

Caracterización estadística de la variabilidad de la capa F_2 sobre Cuba (1974-1975)

L. LOIS, N. JAKOWSKI, y R. HOURRUITINER

RESUMEN

Se investigó la variabilidad de la capa F_2 sobre Cuba durante el período de baja actividad solar 1974-1975. El análisis de las curvas de control mostró que en este caso la mediana mensual es adecuada para el cálculo de la variación ionosférica. En base de ella, se caracterizaron las distribuciones de frecuencia de las desviaciones de los parámetros N_F , f_oF_2 , y τ , en dependencia de la hora del día, la estación del año, y nivel de actividad magnética. Se examinaron las similitudes y diferencias que para las condiciones de Cuba presentan las zonas alta y baja de la capa F_2 , en su comportamiento diario y estacional. Se determinaron criterios integrales para el grado de perturbabilidad de la capa F_2 .

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la variabilidad de la capa F_2 es de gran importancia teórico-práctica, debido a que este medio magneto-iónico afecta considerablemente la propagación de las ondas cortas de radio. La cuantificación de dicha propiedad exige, ante todo, el empleo de curvas de control diarias que representen las variaciones típicas de los parámetros ionosféricos. Posteriormente, el conocimiento de la magnitud de las desviaciones del nivel tranquilo y de las leyes de distribución que las rigen, resulta indispensable para caracterizar el estado de la ionosfera y establecer su pronóstico.

En la literatura se adoptan diferentes criterios en cuanto a la elección del nivel normal. Esto se debe a que su determinación no constituye un problema teóricamente simple de resolver, ya que existen argumentos a favor y en contra de cada uno de ellos (MENDILLO y KLOBUCHAR, 1974). No obstante, la mayoría de los investigadores de latitudes medias utilizan preferentemente la mediana mensual

Manuscrito aprobado el 15 de marzo de 1985.

L. Lois y R. Hourrütiner pertenecen al Instituto de Geofísica y Astronomía, de la Academia de Ciencias de Cuba. N. Jakowski pertenece al Instituto de Investigaciones Cósmicas, de la Academia de Ciencias de la R.D.A.

(MATSUSHITA, 1959; MENDILLO *et al.*, 1972; MENDILLO, 1978). En Cuba se investigó el comportamiento de la frecuencia crítica de la capa F₂ durante perturbaciones ionosféricas (L. Palacio y otros, inédito)¹, y se concluyó que su mediana mensual está contaminada. Dichos autores propusieron caracterizar sus desviaciones a través de la mediana calculada por los 5 días magneto-tranquilos del mes.

El análisis de las distribuciones estadísticas de las desviaciones de la frecuencia crítica de la capa F₂ ha sido realizado por diversos autores (GAIVORONSKAYA *et al.*, 1971; ZEVAKINA *et al.*, 1980). GAIVORONSKAYA *et al.* (1971) examinaron detalladamente las variaciones diarias, estacionales, y con la actividad solar de dichas distribuciones para una serie de estaciones latitudinalmente espaciadas. La probabilidad de ocurrencia de desviaciones fijas, determinada por ellos, resulta de gran interés en el planeamiento de radio-circuitos con una efectividad dada. ZEVAKINA *et al.* (1980) realizaron un estudio semejante para nuestras latitudes, e incorporaron la dependencia con la actividad magnética. Específicamente, investigaron las propiedades estadísticas de la variabilidad de la ionosfera sobre Cuba y establecieron criterios cuantitativos útiles acerca de su estado perturbado.

En este trabajo se investiga integralmente la variabilidad de la capa F₂ sobre Cuba, durante años de baja actividad solar (1974-1975). Para ello, se estudia el comportamiento bajo diferentes condiciones geofísicas de los parámetros contenido electrónico ionosférico o contenido Faraday (N_F), frecuencia crítica ordinaria de la capa F₂ (f_c), y grosor equivalente de la ionosfera (τ), mediante la aplicación consecuente de los métodos y procedimientos del análisis estadístico.

HIBBERD y ROSS (1967) hicieron notar que el análisis de la tríada mencionada (N_F, f_c, τ) garantiza la obtención de un estimado cabal del comportamiento promedio de la región F. En nuestro caso, tal elección nos capacita para caracterizar simultáneamente las variaciones ionosféricas de las zonas alta y baja de la capa F₂, objetivo esencial de este trabajo. Además, la comparación de las magnitudes paramétricas que definen la variabilidad de ambas regiones nos permite ponderar la influencia relativa de las mismas bajo diferentes condiciones geofísicas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los parámetros ionosféricos a los que se circunscribe este estudio se obtienen en Cuba con ayuda de la información combinada de Faraday y sondeo vertical.

¹ "Investigación de las perturbaciones ionosféricas en Cuba y desarrollo de métodos de pronóstico del estado de la ionosfera y de las condiciones de propagación por radio"; informe final del Tema 40208, IGA, ACC, 46 pp., 28 figs., 1981.

El registro continuo de la rotación Faraday sufrida por las ondas métricas (VHF) se realiza en el IGA, ACC (23° 04' N, 82° 28' W), con la estación polarimétrica ZFA -F -IE (BETTAC y WIENER, 1975), desde mediados de 1974 hasta la fecha. En el período julio 1974 - mayo 1975 se recibieron las emisiones, linealmente polarizadas en 140 MHz, del satélite geoestacionario ATS-6, cuyos primeros resultados fueron reportados por FELSKE *et al.* (1975).

El conocimiento de la orientación de la polarización transmitida con respecto a La Tierra y su alta estabilidad, características del experimento de radiofaro montado a bordo del satélite sincrónico ATS-6 (DAVIES *et al.*, 1972, 1975), permitieron determinar los valores absolutos del N_F en Cuba (JAKOWSKI *et al.*, 1981). Esta ventaja le confiere especial importancia a dicho intervalo temporal, que, además, era el más completo en cuanto a porcentaje diario de tiempo registrado, por lo que fue escogido para todo el análisis posterior.

