

RECOMENDACIÓN UIT-R P.533-5

**MÉTODO PARA LA PREDICCIÓN DE LA PROPAGACIÓN
DE LAS ONDAS DECAMÉTRICAS***

(Cuestión UIT-R 223/3)

(1978-1982-1990-1992-1994-1995)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que las pruebas realizadas empleando el Banco de Datos D1 del UIT-R muestran que el método del Anexo 1 tiene una precisión comparable a la de los otros métodos más complejos;
- b) que se requiere información sobre las características de funcionamiento de las antenas de transmisión y de recepción para la aplicación práctica de este método**;
- c) que se han creado programas de computador y se han puesto a disposición de la Oficina de Radiocomunicaciones,

recomienda

- 1 que se utilice la información contenida en el Anexo 1 en la predicción por computador de la propagación de la onda ionosférica a frecuencias entre 2 y 30 MHz;
- 2 que las administraciones y el UIT-R procuren mejorar los métodos de predicción para incrementar la eficacia de las instalaciones de explotación y aumentar la precisión.

ANEXO 1

ÍNDICE

- 1 Introducción
- 2 Emplazamiento de los puntos de control
- 3 Frecuencias máximas utilizables básica y operacional (o de explotación)
 - 3.1 Frecuencias máximas utilizables básicas
 - 3.2 Frecuencia crítica de la capa E (foE)
 - 3.3 MUF básica de la capa E
 - 3.4 Características de la capa F2
 - 3.5 MUF básica de la capa F2
 - 3.5.1 Modo de orden mínimo
 - 3.5.1.1 Trayectos de hasta $d_{m\acute{a}x}$ (km) ($d_{m\acute{a}x}$: longitud máxima de un salto para el modo F2)
 - 3.5.1.2 Trayectos superiores a $d_{m\acute{a}x}$ (km)
 - 3.5.2 Modos de orden superior (trayectos de hasta 9 000 km)

* En la UIT puede obtenerse un programa informático asociado con los procedimientos de predicción descritos en esta Recomendación; para los detalles, véase el Catálogo de Programas para gestión del espectro radioeléctrico publicado por la UIT/BR.

** En la UIT puede obtenerse información detallada sobre toda una gama de antenas con un programa informático asociado; para los detalles, véase la Recomendación UIT-R BS.705.

- 3.5.2.1 Trayectos de hasta $d_{m\acute{a}x}$ (km)
- 3.5.2.2 Trayectos superiores a $d_{m\acute{a}x}$ (km)
- 3.6 MUF operacional (o MUF de explotación) del trayecto
- 4 Frecuencia máxima de apantallamiento por la capa E (f_s)
- 5 Valor intermedio de la intensidad de campo de la onda ionosférica
- 5.1 Trayectos de hasta 7 000 km
 - 5.1.1 Modos considerados
 - 5.1.2 Ángulo de elevación
 - 5.1.3 Determinación de la intensidad de campo
- 5.2 Trayectos superiores a 9 000 km
- 5.3 Trayectos comprendidos entre 7 000 y 9 000 km
- 6 Potencia mediana disponible en el receptor
- 7 Valor mediano mensual de la relación señal/ruido
- 8 Relaciones señal/ruido correspondientes a otros porcentajes de tiempo
- 9 Frecuencia mínima utilizable (LUF)
- 10 Fiabilidad básica del circuito (BCR)

1 Introducción

Este método de predicción de la propagación para la estimación de la fiabilidad y compatibilidad de las frecuencias comprendidas entre unos 2 MHz y 30 MHz se deriva de un método propuesto por primera vez en 1983 por el Grupo Interino de Trabajo 6/12 del ex CCIR, que experimentó perfeccionamientos posteriores tras su examen por las CAMR para la planificación de las bandas de ondas decamétricas atribuidas de servicio de radiodifusión (Ginebra, 1987) (HFBC-87), el CCIR, ahora el UIT-R y las organizaciones de radiodifusión y de otro tipo. El procedimiento aplica un análisis trayecto gráfico de los trayectos de hasta 7 000 km, formulaciones empíricas de modos compuestos a partir del ajuste a los datos medidos para trayectos superiores a 9 000 km, y una transición suave entre estos dos planteamientos en los trayectos de 7 000 a 9 000 km.

