

Comportamiento de las frecuencias críticas de la capa F2 en condiciones de baja actividad solar y baja actividad geomagnética

José Luis Bendito*, José Manuel Alborno y Alexander Carrasco

Grupo de Propagación Ionosférica, Observatorio Ionosférico, Universidad de Los Andes
Mérida, Venezuela

Recibido: 25-05-96 Aceptado: 26-07-96

Resumen

El comportamiento horario de las frecuencias críticas en la región F2 (f_oF2) se estudia para períodos con baja actividad solar y geomagnética usando técnicas estadísticas y espectrales. Hemos encontrado variaciones diurnas, semidiurnas y terdiurnas que siguen una trayectoria estacional. Basados en estos resultados, se ha elaborado un modelo en serie de Fourier que da cuenta de las variaciones estacionales observadas.

Palabras claves: Aeronomía; ionosfera; propagación.

A study on the behaviour of F2 critical frequencies for low solar and geomagnetic activity

Abstract

The hourly behaviour of F2-region critical frequencies (f_oF2) is studied for periods with low solar and geomagnetic activity using statistical and spectral techniques. We have found diurnal, semidiurnal and terdiurnal variations that follow a seasonal pattern. Based on these results, a Fourier series model that accounts for the observed seasonal variations has been elaborated.

Key words: Aeronomy; ionosphere; propagation.

Introducción

Desde hace más de 60 años la ionosfera ha sido objeto de estudios efectuados desde estaciones terrestres diseminadas por todo el planeta, de las cuales la mayor parte utiliza técnicas de sondeo vertical. El análisis de la información proporcionada por estos sondeos permite determinar la estructura y evolución de esta región de la alta atmósfera, poniendo de relieve el hecho de que la ionosfera posee una alta variabilidad espacial y temporal. Entre los distintos parámetros obtenidos de este tipo de regis-

tro, la frecuencia crítica de la región F2 (f_oF2) reviste particular interés en la planificación de las comunicaciones radioeléctricas de larga distancia. En este artículo se estudian las pautas estacionales en el comportamiento horario de f_oF2 en condiciones de baja actividad solar ($S_{10.7} < 110$) y baja actividad geomagnética ($A_p \leq 7$). La base de datos utilizada en este trabajo fue obtenida en el Observatorio Ionosférico de Mérida (Lat. $8^\circ 34' 48''$, Long. $71^\circ 07' 48''$) durante los períodos 1984-1985 y 1994-1995, ambos correspondientes a mínimos en el ciclo de actividad solar.

* Autor para la correspondencia.

Análisis de los datos

Análisis Estadístico

Como un paso previo a nuestro estudio, la base de datos con los valores horarios de f_0F2 para los periodos 1984-1985 y 1994-1995 fue subdividida en series correspondientes a las estaciones del año en el hemisferio norte, cada una de las cuales contiene únicamente aquellos días con mínima actividad geomagnética. El parámetro utilizado para cuantificar dicha actividad fue el índice geomagnético planetario A_p . Se considera que en un determinado día no se producen perturbaciones geomagnéticas significativas cuando $A_p \leq 7$.

A objeto de probar formalmente que las series de tiempo estudiadas no presentan un comportamiento aleatorio, sino que representan la respuesta de la ionosfera a los distintos agentes que influyen en su comportamiento, cada una de las series de tiempo examinadas fue sometida a una prueba de aleatoriedad. Esta prueba consiste en determinar, en primer lugar, el número de veces que el tren de la serie de tiempo cruza la media de la serie; y en segundo lugar, el número de veces que la pendiente del segmento de recta definido entre cada par de observaciones sucesivas cambia de signo. Aceptando que la distribución de la muestra es normal (lo cual es garantizado por el teorema del límite central), es posible determinar el número de cruces y el número de cambios de pendiente que cabría esperar para un comportamiento aleatorio. En base a una comparación entre los valores esperados y los observados, puede asegurarse si una serie de tiempo es aleatoria o si, por el contrario, muestra un comportamiento regular. En todos los casos examinados, se observó que la frecuencia crítica f_0F2 no presenta un comportamiento aleatorio.

Para respaldar esta afirmación desde otro punto de vista, acudimos a la representación gráfica de las series de tiempo que conforman nuestra base de datos, obser-

vándose que la variación horaria de f_0F2 presenta un patrón diario bien definido, con máximos y mínimos que ocurren consistentemente a aproximadamente las mismas horas del día. Esta observación nos sugiere que en principio el comportamiento de f_0F2 representa la respuesta de la ionosfera a la actividad solar como consecuencia del ciclo día/noche. A continuación se obtuvieron las medias de los valores horarios de f_0F2 para todas las series examinadas; esto a objeto de eliminar variaciones rápidas que enmascaran la tendencia de las pautas estacionales en la evolución de f_0F2 a lo largo del día. Las Figuras 1-4 muestran los resultados obtenidos.