Los detalles en relación con la metodología de cálculo de las observaciones de rotación Faraday utilizadas están dados por LOIS *et al.* (1982). Es de destacar que aunque N_F contiene contribuciones de las diversas regiones ionosféricas, ya que representa la integral de la concentración electrónica hasta la altura de Faraday (2 000 km), permite valorar principalmente el comportamiento de la ionosfera superior. Esto se debe a que la región F aporta más del 90% a la integral, y el 70% o más se encuentra por encima del pico de la capa F_2 (DAVIES *et al.*, 1976); por lo cual N_F es correctamente considerado como una medida del contenido electrónico de la región F y, en particular, de la ionosfera superior.

La información concerniente a f_c fue obtenida con la estación de sondeo vertical del Centro Geofísico (22° 58' N, 82° 09' W). Sus variaciones resultan fundamentales para conocer el aporte que ofrece la región cercana al máximo de la capa F_2 , pues su cuadrado es proporcional a la concentración electrónica pico.

El uso combinado de ambos métodos posibilita definir τ como la integral de la concentración electrónica normalizada con la altura, que constituye una medida de la extensión vertical de la región F. Su importancia radica en que facilita la separación de los efectos que se desarrollan en las zonas alta y baja de la capa F_2 , aunque las conclusiones que se derivan son cualitativas por naturaleza, ya que desde el punto de vista físico no es posible dividir artificialmente la ionosfera en regiones diferentes con fronteras bien delimitadas.

El estudio de las variaciones de los parámetros ionosféricos anteriormente mencionados se realizó mediante la aplicación de los métodos usuales del análisis estadístico.

3. CURVA DE CONTROL

Aunque compartimos el criterio de selección de la curva de control propuesto por L. Palacio y otros (inérito)¹, las limitaciones en el registro de la rotación Faraday dificultan la obtención de medianas representativas de los 5 o 10 días magneto-tranquilos de cada mes. Es más, el período elegido —que como se explicó manifiesta las mejores opciones—, no garantiza la representatividad de la primera mediana. Por ello, en esta sección compararemos los valores horarios de las medianas de los 10 días magneto-tranquilos del mes (mediana

tranquila) y de la mediana mensual de los parámetros N_F , f_c , y τ , con vista a determinar si existen diferencias significativas entre ellas que invaliden el uso de la última.

En primer lugar, se aplicaron los métodos estadísticos de regresión y correlación a ambas curvas de control, considerando la mediana mensual como la variable dependiente en la estimación por mínimos cuadrados. La Tabla 1 presenta los parámetros del análisis realizado: A_0 , A_1 , CA_0 , y CA_1 representan respectivamente los interceptos, pendientes, y sus correspondientes semilongitudes de los intervalos de confianza del 95%; R , R_1 , y R_s , simbolizan respectivamente los coeficientes de correlación y sus límites del 95% de confianza inferior y superior. Para homogeneizar los datos de la tabla, las magnitudes de los interceptos de N_F (τ) se dividieron por $10^{16}(10^2)$. Las unidades de A_0 y CA_0 correspondientes a N_F , f_c , y τ son respectivamente m^{-2} , MHz, y km; los demás parámetros del ajuste son adimensionales. Los intervalos de confianza para los interceptos, pendientes, y coeficientes de correlación fueron calculados mediante las aproximaciones t de Student y z de Fisher. Como puede notarse, los valores obtenidos muestran un buen grado de ajuste y asociación entre las medianas consideradas, aunque, éste resulta menor en el caso de τ .

Además, se realizaron las correspondientes décimas de correlación, ajuste, y marginales que permiten aceptar coeficientes de correlación superiores a 0,9, pendientes unitarias e interceptos nulos con un nivel de significación (α) del 5%.

Estos resultados son interpretados como indicadores de la estrecha semejanza existente entre las medianas estudiadas. No obstante, con vista a profundizar en este aspecto se calcularon las desviaciones porcentuales horarias de las medianas mensuales respecto a las tranquilas. En la Fig. 1 se muestran dichas desviaciones —simbolizadas por DN_F , Df_c , y $D\tau$ — vs. LT para un mes de verano (agosto, 1974) y otro de invierno (febrero, 1975) del período analizado. El comportamiento de N_F está de acuerdo con el observado por B. Lazo y otros (inédito)² durante tormentas magnéticas; además, resulta similar al obtenido para f_c por nosotros y por L. Palacio y otros (inédito)¹, ya que la mediana mensual tiende a ser superior (inferior) a la mediana tranquila en invierno (verano).

Esto nos induce a considerar que la mediana mensual de N_F también está contaminada, y no refleja el nivel normal de ionización. Sin embargo, la magnitud de las desviaciones estándares (representadas por segmentos verticales en la Fig. 1) correspondientes a la

² "Investigación de los parámetros estructurales y de las propiedades ondulatorias del plasma cercano a La Tierra"; informe final del Tema 40210, IGA, ACC, 39 pp., 29 figs., 1981.

TABLA 1. Ajuste y asociación entre las medianas mensual y tranquila. Abreviaturas utilizadas: A_0 (intercepto), CA_0 (semilongitud del intervalo de confianza del 95% de A_0), A_1 (pendiente), CA_1 (semilongitud del intervalo de confianza del 95% de A_1), R (coeficiente de correlación), R_I (límite inferior del 95% de confianza de R), R_S (límite superior del 95% de confianza de R).