Se determina el valor mediano mensual de la MUF básica, la intensidad de campo incidente de la onda ionosférica y la potencia disponible en el receptor con una antena receptora sin pérdidas de ganancia determinada. Las intensidades de señal se normalizan respecto a los valores del banco de datos de mediciones del UIT-R. El método exige la determinación de una serie de características ionosféricas y parámetros de propagación en «puntos de control» especificados.

2 Emplazamiento de los puntos de control

Se supone que la propagación se efectúa por el trayecto de círculo máximo entre el transmisor y el receptor en los modos E (trayectos de hasta 4 000 km) y en los modos F2 (todas las longitudes). Los puntos de control se seleccionan como se indica en el Cuadro 1, en función de la longitud del trayecto y la capa de reflexión.

3 Frecuencias máximas utilizables básica y operacional (o de explotación)

La estimación de la MUF de explotación (frecuencia más elevada que permite una explotación aceptable de un servicio de radiocomunicación) se hace en dos etapas; en primer lugar se estima la MUF básica a partir de una serie de parámetros ionosféricos; en segundo lugar se determina un factor de corrección para tener en cuenta los mecanismos de propagación a frecuencias superiores a la MUF básica.

CUADRO 1

Emplazamiento de los puntos de control para la determinación de la MUF básica, el apantallamiento por la capa E, las alturas de reflexión especular del trayecto del rayo y la absorción ionosférica

a) MUF básica y girofrecuencia asociada de los electrones

| Longitud del trayecto, D (km) | Modos E | Modos F2 |
|---------------------------------|----------------------|------------------------|
| $0 < D \leq 2000$ | M | M |
| $2000 < D \leq 4000$ | $T + 1000, R - 1000$ | - |
| $2000 < D \leq d_{m\acute{a}x}$ | - | M |
| $D > d_{m\acute{a}x}$ | - | $T + d_0/2, R - d_0/2$ |

b) Apantallamiento por la capa E

| Longitud del trayecto, D (km) | Modos F2 |
|---------------------------------|----------------------|
| $0 < D \leq 2000$ | M |
| $2000 < D < 9000$ | $T + 1000, R - 1000$ |

c) Alturas de reflexión especular de los trayectos del rayo

| Longitud del trayecto, D (km) | Modos F2 |
|---------------------------------|---------------------------|
| $0 < D \leq d_{m\acute{a}x}$ | M |
| $d_{m\acute{a}x} < D < 9000$ | $T + d_0/2, M, R - d_0/2$ |

d) Absorción ionosférica y girofrecuencia asociada de los electrones

| Longitud del trayecto, D (km) | Modos E | Modos F2 |
|---------------------------------|-------------------------|---|
| $0 < D \leq 2000$ | M | M |
| $2000 < D \leq 4000$ | $T + 1000, M, R - 1000$ | - |
| $2000 < D \leq d_{m\acute{a}x}$ | - | $T + 1000, M, R - 1000$ |
| $d_{m\acute{a}x} < D < 9000$ | - | $T + 1000, T + d_0/2, M, R - d_0/2, R - 1000$ |

- M : Punto intermedio del trayecto.
- T : Emplazamiento del transmisor.
- R : Emplazamiento del receptor.
- $d_{m\acute{a}x}$: Longitud máxima del salto F2.
- d_0 : Longitud del salto del modo de orden inferior.

Las distancias se expresan en km.

