊	9	

mediante el método de mínimos cuadrados. Este tipo de ajuste fue realizado anteriormente por Benkova *et al.* (1984) para latitudes medias. Para este procesamiento nos auxiliamos del sistema MICROSTA.

De esta forma obtuvimos valores de N_{max} y β distribuidos espacialmente sobre la zona del Caribe. Consideramos más ilustrativo

representar la variación espacial de estos parámetros por medio de isolíneas en toda la región. Para esto utilizamos los métodos de regularización de redes de parámetros geofísicos y de determinación de isolíneas utilizados normalmente en estos trabajos, auxiliándonos del sistema SISGEN de procesamiento de datos geofísicos desarrollado por Castro y Eiranova (1986).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis del comportamiento espacial de la ionosfera exterior nocturna se llevó a cabo teniendo en cuenta dos aspectos: su variación en dependencia de la longitud y su variación en dependencia de la altura, o sea, el perfil $N(h)$. Por esta razón hemos considerado conveniente tratar estos temas por separado dentro de este epígrafe.

Dependencia longitudinal

La existencia de una dependencia longitudinal global en el comportamiento de la densidad electrónica máxima se conoce desde hace poco tiempo, siendo reportada en la literatura a partir de 1983 fundamentalmente. Los trabajos realizados a partir de esta fecha permitieron determinar sus principales características. Los máximos de f_oF_2 en la zona cercana al ecuador presentan forma de isla y no de franja continua. Estas zonas de máximo se corres-

ponden con las crestas de la anomalía ecuatorial de las latitudes subtropicales, presentando un desarrollo asimétrico respecto al ecuador en algunas longitudes (Kochanova, 1987). Este desarrollo asimétrico puede alcanzar hasta los 40 grados de inclinación magnética durante la noche en el hemisferio de verano, como reportó Karpachov (1988).

La obtención de la densidad electrónica máxima a partir de los ionogramas analizados nos permitió confeccionar un mapa de isolíneas de este parámetro para condiciones tranquilas y correspondiente a las 22 L. T. El mapa comprende desde los 65-100 grados de longitud oeste y los 8-33 grados de latitud geográfica norte, como puede verse en la F 1. Aquí observamos el aumento de la densidad electrónica máxima en la región cercana al ecuador pero circunscrita a longitudes superiores a los 80 grados oeste.