Período	Parámetro	A_0	CA_0	A_1	CA_1	R	R_I	R_S
1974								
Agosto	N_F	-0,39	0,41	1,00	0,03	1,00	1,00	1,00
	f_c	0,03	0,38	0,96	0,06	0,99	0,98	1,00
		-0,49	0,55	1,13	0,22	0,93	0,84	0,97
Septiembre	N_F	0,48	0,51	0,92	0,09	0,97	0,94	0,99
	f_c	0,45	0,51	0,93	0,08	0,99	0,96	0,99
		0,31	0,57	0,85	0,24	0,85	0,70	0,94
Octubre	N_F	0,92	1,14	0,93	0,10	0,97	0,94	0,99
	f_c	-0,26	0,71	1,05	0,10	0,98	0,95	0,99
		-0,39	0,90	1,16	0,25	0,90	0,78	0,96
1975								
Enero	N_F	-0,30	0,80	1,02	0,07	0,99	0,97	1,00
	f_c	-0,12	0,44	1,06	0,09	0,98	0,96	0,99
		0,61	0,88	0,84	0,22	0,86	0,70	0,94
Febrero	N_F	0,24	0,60	1,03	0,06	0,99	0,98	1,00
	f_c	0,11	0,42	1,00	0,07	0,99	0,97	0,99
		0,37	0,44	0,83	0,19	0,89	0,75	0,95
Marzo	N_F	0,11	0,86	0,94	0,06	0,99	0,98	1,00
	f_c	0,29	0,54	0,95	0,08	0,99	0,97	1,00
		0,34	0,43	0,86	0,16	0,91	0,76	0,97
Abril	N_F	-0,18	0,42	0,98	0,03	1,00	0,99	1,00
	f_c	-0,05	0,38	0,99	0,07	0,99	0,98	1,00
		0,34	0,51	0,85	0,20	0,88	0,75	0,95

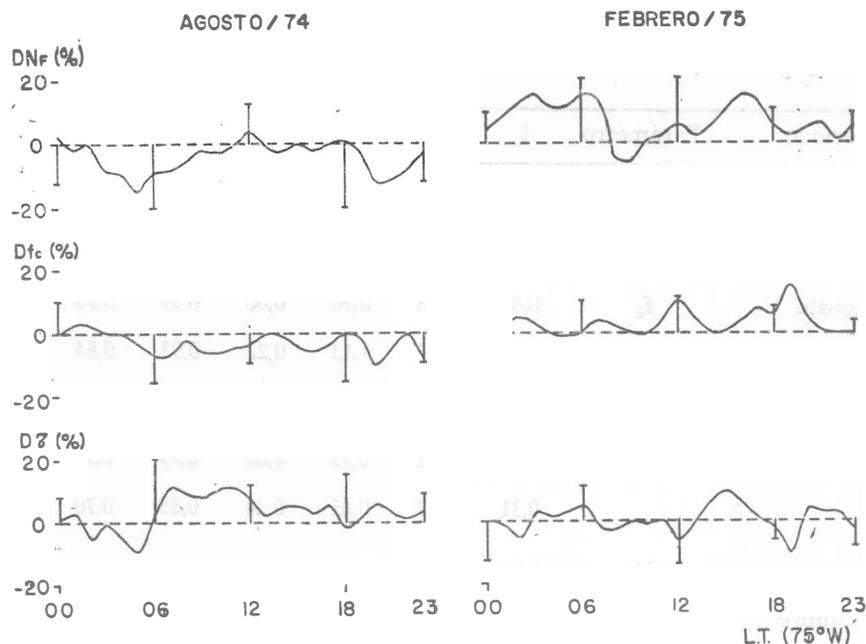


FIG. 1. Desviaciones porcentuales horarias de las medianas mensuales respecto a las tranquilas de los parámetros ionosféricos N_F (DN_F), f_c (Df_c), y τ ($D\tau$). Los segmentos verticales representan el error estándar de la comparación.

mediana tranquila supera las desviaciones porcentuales calculadas. En general, las desviaciones porcentuales promedios resultan inferiores al 10% en todos los casos, y los valores típicos de las desviaciones estándares son del orden del 15% (N_F , τ) y 10% (f_c); por eso estas últimas son capaces de enmascarar el corrimiento entre dichas curvas de control.

En base de todo lo anterior, podemos concluir que, en Cuba, no existen diferencias significativas entre las medianas tranquila y mensual de los parámetros N_F , f_c , y τ , durante el período de baja actividad solar 1974-1975, lo cual nos garantiza que la mediana mensual es una curva de control adecuada bajo tales condiciones.

4. DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS

4.1 Forma de las distribuciones de frecuencia

Una vez determinado que la mediana mensual puede caracterizar el estado tranquilo de la ionosfera, estamos en situación de estudiar

el comportamiento de las distribuciones de frecuencias relativas de las desviaciones de los parámetros ionosféricos N_F , f_c , y τ . Este estudio fue realizado mediante programa por computadora separadamente para el día (07-18 LT) y la noche (19-06 LT), para las diversas estaciones (verano, invierno, equinoccio, y total) y bajo diferentes niveles de actividad magnética: condiciones tranquilas ($A_p \leq 13$), moderadamente perturbadas ($14 \leq A_p \leq 25$), y perturbadas ($A_p \geq 26$), durante el período de baja actividad solar 1974-1975. Además, los cálculos se efectuaron a intervalos horarios, por cuanto los trabajos previos indican que tal resolución es adecuada para caracterizar los efectos ionosféricos en la región F.