Análisis Espectral

Una vez comprobada la no aleatoriedad de f_0F2 , se ha procedido a efectuar su análisis espectral. Dicho análisis se llevó a cabo obteniendo los periodogramas de cada una de las series, examinando el comportamiento de la función de densidad espectral de f_0F2 para las distintas estaciones del año. En todos los casos se encontró una frecuencia fundamental correspondiente a un periodo de 24 horas y armónicos con periodos de 12 y 8 horas. La Figura 5 muestra periodogramas para las cuatro estaciones del año.

Los resultados del análisis espectral indican que la frecuencia crítica horaria f_0F2 puede ser expresada en términos de una serie de Fourier con tres armónicos:

$$f_0F2(t) \approx a_0 + \sum_{n=1}^3 [a_n \text{Cos}(n\omega_0 t) + b_n \text{Sen}(n\omega_0 t)]$$

$$\text{con } \omega_0 = \frac{2\pi}{24} \text{ radianes/hora}$$

donde t es la hora local. Usando las relaciones

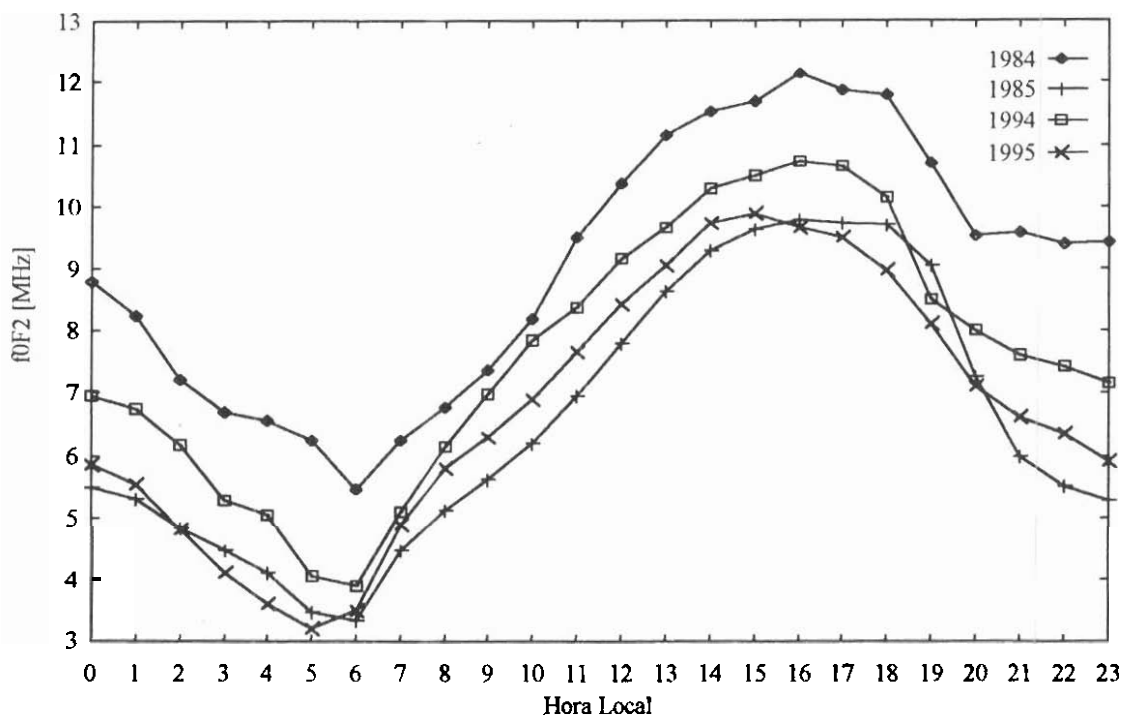


Figura 1. Medias horarias de f_0F_2 para Primavera.