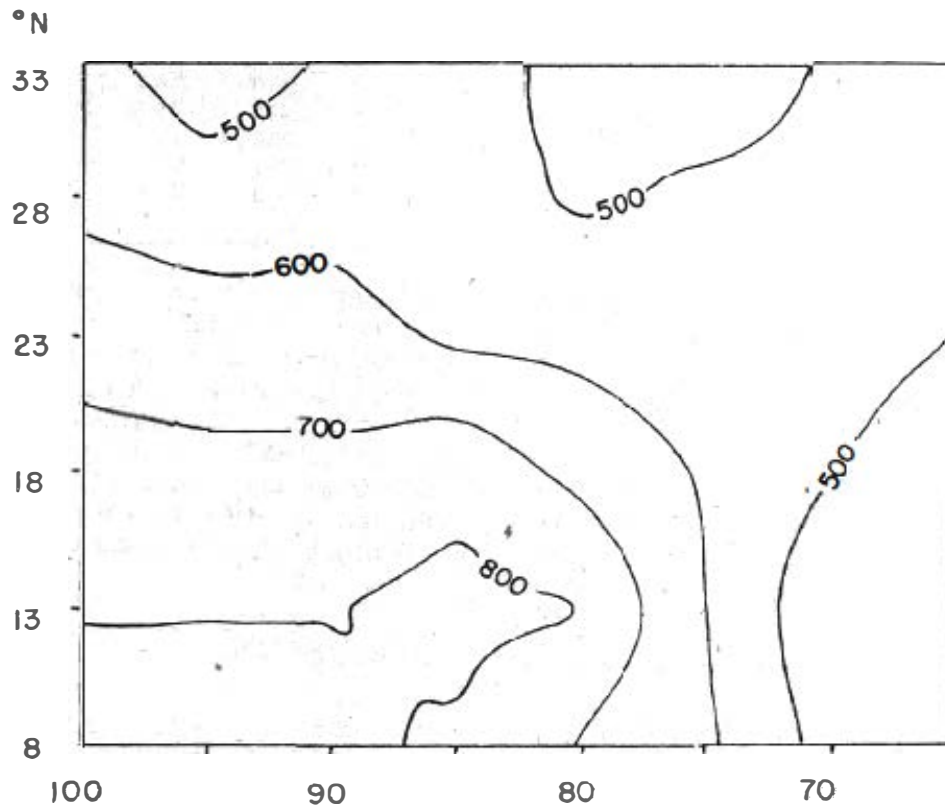
ISOLINEAS DE N_{MAX} 

Fig. 1. Mapa de isocías de la densidad electr3nica m3xima.

En la Fig. 2A mostramos las variaciones longitudinales de N_{max} para tres cortes latitudinales correspondientes a 13; 23 y 33 grados de latitud geogr3fica norte. En ella observamos que las variaciones longitudinales son m3s marcadas en las latitudes m3s bajas, donde se observa claramente un m3ximo alrededor de los 275 grados de longitud.

Simult3neamente mostramos las variaciones de h_{max} , Fig. 2B, donde se observa que este par3metro varía en contrafase con N_{max} . Kochenova (1988) reporta esta misma situaci3n para las latitudes ecuatoriales.

En la Fig. 2C mostramos las variaciones de β , obtenidas del ajuste exponencial de

los perfiles $N(h)$. Aquí se observa un aumento de este par3metro correspondiendo con m3nimos de h_{max} , o sea, coincidiendo con variaciones r3pidas de la densidad con la altura en la ionosfera exterior, efecto descrito para latitudes ecuatoriales (Kochenova, 1988).

La variable β presenta una dependencia longitudinal y, por tanto, la forma de los perfiles por encima de N_{max} tambi3n presenta su dependencia longitudinal.

La explicaci3n del efecto longitudinal se encuentra en las variaciones longitudinales de las componentes zonales y meridionales del viento a latitudes medias, las cuales

están a su vez determinadas por las variaciones de la declinación y la inclinación del campo magnético terrestre. En latitudes ecuatoriales, además de los vientos, las variaciones del campo eléctrico son también responsables de este efecto.

Perfiles promedio para la región del Caribe

En el ajuste realizado a los perfiles correspondientes a las vueltas nocturnas relacionadas en la Tabla 1, se determinaron dos parámetros β y N_{max} .

