

## RECOMENDACIÓN UIT-R P.434-6

**CARACTERÍSTICAS IONOSFÉRICAS DE REFERENCIA DEL UIT-R Y MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE LA MUF BÁSICA, DE LA MUF OPERACIONAL (O MUF DE EXPLOTACIÓN) Y TRAYECTO DEL RAYO\***

(Cuestiones UIT-R 212/3 y UIT-R 223/3)

(1966-1970-1974-1978-1982-1992-1995)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

a) que para el diseño de circuitos radioeléctricos en ondas decamétricas, la planificación de los servicios y la selección de las bandas de frecuencias son necesarios métodos de predicción y datos ionosféricos de referencia a largo plazo,

*recomienda*

- 1 que para predecir las características ionosféricas se haga uso de las fórmulas contenidas en el Anexo 1;
- 2 que para la predicción de la MUF básica y operacional se haga uso de las fórmulas contenidas en el Anexo 2\*\*;
- 3 que para la predicción de los trayectos del rayo se haga uso de las fórmulas contenidas en el Anexo 3.

## ANEXO 1

**Características ionosféricas****1 Introducción**

Se proporcionan las expresiones para calcular el valor mediano mensual de  $f_oF_2$ ,  $M(3000)F_2$ ,  $f_oE$ ,  $f_oF_1$ ,  $h'F$  y  $h'F_2$  y los valores mediano mensual, decilo superior y decilo inferior de  $f_oE_s$  y  $f_bE_s$ . También se incluyen representaciones de los porcentajes de aparición de la capa F difusa. Mediante estas fórmulas se obtienen valores para cualquier localización, mes y hora del día a distintas épocas solares. En el caso de  $f_oE$  y  $f_oF_1$ , se facilitan fórmulas empíricas en términos del ángulo cenital del Sol. Para otras características ionosféricas se aplica una técnica de confección de mapas numéricos basada en las funciones de Fourier ortogonales.

---

\* Los programas de computador asociados con los procedimientos de predicción y los datos descritos en la presente Recomendación están disponibles en la Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT (véase el § 9 del Anexo 1 y el § 8 del Anexo 2); para más detalles consúltese el Catálogo de programas para la gestión del espectro radioeléctrico del UIT/BR.

\*\* Para las definiciones, véase la Recomendación UIT-R P.373.

## 2 Funciones de correspondencia

La forma general de la función numérica  $\Omega(\lambda, \theta, T)$  es la serie de tiempo de Fourier:

$$\Omega(\lambda, \theta, T) = a_0(\lambda, \theta) + \sum_{j=1}^H [a_j(\lambda, \theta) \cos jT + b_j(\lambda, \theta) \operatorname{sen} jT] \quad (1)$$

donde:

$\Omega$ : característica ionosférica a describir

$\lambda$ : latitud geográfica ( $-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$ )

$\theta$ : longitud geográfica Este ( $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ )  
( $\theta$  en grados al Este del meridiano de Greenwich)

$T$ : tiempo universal (UTC) en grados de ángulo ( $-180^\circ \leq T \leq 180^\circ$ )

$H$ : número máximo de armónicos utilizado para representar la variación diurna.

Los coeficientes de Fourier  $a_j(\lambda, \theta)$  y  $b_j(\lambda, \theta)$  varían en función de las coordenadas geográficas y están representados por series de la forma:

$$a_j(\lambda, \theta) = \sum_{k=0}^K U_{2j,k} G_k(\lambda, \theta), \quad j = 0, 1, 2, \dots, H \quad (2a)$$

$$b_j(\lambda, \theta) = \sum_{k=0}^K U_{2j-1,k} G_k(\lambda, \theta), \quad j = 1, 2, \dots, H \quad (2b)$$

La elección de las funciones  $G_k(\lambda, \theta)$  se determina especificando los números enteros  $k$  ( $k_0, k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_m$ ;  $k_m = K$ ), siendo  $i$  el orden en longitud. Por consiguiente, un mapa numérico puede representarse más explícitamente como sigue:

$$\Omega(\lambda, \theta, T) = \sum_{k=0}^K U_{0,k} G_k(\lambda, \theta) + \sum_{j=1}^H \left[ \cos jT \sum_{k=0}^K U_{2j,k} G_k(\lambda, \theta) + \operatorname{sen} jT \sum_{k=0}^K U_{2j-1,k} G_k(\lambda, \theta) \right] \quad (3)$$

En las ecuaciones (2a), (2b) y (3),  $U_{2j,k}$  y  $U_{2j-1,k}$  pueden expresarse en la forma  $U_{s,k}$  donde  $s$  corresponde a  $2j$  o a  $2j-1$ .

En la técnica de establecimiento de mapas numéricos, se ha utilizado la inclinación magnética modificada:

$$X = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left( \frac{I}{\sqrt{\cos \lambda}} \right)$$

donde  $I$  es la inclinación magnética y  $\lambda$  es la latitud geográfica. Como  $X$  es función de la latitud y de la longitud geográficas, no se modifica la expresión de  $\Omega(\lambda, \theta, T)$  de la ecuación (3). El Cuadro 1 muestra las funciones geográficas  $G_k(\lambda, \theta)$ .

