

Tendencias a largo plazo en la región F2 de la ionosfera y su relación con la actividad geomagnética

D. MARÍN

Estación de Sondeos Atmosféricos «El Arenosillo», Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Ctra. San Juan del Puerto-Matalascañas, km 33, 21130, Huelva, España

A. V. MIKHAILOV

IZMIRAN, Academia de Ciencias, Moscú, Rusia

B. A. de la MORENA

Estación de Sondeos Atmosféricos «El Arenosillo», INTA, Huelva, España

M. HERRAIZ

Departamento de Geofísica y Meteorología, Universidad Complutense, Madrid, España

RESUMEN

Usando una nueva aproximación, Mikhailov y Marin (2000) y Marin *et al.* (2000) analizaron respectivamente tendencias a largo plazo en la frecuencia y altura crítica de la capa ionosférica F2, f_oF2 y $hmF2$, para estaciones situadas en el hemisferio Norte y durante el período de tiempo 1965-1991. Mientras que la mayoría de las tendencias encontradas en f_oF2 resultaron ser negativas, las correspondientes a $hmF2$ fueron positivas. Un enfriamiento de la atmósfera superior, producido como consecuencia del calentamiento global de la baja atmósfera debido al efecto invernadero, no puede ser el origen de las tendencias detectadas. Un descenso en la temperatura termosférica implicaría tendencias negativas en $hmF2$ y positivas en f_oF2 , lo cual contradice los resultados encontrados tanto en $hmF2$ como en f_oF2 . Sin embargo, tales tendencias observadas pueden ser explicadas por el incremento en la actividad de tormentas ionosféricas en la región F2 ocasionado por el aumento detectado en la actividad geomagnética durante el periodo de tiempo analizado 1965-1991.

Palabras clave: Región F2 ionosférica, Tendencias a largo-plazo, Perturbaciones geomagnéticas, Tormentas ionosféricas, Efecto invernadero.

ABSTRACT

Using a new approach, Mikhailov and Marin (2000) and Marin *et al.* (2000) analysed respectively the long-term trends of the F2-layer critical frequency and height, f_oF2 and $hmF2$, on Northern Hemisphere ionosonde stations over the time period 1965-1991. Whereas the majority of the observed f_oF2 trends were found to be negative, the $hmF2$ ones were seen to be positive. A global warming in the lower atmosphere, accompanied by a cooling in the upper atmosphere, due to the greenhouse effect can not be the cause of the detected trends. A thermospheric temperature decrease would result in negative $hmF2$ trends and positive f_oF2 trends, contrary to the observations both in f_oF2 and $hmF2$. But such long-term trends can be explained by an increase of the F2-la-

yer storm activity as a result of the increasing geomagnetic activity observed during the analysed time period 1965-1991.

Key words: Ionospheric F2-region, Long-term trends, Geomagnetic disturbances, Ionospheric storms, Greenhouse effect.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe un permanente interés relacionado con el problema de los cambios globales en la atmósfera terrestre debidos al impacto antropogénico. Algunos ejemplos de tales cambios en la baja atmósfera son bien conocidos: incremento de la concentración de dióxido de carbono, disminución del contenido de ozono, etc. De esta forma, las variaciones o tendencias a largo-plazo (escala temporal de decenas de años) que pueden existir en la atmósfera están siendo objeto de estudio e interés por la comunidad científica. La mayor parte de esta discusión referente al cambio global en la atmósfera se ha enfocado principalmente a la troposfera y estratosfera, por ser éstas las regiones que afectan de una forma directa e inmediata al desarrollo humano, tanto biológico como económico. Sin embargo, los cambios a largo-plazo en regiones superiores (mesosfera, ionosfera y termosfera) también deben ser analizados y tratados con atención por su inherente interés científico y por su posible importancia práctica, ya que pueden proporcionar indicaciones útiles de cambios en niveles inferiores. Aunque durante los últimos años varios investigadores han analizado las distintas tendencias a largo plazo en la Ionosfera (Danilov 1997, 1998; Bremer, 1998; Danilov y Mikhailov, 1998, 1999; Mikhailov y Marin, 2000; Marin *et al.*, 2000), el mecanismo físico que explique el origen de tales tendencias aún es incierto. Después de los cálculos efectuados por Roble y Dickinson (1989), que predecían un enfriamiento de la mesosfera y termosfera como consecuencia del incremento de gases atmosféricos de efecto invernadero, Rishbeth (1990) y Rishbeth y Roble (1992) predijeron una disminución en la altura crítica de la capa F2, $hmF2$. Asumiendo estas predicciones, algunos investigadores han intentado explicar las diversas tendencias a largo-plazo observadas en distintos parámetros ionosféricos como una indicación de este efecto invernadero en la mesosfera y termosfera (Bremer, 1992; Givishvili y Leshchenko, 1994; Ulich y Turunen, 1997; Jarvis *et al.*, 1998; Upadhyai y Mahajan, 1998). Sin embargo distintos análisis han mostrado que las tendencias a largo-plazo de los parámetros ionosféricos de las capas E y F no pueden ser explicados mediante esta hipótesis. Un enfriamiento total de la atmósfera superior implicaría una tendencia negativa en $hmF2$ (Bremer, 1992; Ulich y Turunen, 1997) y positiva en $foF2$ (Mikhailov y Marin; 2000), lo cual contradice los resultados obtenidos por Marin *et al.* (2000) y Mikhailov y Marin (2000), respectivamente. Además, otros análisis realizados por Bremer (1998) para numerosas estaciones Europeas, y por Upadhyay y Mahajan (1998) para estaciones pertenecientes a toda la red mundial, mostraron que las tendencias en

$foF2$ y $hmF2$ resultaban ser de distinto signo y magnitud dependiendo de la estación considerada, lo cual también es irreconciliable con esta hipótesis de efecto invernal. Una explicación diferente a las tendencias a largo plazo en la Ionosfera, no conectada con la actividad antropogénica, fue sugerida por Mikhailov y Marín (2000) y Marín *et al.* (2000). Dichos autores, en su investigación de cambios a largo-plazo en $foF2$ y $hmF2$, mostraron que las tendencias detectadas estaban conectadas con los cambios naturales a largo plazo que se producen en la actividad geomagnética y podían ser explicadas teniendo en cuenta el aumento observado en la actividad geomagnética durante el periodo temporal en el que fueron halladas dichas tendencias. En este artículo se resumen los principales resultados obtenidos en los mencionados trabajos y se ofrece una explicación física conjunta basada en este propuesto control geomagnético.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

Los datos de $foF2$ y $hmF2$ usados inicialmente para detectar tendencias a largo-plazo se prepararon de acuerdo a los siguientes criterios:

— Haciendo uso de las bases de datos del WDC-C («World Data Center»), del Rutherford Appleton Laboratory (Chilton, UK) y del NGDC («National Geophysical Data Center», Boulder, USA), se obtuvieron medianas mensuales de $foF2$ y $M(3000)F2$ para cada hora en tiempo universal (UT), correspondientes a estaciones Europeas, Asiáticas y Norteamericanas.

— Los huecos existentes en las observaciones iniciales de $foF2$ y $M(3000)F2$ se rellenaron usando el modelo de medianas mensuales MQMF2 (Mikhailov *et al.*, 1996).