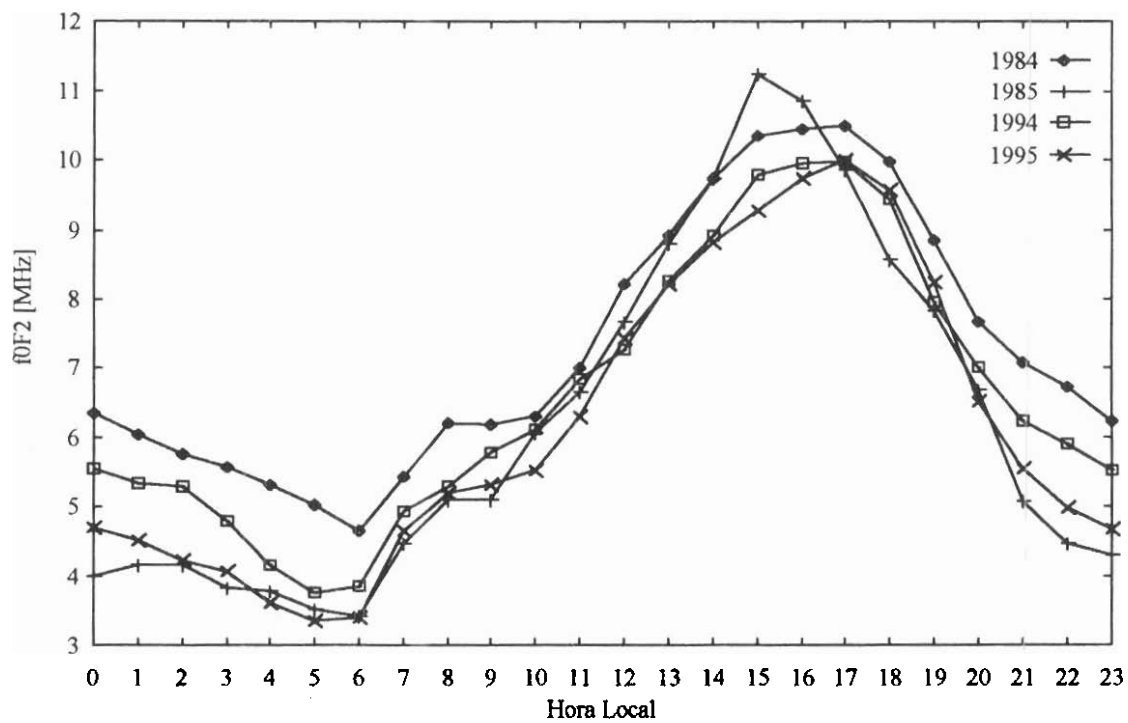


Figura 2. Medias horarias de f_0F_2 para Verano.

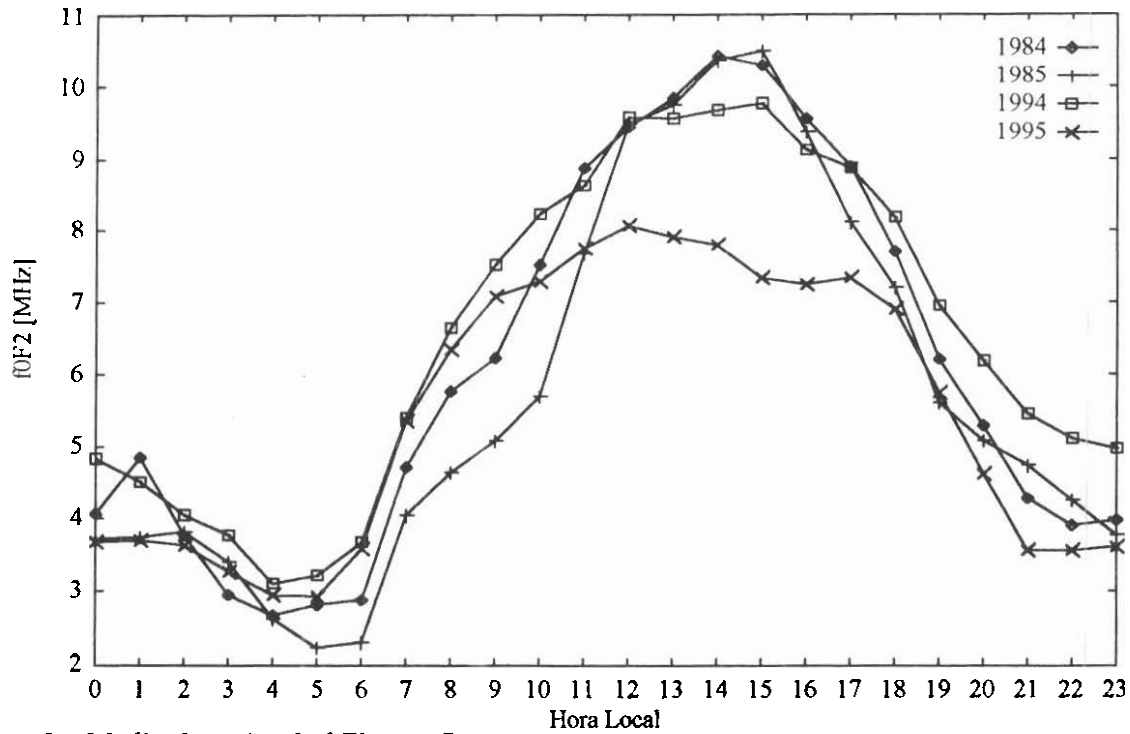


Figura 3. Medias horarias de f_0F_2 para Otoño.