Un aspecto de especial importancia es la selección de una medida adecuada para las desviaciones del nivel tranquilo. PRÖLSS y NAJITA (1975) examinaron las condiciones apropiadas para la utilización de los corrimientos absolutos y relativos, e ilustraron las consecuencias de una elección errónea. Dichos autores señalaron que, a consecuencia del carácter complejo de los procesos generadores de las variaciones ionosféricas, no queda aún claro cuál es el cambio predominante, o si ambos son operativos en diferentes momentos. En el presente estudio se eligió la desviación porcentual para describir la perturbación inducida, ya que —aunque exige el conocimiento de los valores absolutos—, permite reducir el efecto de la variación diaria, garantizando la comparación de los resultados. Las mismas se simbolizarán por DN_F , Df_c , y $D\tau$ en las figuras y tablas que más adelante se insertan.

En la Fig. 2 se muestran las representaciones gráficas de las distribuciones diferenciales de todos los casos anteriormente mencionados; o sea, las curvas de frecuencia, que fueron calculadas para intervalos de clase de 5 unidades de % ($\pm 2,5\%$ alrededor de las marcas de clase elegidas).

Mediante la aplicación de la prueba χ^2 de bondad de ajuste, se investigó extensivamente la forma de las distribuciones en cuanto a su carácter normal. Debemos destacar que el propósito de este trabajo no consiste en determinar el tipo de distribución que mejor ajusta los datos experimentales, sino en verificar si los mismos nos obligan a rechazar o no la hipótesis de normalidad. Para ello se fijó un nivel de significación ($\alpha = 0,05$), eligiendo diferentes números y tamaños de los intervalos de clase que tornaron variable la potencia de la prueba.

Este estudio exhaustivo nos permitió establecer que dichas distribuciones, bajo condiciones magneto-tranquilas, corresponden en primera aproximación a la ley de Gauss, acorde con el resultado obtenido por GAIVORONSKAYA *et al.* (1971) sólo para f_c ; no obstante,

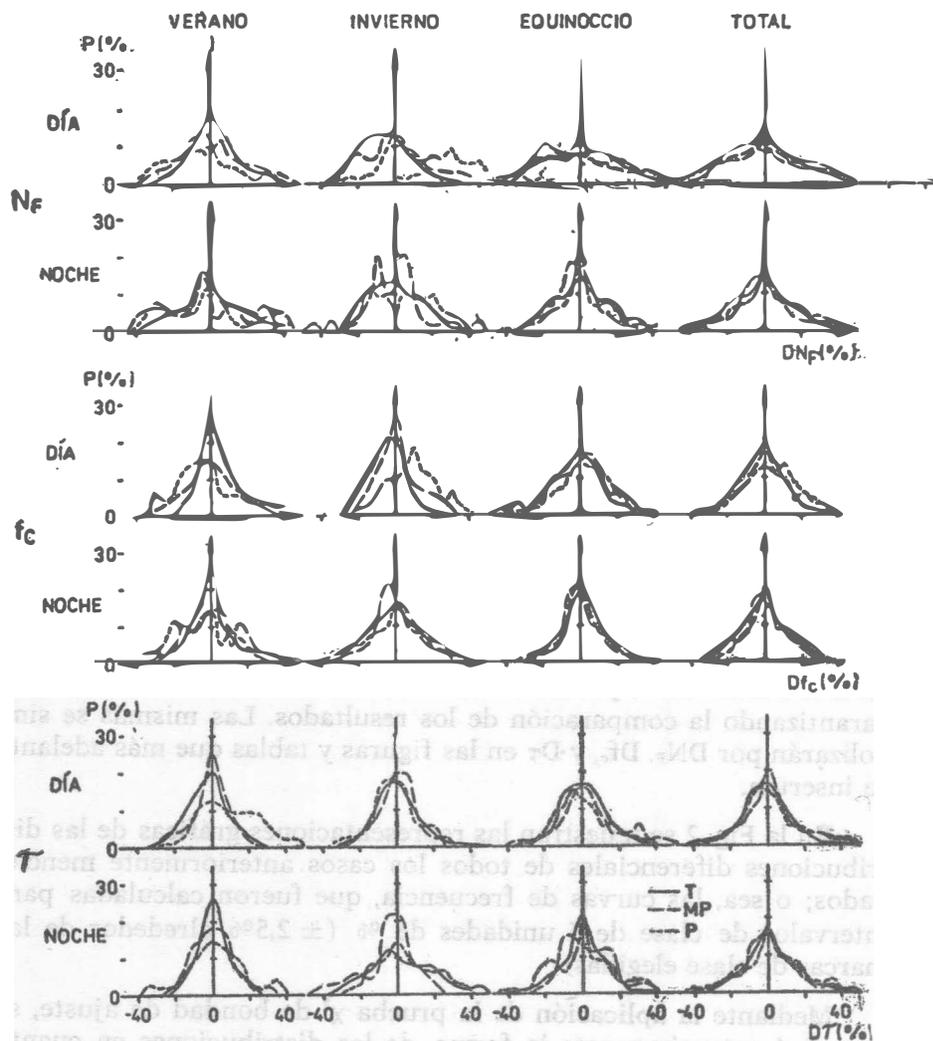


FIG. 2. Distribuciones de frecuencia de las desviaciones porcentuales de los parámetros ionosféricos N_F (DN_F), f_c (Df_c), y τ ($D\tau$) respecto a sus medianas mensuales. El nivel de actividad magnética se señala por las letras T (tranquilo), MP (moderadamente perturbado) y P (perturbado). Los tamaños de las muestras (n) se corresponden con los indicados en la Tabla 2.

aunque el alejamiento respecto a la distribución de Gauss se incrementa mientras la perturbabilidad magnética aumenta, en muchos de estos casos tampoco es posible rechazar la hipótesis de normalidad.