CUADRO 1

Funciones geográficas  $G_k(\lambda, \theta)$

( $X$  es función de  $\lambda$  y de  $\theta$ ,  $m$  es el orden máximo en longitud)

$$q_0 = k_0; q_i (i = 1, m) = \frac{k_i - k_{i-1} - 2}{2}$$

| $k$   | Variación principal en latitud | $k$       | Primer orden en longitud                             | $k$       | Segundo orden en longitud                                | ... | $k$           | $m$ orden en longitud                                    |
|-------|--------------------------------|-----------|--|-----------|--|-----|---------------|--|
| 0     | 1                              | $k_0 + 1$ | $\cos \lambda \cos \theta$                           | $k_1 + 1$ | $\cos^2 \lambda \cos 2 \theta$                           | ... | $k_{m-1} + 1$ | $\cos^m \lambda \cos m \theta$                           |
| 1     | $\text{sen } X$                | $k_0 + 2$ | $\cos \lambda \text{sen } \theta$                    | $k_1 + 2$ | $\cos^2 \lambda \text{sen } 2 \theta$                    | ... | $k_{m-1} + 2$ | $\cos^m \lambda \text{sen } m \theta$                    |
| 2     | $\text{sen}^2 X$               | $k_0 + 3$ | $\text{sen } X \cos \lambda \cos \theta$             | $k_1 + 3$ | $\text{sen } X \cos^2 \lambda \cos 2 \theta$             | ... | $k_{m-1} + 3$ | $\text{sen } X \cos^m \lambda \cos m \theta$             |
| .     |                                | $k_0 + 4$ | $\text{sen } X \cos \lambda \text{sen } \theta$      | $k_1 + 4$ | $\text{sen } X \cos^2 \lambda \text{sen } 2 \theta$      | ... | $k_{m-1} + 4$ | $\text{sen } X \cos^m \lambda \text{sen } m \theta$      |
| .     |                                | .         |  | .         |  |     | .             |  |
| .     |                                | .         |  | .         |  |     | .             |  |
| $k_0$ | $\text{sen}^{q_0} X$           | $k_1 - 1$ | $\text{sen}^{q_1} X \cos \lambda \cos \theta$        | $k_2 - 1$ | $\text{sen}^{q_2} X \cos^2 \lambda \cos 2 \theta$        | ... | $k_m - 1$     | $\text{sen}^{q_m} X \cos^m \lambda \cos m \theta$        |
|       |                                | $k_1$     | $\text{sen}^{q_1} X \cos \lambda \text{sen } \theta$ | $k_2$     | $\text{sen}^{q_2} X \cos^2 \lambda \text{sen } 2 \theta$ | ... | $k_m$         | $\text{sen}^{q_m} X \cos^m \lambda \text{sen } m \theta$ |

Para determinar la inclinación magnética modificada y la girofrecuencia, necesarias para evaluar los mapas numéricos, se ha utilizado un modelo de campo magnético de la Tierra de 1960, basado en un análisis armónico esférico de sexto orden. Debe considerarse dicha época con preferencia a cualquier otra de interés, porque es la que se emplea para generar los valores de los coeficientes numéricos.

La inducción magnética  $F_x$ ,  $F_y$  y  $F_z$  en gauss a lo largo del Norte geográfico, el Este y direcciones verticalmente descendentes viene dada respectivamente por:

$$F_x = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n x_n^m \left[ g_n^m \cos m \theta + h_n^m \text{sen } m \theta \right] R^{n+2} \tag{5a}$$

$$F_y = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n y_n^m \left[ g_n^m \text{sen } m \theta - h_n^m \cos m \theta \right] R^{n+2} \tag{5b}$$

$$F_z = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n z_n^m \left[ g_n^m \cos m \theta + h_n^m \text{sen } m \theta \right] R^{n+2} \tag{5c}$$

donde:

$$x_n^m = \frac{d}{d \varphi} (P_{n,m}(\cos \varphi)) \tag{6a}$$

$$y_n^m = m \cdot \frac{P_{n,m}(\cos \varphi)}{\text{sen } \varphi} \tag{6b}$$

$$z_n^m = - (n + 1) P_{n,m}(\cos \varphi) \tag{6c}$$

con:

$\varphi$  : colatitud Norte ( $= 90^\circ - \lambda$ ), donde  $\lambda$  es la latitud geográfica en grados (positivos en el hemisferio Norte,  $-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$ )

$P_{n,m}(\cos \varphi)$  : función de Legendre asociada, definida como:

$$P_{n,m}(\cos \varphi) = \sin^m \varphi \left[ \cos^{n-m} \varphi - \frac{(n-m)(n-m-1)}{2(2n-1)} \cos^{n-m-2} \varphi + \frac{(n-m)(n-m-1)(n-m-2)(n-m-3)}{(2)(4)(2n-1)(2n-3)} \cos^{n-m-4} \varphi + \dots \right] \quad (7)$$

$g_n^m$  y  $h_n^m$  : coeficientes numéricos para el modelo de campo en gauss

$R$  : factor de escala dependiente de la altura, cuya fórmula es:

$$R = \frac{6371,2}{6371,2 + h_r} \quad (8)$$

donde:

$h_r$  : altura a la que se evalúa el campo (que se supone de 300 km).

El campo magnético total,  $F$ , será:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (9)$$

La inclinación magnética,  $I$  y la girofrecuencia,  $f_H$  (MHz) se determinan a partir de:

$$I = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{F_z}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \right) \quad (10)$$

y:

$$f_H = 2,8 F \quad (11)$$

### 3 Predicción de foF2 y M(3000)F2

Los mapas numéricos de la capa F2 se basan en sondeos de incidencia vertical de la ionosfera realizados por un gran número de estaciones terrenas de todo el mundo. Los juegos de coeficientes numéricos que definen las variaciones diurnas y geográficas de la mediana mensual de foF2 (Oslo, 1966) y M(3000)F2 se basan en una relación lineal con la actividad solar. Los coeficientes son los valores de  $U_{s,k}$  (véanse las ecuaciones (2) y (3)) que definen la función  $\Omega(\lambda, \theta, T)$ , del mapa numérico de la característica indicada por el mes y el nivel de actividad solar considerados. Se dispone de coeficientes para cada mes del año y para dos niveles de actividad solar,  $R_{12} = 0$  y  $R_{12} = 100$ .  $R_{12}$  es la media móvil para doce meses del número mensual de manchas solares y se utiliza como índice del nivel de actividad solar.

La mayoría de las veces conviene suponer una relación lineal de  $R_{12}$  con foF2 y M(3000)F2. Sin embargo, la relación entre foF2 y  $R_{12}$  deja de ser lineal para un nivel de actividad solar función de la ubicación geográfica, la hora del día y la estación. La mayor desviación con respecto a la relación lineal se presenta con valores de  $R_{12}$  superiores a 150 aproximadamente. Si  $R_{12}$  es mayor de 150, se reduce el error suponiendo que ese valor más elevado es en realidad 150. La relación entre M(3000)F2 y  $R_{12}$  es efectivamente lineal para toda la gama de valores de  $R_{12}$ .