3.1 Frecuencias máximas utilizables básicas

Se evalúan las MUF básicas de los diversos modos de propagación en términos de las correspondientes frecuencias críticas de la capa ionosférica y de un factor relacionado con la longitud del salto. Cuando se consideran los modos E y F2, la mayor de las dos MUF básicas de los modos E y F2 de orden mínimo representa la MUF básica del trayecto.

3.2 Frecuencia crítica de la capa E (foE)

La frecuencia foE se determina como se indica en la Recomendación UIT-R P.434.

3.3 MUF básica de la capa E

La frecuencia foE se evalúa en los puntos de control indicados en el Cuadro 1a), y se selecciona el valor menor para los trayectos de 2 000 a 4 000 km. La MUF básica de un modo E de n saltos en un trayecto de longitud D viene dada por:

$$n E(D)MUF = foE \cdot \sec i_{110} \quad (1)$$

donde i_{110} es el ángulo de incidencia a una altura de reflexión especular de 110 km, en el punto medio de un salto de longitud $d = D/n$.

La MUF básica de la capa E de este trayecto es el valor de $E(D)MUF$ para el modo E de orden mínimo.

3.4 Características de la capa F2

Las representaciones numéricas de las características ionosféricas de foF2 y M(3000)F2, para valores del índice solar $R_{12} = 0$ y 100, y para cada mes, se toman de la Recomendación UIT-R P.434, donde el campo magnético se evalúa a una altura de 300 km. Los coeficientes de Oslo se utilizan para determinar estos valores en las horas necesarias y en los puntos de control del Cuadro 1a). Se aplica una interpolación o extrapolación lineal para los valores predominantes del índice comprendidos entre $R_{12} = 0$ y 150 (véase la Recomendación UIT-R P.371). En el caso de foF2 únicamente, y para una actividad solar más elevada, R_{12} se hace igual a 150.

3.5 MUF básica de la capa F2

3.5.1 Modo de orden mínimo

3.5.1.1 Trayectos de hasta $d_{m\acute{a}x}$ (km)

El orden, n_0 , del modo de orden mínimo viene determinado por consideraciones geométricas, utilizando la altura de reflexión especular h_r obtenida en el punto de control en el punto medio del trayecto mediante la ecuación:

$$h_r = \frac{1490}{M(3000)F2} - 176 \text{ km o } 500 \text{ km, tomándose entre ambos el valor que sea menor.} \quad (2)$$

Para este modo, la MUF básica de la capa F2, que también es la MUF básica de la capa F2 del trayecto, se calcula de la manera siguiente:

$$n_0 F2(D)MUF = \left[1 + \left(\frac{C_d}{C_{3000}} \right) (B - 1) \right] \cdot foF2 + \frac{f_H}{2} \left(1 - \frac{d}{d_{m\acute{a}x}} \right) \quad (3)$$

donde:

f_H : valor de la girofrecuencia de los electrones, para una altura de 300 km, determinado en cada uno de los puntos de control del Cuadro 1a)

$$C_d = 0,74 - 0,591 Z - 0,424 Z^2 - 0,090 Z^3 + 0,088 Z^4 + 0,181 Z^5 + 0,096 Z^6 \quad (4)$$

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

$$d_{m\acute{a}x} = 4780 + (12610 + 2140/x^2 - 49720/x^4 + 688900/x^6) (1/B - 0,303) \quad (5)$$

$$B = M(3000)F2 - 0,124 + \left[[M(3000)F2]^2 - 4 \right] \cdot \left[0,0215 + 0,005 \operatorname{sen} \left(\frac{7,854}{x} - 1,9635 \right) \right] \quad (6)$$

donde:

$d = D/n_0$ y $d_{m\acute{a}x}$ se expresan en kilómetros

C_{3000} : valor de C_d para $D = 3000$ km

$x = foF2/foE$, ó 2, tomándose entre ambos el valor que sea mayor

foE se calcula como en el § 3.3.