La conclusión anterior es de gran importancia, pues posibilita la utilización de una serie de métodos estadísticos que requieren la acep-

tación del carácter gaussiano. Posteriormente haremos uso de la misma, aplicando el análisis de varianza y la prueba de Bartlett a los momentos de las distribuciones estudiadas, justamente el fin que perseguíamos con este estudio. Además, se desprende que —contrariamente el criterio de GAIWORONSKAYA *et al.* (1971)— la aceptación o rechazo del carácter gaussiano de las fluctuaciones de los parámetros ionosféricos no constituye una medida confiable para precisar el estado tranquilo o perturbado de la capa F₂.

4.2 Momentos de las distribuciones de frecuencia

Con vista a caracterizar las distribuciones de frecuencia estudiadas, se determinaron sus parámetros fundamentales: valor medio, desviación estándar, asimetría, y curtosis. Para ello se calcularon, por las fórmulas habituales (SPIEGEL, 1977), sus momentos simples de primer orden y los centrales de segundo, tercer, y cuarto orden.

En la Tabla 2 se presentan, para diferentes tamaños de muestra (n), los valores medios (m) y las desviaciones estándares (s) de las distribuciones estadísticas mostradas en la Fig. 1; dichas magnitudes nos informan respectivamente sobre el tipo de perturbación (positiva o negativa) y la dispersión que corresponde a cada caso analizado. En primer lugar, se investigó, mediante dójimas de Bartlett (OSTLE, 1981), la homogeneidad de las varianzas (s^2), considerándose $\alpha = 0,05$. Se obtuvo que la s de los parámetros N_F y τ , bajo condiciones magneto-tranquilas, depende de la estación del año, en contraposición con los resultados de f_c . Con el incremento de la actividad magnética, sin embargo, el comportamiento resulta uniforme en los tres parámetros, aumentando s durante todas las estaciones tanto por el día como por la noche. De forma global, f_c y τ muestran s nocturnas superiores a las diurnas para todos los niveles de actividad magnética; mientras que N_F no presenta diferencias significativas entre ellas, aunque su cuadro estacional es complejo. ZEVAKINA *et al.* (1980) obtuvieron resultados similares en cuanto a f_c se refiere.

El cuadro de variación que presenta m a medida que aumenta la actividad magnética, resulta muy interesante. Durante el día, se observa su decrecimiento (crecimiento) sucesivo en N_F y f_c de valores positivos (negativos) a negativos (positivos) en verano (invierno); en τ , advertimos la conducta inversa. Por la noche, la situación es idéntica en verano e invierno: N_F y τ muestran un decrecimiento inicial en m seguido por un significativo incremento posterior, y f_c sólo tendencia de aumento.

La variación diurna anterior nos lleva a confirmar para la alta ionosfera el resultado conocido para f_c en Cuba (L. Palacio y otros, inédito)¹, de que en verano (invierno) es de esperar el desarrollo más frecuente de perturbaciones negativas (positivas). Por la noche, la

TABLA 2. Medidas de tendencia central y dispersión de las distribuciones de frecuencia. Abreviaturas utilizadas: m (valor medio), s (desviación estándar), n (tamaño de la muestra), A_p (índice geomagnético planetario diario).

Parámetro	Condiciones geomagnéticas	Período	Día			Noche		
			m	s	n	m	s	n
$DN_F(\%)$	$A_p \leq 13$	Verano	2,7	14,9	150	3,8	24,1	123
		Equinoccio	1,0	16,2	350	2,7	22,2	194
		Invierno	5,7	13,4	249	-0,9	16,2	239
		Total	- 1,1	18,8	749	1,2	19,0	556
	$14 \leq A_p \leq 25$	Verano	2,4	23,3	163	0,3	25,7	116
		Equinoccio	3,1	28,9	262	7,1	27,2	130
		Invierno	7,5	21,9	109	-2,8	27,4	92
		Total	2,0	25,3	484	2,1	24,7	338
	$A_p \geq 26$	Verano	- 0,5	27,4	96	4,3	36,7	77
		Equinoccio	3,0	32,3	331	7,0	27,5	190
		Invierno	18,3	24,4	133	5,6	22,0	81
		Total	5,6	30,5	560	6,0	28,6	348
$Df_c(\%)$	$A_p \leq 13$	Verano	4,0	10,6	127	1,3	14,5	102
		Equinoccio	- 1,2	12,3	278	1,5	14,1	163
		Invierno	3,0	11,6	189	-0,1	15,6	153
		Total	1,6	12,2	594	0,5	14,8	418
	$14 \leq A_p \leq 25$	Verano	1,3	15,2	98	2,4	14,6	72
		Equinoccio	1,0	15,0	169	3,5	19,1	102
		Invierno	0,7	12,2	90	1,0	12,9	65
		Total	0,3	14,8	357	2,2	16,3	239
	$A_p \geq 26$	Verano	- 2,0	16,9	75	3,8	27,7	59
		Equinoccio	0,3	16,8	282	3,5	18,0	167
		Invierno	9,8	15,8	125	1,3	18,8	62
		Total	2,1	17,2	482	2,9	20,5	288
$D\tau(\%)$	$A_p \leq 13$	Verano	- 3,0	11,5	127	1,5	12,0	102
		Equinoccio	2,3	14,6	278	1,8	19,0	163
		Invierno	1,0	14,1	189	1,8	21,7	153
		Total	0,3	13,8	594	1,9	18,9	418
	$14 \leq A_p \leq 25$	Verano	0,5	13,9	98	0,1	16,0	72
		Equinoccio	2,4	19,3	169	3,5	16,4	102
		Invierno	- 1,0	13,9	90	-4,2	21,4	65
		Total	0,3	16,5	357	0,1	17,3	239
	$A_p \geq 26$	Verano	7,6	19,6	75	1,8	19,2	59
		Equinoccio	5,2	20,3	282	1,4	21,7	167
		Invierno	- 1,5	19,3	125	8,2	25,7	62
		Total	3,6	25,1	482	1,9	22,1	288

Tabla 3. Medidas de simetría y esbeltez de las distribuciones de frecuencia.^a
 Abreviaturas utilizadas: A_s (coeficiente de asimetría), C_u (coeficiente de curtosis), A_p (índice geomagnético planetario diario).