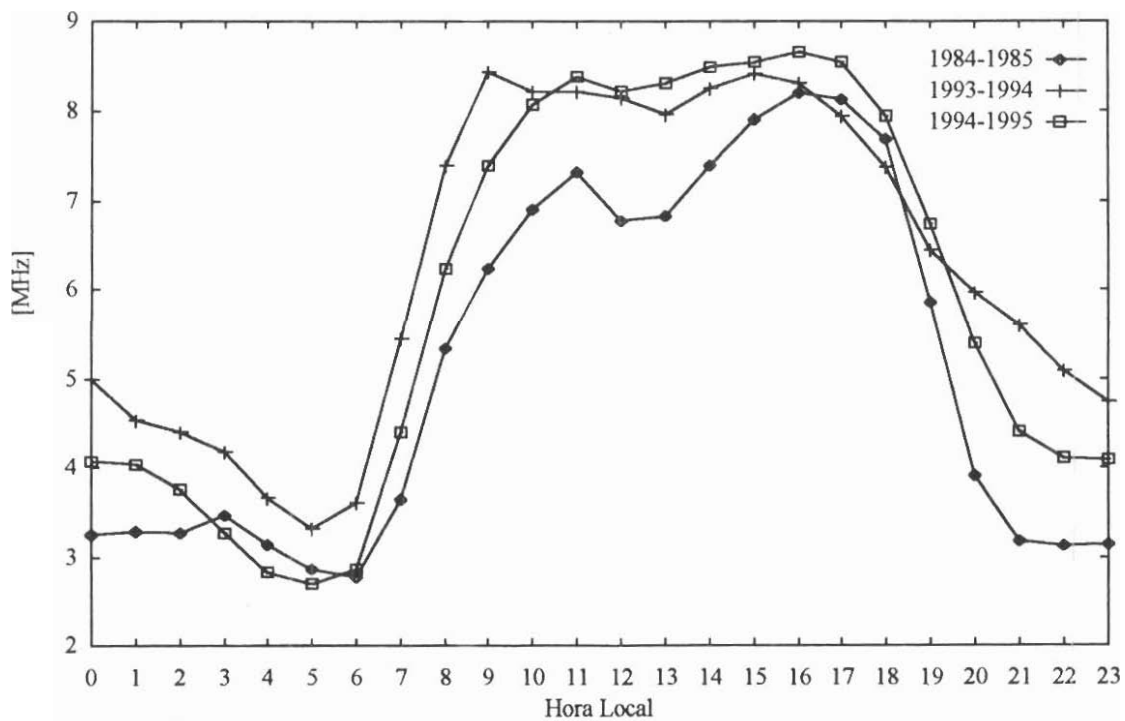


Figura 4. Medias horarias de f_0F_2 para Invierno.