3.5.1.2 Trayectos superiores a $d_{m\acute{a}x}$ (km)

La MUF b\asica del modo de orden m\inimo $n_0F_2(D)MUF$ para una longitud de trayecto D se hace igual al menor de los valores de $F_2(d_{m\acute{a}x})MUF$ determinados por la ecuaci3n (3) para los dos puntos de control del Cuadro 1a). Esta es tambi\en la MUF b\asica del trayecto.

3.5.2 Modos de orden superior (trayectos superiores a 9 000 km)

3.5.2.1 Trayectos de hasta $d_{m\acute{a}x}$ (km)

La MUF b\asica de la capa F2 para un modo de n saltos se calcula por las ecuaciones (3) a (6) en el punto de control situado en el punto medio del trayecto indicado en el Cuadro 1a) para un salto de longitud $d = D/n$.

3.5.2.2 Trayectos superiores a $d_{m\acute{a}x}$ (km)

La MUF b\asica de la capa F2 para un modo de n saltos se calcula en funci3n de $F_2(d_{m\acute{a}x})MUF$ y de un factor de proporcionalidad de la distancia que depende de las longitudes respectivas de los saltos del modo en cuesti3n y del modo de menor orden posible.

$$n F_2(D)MUF = F_2(d_{m\acute{a}x})MUF \cdot M_n / M_{n_0} \quad (7)$$

donde M_n/M_{n_0} se obtiene de la ecuaci3n (3) como se indica a continuaci3n:

$$\frac{M_n}{M_{n_0}} = \frac{n F_2(d)MUF}{n_0 F_2(D)MUF} \quad (8)$$

Se selecciona al valor m\as bajo de los valores calculados en los dos puntos de control del Cuadro 1a).

3.6 MUF operacional (o MUF de explotaci3n) del trayecto

La MUF de explotaci3n del trayecto es la mayor de las MUF de explotaci3n para los modos F2 y de las MUF de explotaci3n para los modos E. Para los modos F2, la MUF de explotaci3n es igual al producto de la MUF b\asica por R_{op} donde R_{op} se indica en el Cuadro 2 de la Recomendaci3n UIT-R P.434. Para los modos de la capa E la MUF de explotaci3n es igual a la MUF b\asica.

La estimaci3n de la MUF de explotaci3n superada durante el 10% y el 90% de los d\ias se determina multiplicando la mediana de la MUF de explotaci3n por los factores 1,15 y 0,85 respectivamente, en el caso de los modos F, y por 1,05 y 0,95, respectivamente en el caso de los modos E.

4 Frecuencia m\axima de apantallamiento por la capa E (f_s)

Para trayectos de hasta 9 000 km se considera el apantallamiento por la capa E de los modos F2. Para calcular la frecuencia m\axima de apantallamiento (v\ea se el Cuadro 1b)) se toma el valor de foE en el punto medio del trayecto (para trayectos de hasta 2 000 km) o el mayor de los valores de foE en los dos puntos de control situados a 1 000 km de cada extremo del trayecto (para trayectos superiores a 2 000 km).

$$f_s = 1,05 foE \sec i \quad (9)$$

siendo:

$$i = \arcsen \left(\frac{R_0 \cos \Delta_F}{R_0 + h_r} \right) \quad (10)$$

donde:

i : \u00e1ngulo de incidencia a la altura $h_r = 110$ km

R_0 : radio de la Tierra = 6 371 km

Δ_F : \u00e1ngulo de elevaci3n para el modo de la capa F2 (determinado por la ecuaci3n (11)).

5 Valor intermedio de la intensidad de campo de la onda ionosf\erica

El valor predicho de la intensidad de campo es la mediana mensual de todos los d\ias del mes.