Parámetro	Condiciones geomagnéticas	Período	Día		Noche	
			A_s	C_u	A_s	C_u
DN _F (%)	$A_p \leq 13$	Verano	1,01	2,41	1,12	2,19
		Equinoccio	0,59	-0,02	0,54	0,48
		Invierno	0,65	0,45	0,82	1,22
		Total	0,75	0,88	0,98	2,23
	$14 \leq A_p \leq 25$	Verano	0,59	0,20	0,55	0,04
		Equinoccio	0,66	0,96	1,88	3,26
		Invierno	-0,12	-0,60	-0,81	2,09
		Total	0,57	1,08	1,22	3,05
	$A_p \geq 26$	Verano	1,07	2,64	-0,11	-2,20
		Equinoccio	0,41	1,25	1,31	2,68
		Invierno	0,49	0,18	0,25	0,35
		Total	0,37	1,06	1,21	2,40
Df _c (%)	$A_p \leq 13$	Verano	0,68	0,35	1,11	2,69
		Equinoccio	0,39	0,44	0,87	2,28
		Invierno	0,69	1,48	0,75	1,54
		Total	0,03	1,10	0,88	2,15
	$14 \leq A_p \leq 25$	Verano	0,12	-0,22	0,18	-0,49
		Equinoccio	0,49	0,33	1,44	2,73
		Invierno	0,62	-0,22	0,28	0,18
		Total	0,20	0,66	1,13	2,72
	$A_p \geq 26$	Verano	0,57	-0,11	1,29	1,64
		Equinoccio	-0,34	0,72	0,92	1,87
		Invierno	0,50	1,54	0,72	2,00
		Total	-0,04	0,85	1,15	2,68
Dτ(%)	$A_p \leq 13$	Verano	0,09	0,10	0,41	3,66
		Equinoccio	1,08	2,87	2,16	9,65
		Invierno	1,03	1,92	0,55	0,91
		Total	0,78	1,18	1,18	5,22
	$14 \leq A_p \leq 25$	Verano	0,92	2,55	3,24	8,64
		Equinoccio	0,26	0,31	0,70	0,74
		Invierno	-0,13	0,23	0,11	0,74
		Total	0,37	1,39	0,86	5,27
	$A_p \geq 26$	Verano	-0,93	2,79	0,04	-0,03
		Equinoccio	1,10	2,57	0,65	1,77
		Invierno	1,16	4,00	1,39	3,47
		Total	1,09	3,83	0,90	3,09

^a Los tamaños de las muestras se corresponden con los planteados en la Tabla 2 (véanse valores de n).

propensión es a la ocurrencia de perturbaciones positivas en toda la capa F_2 , inicialmente negativas en su región superior.

Por otra parte, la variación en contrafase (fase) de los valores medios de τ , respecto a los de N_F y f_c , nos permite concluir que el papel fundamental en el comportamiento de la capa F_2 lo desempeña la región cercana a su máximo (ionosfera superior) durante el día (la noche). Debemos mencionar que la disminución inicial que tanto en verano como en invierno se nota en los valores de $m(N_F)$ y $m(\tau)$ en la Tabla 2, resulta significativa, aún cuando no aporta información alguna sobre la región ionosférica que desarrolla el papel principal.

A partir de la aplicación del análisis de varianza (OSTLE, 1981) bajo condiciones magneto-tranquilas, se determinó que no existen diferencias significativas entre las distribuciones de frecuencia relativas al verano y equinoccio para $N_F(\alpha = 0,05)$, ni entre las correspondientes al invierno y el equinoccio para $f_c(\alpha = 0,025)$ y $\tau(\alpha = 0,05)$. Debido a que los mecanismos físicos responsables de las variaciones ionosféricas dependen en forma crítica de las condiciones atmosféricas, se sugiere que éstas manifiestan diferente dependencia estacional en la región del máximo de la capa F_2 y en la alta ionosfera. Además, la semejanza entre el comportamiento de f_c y τ indica que la región del máximo de la capa F_2 ejerce mayor influencia en relación con la escala de altura de dicha capa.

El grado de desviación de la simetría y el de esbeltez constituyen dos importantes características de una distribución en relación con la gaussiana. En la Tabla 3 se muestran los coeficientes de asimetría (A_s) y curtosis (C_u), como medidas cuantitativas de dichas propiedades. Puede observarse, ante todo, que la mayoría de las distribuciones son leptocúrticas (90%) y poseen asimetría positiva (93%), particularmente por la noche. Esto significa que las distribuciones estudiadas poseen, en relación con la normal, picos más altos y colas más largas hacia la derecha. Además, se estableció que dichos coeficientes no manifiestan dependencia alguna con la actividad magnética. Estas conclusiones se corresponden con las derivadas por ZEVAKINA *et al.* (1980) para f_c .

4.3 Distribuciones de frecuencia acumulativas

En base de las distribuciones, cuyas curvas de frecuencia se presentan en la Fig. 2, se determinaron las distribuciones de frecuencia acumulativas. Las mismas se calcularon con un paso de 10 unidades de %, considerando 5 unidades a cada lado de las distribuciones de frecuencia. En la Fig. 3 se muestran las ojivas correspondientes a todos los casos analizados.

ZEVAKINA *et al.* (1980) establecieron el intervalo de $\pm 15\%$ para f_c como frontera entre las desviaciones tranquilas y perturbadas. Este

límite considera un 90% de las observaciones durante 1968, contra sólo un 80% en 1974; a consecuencia de que, durante períodos de baja actividad solar, la capa F_2 sobre Cuba está expuesta más frecuentemente a perturbaciones, como encontraron dichos autores.