— Los datos en tiempo universal fueron convertidos a tiempo local solar (SLT) mediante interpolación por *splines* cúbicos.

— Los valores correspondientes a $hmF2$ se calcularon a partir de $M(3000)F2$ usando la fórmula de Shimazaki (1955):

$$hmF2 = [1490/M(3000)F2]-176 \quad (1)$$

En la búsqueda de tendencias a largo-plazo en los parámetros de la región F2 de la Ionosfera, se ha de tener en cuenta que el comportamiento de esta región ionosférica está fuertemente influenciado por la actividad solar y geomagnética. Esto dificulta el cálculo de los cambios globales que se pretenden detectar puesto que éstos son relativamente pequeños comparados con aquellos ocasionados por las variaciones solares y geomagnéticas. Por lo tanto se requieren especiales aproximaciones capaces de eliminar estas fuertes influencias, dependiendo en gran medida los resultados obtenidos de la metodología usada. El método que ha sido aplicado en la obtención de los resultados que se pre-

sentarán en este artículo, así como las ventajas de su uso, han sido descritos en detalle por Danilov y Mikhailov (1999) y Mikhailov y Marin (2000) por lo que a continuación se resumen únicamente sus principales puntos:

— En lugar de usar directamente las medianas mensuales del parámetro en cuestión, se utilizan sus valores horarios suavizados.

— Para intentar excluir al máximo la dependencia de la actividad solar y geomagnética, se analizan las desviaciones relativas de las medianas suavizadas respecto a valores proporcionados por algún modelo:

$$\delta X = (X_{\text{obs}} - X_{\text{mod}}) / X_{\text{mod}} \quad (2)$$

donde X representa el parámetro ionosférico en cuestión (en este caso, foF2 o hmF2), Xobs su mediana suavizada observada y Xmod su valor obtenido por medio uno de los dos siguientes modelos:

$$X_{\text{mod1}} = a + b R_{12} + c R_{12}^2 + d R_{12}^3 \quad (\text{Modelo 1}) \quad (3)$$

$$X_{\text{mod2}} = a + b R_{12} + c R_{12}^2 + d R_{12}^3 + e Ap_{12} \quad (\text{Modelo 2}), \quad (4)$$

siendo R_{12} y Ap_{12} los valores mensuales suavizados de los índices de actividad solar y geomagnética R y Ap, respectivamente.

— De este modo, las tendencias lineales para una hora y mes seleccionados pueden ser estimadas de acuerdo a una regresión lineal de las variaciones relativas del parámetro ionosférico en cuestión δX con el año ($\delta X = a + k \text{ año}$). Debido a que las variaciones estacionales de las tendencias, tanto de foF2 como de hmF2, son pequeñas respecto a las diurnas (Mikhailov y Marin, 2000, Marin *et al.*, 2000), únicamente las variaciones relativas δX promediadas para cada año a horas fijas se han considerado para calcular las correspondientes tendencias anuales.

— El test estadístico de significación aplicado a la tendencia lineal (pendiente k), ha sido realizado usando el criterio F de Fisher (Pollard, 1977):

$$F = r^2 (N - 2) / (1 - r^2), \quad (5)$$

donde r es el coeficiente de correlación entre los valores anuales medios δX y el año, y N el número de pares considerado. El nivel de confianza aplicado en este artículo ha sido de al menos el 90%.

— El periodo de tiempo utilizado para el cálculo de las tendencias se extiende desde 1965 hasta 1991, el cual se corresponde con un periodo temporal en el que se aprecia un aumento en la actividad geomagnética (Mikhailov y Marín, 2000). Sin embargo, debe ser mencionado que el modelo usado en la obtención de las desviaciones relativas δX es calculado utilizando todos los años de observaciones disponibles para cada estación particular analizada.

— Otro aspecto que debe ser tenido en cuenta en el análisis de tendencias a largo-plazo en la región F2 de la ionosfera, es la posible influencia del efecto histéresis en las variaciones de $foF2$ y $hmF2$. Danilov y Mikhailov (1999) y Mikhailov y Marín (2000) encontraron que únicamente si este efecto en las fases de subida y bajada de un ciclo solar es eliminado, es posible obtener tendencias en $foF2$ estables y significativas. Dichos autores recomendaron calcular las tendencias de $foF2$ considerando únicamente los años correspondientes a los máximos y mínimos de cada ciclo solar. La Tabla 1 muestra la selección de años recomendada que se basa en las variaciones medias anuales observadas en el índice R_{12} . Se seleccionaron dos-tres años correspondientes a los extremos de cada ciclo solar con valores próximos de R_{12} . Por otra parte, al igual que para $foF2$, las variaciones de $M(3000)F2$ también pueden verse afectadas por el efecto histéresis (Rao y Rao, 1969). Como los valores de $hmF2$ son obtenidos a partir de los de $M(3000)F2$, también puede esperarse en sus variaciones alguna influencia de este efecto. Sin embargo, un análisis efectuado por Marín *et al.* (2000) mostró que el carácter de las tendencias de $hmF2$ no cambiaba cuando para su cálculo eran utilizados, por una parte, todos los años, y por otra, la selección de años basada en los extremos de cada ciclo solar mostrada en la tabla 1 y propuesta para evitar el efecto histéresis. De esta forma, se ha de mencionar que mientras los resultados de las tendencias de $foF2$ que se presentan en este artículo se han calculado teniendo en cuenta la selección de años mostrada en la tabla 1, los correspondientes a $hmF2$ se han obtenido considerando todos los años.

3. TENDENCIAS EN $foF2$ y $hmF2$: RESULTADOS

A continuación se resumen los resultados que Mikhailov y Marín (2000) y Marín *et al.* (2000) obtuvieron en su investigación de tendencias a largo-plazo en la región F2 ionosférica. En el estudio se utilizaron estaciones situadas en el Hemisferio Norte, entre 37°N y 81°N latitud geográfica (30°N y 71°N, latitud geomagnética), y cubriendo un amplio rango longitudinal.

Aplicando la metodología que acaba de ser mencionada, Mikhailov y Marín (2000) analizaron las tendencias a largo-plazo de $foF2$ sobre 30 estaciones Norteamericanas, Europeas y Asiáticas. Estas estaciones, así como los valores (en 10^{-4} por año) de sus tendencias lineales en $foF2$ obtenidas para el periodo temporal 1965-1991 a las 0 y 12 SLT, se presentan en la tabla 2. Para el cálculo de las tendencias, únicamente se consideraron los años mostrados en la tabla 1 correspondientes a los máximos y mínimos de cada ciclo de actividad solar pertenecientes al intervalo temporal de estudio 1965-1991. Además, en la Tabla 2 se comparan los resultados cuando se utilizan los modelos ya comentados para la obtención de las desviaciones relativas de $foF2$ utilizadas para calcular la tendencia. Se aprecia cómo la inclusión del índice geomagnético Ap_{12} , en la regresión usada como Modelo 2 hace que las tendencias sean más positivas. La

Tabla I. Valores medios anuales del índice R_{12} . Las celdas sombreadas muestran los años correspondientes a los máximos (M) y mínimos (m) de actividad solar usados en el análisis.