5.1 Trayectos hasta 7 000 km

5.1.1 Modos considerados

Se seleccionan, como máximo tres modos E (solamente para trayectos de hasta 4 000 km) y seis modos F2 que cumplen todos los criterios siguientes:

- Modos E – modo de orden mínimo con una longitud del salto de hasta 2 000 km, o uno de los dos modos de orden superior que le siguen;
- ángulo de elevación $\geq 3^\circ$, obtenido por la ecuación (11) con reflexión especular a una altura $h_r = 110$ km.
- Modos F2 – modo de orden mínimo con una longitud del salto de hasta d_0 , o uno de los cinco modos de orden superior que le siguen;
- ángulo de elevación $\geq 3^\circ$, obtenido por la ecuación (11) con reflexión especular a una altura h_r determinada mediante la ecuación (2), donde M(3000)F2 se evalúa en el punto medio del trayecto (trayectos de hasta $d_{m\acute{a}x}$ (km)) o en el punto de control indicado en el Cuadro 1c) en el cual foF2 tiene el valor inferior (trayectos entre $d_{m\acute{a}x}$ y 9 000 km);
 - frecuencia máxima de apantallamiento por la capa E, que se evalúa como se indica en el § 4, y que es inferior a la frecuencia de funcionamiento.

5.1.2 Ángulo de elevación

El ángulo de elevación que se aplica a todas las frecuencias, incluidas las superiores a la MUF básica, viene dado por:

$$\Delta = \text{arc tg} \left(\cotg \frac{d}{2 R_0} - \frac{R_0}{R_0 + h_r} \text{cosec} \frac{d}{2 R_0} \right) \quad (11)$$

donde:

d : longitud del salto de un modo de n saltos, dada por $d = D/n$

h_r : altura equivalente de reflexión en un plano especular

para los modos E, $h_r = 110$ km

para los modos F2, h_r se determina en función del tiempo, el emplazamiento y la longitud del salto.

La altura de reflexión especular, h_r , para los modos F2 se calcula como se indica a continuación, siendo:

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

con:

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

e $y = x$ ó 1,8, tomándose entre ambos el valor que sea mayor.

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

$$h_r = h \text{ u } 800 \text{ km, tomándose entre ambos el valor que sea menor} \quad (12)$$

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:

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

$$F_1 = 1,21 + 0,2 x_r \quad \text{para } x_r > 1,71$$

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

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

$$G = 19,25 \quad \text{para } x_r > 3,7$$

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

$$h_r = h \text{ u } 800 \text{ km, tomándose entre ambos el valor que sea menor} \quad (13)$$

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

$$= A_2 + B_2 \text{ en los demás casos}$$

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:

$$h_r = 115 + H J + U d \text{ u } 800 \text{ km, tomándose entre ambos el valor que sea menor} \quad (14)$$

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

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

En los trayectos de hasta $d_{m\acute{a}x}$ (km) h_r se evalúa en el punto medio del trayecto; en los trayectos más largos se determina en todos los puntos de control indicados en el Cuadro 1c), y se emplea su valor medio.

5.1.3 Determinación de la intensidad de campo

Para cada modo w seleccionado en el § 5.1.1, la intensidad de campo mediana viene dada por:

$$E_{tw} = 136,6 + P_t + G_t + 20 \log f - L_{bf} - L_i - L_c - L_m - L_g - L_h - L_z \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (15)$$

donde:

f : frecuencia de transmisión (MHz)

P_t : potencia del transmisor (dB(1 kW))

G_t : ganancia de la antena transmisora en el acimut y los ángulos de elevación requeridos (Δ), con relación a una antena isótropa (dB)

L_{bf} : pérdida básica de transmisión en el espacio libre (dB), dada por:

$$L_{bf} = 32,45 + 20 \log f + 20 \log p' \quad (16)$$

siendo:

p' : distancia oblicua virtual (km):

$$p' = 2 R_0 \sum_1^n \left[\frac{\text{sen } (d / 2 R_0)}{\cos [\Delta + (d / 2 R_0)]} \right] \quad (17)$$