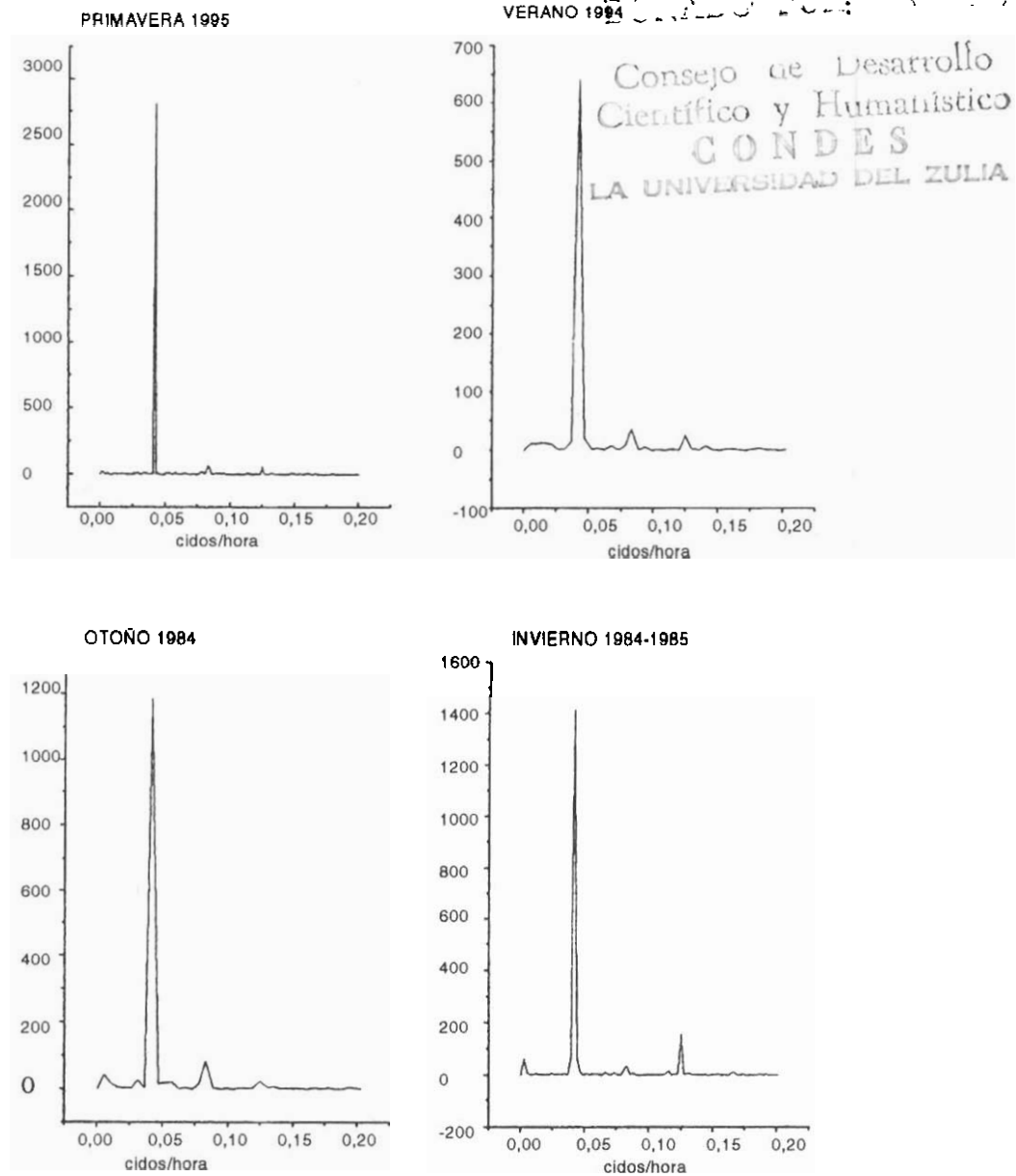


Figura 5

$$a_n = A_n \text{ Sen}\varphi_n ; b_n = A_n \text{ Cos}\varphi_n ;$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} ; \text{Tan}\varphi_n = \frac{a_n}{b_n}$$

la ecuación [1] puede ser escrita como

$$f_0 F_2(t) \approx A_0 + \sum_{n=1}^3 A_n \text{ Sen}(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad [2]$$

En base a esta última formulación, se hallaron las amplitudes y fases del modelo para cada estación del año, utilizando un ajuste por mínimos cuadrados entre la serie

Tabla 1
Amplitudes y Fases del Modelo de f_0F_2

	Primavera 1984	Verano 1984	Otoño 1984	Invierno 1984-1985	Primavera 1985	Verano 1985
A ₀ [MHz]	9,075	7,153	6,130	5,170	6,485	5,725
A ₁ [MHz]	2,806	2,710	3,512	2,633	2,898	3,432
A ₂ [MHz]	0,631	0,591	0,621	0,410	0,483	1,195
A ₃ [MHz]	0,181	0,356	0,485	0,882	0,427	0,183
ϕ_1 [rad]	3,47	3,60	4,13	4,17	3,67	4,02
ϕ_2 [rad]	0,78	-0,36	0,84	-0,073	-0,13	0,69
ϕ_3 [rad]	1,14	1,19	0,98	0,49	0,43	2,16
	Otoño 1985	Invierno 1993-1994	Primavera 1994	Verano 1994	Otoño 1994	Invierno 1994-1995
A ₀ [MHz]	5,725	6,279	7,605	6,580	6,546	5,985
A ₁ [MHz]	3,432	2,351	2,753	2,581	3,074	2,975
A ₂ [MHz]	1,165	0,481	0,635	0,598	0,532	0,353
A ₃ [MHz]	0,183	0,689	0,501	0,508	0,437	0,813
ϕ_1 [rad]	4,02	4,22	3,65	3,66	4,12	4,14
ϕ_2 [rad]	0,69	2,26	0,93	-0,16	1,50	1,57
ϕ_3 [rad]	2,16	0,74	0,77	0,92	0,89	0,52

de Fourier y las observaciones. Los valores de dichas amplitudes y fases se muestran en la Tabla 1. En todos los casos considerados, la correlación entre las observaciones y el modelo descrito por [2] fue superior al 80%.

Discusión

El comportamiento de f_0F_2 constituye la respuesta de la ionosfera a diferentes agentes que influyen en su formación y permanencia, tales como las actividades solar y geomagnética, vientos neutrales (1), campos eléctricos, cambios en la composición y temperatura de la atmósfera neutra, y otras causas menos conocidas. Estos agentes modifican la concentración electrónica de la región F2 actuando sobre la producción, pérdida y transporte de la ioniza-