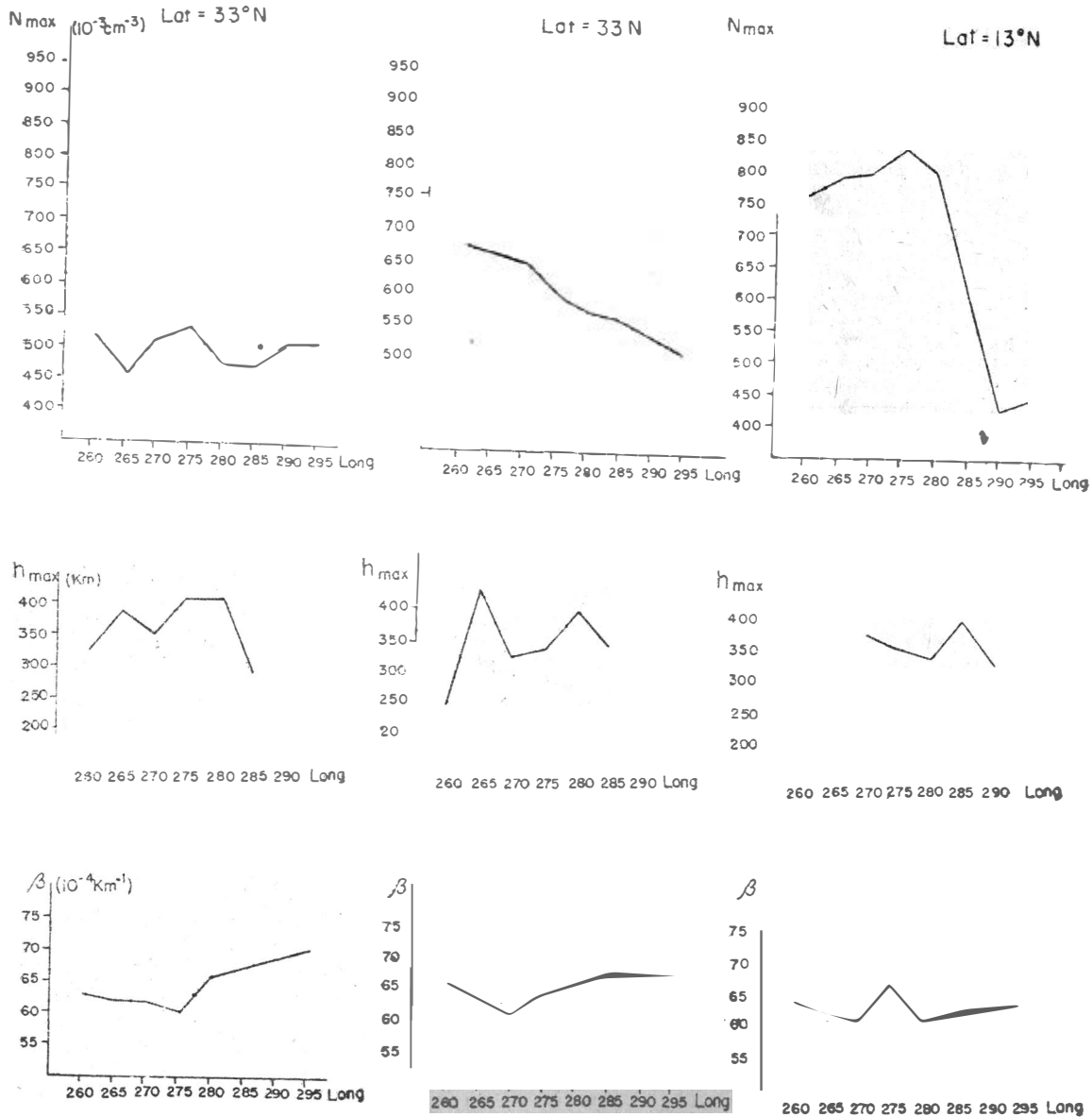


Fig. 2. Variaciones longitudinales de 2a: N_{max} 2b: h_{max} y 2c: para 3 cortes latitudinales correspondientes a 13°, 23°, 33° N de latitud geográfica.

El comportamiento espacial de β también lo representamos en forma de mapa de isolíneas (Fig. 3). Vemos que sólo aparece la isolínea correspondiente a $0,0065 \text{ km}^{-1}$. A la derecha los valores se encuentran entre los límites $0,0065$ y $0,0070$, mientras que a la izquierda los valores están entre $0,0060$ y $0,0065$. La distancia entre isolíneas la determinamos estudiando la influencia de las variaciones de β sobre la forma del perfil $N_e(h)$. Una variación de este parámetro inferior a $5.10E-4$, produce desviaciones porcentuales de sólo 15% y fue seleccionada como distancia

mínima entre isolíneas. La distancia entre isolíneas de N_{max} , 10^5 electrones/cm³, se determinó en forma análoga.