Años	Media Anual R_{12}	Años	Media Anual R_{12}	Años	Media Anual R_{12}
1930	38,8	1953	14,9 m	1976	13,4 m
1931	21,1	1954	6,4 m	1977	31,9
1932	12,1	1955	41,5	1978	91,4
1933	5,9 m	1956	133,8	1979	148,6 M
1934	9,4 m	1957	187,9 M	1980	154,2 M
1935	36,6	1958	189,5 M	1981	141,3 M
1936	79,6	1959	157,5	1982	114,3
1937	113,2 M	1960	108,0	1983	74,7
1938	106,4 M	1961	59,4	1984	42,2
1939	89,8	1962	36,6	1985	17,9 m
1940	66,4	1963	27,3	1986	13,8 m
1941	50,5	1964	12,3 m	1987	32,1
1942	30,4	1965	16,3 m	1988	98,5
1943	15,3 m	1966	49,7	1989	153,9 M
1944	11,1 m	1967	89,7	1990	145,5 M
1945	36,4	1968	106,6 M	1991	144,0 M
1946	91,7	1969	106,5 M	1992	93,8
1947	145,6 M	1970	100,4 M	1993	55,6
1948	141,2 M	1971	69,7	1994	30,2
1949	129,6	1972	66,8	1995	17,3 m
1950	88,7	1973	39,0	1996	9,1 m
1951	64,9	1974	32,2	1997	22,7
1952	32,9	1975	17,4 m	1998	62,4

mayoría de las tendencias significativas detectadas con un nivel de confianza del 90% (señaladas en negrita) son negativas, aunque también se observan determinadas estaciones (como Khabarovsk, Alma-Ata o Tashkent), en general de media-baja latitud geomagnética, que presentan tendencias positivas. Debe ser mencionado que debido a que sólo se han considerado los años de máxima y mínima actividad solar, el número N de pares analizados es pequeño (N=14) y algunas tendencias no son significativas para el nivel de confianza elegido del 90%.

Marín *et al.* (2000) realizaron un análisis similar para $hmF2$ utilizando 27 estaciones situadas en el sector longitudinal Euroasiático (5.6°W-136°E). En la tabla 3 se muestran los correspondientes resultados para las 0 y 12 SLT. Todos los años del periodo 1965-1991 fueron utilizados en el análisis. Al contrario que para el comportamiento detectado en las tendencias de $foF2$, la inclusión de una dependencia lineal de la actividad geomagnética en la regresión (Modelo 2)

Tabla II. Estaciones analizadas y sus tendencias de f_oF_2 (en 10^{-4} por año) para el periodo 1965-1991. Regresiones de f_oF_2 con R_{12} (Modelo 1) y con $R_{12} + Ap$ (Modelo 2) son usadas en el cálculo. Los valores que aparecen en negrita muestran las tendencias significativas con un nivel de confianza del 90%.

Estación	Latitud geomagnética ° Norte	Latitud y longitud geográfica		0 SLT Mod. 1	0 SLT Mod. 2	12 SLT Mod. 1	12 SLT Mod. 2
		° Norte	° Este				
Kheysa	71,28	80,60	58,00	-29,5	-21,8	-29,5	-22,2
Sodankyla	63,73	67,40	26,60	-39,5	-37,5	-67,5	-56,0
Dikson	62,97	73,50	80,40	-15,8	-9,2	-21,3	-14,7
Lycksele	62,70	64,70	18,80	1,9	2,5	-26,0	-17,9
Uppsala	58,44	59,80	17,60	-42,5	-29,9	-27,6	-22,4
Salekhard	57,30	66,50	66,70	23,9	20,0	-22,5	-16,4
Ottawa	56,78	45,40	284,10	0,74	9,9	-17,7	-12,5
St. Petersburg	56,17	60,00	30,70	-19,2	-9,4	-16,1	-10,9
Juliusruh	54,40	54,60	13,40	-33,7	-24,8	-12,2	-9,0
Slough	54,25	51,50	359,43	-13,1	-5,9	-5,9	-2,6
Kaliningrad	53,10	54,60	13,40	-27,9	-17,1	-10,8	-8,1
Dourbes	51,89	50,10	4,60	-3,9	4,0	1,7	3,2
Yakutsk	51,00	62,00	129,60	-33,0	-22,1	-25,8	-19,8
Moscow	50,82	55,50	37,30	-25,6	-16,6	-12,0	-8,7
Gorky	50,29	56,15	44,28	-18,8	-13,1	-10,7	-8,1
Poitiers	49,40	46,60	0,30	-9,4	-6,1	-0,3	-0,4
Boulder	48,89	40,00	254,70	5,0	5,6	-8,4	-6,5
Ekaterinburg	48,42	56,70	61,10	-30,2	-23,9	-12,0	-9,5
Kiev	47,50	50,72	30,30	-11,5	-5,8	-4,7	-4,1
Tomsk	45,92	56,50	84,90	-16,9	-12,4	5,0	6,0
Rome	42,46	41,90	12,52	-2,3	-3,8	6,2	3,5
Irkutsk	41,06	52,47	104,03	-8,9	-7,7	-9,3	-9,2
Sofia	41,00	42,60	23,40	0,4	-1,1	-4,1	-6,1
Karaganda	40,31	49,80	73,08	-8,1	-3,3	-4,7	-4,5
Khabarovsk	37,91	48,52	135,12	9,3	7,9	3,6	1,3
Novokazalinsk	37,60	45,77	62,12	-8,9	-7,1	-5,9	-5,9
Alama_Atá	33,42	43,25	76,92	12,1	10,0	6,5	4,0
Tashkent	32,30	41,33	69,62	-1,6	-1,1	5,8	2,1
Ashkhabad	30,39	37,90	58,30	-4,4	-5,4	-1,4	-3,5
Akita	29,53	39,70	140,10	0,2	0,4	-0,7	-3,3

proporciona una magnitud de las tendencias más negativa. La mayoría de las estaciones analizadas presentan tendencias significativas con un nivel de confianza de al menos el 95% (al igual que en la tabla 2, aparecen señaladas en negrita).

El número de estas estaciones con tendencias significativas (positivas y negativas) para las 0, 6, 12 y 18 SLT y cuando los dos modelos son aplicados

Tabla III. Estaciones analizadas y sus tendencias de $hmF2$ (en 10^{-4} por año) para el periodo 1965-1991. Regresiones de $hmF2$ con R_{12} (Modelo 1) y con $R_{12} + Ap$ (Modelo 2) son usadas en el cálculo. Los valores que aparecen en negrita muestran las tendencias significativas con un nivel de confianza del 95%.