#### 4 Predicción de foE

El método para predecir la mediana mensual de foE se basa en todos los datos de 55 estaciones ionosféricas publicados en los años 1944-1973.

foE (MHz) se expresa mediante:

$$(foE)^4 = A B C D \quad (12)$$

donde:

A es el factor de actividad solar que viene dado por:

$$A = 1 + 0,0094 (\Phi - 66) \quad (13)$$

$\Phi$  : mediana mensual del flujo de ruido radioeléctrico solar observado en 10,7 cm, expresado en unidades de  $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ . Con fines de predicción resulta adecuado aproximar  $\Phi$  por una estimación de  $\Phi_{12}$ , valor suavizado (12 meses) de  $\Phi$ .

B es el factor de variación estacional que viene dado por:

$$B = \cos^m N \quad (14)$$

donde:

$$N = \lambda - \delta \quad \text{para } |\lambda - \delta| < 80^\circ \\ = 80^\circ \quad \text{para } |\lambda - \delta| \geq 80^\circ$$

$\lambda$  : latitud geográfica, que se considera positiva en el hemisferio Norte

$\delta$  : declinación solar que se considera positiva para declinaciones septentrionales.

El exponente  $m$  es una función de la latitud geográfica  $\lambda$ :

$$m = -1,93 + 1,92 \cos \lambda \quad \text{para } |\lambda| < 32^\circ \quad (15a)$$

o:

$$m = 0,11 - 0,49 \cos \lambda \quad \text{para } |\lambda| \geq 32^\circ \quad (15b)$$

C es el factor principal de latitud, que viene dado por:

$$C = X + Y \cos \lambda \quad (16a)$$

donde:

$$X = 23, \quad Y = 116 \quad \text{para } |\lambda| < 32^\circ \quad (16b)$$

o:

$$X = 92, \quad Y = 35 \quad \text{para } |\lambda| \geq 32^\circ \quad (16c)$$

D es el factor para tener en cuenta la hora del día:

Caso 1:  $\chi \leq 73^\circ$

$$D = \cos^p \chi \quad (17a)$$

donde  $\chi$  es el ángulo cenital solar en grados. Para  $|\lambda| \leq 12^\circ$ ,  $p = 1,31$ ; para  $|\lambda| > 12^\circ$ ,  $p = 1,20$ .

Caso 2:  $73^\circ < \chi < 90^\circ$

$$D = \cos^p (\chi - \delta\chi) \quad (17b)$$

donde:

$$\delta\chi = 6,27 \times 10^{-13} (\chi - 50)^8 \quad \text{grados} \quad (17c)$$

el valor  $p$  es el mismo que en el Caso 1.

Caso 3:  $\chi \geq 90^\circ$

El valor de  $D$  durante la noche, para  $\chi \geq 90^\circ$ , es el mayor de los dos siguientes:

$$D = (0,072)^p \exp(-1,4 h) \quad (17d)$$

o:

$$D = (0,072)^p \exp(25,2 - 0,28 \chi) \quad (17e)$$

siendo  $h$  el número de horas después del ocaso ( $\chi = 90^\circ$ ). En condiciones de invierno polar, cuando el Sol no sale, se debe utilizar la ecuación (17e).  $p$  tiene el mismo valor que en el primer caso.

El valor mínimo de foE, viene dado por:

$$(\text{foE})_{\text{mínima}}^4 = 0,004 (1 + 0,021 \Phi)^2 \quad (18)$$

donde  $\Phi$  puede aproximarse por una estimación de  $\Phi_{12}$ , valor suavizado (12 meses) de  $\Phi$ .

Por la noche, si el valor de foE calculado por las ecuaciones (12) a (17e) es inferior al calculado por la ecuación (18) debe tomarse este último valor.

Las pruebas destinadas a comprobar la precisión del método descrito han permitido determinar una desviación típica media de 0,11 MHz para una base de datos correspondiente a más de 80 000 comparaciones horarias para las 55 estaciones consideradas.

## 5 Predicción de foF1

Las expresiones para calcular el valor mediano mensual de foF1 se basan en datos recogidos de 1954 a 1966 en 39 estaciones ionosféricas situadas en ambos hemisferios.

foF1 (MHz) se expresa mediante:

$$\text{foF1} = f_s \cos^n \chi \quad (19)$$

donde:

$$\begin{aligned} f_s &= f_{s_0} + 0,01 (f_{s_{100}} - f_{s_0}) R_{12} \\ f_{s_0} &= 4,35 + 0,0058 \lambda - 0,000120 \lambda^2 \\ f_{s_{100}} &= 5,35 + 0,0110 \lambda - 0,000230 \lambda^2 \\ n &= 0,093 + 0,00461 \lambda - 0,0000540 \lambda^2 + 0,00031 R_{12} \end{aligned}$$

siendo  $\lambda$  la latitud geomagnética en grados, que es positiva en ambos hemisferios, y que viene dada por:

$$\lambda = \left| \arcsin [\sin g_0 \cdot \sin g + \cos g_0 \cdot \cos g \cdot \cos (\theta_0 - \theta)] \right|$$

donde:

$g$  : latitud geográfica de la posición de interés

$g_0$  : latitud geográfica del polo Norte geomagnético (78,3° N)

$\theta$  : longitud geográfica de la posición de interés

$\theta_0$  : longitud geográfica del polo Norte geomagnético (69,0° W).