	Primavera 1995	Verano 1995	Otoño 1995
A ₀ [MHz]	6,756	6,162	5,475
A ₁ [MHz]	2,814	2,886	2,553
A ₂ [MHz]	0,408	0,679	0,268
A ₃ [MHz]	0,392	0,478	0,585
ϕ_1 [rad]	3,73	3,72	4,35
ϕ_2 [rad]	1,04	-0,49	1,74
ϕ_3 [rad]	1,06	0,79	0,59

ción. El espectro de f_0F_2 , por lo tanto, representa los efectos de aquellos procesos que actúan con una periodicidad bien definida, tales como la insolación, las mareas atmosféricas y los vientos neutrales. Con el objeto

de reducir la influencia de otros agentes que tienen lugar de forma errática, la base de datos empleada en este estudio se limita a periodos con mínima actividad solar y geomagnética. Como fue anteriormente mencionado, en los periodogramas de todas las series que fueron analizadas aparecen armónicos con periodos de 24, 12 y 8 horas, los cuales han sido reportados por otros investigadores (2, 3). El espectro de f_0F2 no muestra de manera consistente otros armónicos con periodos distintos a los mencionados, por lo que las variaciones diurnas, semidiurnas y terdiurnas representan procesos determinantes en la evolución temporal de la densidad electrónica en la región F2. La presencia de dichas variaciones podría ser explicada en principio en términos de las mareas que se producen en la atmósfera neutral debido a la absorción de radiación ultravioleta por el ozono en la estratosfera y la baja mesosfera. En efecto, dado que el patrón de la insolación se aproxima al de una onda cuadrada, se producen oscilaciones semidiurnas y terdiurnas en adición a la variación fundamental de 24 horas (4). El Observatorio Ionosférico de Mérida se encuentra en una latitud de 8° Norte, por lo que los modos de oscilación con periodos de 12 y 8 horas son fuertemente excitados en la atmósfera local.

A objeto de estudiar la manera en la que se produce el patrón diurno de f_0F2 , se obtuvieron los valores de los armónicos mencionados para periodos en los que se registraron varios días consecutivos sin actividad geomagnética significativa. La Figura 6 muestra las componentes de 24, 12 y 8 horas así como la variación diaria resultante para algunos días examinados. Como puede apreciarse, la acción conjunta de los tres armónicos reconstruye en forma apropiada la variación de f_0F2 a lo largo del día, obteniéndose en todos los casos una correlación entre las observaciones y el modelo superior al 90%. La componente con periodo de 24 horas exhibe poca variabilidad. La forma precisa en la que se combinan las amplitu-

des y fases de los armónicos de 12 y 8 horas determina el patrón diario de f_0F2 .

El examen de las Figuras 1-4 revela la presencia de patrones propios de cada estación en el comportamiento horario de f_0F2 . Dichos patrones pueden apreciarse con mayor claridad en la Figura 7, la cual presenta las medias horarias de f_0F2 correspondientes a cada estación. La velocidad con que f_0F2 aumenta inmediatamente después del amanecer (dN/dt) es aproximadamente la misma para primavera y verano, aumentando en otoño y alcanzando un valor máximo en invierno. Este tipo de comportamiento ha sido descrito por Rishbeth (5). La velocidad con que f_0F2 disminuye después del ocaso es la misma para todas las estaciones excepto para la primavera donde tiene lugar de una manera más lenta. Con respecto a las horas a las que se producen los máximos y los mínimos, se nota que el mínimo valor de la frecuencia crítica para primavera y verano ocurre aproximadamente a las 0600 locales, en tanto que para otoño e invierno este mínimo se produce una hora más temprano. La hora a la que se produce el máximo valor de f_0F2 es casi la misma para primavera y verano (entre la 1700 y 1800), adelantándose dos horas en el otoño e invierno. Llama la atención la aparición de dos máximos en el invierno: uno en horas de la mañana y otro hacia el atardecer, los cuales dan lugar a la muesca o "biteout" que se aprecia en las Figuras 4 y 7. En el promedio, los valores más altos de f_0F2 ocurren en la primavera, disminuyendo a lo largo del año hasta alcanzar un mínimo en el invierno.

Por otra parte, al examinarse la variación estacional en las amplitudes y las fases de la serie de Fourier que describe a f_0F2 en cada estación del año, se observa un pauta consistente en los valores que ocurren para estaciones homólogas en los dos mínimos del ciclo de actividad solar comprendidos en este estudio. En la Tabla 1 se puede apreciar que la amplitud del coeficiente A_0 es máxima en la primavera, disminuyendo paulatinamente hasta llegar a un mínimo en el