Estación	Latitud geomagnética ° Norte	Latitud y longitud geográfica		0 SLT Mod. 1	0 SLT Mod. 2	12 SLT Mod. 1	12 SLT Mod. 2
		° Norte	° Este				
Kheysa	71,28	80,60	58,00	-29,5	-21,8	-29,5	-22,2
Murmansk	64	69	33	-3,23	-4,63	1,66	-3,09
Sodankyla	63,73	67,4	26,6	-6,71	-6,94	5,08	-2,58
Lycksele	62,7	64,7	18,8	18,98	10,62	25,22	16,29
Arkhangelsk	58,7	64,6	40,5	-2,36	-5,31	4,77	-0,28
Uppsala	58,44	59,8	17,6	-15,49	-19,06	-13,42	-20,08
St. Petersburg	56,17	60	30,7	7,64	-0,23	10,12	3,67
Juliusruh	54,4	54,6	13,4	-3,48	-10,38	3,63	-2,08
Slough	54,25	51,5	359,4	7,87	-0,27	17,2	10,06
Kaliningrad	53,1	54,7	20,6	14,06	0,44	4,91	-3,36
Dourbes	51,89	50,1	4,6	-0,86	-2,77	-13,36	-12,14
Yakutsk	51,2	62	129,6	19,55	11,16	15,96	6,93
Tunguska	50,9	61,6	90	9,7	2,53	16,64	9,15
Moscow	50,82	55,5	37,3	27,8	12,07	29,26	16,82
Magadan	50,75	60	151	9,29	2,15	-9,52	-14,2
Gorky	50,29	56,15	44,28	0,69	-3,34	15,47	8,03
Poitiers	49,4	46,6	0,3	-4,43	-12,63	-7,59	-10,74
Ekaterinburg	48,42	56,4	58,6	15,75	5,57	14,87	9,21
Kiev	47,5	50,72	30,3	8,89	0,41	4,35	0,64
Tomsk	45,92	56,5	84,9	23,45	12,17	23,17	14,19
Bekescsaba	45,2	46,7	21,2	-11,94	-13,54	-9,8	-9,84
Novosibirsk	44,61	54,6	83,2	7,96	-0,06	7,59	1,17
Irkutsk	41,06	52,5	104	11,13	2,96	15,92	8,41
Khabarovsk	37,91	48,5	135,1	10,27	4,50	13,48	7,69
Novokazilinsk	37,6	45,77	62,12	1,44	-5,12	-0,97	-7,44
Alma Ata	33,42	43,2	76,9	12,51	5,64	18,77	16,31
Tashkent	32,3	41,33	69,62	4,99	2,29	3,97	5,17
Ashkabad	30,39	37,9	58,3	33,41	10,16	35,22	23,7

(Modelo 1 – sin tener en cuenta la actividad geomagnética; Modelo 2 – teniéndola en cuenta), se resume en la tabla 4. La mayoría de las tendencias son positivas, incluso cuando el índice Ap es incluido en la regresión (Modelo 2) y la magnitud de las tendencias tiende a disminuir. La única excepción puede ser vista para el caso de las 0 SLT (Modelo 2), en el que el número de tendencias positivas y negativas es semejante.

Por lo tanto, las estaciones analizadas muestran en su mayoría tendencias negativas en $foF2$ y positivas en $hmF2$, independientemente de la regresión usada como modelo (1 ó 2, sin y teniendo en cuenta Ap respectivamente) para el

Tabla IV. Número de estaciones con tendencias de $hmF2$ significativas (positivas y negativas) con un nivel de confianza del 95%.

Número de estaciones analizadas	0 SLT Mod. 1	0 SLT Mod. 2	6 SLT Mod. 1	6 SLT Mod. 2	12 SLT Mod. 1	12 SLT Mod. 2	18 SLT Mod. 1	18 SLT Mod. 2
27	19 sig. 16 posit. 3 negat.	13 sig. 6 posit. 7 negat.	20 sig. 19 posit. 1 negat.	17 sig. 12 posit. 5 negat.	19 sig. 14 posit. 5 negat.	18 sig. 13 posit. 5 negat.	20 sig. 17 posit. 3 negat.	18 sig. 14 posit. 4 negat.

cálculo de las desviaciones relativas del parámetro ionosférico en cuestión ($foF2$ ó $hmF2$).

Basándonos en los resultados de las tablas 2 y 3, es posible analizar las variaciones espaciales (longitudinales y latitudinales) de las tendencias de $foF2$ y $hmF2$. Se ha encontrado una clara dependencia de las tendencias de $foF2$ con la latitud geomagnética tanto para horas nocturnas como diurnas. Las tendencias son más negativas en estaciones cuya latitud geomagnética es mayor, tendiendo la magnitud de estas tendencias negativas a decrecer, llegando a ser incluso positiva, a medida que la latitud geomagnética disminuye. Sin embargo, tal dependencia no es observada para las tendencias de $hmF2$: éstas son en su mayoría positivas, de magnitud parecida, independientemente de la latitud. La figura 1 muestra un ejemplo de esta dependencia latitudinal para ambos parámetros, $foF2$ y $hmF2$, para las 12 SLT, cuando se aplican los modelos 1 y 2. Únicamente están representadas las estaciones con tendencias significativas al 90%, para el caso de $foF2$, y 95% para $hmF2$. Es importante observar cómo la inclusión del índice Ap_{12} en la regresión (Modelo 2) no elimina la mencionada dependencia geomagnética en las tendencias de $foF2$.

Por otra parte, un efecto longitudinal se ha detectado en las tendencias de $hmF2$. En la figura 2 se representan, en función de la longitud, las tendencias de $hmF2$ para las 0 y 12 SLT, correspondientes a estaciones con observaciones disponibles para todo el periodo temporal 1965-1991. El modelo 2 fue usado para obtener las desviaciones relativas de $hmF2$. Puede ser apreciado como las tendencias significativas negativas están agrupadas en un pequeño sector longitudinal (Oeste de Europa, 6°W-30°E), y las positivas tienden generalmente a corresponder a estaciones situadas al Este de 30°. Un efecto longitudinal parecido ha sido también encontrado por Bremer (1998). Por el contrario, ninguna dependencia con la longitud ha podido ser detectada para las tendencias de $foF2$.

4. Discusión

El mecanismo físico de las tendencias a largo-plazo en la ionosfera permanece aún por aclarar. Aunque el incremento de los gases atmosféricos de efec-

to invermadero ha sido propuesto por diferentes autores como responsable de tales tendencias, los resultados presentados en este trabajo contradicen esta hipótesis. Un enfriamiento global de la atmósfera superior debido a este efecto implicaría tendencias negativas en $hmF2$ y positivas en $foF2$ (Mikhailov y Marín, 2000), lo cual contradice las observaciones obtenidas.