El ángulo cenital máximo del Sol en que está presente la capa F1 viene dado por las siguientes expresiones (véanse también las Figs. 1 y 2):

$$\chi_m = \chi_0 + 0,01 (\chi_{100} - \chi_0) R_{12} \quad \text{grados} \quad (20)$$

donde:

$$\begin{aligned} \chi_0 &= 50,0 + 0,348 \lambda \\ \chi_{100} &= 38,7 + 0,509 \lambda \end{aligned}$$

FIGURA 1  
Variación de  $\chi_m$  en función de la latitud geomagnética y de  $R_{12}$

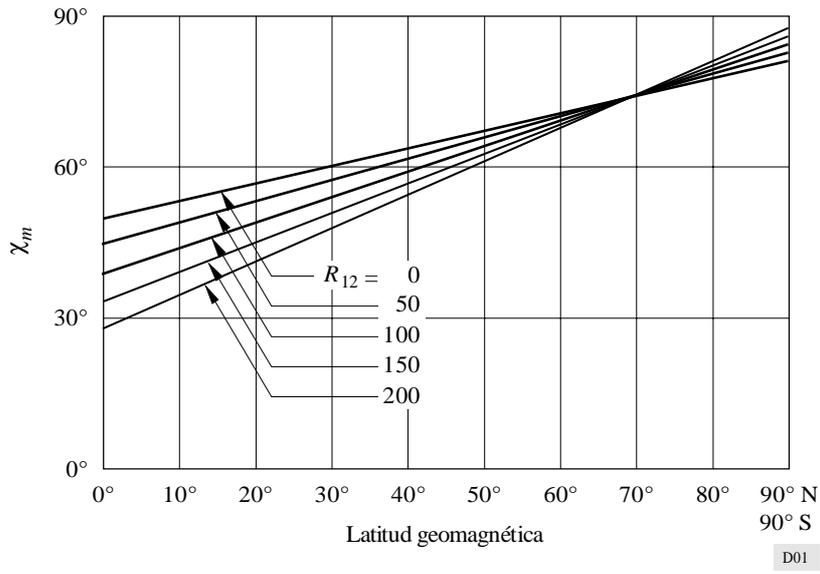
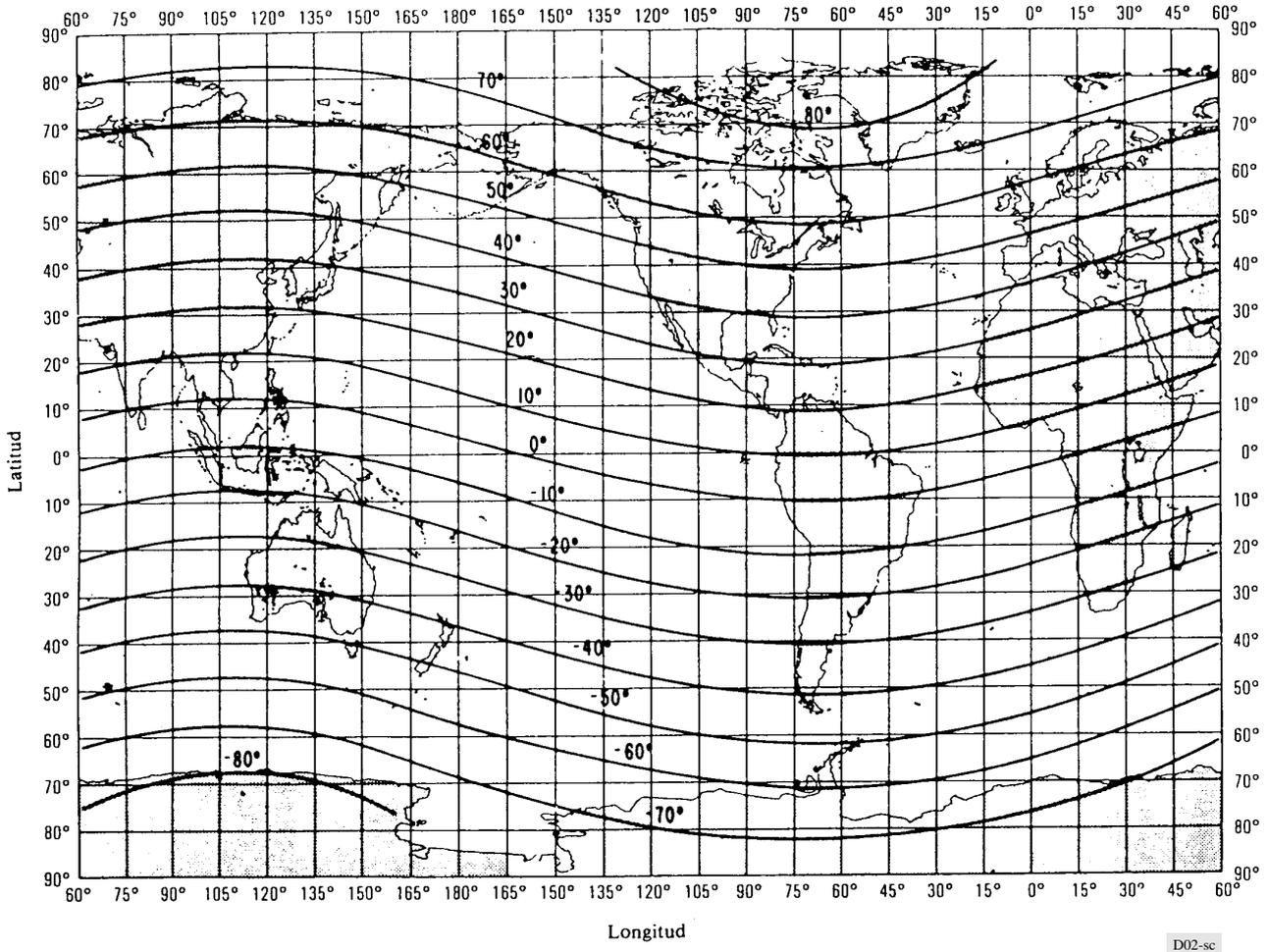


FIGURA 2  
Latitudes geomagnéticas



## 6 Predicción foEs y fbEs

Se ha elaborado un juego de coeficientes numéricos que definen las variaciones diurnas, geográficas y mensuales de los valores medianos y los decilos superior e inferior de foEs para un año de mínima actividad solar y un año de máxima actividad solar, así como un juego de coeficientes numéricos que dan las variaciones de las medianas y los decilos inferior y superior de fbEs (frecuencia de apantallamiento de la capa E esporádica) para un año de mínima actividad solar.