El análisis de las ojivas mostradas en la Fig. 3, y de las distribuciones integrales de que dimanen, permite establecer que los límites adecuados para N_F y τ son, respectivamente, de ± 20 -25% y $\pm 15\%$. Los mismos garantizan que aproximadamente el 80% o más de las observaciones estén contenidas en dichos intervalos.

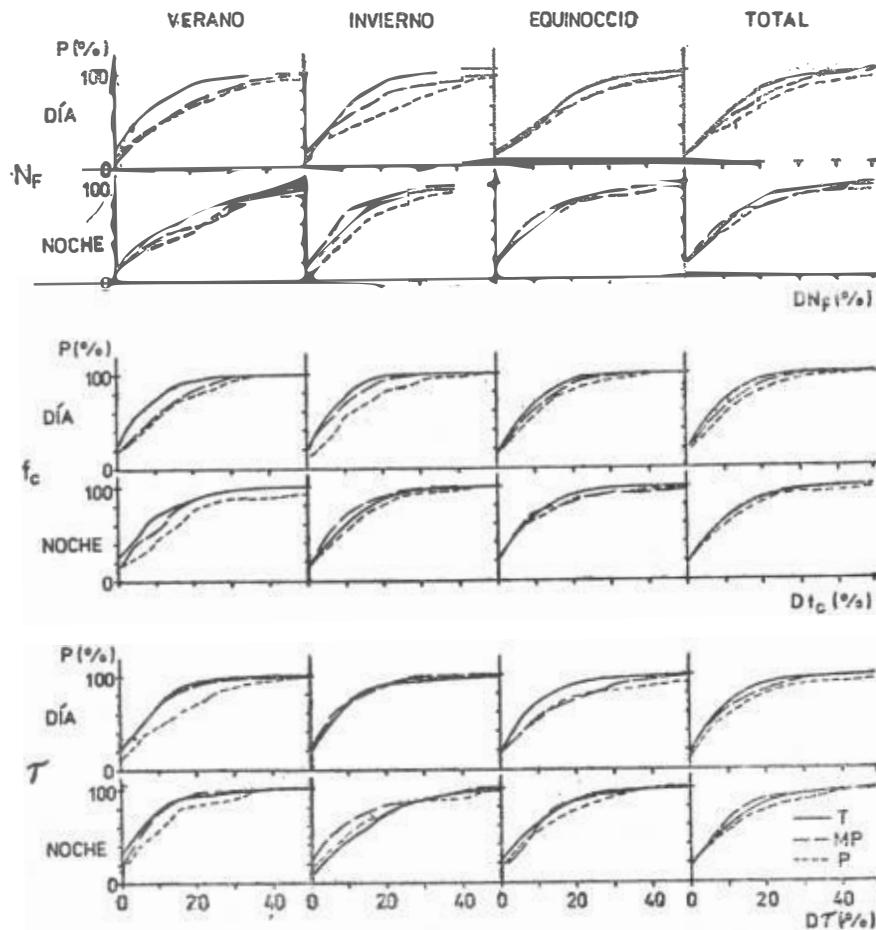


FIG. 3. Distribuciones de frecuencias acumulativas de las desviaciones porcentuales de los parámetros ionosféricos N_F (DN_F), f_c (Df_c), y τ (DT) respecto a sus medianas mensuales. Los símbolos relativos al nivel de actividad magnética (T, MP, P,) y los tamaños de las muestras (n) se explican en la Fig. 2.

TABLA 4. Grado de perturbabilidad de la capa F₂ en Cuba.

Grado de perturbabilidad	DN _F (%)	Df _c (%)	Dτ(%)
0. Tranquilo	≤ 25	≤ 15	≤ 15
± 1 Débilmente perturbado	≤ 30	≤ 20	≤ 20
± 2 Moderadamente perturbado	≤ 40	≤ 30	≤ 30
± 3 Fuertemente perturbado	> 40	> 30	> 30

La determinación del grado de perturbabilidad de la capa F₂ es de gran importancia tanto para el pronóstico ionosférico como para el análisis del comportamiento de la ionosfera durante perturbaciones heliogeofísicas. Para nuestras condiciones, ZEVAKINA *et al.* (1980) propusieron ciertos criterios sobre el mismo, considerando sólo f_oF₂. El estudio estadístico realizado en este trabajo permite completarlos, incorporando los resultados de N_F y τ. En la Tabla 4 se muestran tales criterios sobre el grado de perturbabilidad de la capa F₂ en Cuba.

5. SUMARIO Y RECOMENDACIONES

La utilización combinada de la información derivada por los métodos de rotación Faraday y sondeo vertical, garantiza la obtención de un cuadro realista del comportamiento de la región F. En este sentido, examinamos la variabilidad de la capa F₂ sobre Cuba en dependencia de la hora del día, la estación del año, y nivel de actividad magnética durante el período de baja actividad solar 1974-1975. Los resultados obtenidos pueden resumirse como sigue:

- A. Se concluyó que la mediana mensual es una curva de control adecuada para precisar el estado tranquilo de la capa F₂ en nuestras condiciones.
- B. Se caracterizaron las variaciones de los momentos fundamentales (*m*, *s*, *A_s*, *C_u*) correspondientes a las distribuciones de frecuencia de DN_F, Df_c, y Dτ, bajo diferentes condiciones geofísicas.
- C. Se estableció que dichas distribuciones, bajo condiciones magneto-tranquilas, corresponden en primera aproximación a la ley de Gauss, alejándose de la misma a medida que la perturbabilidad magnética aumenta, aunque en muchos de estos casos no es posible rechazar la hipótesis de normalidad.
- D. Se obtuvieron diferentes dependencias estacionales bajo condiciones tranquilas para la ionosfera superior y la región cercana

al máximo de la capa F_2 , y se determinó la semejanza del equinoccio con el verano en el primer caso, y con el invierno en el segundo.