L_i : pérdida por absorción (dB), dada por:

$$L_i = \frac{(1 + 0,0067 R_{12}) \cdot \sec i}{(f + f_L)^2} \cdot \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k A T_{\text{mediodía}} \cdot \frac{F(\chi_j)}{F(\chi_{j\text{mediodía}})} \cdot \Phi_n \left(\frac{f_v}{foE} \right) \quad (18)$$

con:

$$F(\chi) = \cos^p (0,881 \chi) \text{ o } 0,02, \text{ el que sea mayor} \quad (19)$$

donde:

$$f_v = f \cos i \quad (20)$$

e

i : ángulo de incidencia a 110 km

k : número de puntos de control (según el Cuadro 1d)

f_L : media de los valores de la girofrecuencia de los electrones alrededor del componente longitudinal del campo magnético de la Tierra para una altura de 100 km, determinada en los puntos de control dados en el Cuadro 1d)

χ_j : ángulo cenital solar del j -ésimo punto de control o 102° , el que sea menor. En el cálculo de este parámetro se emplea la ecuación de tiempo correspondiente a la mitad del mes de que se trata.

$\chi_{j\text{mediodía}}$: valor de χ_j en el medio día local

$A T_{\text{mediodía}}$: factor de absorción en el mediodía local y $R_{12} = 0$ dado como función de la latitud geográfica y del mes en la Fig. 1

$\Phi_n \left(\frac{f_v}{foE} \right)$: factor de penetración de la capa absorción dado como función de la relación de la frecuencia de la onda de incidencia vertical equivalente f_v a foE conforme a la Fig. 2

p : exponente de absorción diurna dado en función de la latitud de inclinación modificada (véase la Recomendación UIT-R P.434, Anexo 1) y el mes en la Fig. 3.

En frecuencias superiores a la MUF básica, la absorción sigue variando con la frecuencia, y se calcula suponiendo que los trayectos del rayo son los mismos que los de la MUF básica.

L_m : pérdidas «por encima de la MUF»:

para frecuencias f iguales o inferiores a la MUF básica (f_b) de un modo dado:

$$L_m = 0 \quad (21)$$

para los modos E y para $f > f_b$:

$$L_m = 130 \left[\left(f / f_b \right) - 1 \right]^2 \quad \text{dB} \quad (22)$$

u 81 dB, tomándose entre ambos el valor que sea menor;

para los modos F2 y para $f > f_b$:

$$L_m = 36 \left[\left(\frac{f}{f_b} \right) - 1 \right]^{1/2} \quad \text{dB} \quad (23)$$

ó 62 dB, tomándose entre ambos el valor que sea menor.

L_g : pérdida acumulativa por reflexión en el suelo en los puntos de reflexión intermedios:

para un modo de n saltos,

$$L_g = 2(n - 1) \quad \text{dB} \quad (24)$$

L_h : factor que tiene en cuenta las pérdidas aurorales y de otro tipo indicadas en el Cuadro 2. Los valores se evalúan en función de la latitud geomagnética G_n (N o S del Ecuador) y la hora local t (para un dipolo geocéntrico con un polo situado a $78,5^\circ$ N y $68,2^\circ$ W: se toman los valores medios en los puntos de control del Cuadro 1d)).

En el hemisferio Norte, el invierno abarca los meses de diciembre a febrero; los equinoccios, los de marzo a mayo y de septiembre a noviembre; y el verano, los de junio a agosto. En el hemisferio Sur se invierten los meses correspondientes al invierno y el verano.

Para $G_n < 42,5^\circ$, $L_h = 0$ dB

L_z : término que refleja los efectos de propagación ionosférica no incluidos por otro concepto en el presente método. El valor recomendado actual es 9,9 dB (véase también la definición de L_y dada en el § 5.2).