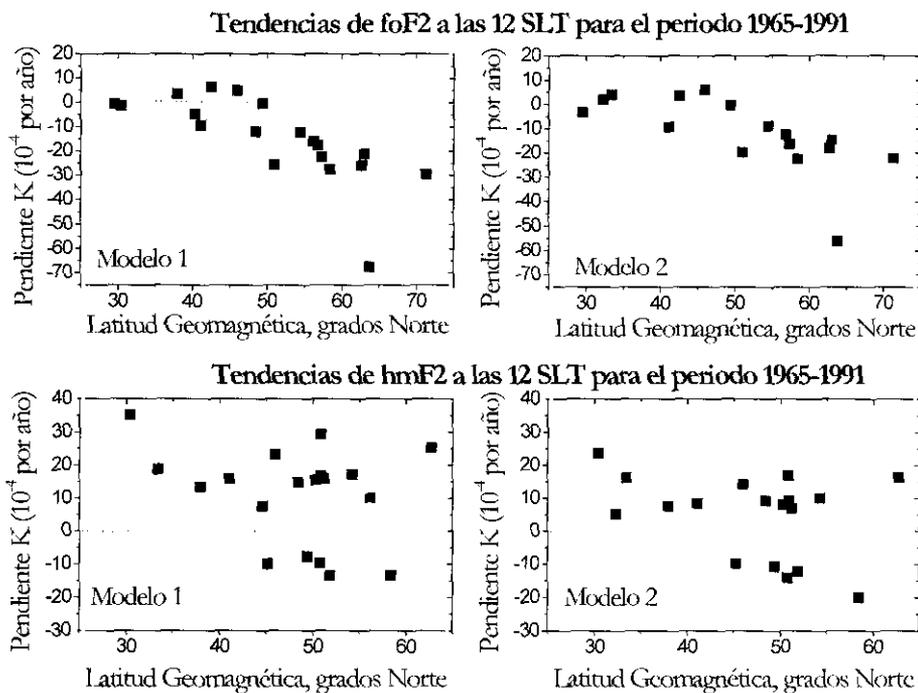


Figura 1. Dependencia de las tendencias de $foF2$ y $hmF2$ con la latitud geomagnética a las 12 SLT. Los modelos 1 (regresión de $foF2$ ó $hmF2$ con R_{12}) y 2 (regresión de $foF2$ ó $hmF2$ con R_{12} y A_{p12}) se han usado en la obtención de los resultados. Únicamente se muestran las estaciones con tendencias significativas para un nivel de confianza del 90% (para $foF2$) y 95% (para $hmF2$).

En este artículo se propone una explicación diferente, no de origen antropogénico, conectada con los cambios a largo-plazo de la actividad geomagnética. Las tendencias detectadas en $foF2$ y $hmF2$ pueden ser explicadas teniendo en cuenta el aumento en la actividad geomagnética observado durante el intervalo temporal analizado 1965-1991 y el consiguiente incremento producido en la actividad de tormentas ionosféricas en la región F2. Para analizar conjuntamente los resultados obtenidos en $foF2$ y $hmF2$, consideraremos las expresiones aproximadas dadas por Ivanov-Kholodny y Mikhailov (1986), las cuales, ex-

presan los cambios relativos de los parámetros representativos de la región F2 ionosférica a latitudes medias y horas diurnas, $NmF2$ (densidad electrónica máxima en la capa F2) y $hmF2$, de la forma:

$$\Delta \log NmF2 = 1.08 \Delta \lg [O] - 0.65 \Delta \lg \beta + 9 \times 10^{-3} \Delta W \quad (6)$$

$$\Delta hmF2 = 50 \Delta \lg [O] + 50 \Delta \lg \beta + 1.55 \Delta W \quad (7)$$

donde $[O]$ es la concentración de oxígeno atómico correspondiente a alguna altura fija dentro de la capa F2, β es el coeficiente lineal de pérdida y W es la velocidad de deriva vertical del plasma conectada con los vientos termosféricos y campos eléctricos. El coeficiente de pérdida β depende de la densidad de los gases moleculares N_2 y O_2 : $\beta = k_1 [N_2] + k_2 [O_2]$, donde k_1 y k_2 son las constantes de las dos reacciones que controlan la velocidad de pérdida de iones O^+ en la región F2:

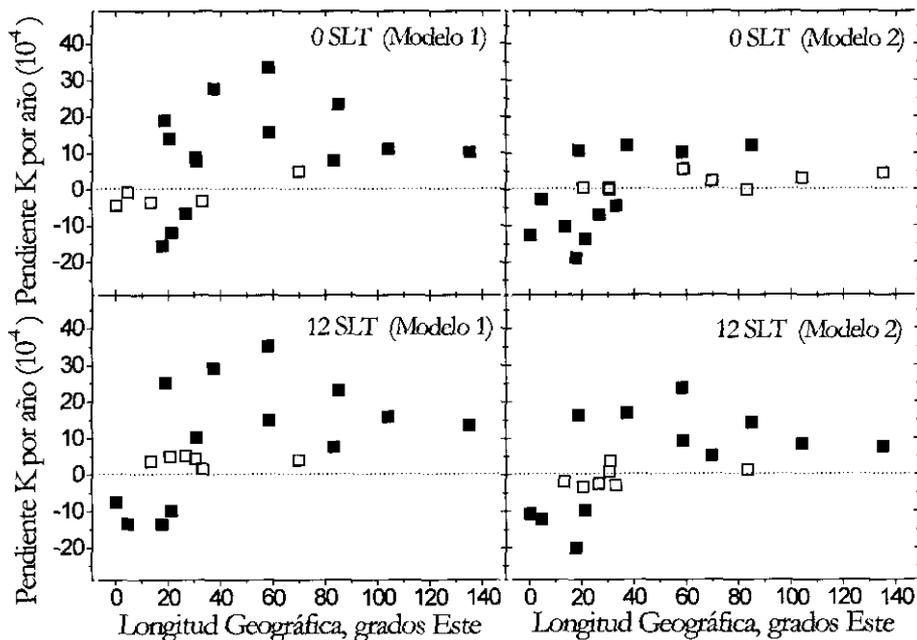


Figura 2. Dependencia longitudinal de las tendencias de $hmF2$ a las 0 y 12 SLT. Una regresión de $hmF2$ con R_{12} y A_{p12} (Modelo 2) es aplicada en el análisis. Únicamente se muestran las estaciones con observaciones disponibles para todo el periodo de tiempo 1965-1991. Los símbolos rellenos señalan las tendencias significativas al 95%.

Los principales procesos responsables de los efectos que las perturbaciones geomagnéticas originan en la región F2 son conocidos: mientras que los cambios en la composición neutra, temperatura y vientos termosféricos dominan a latitudes medias y bajas, la precipitación de partículas y campos eléctricos afectan fuertemente al comportamiento de la capa F2 de alta latitud (Prölss, 1995, y referencias en su interior). Durante periodos geomagnéticos perturbados, la entrada de energía por regiones de alta latitud (calentamiento Joule y precipitación de partículas) causa cambios en la circulación global termosférica. Estos cambios producen una perturbación en la composición y temperatura neutra, concretamente, un descenso en la concentración de O y un incremento en las de N_2 , O_2 y en la temperatura neutra. Tales perturbaciones son las principales responsables de las tormentas ionosféricas negativas en la región F2 de latitudes medias, provocando un aumento en el coeficiente lineal de pérdida β (debido al aumento en las concentraciones de N_2 y O_2 y temperatura) y, como se ha comentado, un descenso en la concentración de oxígeno atómico. Por lo tanto, teniendo en cuenta las expresiones (1) y (2), las tormentas ionosféricas negativas implican un descenso en $NmF2$ (y por lo tanto en $foF2$), y aumento en $hmF2$, debido a que el incremento de β usualmente prevalece sobre la disminución de [O] (Mikhailov y Förster, 1997, 1999). De esta forma, deben esperarse tendencias negativas en $foF2$ y positivas en $hmF2$ a medias latitudes, como resultado de un incremento en la actividad geomagnética. A latitudes inferiores las variaciones en la composición neutra son menores, pero se pueden observar efectos de tormentas positivas en la región F2, como consecuencia de la intensificación que se produce en el viento termosférico hacia el ecuador (Prölss, 1995 y referencias en su interior). Esto resulta en una pequeña tendencia de $foF2$ negativa, e incluso positiva, a bajas latitudes y explica la dependencia observada con la latitud geomagnética (la magnitud de las tendencias negativas de $foF2$ tiende a disminuir al hacerlo la latitud). Respecto a $hmF2$, el aumento del viento termosférico hacia el ecuador a bajas latitudes implica una tendencia positiva en este parámetro. Al resultar entonces las tendencias de $hmF2$ positivas, tanto a medias como a bajas latitudes, ninguna dependencia de éstas con la latitud debe ser esperada, lo cual también está de acuerdo con los resultados obtenidos. Por lo tanto, las tendencias mostradas, negativas en $foF2$, con una pronunciada dependencia con la latitud geomagnética, y positivas en $hmF2$, pueden ser explicadas teniendo en cuenta el incremento producido en la actividad geomagnética durante el periodo de tiempo analizado 1965-1991 y la correspondiente intensificación de las tormentas ionosféricas en la región F2.