## 7 Predicción de h'F y h'F,F2

Para años de máxima y mínima actividad solar se han confeccionado mapas numéricos mensuales de la mediana mensual h'F, que es la mínima altura virtual observada de reflexión de las señales de incidencia vertical en la capa F (normalmente en la capa F2 por la noche y en la capa F1 durante el día). Se han elaborado igualmente para años de máxima y mínima actividad solar mapas numéricos de h'F,F2, que es la mínima altura virtual observada de reflexión de las señales de incidencia vertical en la capa F, durante la noche y durante el día la capa F2.

## 8 Predicción del porcentaje de aparición de la capa F difusa

El porcentaje de aparición de la capa F difusa se ha determinado a partir de datos ionosféricos mensuales obtenidos por la red mundial de estaciones de sondeos ionosféricos con incidencia vertical, para un año de elevada actividad solar y otro año de baja actividad solar; los valores se han representado numéricamente mediante una técnica cartográfica.

## 9 Programas de computador y datos de referencia disponibles

En el Catálogo de gestión del espectro radioeléctrico del UIT/BR se indican los programas de computador disponibles y los datos de referencia para evaluar mediante computador o microcomputador las características ionosféricas indicadas anteriormente. Para ubicaciones situadas en una determinada zona geográfica el programa WOMAP muestra los valores de la característica ionosférica seleccionada para un Tiempo Universal, mes y época solar concretos. El programa complementario HRMNTH muestra las características ionosféricas elegidas para una ubicación y años determinados, en función del Tiempo Universal, y para cada mes y época solar asociada.

### ANEXO 2

## Predicción de las MUF básica y operacional

### 1 Introducción

Se presentan fórmulas empíricas para evaluar la mediana mensual de la MUF básica del trayecto de propagación.

Esta MUF se considera como el valor más elevado de la MUF básica para los modos de propagación que corresponden a la longitud del trayecto considerada.

Se indica la relación entre la MUF operacional y la MUF básica y se describe un programa de computador mediante el cual se proporcionan estimaciones de la MUF básica y la operacional y de la frecuencia de trabajo óptima en un trayecto de propagación punto a punto de cualquier longitud.

## 2 Consideraciones sobre el modo

Los modos considerados son los siguientes:

|                              |                          |
|------------------------------|--------------------------|
| 1F2                          | 0 a $d_{m\acute{a}x}$    |
| Modos de orden superior a F2 | más de $d_{m\acute{a}x}$ |
| 1F1                          | 2 000-3 400 km           |
| 1E                           | 0-2 000 km               |
| 2E                           | 2 000-4 000 km           |

donde el máximo alcance sobre el suelo  $d_{m\acute{a}x}$  (km) para un solo salto en el modo F2 viene dado por la fórmula:

$$d_{m\acute{a}x} = 4780 + (12610 + 2140/x^2 - 49720/x^4 - 688900/x^6)(1/B - 0,303)$$

con:

$$B = M(3000)F2 - 0,124 + \left[ [M(3000)F2]^2 - 4 \right] \cdot \left[ 0,0215 + 0,005 \operatorname{sen} \left( \frac{7,854}{x} - 1,9635 \right) \right]$$

y  $x = foF2/foE$ , o 2 (el mayor valor).

Se utilizan las características ionosféricas para el punto medio del trayecto de círculo máximo.

## 3 Predicción de MUF básica de la capa F2

### 3.1 Distancia sobre el suelo $D$ hasta $d_{m\acute{a}x}$

La MUF básica de la capa F2 viene dada por la expresión:

$$F2(D)MUF = \left[ 1 + \left( \frac{C_D}{C_{3000}} \right) (B - 1) \right] \cdot foF2 + \frac{f_H}{2} \left( 1 - \frac{D}{d_{m\acute{a}x}} \right)$$

siendo:

$f_H$ : girofrecuencia adecuada (véase el Anexo 1)

y:

$$C_D = 0,74 - 0,591 Z - 0,424 Z^2 - 0,090 Z^3 + 0,088 Z^4 + 0,181 Z^5 + 0,096 Z^6$$

con  $Z = 1 - 2D/d_{m\acute{a}x}$

$C_{3000}$ : valor de  $C_D$  para  $D = 3000$  km, siendo  $D$  la distancia de círculo máximo (km).

Las fórmulas anteriores se aplican a la MUF básica para la onda  $x$  a distancia cero, para la onda  $o$  a distancias  $d_{m\acute{a}x}$  y superiores y para algunas ondas compuestas a distancias intermedias. La correspondiente MUF básica de la onda  $o$  se obtiene para todas las distancias eliminando el último término en  $f_H$  de la primera fórmula.

### 3.2 Distancia sobre el suelo $D$ superior a $d_{m\acute{a}x}$

Los valores de  $F2(d_{m\acute{a}x})$  MUF se determinan para dos ubicaciones de puntos de control a  $d_0/2$  de cada terminal a lo largo del trayecto de círculo máximo de conexión, siendo  $d_0$  la longitud de salto del modo F2 de orden inferior. La MUF del trayecto es el menor de los dos valores.

## 4 Predicción de la MUF básica de la capa F1

La propagación ionosférica por la capa F1 es importante para distancias de transmisión entre 2000 y 3400 km, en latitudes medias y elevadas, durante los meses de verano. Para las mencionadas distancias de transmisión la MUF básica de la capa F1 se considera como el producto del valor de  $foF1$  en el punto mitad del trayecto (véase el Anexo 1) y el factor  $M_{F1}$ . Este factor se ha deducido de cálculos de trazado de rayos en perfiles de densidad electrónica en función de la altura, obtenidos en base a ionogramas representativos de medio día en latitudes medias y altas. Se supone que estos

factores se aplican a todos los ángulos cenitales del Sol. El factor  $M_{F1}$  puede determinarse a partir de las siguientes expresiones numéricas:

$$M_{F1} = J_0 - 0,01 (J_0 - J_{100}) R_{12}$$

donde:

$$J_0 = 0,16 + 2,64 \times 10^{-3} D - 0,40 \times 10^{-6} D^2$$

$$J_{100} = -0,52 + 2,69 \times 10^{-3} D - 0,39 \times 10^{-6} D^2$$

$R_{12}$  está comprendido entre 0 y 150 y  $D$  es la distancia de círculo máximo en kilómetros (entre 2 000 y 3 400 km).