La composición de los mapas de N_{max} y β (Fig. 4) nos permite delimitar 6 zonas diferentes cuyas características son:

Zona	Beta (β)	N_{max}
6	— $0,0065$	4.10^5
5	— $0,0065$	6.10^5
4	— $0,0060$	4.10^5
3	— $0,0060$	6.10^5
2	— $0,0065$	8.10^5
1	— $0,0060$	8.10^5

ISOLINEAS DE BETA [10^{-4} km^{-1}]

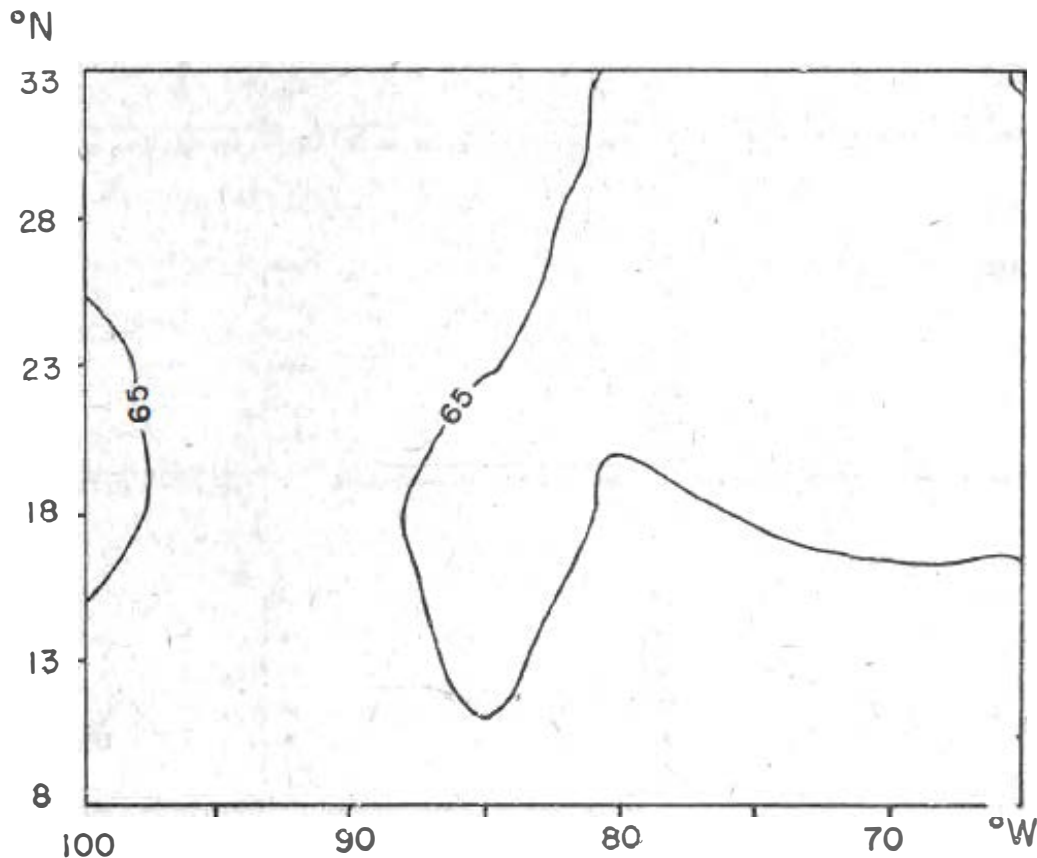


Fig. 3. Mapa de isolíneas de β .