Sin embargo, debe ser comentado que algunas estaciones localizadas en un pequeño sector longitudinal (oeste de Europa) presentan tendencias en $hmF2$ negativas, las cuales, no pueden ser explicadas por la hipótesis geomagnética que se propone. En la búsqueda de tendencias lineales de $hmF2$ debe ser tenido en cuenta que los valores de $hmF2$ no son calculados directamente de los ionogramas, sino que se obtienen a partir de determinadas fórmulas empíricas que vinculan $hmF2$ con $M(3000)F2$. Este hecho dificulta la detección de las ten-

dencias de *hmF2* puesto que inserta un ruido adicional en el análisis. Las observaciones iniciales de *hmF2* dependen de la calidad inicial de los valores de $M(3000)F2$ y de la aproximación empírica usada para su obtención, por lo que, los resultados de sus tendencias no son tan fiables como los obtenidos para *foF2*. Las estaciones de Uppsala y Lycksele sirven como ejemplo. Se puede observar cómo dichas estaciones presentan una situación geográfica muy cercana y, sin embargo, muestran tendencias de *hmF2* significativas de distinto signo (ver tabla 3).

Para comprobar que las tendencias a largo-plazo en la región F2 ionosférica están conectadas con los cambios naturales que se producen en la actividad geomagnética, hemos analizado las variaciones de las desviaciones relativas de *foF2* para la estación de Slough, donde existen observaciones disponibles de *foF2* desde 1932. En la Figura 3 se muestran las variaciones a largo-plazo de A_{p12} y $\delta foF2$ a las 12 SLT y para todo el intervalo temporal disponible. Únicamente se consideran los años de máxima y mínima actividad solar (tabla 1). Un ajuste polinómico de cuarto orden ofrece una imagen cualitativa de la antifase de las variaciones a largo-plazo de A_{p12} y $\delta foF2$. Mientras que los periodos para los que existe un incremento en la actividad geomagnética (antes de 1945 y después de 1965) se corresponden con una tendencia de *foF2* negativa, para el periodo en el que se observa un descenso en la actividad geomagnética (1945-1965) existe una pequeña tendencia positiva en *foF2*. Además, la tendencia de *foF2* tiende a cambiar, de negativa a positiva, después de 1990 en concordancia con el cambio de la actividad geomagnética. Se aprecia también cómo las variaciones en los extremos de A_{p12} tienen lugar con anterioridad o coinciden con las de *foF2*, confirmando la relación entre ambos parámetros. Por lo tanto se puede concluir cualitativamente que las tendencias de *foF2* en la estación de Slough reflejan las variaciones a largo-plazo en la actividad geomagnética (el incremento de ésta resulta en una tendencia de *foF2* negativa y viceversa).

Para corroborar esta conclusión, se analizaron las variaciones horarias de las tendencias de *foF2* para las estaciones de Slough, Moscú y Tomsk (Figura 4). Estas estaciones están lo suficientemente separadas en longitud como para demostrar el carácter global del efecto que está siendo analizado. Las tendencias fueron calculadas considerando los años de máxima y mínima actividad solar pertenecientes a 2 periodos de tiempo, uno anterior y otro posterior a 1965, año en el que la actividad geomagnética tiende a cambiar de tendencia. Para caracterizar ambos periodos se seleccionaron dos intervalos de tiempo similares: 1947-1965 (18 años) y 1975-1991 (16 años). Se puede observar cómo las tendencias son en su mayoría positivas para el periodo anterior a 1965, correspondiente a una disminución en la actividad geomagnética, y negativas para el posterior a 1965, para el que se aprecia una intensificación geomagnética. Este resultado constituye una sólida confirmación del control geomagnético que está siendo propuesto.

Al no existir observaciones disponibles suficientes de $M(3000)F2$, no se puede realizar un análisis similar al anterior para comprobar si las tendencias de

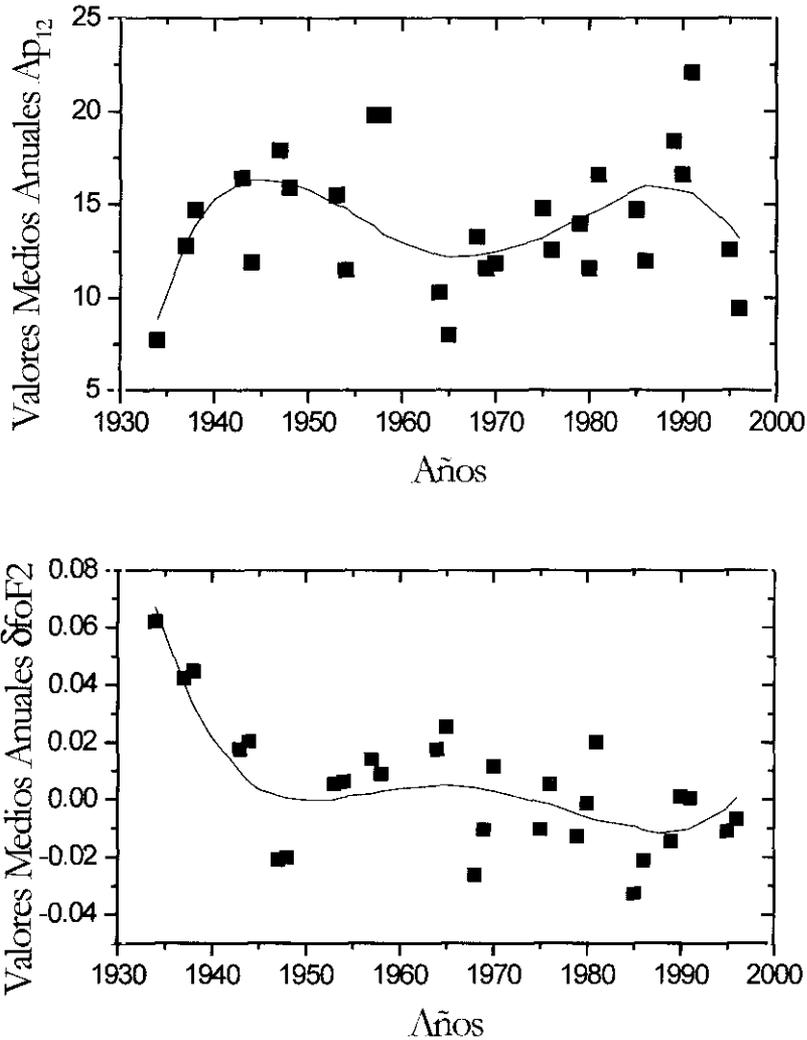


Figura 3. Variaciones a largo-plazo de los valores medios anuales de Ap_{12} y $\delta foF2$ para la estación de Slough. La línea continua muestra un ajuste polinómico de cuarto grado. Únicamente se han considerado los años correspondientes a los máximos y mínimos de cada ciclo de actividad solar.