## 5 Predicción de la MUF básica de la capa E

### 5.1 Distancia sobre el suelo inferior a 2 000 km

La propagación ionosférica vía reflexiones únicas de la capa E es importante para las distancias de transmisión inferiores a 2 000 km. La MUF básica de la capa E de un modo de propagación en particular puede determinarse como el producto del valor a medio trayecto de la foE (véase el Anexo 1) y el factor  $M_E$ . Basándose en cálculos del trayecto del rayo para un modelo parabólico de la capa E con  $h_m E = 110$  km,  $y_m E = 20$  km y despreciando los efectos del campo magnético de la Tierra. La curva puede calcular el factor  $M_E$  mediante la ecuación:

$$M_E = 3,94 + 2,80 x - 1,70 x^2 - 0,60 x^3 + 0,96 x^4$$

donde:

$$x = \frac{D - 1\,150}{1\,150}$$

siendo  $D$  la distancia de círculo máximo (km).

### 5.2 Distancia sobre el suelo entre 2 000 km y 4 000 km

El modo 2E MUF para distancias entre 2 000 y 4 000 km se considera como el E(2000)MUF expresado en términos de foE a mitad de trayecto.

## 6 Predicción de la MUF operacional

Para formular predicciones, cuando se determina la MUF operacional (véase la Recomendación UIT-R P.373) para un modo F2 se expresa en términos de la MUF básica para las diferentes estaciones del año, horas del día y potencia radiada del transmisor, como se desprende del Cuadro 2. Se propone utilizar la información correspondiente a las condiciones imperantes en el punto medio del trayecto. Cuando se determina la MUF operacional para un modo E o F1, se toma igual a la MUF básica correspondiente.

CUADRO 2

Relación ( $R_{op}$ ) entre la MUF operacional mediana y la MUF básica mediana para un modo F2

| Potencia isotropa radiada equivalente (dBW) | Verano |      | Equinoccio |      | Invierno |      |
|---|--------|------|------------|------|----------|------|
|   | Noche  | Día  | Noche      | Día  | Noche    | Día  |
| ≤ 30  | 1,20   | 1,10 | 1,25       | 1,15 | 1,30     | 1,20 |
| > 30  | 1,25   | 1,15 | 1,30       | 1,20 | 1,35     | 1,25 |

## 7 Predicción de la frecuencia óptima de trabajo

La FOT (Recomendación UIT-R P.373) se estima en términos de la MUF operacional, utilizando un factor de conversión  $F_l$  igual a 0,95 si la MUF básica del trayecto está determinada por un modo E o F1 y del valor indicado en el Cuadro 3 si la MUF básica del trayecto está determinada por un modo F2.

CUADRO 3

Relación  $F_l$  entre la FOT y la MUF operacional determinada para un modo F2

a)  $R_{12}$  inferior a 50 en función de la estación, de la hora local a mitad del trayecto  $t$  y de latitud geográfica de mitad del trayecto  $\lambda$  (Norte o Sur del Ecuador)

| $\lambda$ | $t$ | 22-02 | 02-06 | 06-10 | 10-14 | 14-18 | 18-22 |  |
|-----------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| > 75°     |     | 0,60  | 0,65  | 0,69  | 0,72  | 0,68  | 0,67  | I<br>n<br>v<br>i<br>e<br>r<br>n<br>o           |
| 65-75°    |     | 0,68  | 0,71  | 0,75  | 0,76  | 0,75  | 0,70  |  |
| 55-65°    |     | 0,74  | 0,76  | 0,80  | 0,80  | 0,82  | 0,73  |  |
| 45-55°    |     | 0,79  | 0,78  | 0,83  | 0,85  | 0,84  | 0,76  |  |
| 35-45°    |     | 0,81  | 0,79  | 0,85  | 0,87  | 0,89  | 0,77  |  |
| 25-35°    |     | 0,81  | 0,74  | 0,86  | 0,82  | 0,85  | 0,78  |  |
| 15-25°    |     | 0,78  | 0,67  | 0,87  | 0,75  | 0,77  | 0,79  |  |
| < 15°     |     | 0,71  | 0,70  | 0,88  | 0,86  | 0,87  | 0,79  |  |
| > 75°     |     | 0,67  | 0,72  | 0,74  | 0,73  | 0,80  | 0,65  | E<br>q<br>u<br>i<br>n<br>o<br>c<br>c<br>i<br>o |
| 65-75°    |     | 0,70  | 0,75  | 0,76  | 0,74  | 0,82  | 0,69  |  |
| 55-65°    |     | 0,73  | 0,78  | 0,80  | 0,75  | 0,81  | 0,73  |  |
| 45-55°    |     | 0,75  | 0,80  | 0,81  | 0,76  | 0,81  | 0,76  |  |
| 35-45°    |     | 0,77  | 0,81  | 0,81  | 0,77  | 0,80  | 0,78  |  |
| 25-35°    |     | 0,78  | 0,80  | 0,82  | 0,78  | 0,81  | 0,74  |  |
| 15-25°    |     | 0,77  | 0,75  | 0,83  | 0,81  | 0,83  | 0,69  |  |
| < 15°     |     | 0,76  | 0,66  | 0,86  | 0,89  | 0,86  | 0,75  |  |
| > 75°     |     | 0,68  | 0,79  | 0,84  | 0,87  | 0,85  | 0,76  | V<br>e<br>r<br>a<br>n<br>o                     |
| 65-75°    |     | 0,70  | 0,81  | 0,83  | 0,86  | 0,86  | 0,77  |  |
| 55-65°    |     | 0,72  | 0,84  | 0,83  | 0,84  | 0,86  | 0,81  |  |
| 45-55°    |     | 0,75  | 0,85  | 0,82  | 0,83  | 0,85  | 0,84  |  |
| 35-45°    |     | 0,79  | 0,85  | 0,80  | 0,82  | 0,83  | 0,85  |  |
| 25-35°    |     | 0,79  | 0,82  | 0,78  | 0,80  | 0,81  | 0,80  |  |
| 15-25°    |     | 0,77  | 0,78  | 0,77  | 0,79  | 0,79  | 0,73  |  |
| < 15°     |     | 0,74  | 0,75  | 0,80  | 0,83  | 0,82  | 0,69  |  |