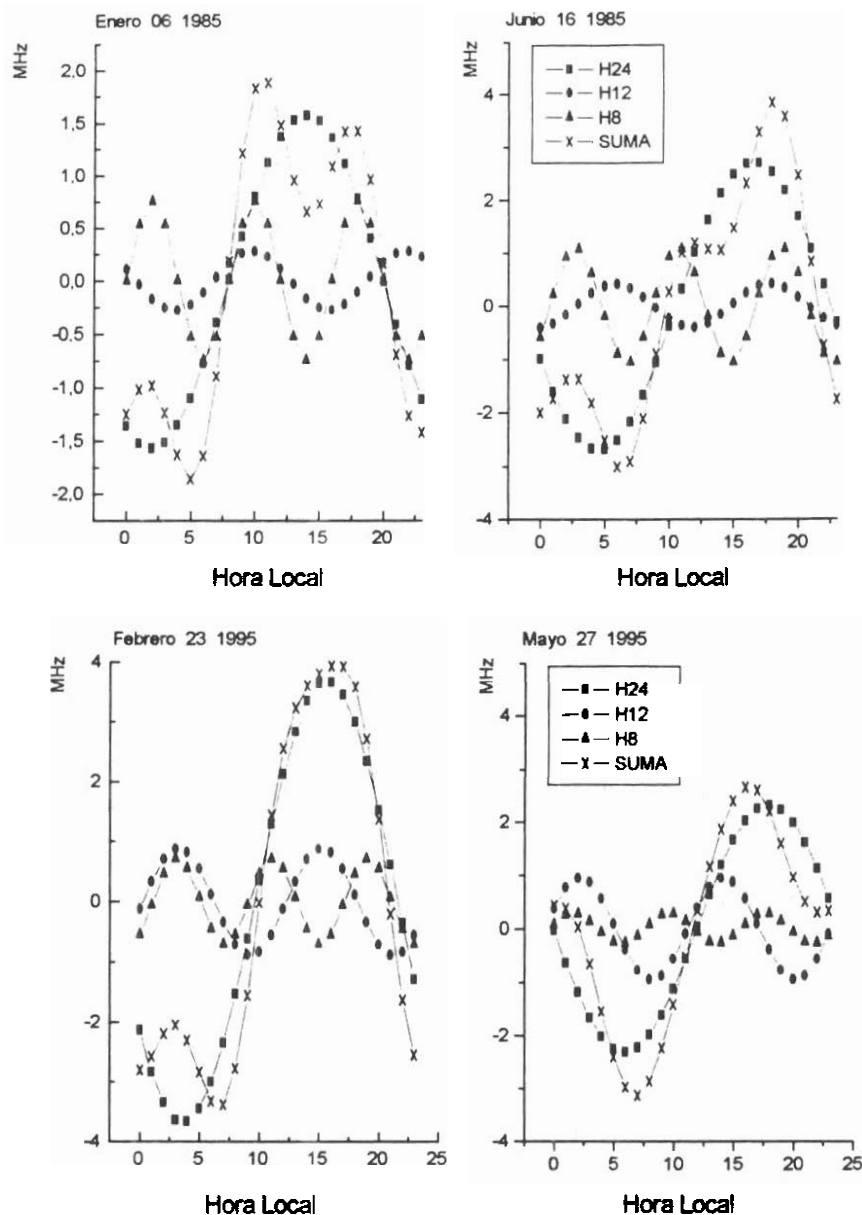


Figura 6.

invierno, lo cual concuerda con la variación observada en las medias de f_0F_2 . La curva correspondiente a la primavera de 1984 (Figura 1) exhibe valores notablemente mayores que los correspondientes a los demás años. Similarmente, la amplitud del término independiente A_0 para dicho período es la más grande registrada en nuestro estudio.

Es bien conocido que las medias a largo término de f_0F_2 muestran una buena correlación con medias similares de la actividad solar, por lo que el comportamiento de A_0 era de esperarse debido a que durante la primavera de 1984 la actividad solar es relativamente alta comparada con la de los otros períodos considerados ($S_{10.7} \approx 106.16$).