$hmF2$ también presentan un carácter distinto para periodos temporales anteriores y posteriores a 1965. En su lugar, se han calculado los coeficientes de correlación entre los valores anuales de $\delta hmF2$ y Ap_{12} a las 0 y 12 SLT, usando todos los años disponibles de observaciones para cada estación particular. Los resultados se muestran en la tabla 5. La mayoría de las estaciones analizadas

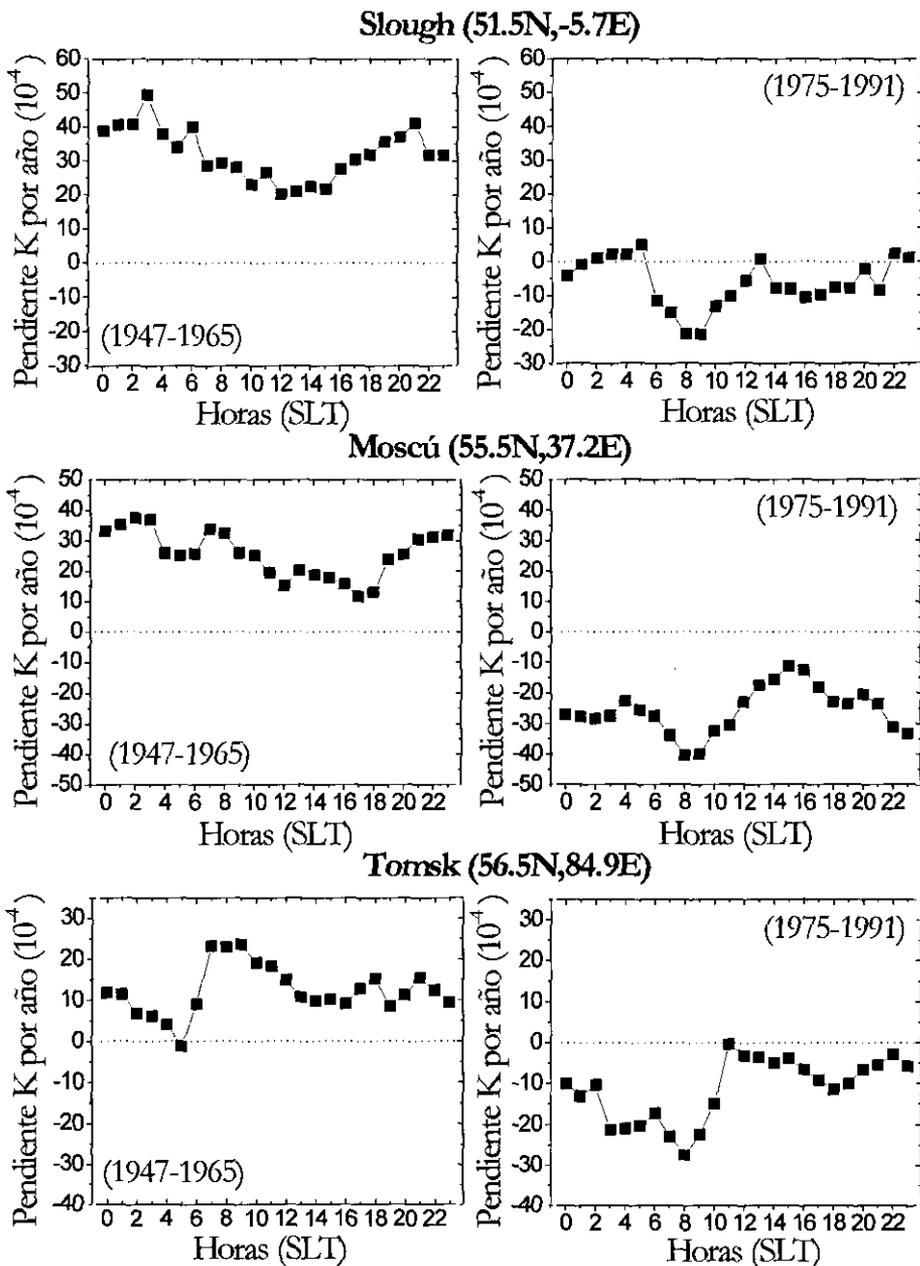


Figura 4. Variaciones horarias de las tendencias de foF2 correspondientes a las estaciones de Slough, Moscú y Tomsk, obtenidas para los períodos de descenso (1947-1965) y aumento (1975-1991) en la actividad geomagnética.

(19 de 27, para ambas horas analizadas) presentan correlaciones positivas y significativas con un nivel de confianza del 95% cuando el Modelo 1 es aplicado. Aunque tales correlaciones desaparecen cuando el índice geomagnético Ap_{12} es incluido en la regresión (Modelo 2), las correlaciones positivas encontradas entre $\delta hmF2$ y Ap_{12} pueden ser consideradas como una clara indicación de la relación existente entre las tendencias de $hmF2$ y la actividad geomagnética.

Tabla 5. Coeficientes de correlación entre los valores anuales $\delta hmF2$ y Ap_{12} para todo el periodo temporal con observaciones disponibles en cada estación particular. Regresiones de $hmF2$ con R_{12} (Modelo 1) y con $R_{12} + Ap$ (Modelo 2) se usan en el cálculo. Los valores que aparecen en negrita muestran las tendencias significativas con un nivel de confianza del 95%.