b)  $R_{12}$  superior o igual a 50 e inferior o igual a 100 en función de la estación del año, de la hora local a mitad del trayecto  $t$  y la latitud geográfica de mitad del trayecto  $\lambda$  (Norte o Sur del Ecuador)

| $\lambda$ | $t$ | 22-02 | 02-06 | 06-10 | 10-14 | 14-18 | 18-22 |  |
|-----------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| > 75°     |     | 0,76  | 0,78  | 0,68  | 0,67  | 0,62  | 0,70  | I<br>n<br>v<br>i<br>e<br>r<br>n<br>o           |
| 65-75°    |     | 0,79  | 0,81  | 0,74  | 0,70  | 0,73  | 0,73  |  |
| 55-65°    |     | 0,82  | 0,83  | 0,79  | 0,75  | 0,80  | 0,76  |  |
| 45-55°    |     | 0,84  | 0,82  | 0,83  | 0,81  | 0,84  | 0,78  |  |
| 35-45°    |     | 0,83  | 0,81  | 0,85  | 0,86  | 0,86  | 0,79  |  |
| 25-35°    |     | 0,78  | 0,76  | 0,85  | 0,85  | 0,85  | 0,78  |  |
| 15-25°    |     | 0,74  | 0,71  | 0,85  | 0,83  | 0,82  | 0,76  |  |
| < 15°     |     | 0,77  | 0,69  | 0,87  | 0,86  | 0,85  | 0,78  |  |
| > 75°     |     | 0,64  | 0,61  | 0,73  | 0,74  | 0,74  | 0,67  | E<br>q<br>u<br>i<br>n<br>o<br>c<br>c<br>i<br>o |
| 65-75°    |     | 0,68  | 0,71  | 0,77  | 0,74  | 0,78  | 0,70  |  |
| 55-65°    |     | 0,70  | 0,75  | 0,80  | 0,72  | 0,78  | 0,73  |  |
| 45-55°    |     | 0,73  | 0,77  | 0,81  | 0,74  | 0,76  | 0,75  |  |
| 35-45°    |     | 0,75  | 0,78  | 0,82  | 0,78  | 0,76  | 0,76  |  |
| 25-35°    |     | 0,77  | 0,76  | 0,82  | 0,83  | 0,78  | 0,72  |  |
| 15-25°    |     | 0,75  | 0,73  | 0,84  | 0,87  | 0,81  | 0,69  |  |
| < 15°     |     | 0,79  | 0,68  | 0,86  | 0,89  | 0,84  | 0,80  |  |
| > 75°     |     | 0,82  | 0,80  | 0,82  | 0,85  | 0,80  | 0,79  | V<br>e<br>r<br>a<br>n<br>o                     |
| 65-75°    |     | 0,83  | 0,82  | 0,79  | 0,82  | 0,82  | 0,82  |  |
| 55-65°    |     | 0,83  | 0,82  | 0,77  | 0,79  | 0,82  | 0,83  |  |
| 45-55°    |     | 0,81  | 0,81  | 0,76  | 0,77  | 0,81  | 0,82  |  |
| 35-45°    |     | 0,78  | 0,78  | 0,75  | 0,78  | 0,78  | 0,78  |  |
| 25-35°    |     | 0,77  | 0,83  | 0,75  | 0,79  | 0,77  | 0,74  |  |
| 15-25°    |     | 0,77  | 0,69  | 0,78  | 0,82  | 0,78  | 0,73  |  |
| < 15°     |     | 0,79  | 0,63  | 0,84  | 0,85  | 0,81  | 0,77  |  |

Invierno: Noviembre, diciembre, enero, febrero en el hemisferio Norte y mayo, junio, julio, agosto en el hemisferio Sur.

Verano: Mayo, junio, julio, agosto en el hemisferio Norte y noviembre, diciembre, enero, febrero en el hemisferio Sur.

Equinoccio: Marzo, abril, septiembre, octubre en ambos hemisferios.

CUADRO 3 (Continuación)

c)  $R_{12}$  superior a 100 en función de la estación, de la hora local a mitad del trayecto  $t$  y de latitud geográfica de mitad del trayecto  $\lambda$  (Norte o Sur del Ecuador)