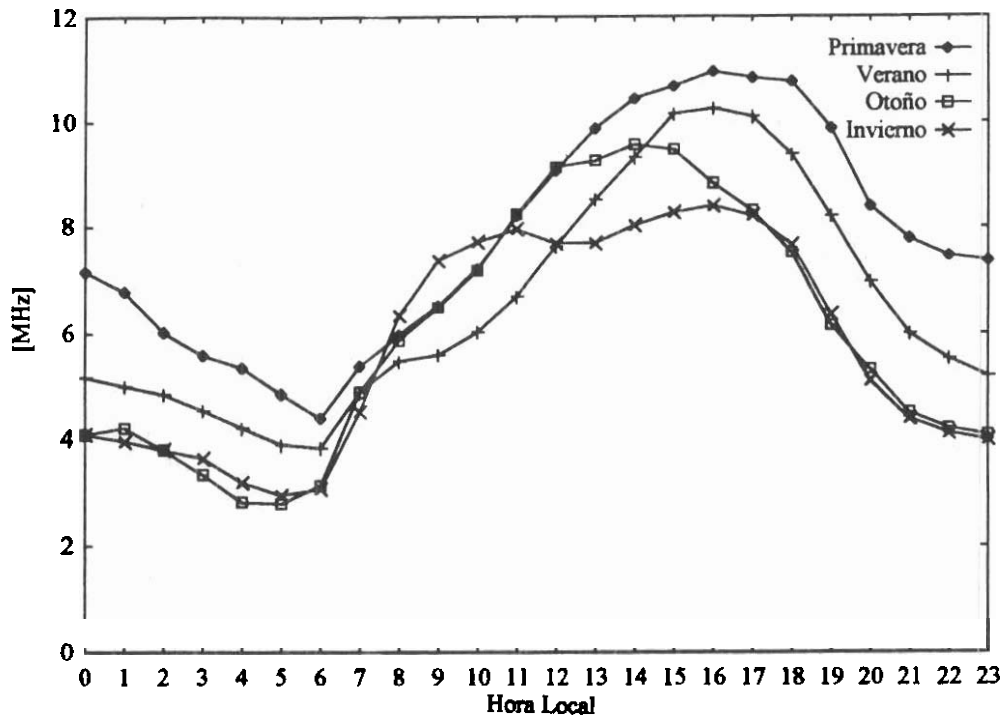


Figura 7. Medias horarias de f_0F_2 para cada Estación.

Puede concluirse entonces que A_0 depende simultáneamente del nivel de la actividad solar (para periodos relativamente prolongados) y de la estación del año.

Canziani *et al* (3), en un estudio del comportamiento latitudinal de la máxima densidad electrónica de la región F2 (NmF_2), determinan que la amplitud del armónico diurno refleja principalmente la influencia de procesos de fotoionización, los cuales a su vez están controlados en principio por la actividad solar. En consecuencia, los armónicos con periodos de 12 y 8 horas representarían la influencia de agentes que modifican los procesos de recombinación y transporte. Los autores sugieren que la temperatura de la atmósfera neutra es un factor determinante en el comportamiento diario de la densidad electrónica; en tanto que sus variaciones estacionales están relacionadas con el transporte de componentes en la termosfera producido por la circulación global.

Con respecto a los resultados obtenidos en este estudio, es de notar que la mínima amplitud del armónico diurno ocurre en el invierno, lo que refuerza la suposición de que la actividad solar es el principal agente cuya influencia es reflejada por el espectro de f_0F_2 , tal como se aprecia de la evolución estacional de A_0 . En las otras estaciones, el efecto de la insolación estaría enmascarado por otros procesos, dado que la máxima amplitud de A_1 se produce en otoño (cuando la insolación sobre el hemisferio norte está disminuyendo). De manera similar, la amplitud de A_2 también es mínima en el invierno, alcanzando un máximo en el verano. Con respecto al comportamiento de este coeficiente, los valores correspondientes a Verano y Otoño de 1985 presentan una apreciable dispersión con respecto a las demás estaciones, lo que probablemente se deba a la corta longitud de las series correspondientes a dichos periodos (4 días en cada caso).

La máxima amplitud del armónico terdiurno, por el contrario, ocurre en el invierno, reforzando la tesis de que dicha variación se debe a cambios estacionales en los procesos de transporte y pérdida de la ionización. Este armónico de rápida variación explica los valores de dN/dt que se dan en el invierno después del amanecer, pudiendo también estar relacionado con el "bite-out" invernal. Este último fenómeno es atribuido a derivas electrodinámicas producidas por campos eléctricos (6, 7), los cuales a su vez serían generados por mareas atmosféricas térmicas y gravitacionales que actúan con periodos cercanos a las doce horas.

La fase ϕ_1 del armónico diurno presenta una pauta consistente con las horas a las que se producen los máximos en f_0F_2 a lo largo del año. En efecto, ϕ_1 aumenta de forma monótonica conforme se avanza desde la primavera hacia el invierno, coincidiendo con el adelanto progresivo observado en la hora de ocurrencia de los máximos de la frecuencia crítica. Dicho adelanto también se observa en menor grado para la hora de aparición de los mínimos de f_0F_2 .

Referencias Bibliográficas

1. CHO H., YEH K.: Neutral Winds and the Behavior of the Ionospheric F2 Region. *Radio Science* 5(6):881-894, 1970.
2. SINGLER A.: Harmonic Analysis of the Diurnal Variation of Critical F2 Layer Frequencies. *Geomagnetism and Aeronomy* V(6):806-812, 1965.
3. CANZIANI P., MARINARO S., GIRALDEZ A.: On the Tidal Behaviour of NmF2. *Annales Geophysicae* 5A:281-282, 1987.
4. EVANS J.: A Note on Lunar Tides in the Ionosphere. *Journal of Geophysical Research* 83(A4):1647-1652, 1978.
5. RISHBETH H.: The Effect of Winds in the Ionospheric F2-Peak. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 29(3): 225-238, 1967.
6. WHITTEN R., POPPOFF I.: *Fundamentals of Aeronomy*. John Wiley and Sons, 1971, pp. 294-296.
7. RISHBETH H. y GARRIOTT O.: *Introduction to Ionospheric Physics*. Academic Press, 1969, p. 180.