- E. Se determinó que, para ambas regiones ionosféricas durante el día, es de esperar el desarrollo más frecuente de perturbaciones positivas (negativas) en invierno (verano); por la noche, la tendencia es hacia la ocurrencia de perturbaciones positivas.
- F. Se infirió que el papel fundamental en el comportamiento de la capa F_2 lo desempeña la región cercana a su máximo (ionosfera superior) durante el día (la noche).
- G. Se determinaron los límites entre las desviaciones tranquilas y perturbadas de los parámetros ionosféricos estudiados, y se completaron los criterios de grado de perturbabilidad para la capa F_2 .

Por último, queremos destacar que el estudio realizado debe ser extendido a años de alta actividad solar, con vista a ampliar el alcance de las conclusiones logradas.

REFERENCIAS

- BETTAC, H. D., y WIENER, A. (1975): A two-channel Faraday fading receiving system at 140 MHz. En *Proceedings on the beacon satellite investigations of the ionosphere structure and ATS-6 data*, Moscú, vol. 2, pp. 136-145.
- DAVIES, K., FRITZ, R. B., y GRAY, T. B. (1976): Measurements of the columnar electron contents of the ionosphere and plasmasphere. *J. Geophys. Res.*, 81(16):2825-2834.
- DAVIES, K., FRITZ, R. B., y GRUBB, R. N. (1972): The ATS-F/G radio beacon experiments. *J. Environ. Sci.*, 15:31-35.
- DAVIES, K., FRITZ, R. B., GRUBB, R. N., y JONES, I. E. (1975): The ATS-6 radio beacon: Technique and some early results. En *Proceedings on the beacon satellite investigations of the ionosphere structure and ATS-6 data*, Moscú, vol. 2, pp. 93-135.
- FELSKE, D., BETTAC, H. D., y LAZO, B. (1975): First results of ATS-6 Faraday rotation measurements at 140 MHz. En *Proceedings on the beacon satellite investigations of the ionosphere structure and ATS-6 data*, Moscú, vol. 2, pp. 191-197.
- GAIVORONSKAYA, T. V., CERGUYENKO, N. P., y YUDOVICH, L. A. (1971): Desviaciones de las frecuencias críticas de la región F de los valores medianos [en ruso]. En *Perturbaciones ionosféricas y su influencia en las radiocomunicaciones*, IZMIRAN, Nauka, Moscú, pp. 55-73.
- HIBBERD, F. H., y ROSS, W. J. (1967): Variations in total electron content and other ionospheric parameters associated with magnetic storms. *J. Geophys. Res.*, 72(21):5331-5337.
- JAKOWSKI, N., BETTAC, H. D., LAZO, B., y LOIS, L. (1981): Seasonal variations of the columnar electron content of the ionosphere observed in Havana from July 1974 to April 1975. *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 43(1):7-11.
- LOIS, L., LAZO, B., HOURRUITINER, R., JAKOWSKI, N., BETTAC, H. D., y WIENER, A. (1982): Contenido electrónico ionosférico sobre Cuba; Metodología de cálculo. *Cien. Tierra Espacio*, 4:19-38.

- MATSUSHITA, S. (1959): A study of the morphology of ionospheric storms. *J. Geophys. Res.*, 64 (3):305-321.
- MENDILLO, M. (1978): *Behavior of the ionospheric F-region during geomagnetic storms*. AFGL-TR-78-0092 (II), Boston, Ma., U.S.A., 154 pp.
- MENDILLO, M., y KLOBUCHAR, J. A. (1974): *An atlas of the midlatitude F-region response to geomagnetic storms*. AFCRL Tech. Report No. 0065, HANSCOM AFB, Bedford, Ma., U.S.A.
- MENDILLO, M., PAPAGIANNIS, M. D., y KLOBUCHAR, J. A. (1972): Average behavior of the midlatitude F-region parameters N_T , N_{max} , and τ during geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.*, 77(25):4891-4895.
- OSTLE, B. (1981): *Estadística aplicada*. Editorial Científico-Técnica, La Habana, 632 pp., 16 tablas.
- PRÖLSS, G. W., y NAJITA, K. (1975): Magnetic storm associated changes in the electron content at low latitudes. *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 37:635-643.
- SPIEGEL, M. R. (1977): *Teoría y problemas de estadística*. Pueblo y Educación, La Habana, 4ta edn., 358 pp., 7 tablas.
- ZEVAKINA, R. A., PALACIO, L., y GIL, G. (1980): Propiedades estadísticas de la variabilidad de las regiones F_2 , F_1 , E, y criterios del estado perturbado de la ionosfera en bajas latitudes [en ruso]. En *Variaciones de la ionosfera durante tormentas magnéticas*, Nauka, Moscú, pp. 110-118.

STATISTICAL CHARACTERIZATION OF THE F_2 LAYER
VARIABILITY OVER CUBA (1974-1975)

ABSTRACT

The variability of the F_2 layer over Cuba was investigated for the period of low solar activity 1974-1975. The analysis of the control curves showed that in this case the monthly median was suitable for ionospheric variation calculus. In this way the frequency distribution of the N_p , f_o , and τ deviations were characterized in dependence of local time, season of the year, and magnetic activity. The similarities and differences that appear, for the conditions of Cuba, between high and low F_2 layer diurnal and seasonal behaviour, were examined. Integral criteria for delimitation of ionospheric F_2 layer perturbations were also determined.