| $\lambda$ | $t$ | 22-02 | 02-06 | 06-10 | 10-14 | 14-18 | 18-22 |  |
|-----------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| > 75°     |     | 0,62  | 0,70  | 0,74  | 0,67  | 0,64  | 0,73  | I<br>n<br>v<br>i<br>e<br>r<br>n<br>o           |
| 65-75°    |     | 0,69  | 0,74  | 0,77  | 0,72  | 0,72  | 0,78  |  |
| 55-65°    |     | 0,77  | 0,78  | 0,81  | 0,80  | 0,79  | 0,82  |  |
| 45-55°    |     | 0,83  | 0,80  | 0,84  | 0,87  | 0,84  | 0,86  |  |
| 35-45°    |     | 0,86  | 0,81  | 0,87  | 0,90  | 0,87  | 0,87  |  |
| 25-35°    |     | 0,83  | 0,76  | 0,89  | 0,90  | 0,88  | 0,86  |  |
| 15-25°    |     | 0,78  | 0,70  | 0,89  | 0,89  | 0,89  | 0,83  |  |
| < 15°     |     | 0,83  | 0,76  | 0,89  | 0,90  | 0,89  | 0,84  |  |
| > 75°     |     | 0,66  | 0,67  | 0,75  | 0,66  | 0,70  | 0,72  | E<br>q<br>u<br>i<br>n<br>o<br>c<br>c<br>i<br>o |
| 65-75°    |     | 0,67  | 0,71  | 0,73  | 0,70  | 0,70  | 0,72  |  |
| 55-65°    |     | 0,69  | 0,75  | 0,71  | 0,71  | 0,71  | 0,72  |  |
| 45-55°    |     | 0,73  | 0,78  | 0,70  | 0,72  | 0,74  | 0,73  |  |
| 35-45°    |     | 0,79  | 0,82  | 0,75  | 0,78  | 0,80  | 0,84  |  |
| 25-35°    |     | 0,81  | 0,82  | 0,87  | 0,87  | 0,87  | 0,86  |  |
| 15-25°    |     | 0,81  | 0,77  | 0,89  | 0,92  | 0,90  | 0,85  |  |
| < 15°     |     | 0,80  | 0,79  | 0,86  | 0,90  | 0,90  | 0,82  |  |
| > 75°     |     | 0,73  | 0,74  | 0,82  | 0,83  | 0,79  | 0,75  | V<br>e<br>r<br>a<br>n<br>o                     |
| 65-75°    |     | 0,75  | 0,75  | 0,77  | 0,80  | 0,80  | 0,77  |  |
| 55-65°    |     | 0,77  | 0,76  | 0,74  | 0,77  | 0,80  | 0,80  |  |
| 45-55°    |     | 0,79  | 0,76  | 0,73  | 0,75  | 0,80  | 0,84  |  |
| 35-45°    |     | 0,80  | 0,76  | 0,75  | 0,75  | 0,79  | 0,84  |  |
| 25-35°    |     | 0,81  | 0,76  | 0,82  | 0,81  | 0,79  | 0,83  |  |
| 15-25°    |     | 0,81  | 0,77  | 0,85  | 0,86  | 0,81  | 0,80  |  |
| < 15°     |     | 0,80  | 0,79  | 0,86  | 0,89  | 0,85  | 0,78  |  |

Invierno: Noviembre, diciembre, enero, febrero en el hemisferio Norte y mayo, junio, julio, agosto en el hemisferio Sur.

Verano: Mayo, junio, julio, agosto en el hemisferio Norte y noviembre, diciembre, enero, febrero en el hemisferio Sur.

Equinoccio: Marzo, abril, septiembre, octubre en ambos hemisferios.

### 8 Programa de computador

Los procedimientos descritos en el presente Anexo se realizan mediante el programa de computador MUFFY que predice la MUF básica, la MUF operacional y la frecuencia óptima de trabajo en función de la hora del día, para un trayecto de propagación, mes y número de manchas solares determinados.

#### ANEXO 3

### Predicción del trayecto del rayo

Para realizar una estimación simplificada de los trayectos del rayo oblicuos, puede suponerse que la reflexión tiene lugar en un plano especular efectivo situado a la altura  $h_r$ .

En lo que sigue:

$$x = foF2 / foE \quad y \quad H = \frac{1490}{M(3000)F2 + \Delta M} - 316$$

siendo: 
$$\Delta M = \frac{0,18}{y - 1,4} + \frac{0,096 (R_{12} - 25)}{150}$$

e  $y = x$  o 1,8 (el mayor valor).

a) Para  $x > 3,33$  y  $x_r = f/foF2 \geq 1$ , donde  $f$  es la frecuencia de la onda, se tiene:

$h_r = h$  o 800 km, tomándose entre ambos el valor que sea menor

donde:  $h = A_1 + B_1 2,4^{-a}$  para  $B_1$  y  $a \geq 0$

$= A_1 + B_1$  en los demás casos

con  $A_1 = 140 + (H - 47) E_1$

$B_1 = 150 + (H - 17) F_1 - A_1$

$E_1 = - 0,09707 x_r^3 + 0,6870 x_r^2 - 0,7506 x_r + 0,6$

$F_1$  es tal que:

$F_1 = - 1,862 x_r^4 + 12,95 x_r^3 - 32,03 x_r^2 + 33,50 x_r - 10,91$  para  $x_r \leq 1,71$

$F_1 = 1,21 + 0,2 x_r$  para  $x_r > 1,71$

y  $a$  varía en función de la distancia  $d$  y de la distancia de salto  $d_s$  de acuerdo con:

$a = (d - d_s)/(H + 140)$

donde:  $d_s = 160 + (H + 43)G$

$G = - 2,102 x_r^4 + 19,50 x_r^3 - 63,15 x_r^2 + 90,47 x_r - 44,73$  para  $x_r \leq 3,7$

$G = 19,25$  para  $x_r > 3,7$

b) Para  $x > 3,33$  y  $x_r < 1$

$h_r = h$  o 800 km, tomándose entre ambos el valor que sea menor

donde:  $h = A_2 + B_2 b$  para  $B_2 \geq 0$

$= A_2 + B_2$  en los demás casos

con  $A_2 = 151 + (H - 47) E_2$

$B_2 = 141 + (H - 24) F_2 - A_2$

$E_2 = 0,1906 Z^2 + 0,00583 Z + 0,1936$

$F_2 = 0,645 Z^2 + 0,883 Z + 0,162$

donde:  $Z = x_r$  ó 0,1, tomándose entre ambos el valor que sea mayor, y  $b$  varía en función de la distancia normalizada  $d_f$  y de  $Z$  y  $H$  de acuerdo con:

$b = - 7,535 d_f^4 + 15,75 d_f^3 - 8,834 d_f^2 - 0,378 d_f + 1$

donde:  $d_f = \frac{0,115 d}{Z(H + 140)}$  ó 0,65, tomándose entre ambos el valor que sea menor.

c) Para  $x \leq 3,33$  se tiene:

$h_r = 115 + HJ + Ud$  o 800 km, tomándose entre ambos el valor que sea menor

con  $J = - 0,7126 y^3 + 5,863 y^2 - 16,13 y + 16,07$

y  $U = 8 \times 10^{-5} (H - 80) (1 + 11 y^{-2,2}) + 1,2 \times 10^{-3} H y^{-3,6}$