ZONAS DE VALIDEZ DE LOS PERFILES PROMEDIO

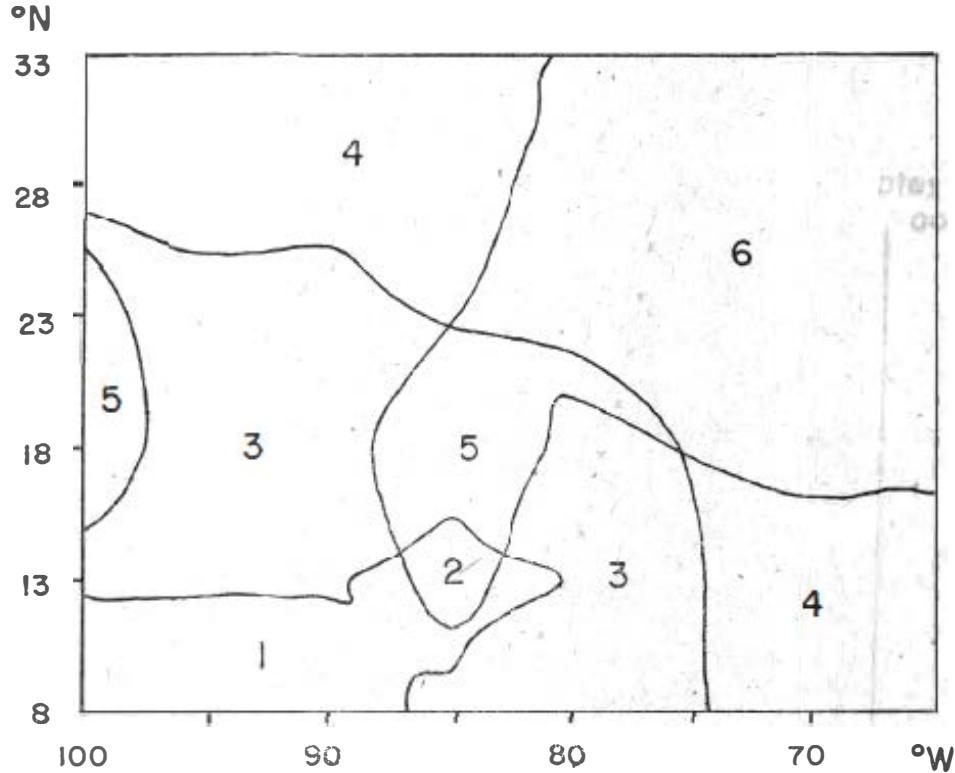
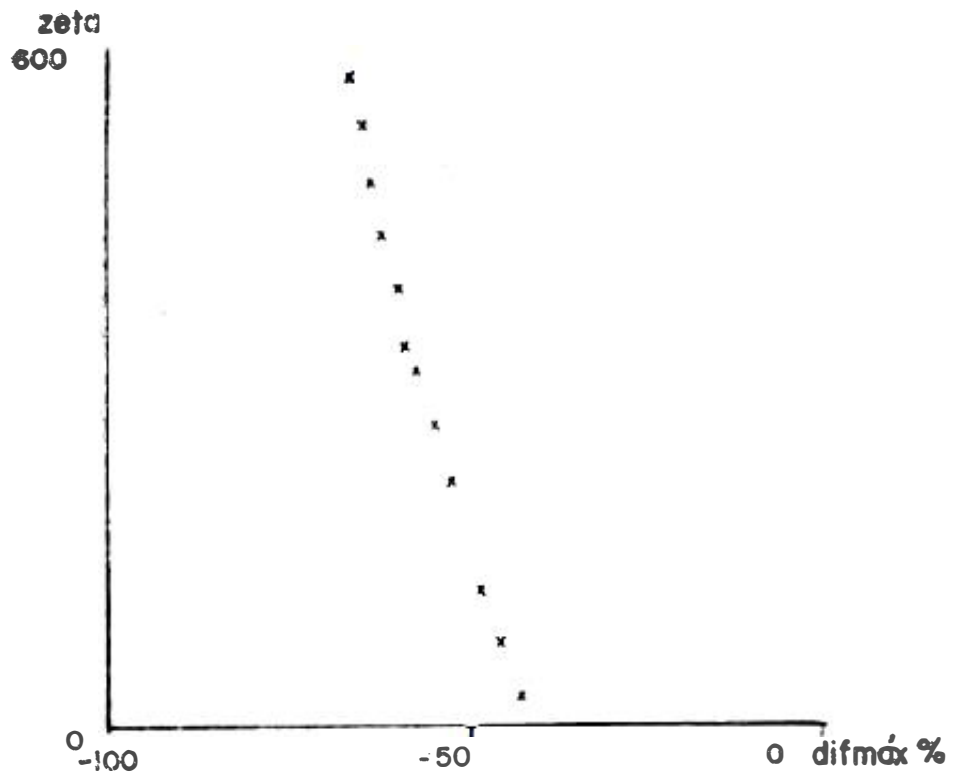


Fig. 4. Mapa de zonas de igual perfil $Ne(h)$.