Estación	0 SLT Modelo 1	0 SLT Modelo 2	12 SLT Modelo 1	12 SLT Modelo 2	Periodo temporal Analizado
Murmansk	0.157	-0.008	0.449	0.054	1958-93
Sodankyla	0.011	-0.006	0.525	-0.003	1958-97
Lycksele	0.509	0.040	0.476	0.038	1958-97
Arkhangelsk	0.490	-0.021	0.819	-0.017	1970-89
Uppsala	0.164	-0.004	0.236	-0.008	1958-97
St. Petersburg	0.608	0.053	0.389	0.029	1958-95
Juliusruh	0.576	-0.040	0.579	0.020	1958-91
Slough	0.623	0.031	0.567	-0.001	1968-97
Kaliningrad	0.683	0.039	0.496	0.036	1965-93
Dourbes	0.274	-0.075	-0.096	-0.037	1958-96
Yakutsk	0.597	0.038	0.670	0.074	1958-90
Tunguska	0.687	0.053	0.569	0.073	1969-96
Moskow	0.512	0.030	0.383	0.024	1958-95
Magadan	0.627	0.023	0.386	0.020	1969-93
Gorky	0.312	-0.082	0.509	-0.023	1959-88
Poitiers	0.439	-0.018	0.162	-0.030	1958-95
Ekaterinburg	0.467	0.012	0.311	0.005	1958-94
Kiev	0.672	0.012	0.307	0.021	1965-91
Tomsk	0.635	0.055	0.580	0.048	1958-96
Bekescsaba	0.100	-0.015	0.008	-0.003	1965-92
Novosibirsk	0.648	-0.023	0.585	0.045	1959-92
Irrutsk	0.548	0.019	0.517	0.044	1959-91
Khabarovsk	0.404	0.025	0.338	0.011	1960-92
Novokazilinsk	0.366	0.013	0.448	0.002	1965-88
Alma Ata	0.547	0.041	0.202	0.029	1958-88
Tashkent	0.230	-0.011	-0.143	-0.035	1962-92
Ashkhabad	0.498	0.045	0.328	0.046	1958-97

5. CONCLUSIONES

Aplicando la metodología propuesta por Danilov y Mikhailov (1998) y Mikhailov y Marín (2000), se han analizado las tendencias a largo-plazo en los parámetros característicos de la región F2 de la Ionosfera, $foF2$ y $hmF2$. Estaciones situadas en el Hemisferio Norte y el intervalo temporal de incremento de la actividad geomagnética 1965-1991, se han utilizado en el análisis. La mayoría de las tendencias de $foF2$ resultaron ser negativas con una pronunciada dependencia en la latitud geomagnética, la magnitud de la tendencia tendiendo a disminuir hacia latitudes inferiores. Por el contrario, la mayoría de las estaciones presentaron tendencias positivas de $hmF2$.

Las tendencias detectadas pueden ser explicadas por el aumento observado en la actividad geomagnética durante el periodo de tiempo analizado 1965-1991. Este aumento implicaría una intensificación en la actividad de tormentas ionosféricas en la región F2, lo que justificaría las correspondientes tendencias observadas. Sin embargo, los resultados obtenidos contradicen la hipótesis de efecto invernadero propuesta por distintos autores para explicar las tendencias observadas en la ionosfera.

Además, se han mostrado claras evidencias que muestran la conexión de las tendencias a largo-plazo, tanto en $foF2$ como en $hmF2$, con los cambios naturales de la actividad geomagnética, lo que confirma la existencia de un control geomagnético sobre las tendencias globales en la región F2 ionosférica.

6. REFERENCIAS

- BREMER, J. (1992): «Ionospheric trends in mid-latitudes as a possible indicator of the atmospheric greenhouse effect», *J. Atmos. Terr. Phys.*, 54, 1505-1511.
- BREMER, J. (1998): «Trends in the ionospheric E and F regions over Europe», *Ann. Geophys.*, 16, 986-996.
- DANILOV, A. D. (1997): «Long-term changes of the mesosphere and lower thermosphere temperature and composition», *Adv. Space Res.*, 20 (11), 2137-2147.
- DANILOV, A. D. (1998): Review of long-term trends in the upper mesosphere, thermosphere and ionosphere, *Adv. Space Res.*, 22, (6), 907-915.
- DANILOV, A. D. and MIKHAILOV, A. V. (1998): «Long-term trends of the F2-layer critical frequencies: a new approach», *Proceedings of the 2nd COST 251 Workshop «Algorithms and models for COST 251 Final Product», 30-31 March, 1998, Side, Turkey, Rutherford Appleton Lab., UK*, 114-121.
- DANILOV, A. D. and MIKHAILOV, A. V. (1999): «Spatial and seasonal variations of the $foF2$ long-term trends», *Ann. Geophys.*, 17, 1239-1243.
- GIVISHVILI, G. V. and Leshchenko, L. N. (1994): «Possible proofs of presence of technogenic impact on the midlatitude ionosphere», *Doklady RAN*, 334, (2), 213-214 (en Ruso).
- IVANOV-KHOLODNY, G. S. and MIKHAILOV, A. V. (1986): *The prediction of ionospheric conditions*, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland.

- JARVIS, M. J.; JENKINS, B. and RODGERS, G. A. (1998): «Southern hemisphere observations of a long-term decrease in F region altitude and thermospheric wind providing possible evidence for global thermospheric cooling», *J. Geophys. Res.*, 103, 20774-20787.
- MARIN, D.; MIKHAILOV, A. V.; MORENA, B. A. de la, and HERRAIZ, M. (2000): «Long-term hmF2 trends in the Euroasian longitudinal sector on the ground-base ionosonde observations» (enviado a *Physics and Chemistry of the Earth*).
- MIKHAILOV, A. V.; MIKHAILOV, B. V., and SKOBLIN, M. G. (1996): «Monthly median foF2 and M(3000)F2 ionospheric model over Europe», *Ann. Geofisica*, 39, 791-805.
- MIKHAILOV, A. V. and M. FÖRSTER, (1990): «Day-to-day thermosphere parameter variation as deduced from Millstone Hill incoherent scatter radar observations during March 16-22, 1990 magnetic storm period», *Ann. Geophys.*, 15, 1429-1438.
- MIKHAILOV, A. V. and FÖRSTER, M. (1999): «Some F2-layer effects during the January 06-11, 1997 CEDAR storm period as observed with the Millstone Hill incoherent scatter facility», *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 61, 249-261.
- MIKHAILOV, A. V. and MARIN, D. (2000): «Geomagnetic control of the foF2 trends», *Ann. Geophys.*, 18, 653-665.
- POLLARD, J. H. (1977): *A handbook of numerical and statistical techniques*, Camb. Univ. Press.
- PRÖLSS, G. W. (1995): «Ionospheric F region storms», in *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, 2, edited by H. Volland, pp. 195-248, CRC Press, Boca Raton, Fla.
- RAO, M. S. V. G., and RAO, R. S. (1969): «The hysteresis variation in F2-layer parameters», *J. Atmos. Terr. Phys.*, 31, 1119-1125.
- RISHBETH, H. (1990): «A greenhouse effect in the ionosphere?», *Planet. Space Sci.*, 38, 945-948.
- RISHBETH, H., and ROBLE, R. G. (1992): «Cooling of the upper atmosphere by enhanced greenhouse gases - modelling of thermospheric and ionospheric effects», *Planet. Space Sci.*, 40, 1011-1026.
- ROBLE, R. G., and DICKINSON, R. E. (1989): «How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere», *Geophys. Res. Lett.*, 16, 1441-1444.
- SHIMAZAKI, T. (1955): «World-wide variations in the height of the maximum electron density of the ionospheric F2 layer», *J. Radio Res. Labs. Japan*, 2(7), 85-97.
- ULICH, T., and E. TURUNEN, (1997): «Evidence for long-term cooling of the upper atmosphere in ionospheric data», *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1103-1106.
- UPADHYAY, H. O., and MAHAJAN, K. K. (1998): «Atmospheric greenhouse effect and ionospheric trends», *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3375-3378.