En cada una de estas zonas hemos determinado un perfil que representa el comportamiento de la densidad electrónica con la altura. El perfil de desviación porcentual entre los perfiles extremos de la región, mostrado en la Fig. 5, evidencia diferencias de hasta 60% en algunas alturas.

En caso de no ser necesario tener en cuenta las variaciones espaciales, se puede utilizar el perfil promedio calculado a partir de los 221 perfiles elaborados, cuyos parámetros son $\beta = 0,0062 \text{ km}^{-1}$ y $N_{\text{max}} = 6,02 \cdot 10^6 \text{ electrones/cm}^3$.

La Fig 6 muestra la comparación de este perfil promedio con el determinado por Benkova *et al.* (1984) para la región americana, así como con el del modelo IRI-79. Observamos que nuestro perfil está corrido hacia la zona de menor densidad siendo las diferencias mayores en la alta ionosfera; la beta de nuestro perfil es superior a la determinada en el trabajo citado y por esto las diferencias dependen de la altura. El corrimiento resulta natural puesto que los perfiles mostrados de los otros autores son para horas diurnas.



DIFERENCIA MAXIMA ENTRE LOS PERFILES DE LA ZONA

Fig. 5. Perfil de desviación porcentual entre los perfiles extremales de la región.

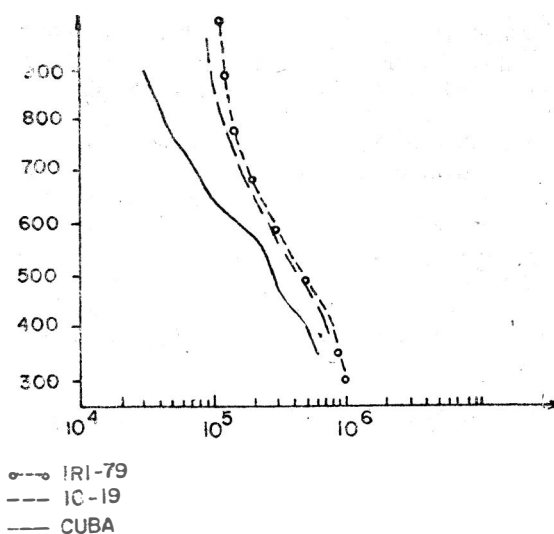


Fig. 6. Comparación del perfil promedio con el determinado por Benkova et al. (1984) y el del modelo IRI-79.

CONCLUSIONES

Los mapas de N_{max} y β obtenidos presentan una variación longitudinal en el desarrollo de la cresta de la anomalía ecuatorial en las latitudes ecuatoriales, semejante al reportado por Karpachov (1988), aunque las curvas obtenidas por nosotros son más detalladas. Al circunscribirnos a un área menor, podemos observar que la amplitud de las variaciones longitudinales es menor a las latitudes superiores.

En las latitudes subtropicales el máximo de la variación longitudinal del parámetro coincidía con el mínimo de la variación de

h_{max} , lo cual implica un cambio más rápido del perfil en estas longitudes. Este resultado complementa lo reportado por Kochenova (1988) para el ecuador magnético.

La determinación de esta distribución espacial, conjuntamente con la de N_{max} , nos permitieron delimitar los perfiles promedio nocturnos característicos para la región del Caribe y, además, la zona de validez de cada uno de ellos. En los casos que no sea necesario tener en cuenta estas diferencias, se calculó un perfil promedio para toda la región, de utilidad para las radiocomunicaciones.

REFERENCIAS

Benkova, N. P., G. V. Vasiliev, E. F. Koslov, N. A. Kochenova, Yu. V. Kushnerevski, N. I. Samarokin y otros (1983): Perfiles de concentración electrónica de las zonas subaurorales

por los datos del satélite IK-19 y estaciones terrestres [en ruso]. En *Proceeding of the Symposium organized by KAPG, Projects 5 and 6, Praga, 288-31, march, pp. 43-52.*

- Benkova, N. P., N. A. Kochenova, A. D. Lgenka, M. N. Ftkulin, y M. D. Fligel (1984): Model representation of mid-latitude electron density by means of Intercosmos-19 Data. *Adv. Space Research*, 4(1):51-58.
- Castro, J., y Eiranova (1986) Sisgen: Sistema de transformación de datos gravimétricos. En *Programoteca del centro de cálculo del Instituto de Geofísica y Astronomía*, ACC.
- Chan, K. L., (1966): Sobre la ionosfera exterior del continente americano. *Radio Science*, 1(10): 1158-1167.
- Chan, K. L., y L. Colin (1969): Global electron density distributions from topside sounding. *Proc. IEEE*, 57(6):990-1003.
- Deminov, M. G. y A. T. Karpachov (1983): Efecto longitudinal en la anomalía ecuatorial [en ruso]. En *Física de la ionosfera nocturna y la magnetosfera*, Nauka, IZMIRAN, pp. 16-21.
- Deminov, M. G. y A. T. Karpachov (1988): El efecto longitudinal en la ionosfera nocturna de latitudes medias según los datos del INTERCOSMOS-19 [en ruso]. *Geofísica y Astronomía*, 28(1):76-80.
- Deminov, M. G., N. A. Kochenova, y Yu. S. Sitnov (1988): Variaciones longitudinales del campo eléctrico en la ionosfera ecuatorial diurna [en ruso]. 28(1):71-75.
- Gil, G., B. Melendez y J. S. González (en prensa): Dependencia latitudinal de la densidad electrónica de la ionosfera superior de la zona del Caribe. *Cien. Tierra Espacio*, ACC.
- González, J. S., N. P. Benkova, N. A. Kochenova, Yu. V. Kushnerevski, y N. V. Serebriakova (1985): Resultados preliminares de las mediciones de la ionosfera en Cuba, mediante el sondeo vertical desde tierra y satélites [en ruso]. En *Preprint No. 53 (586)*, IZMIRAN, Moscú, 19 pp.
- Jackson, J. E. (1969): La reducción de ionogramas de satélites a perfiles de densidad electrónica. *Proc. IEEE*, 57(6):960-975.
- Karpachov, A. T., y V. N. Mashkova (1983): Efectos longitudinales en la ionosfera por los datos del satélite INTERCOSMOS-19 [en ruso]. En *Física de la ionosfera y de la magnetosfera*, IZMIRAN, Nauka, Moscú, pp. 5-15.
- Karpachov, A. T. (1988): Las particularidades del efecto longitudinal global en la anomalía ecuatorial noturna [en ruso]. *Geofísica y Astronomía*, 28(10):46-50.
- (1987): Variaciones longitudinales de la ionosfera ecuatorial por los datos del INTERCOSMOS-19 [en ruso]. *Geofísica y Astronomía*, 27(1):142-144.
- (1988): Variaciones longitudinales del perfil N (h) en el ecuador magnético. *Geofísica y Astronomía*, 28(1):144-146.

Ciencias de la Tierra y del Espacio, 21-22, 1993

SPATIAL BEHAVIOR OF THE NIGHTTIME IONOSPHERE OF THE
CARIBBEAN REGION UNDER QUIET CONDITIONS

Giselle GIL MORENO
and Berta MELENDEZ OLIVEROS

ABSTRACT. *Spatial behavior of the nighttime topside ionosphere electronic density of the Caribbean region under quiet magnetic conditions is analyzed from IK-19 satellite ionograms. Longitudinal variations of N_{max} and β were studied in this region using isopleth maps of these parameters. A longitudinal dependence of the anomalous equatorial electron density maximum development in subtropical latitudes is shown in these maps. Typical electron density profiles and their validity zone were determined for this region. An average profile to be used in every day radiocommunication service was also determined.*