FIGURA 1
Factor de absorción, $A_{T_{mediodía}}$

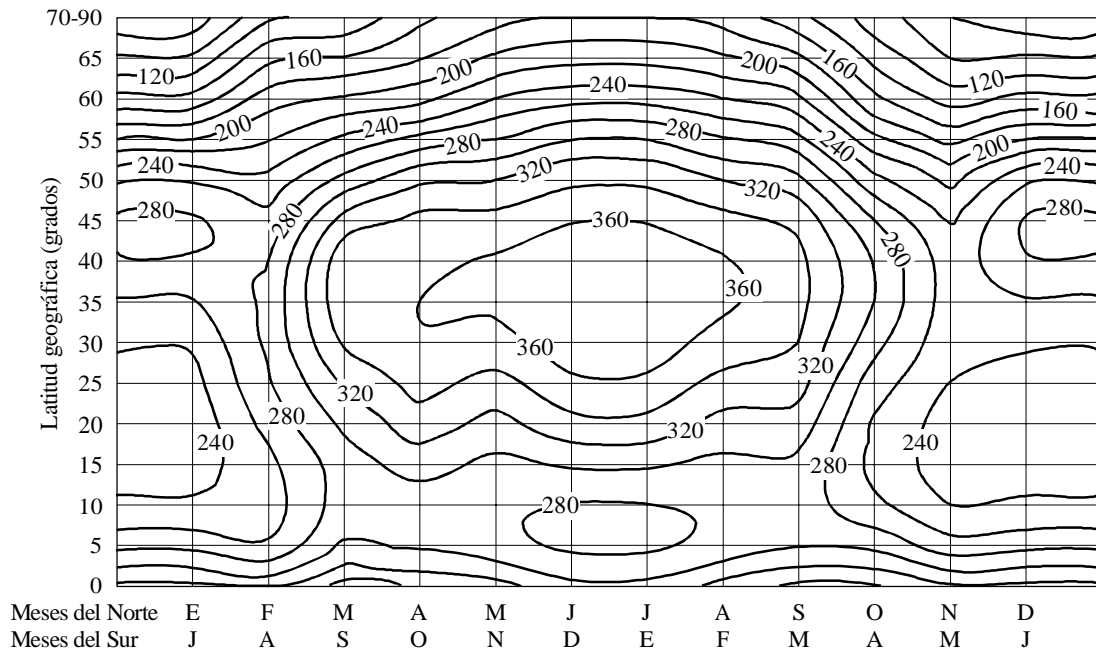
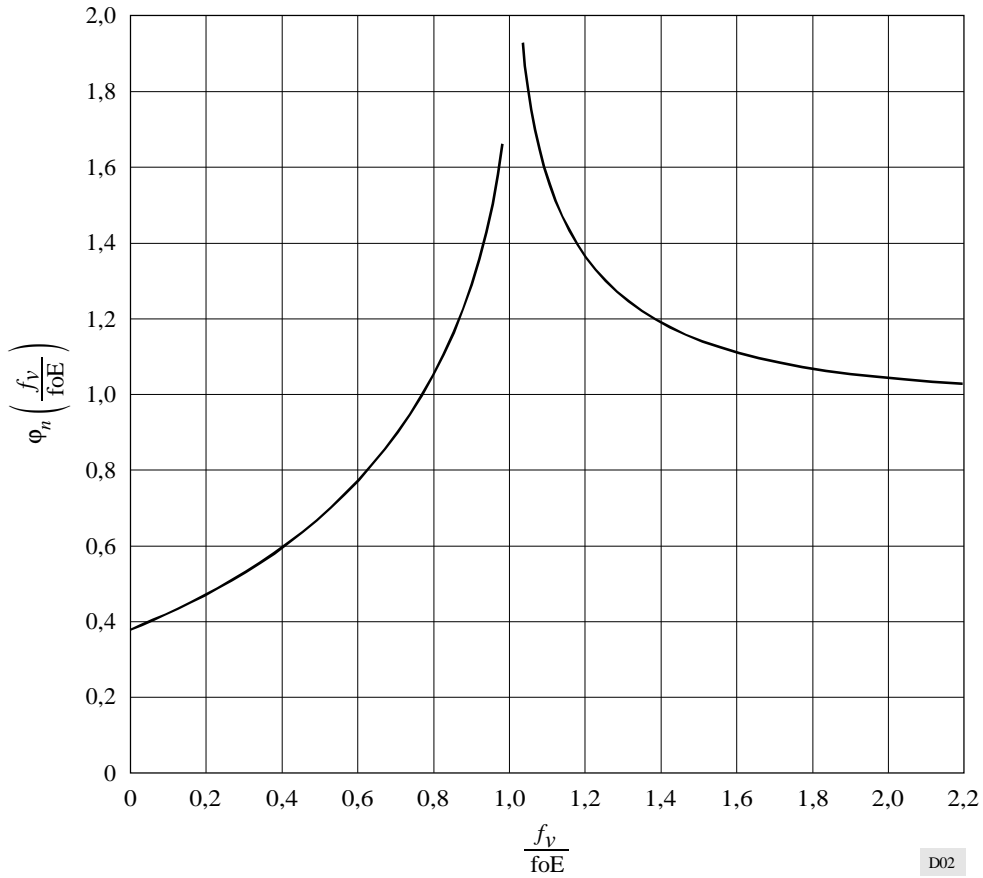
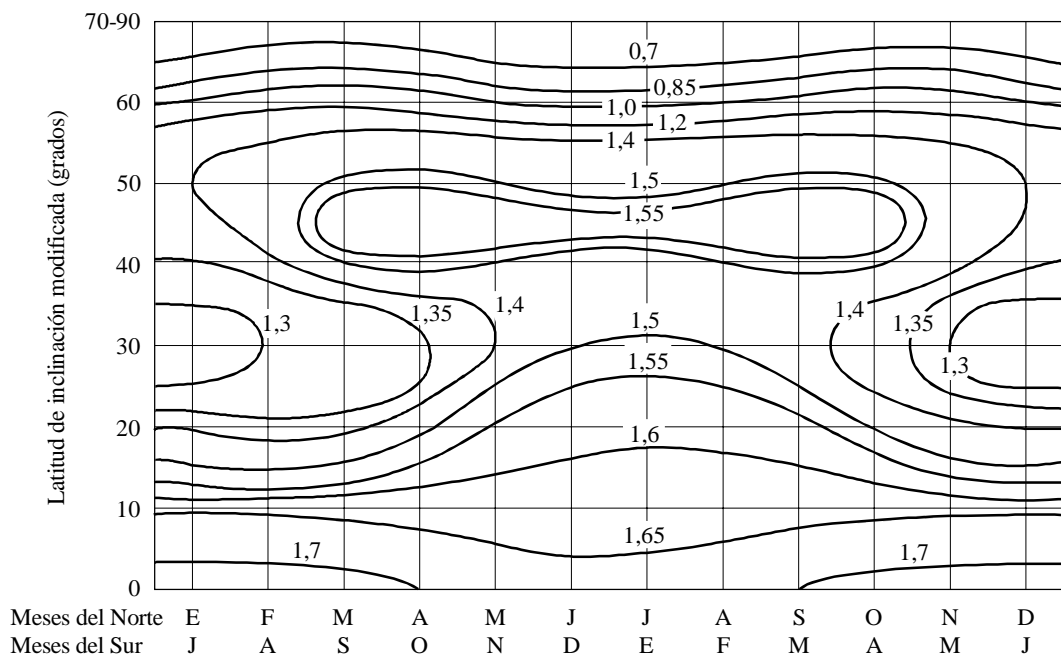


FIGURA 2
Factor de penetración de la capa de absorción, $\varphi_n \left(\frac{f_v}{foE} \right)$



D02

FIGURA 3
Exponente de absorción diurna, p



Meses del Norte E F M A M J J A S O N D
Meses del Sur J A S O N D J E F M A M J

D03

Prescindiendo de los modos apantallados por la capa E, se toma como valor mediano equivalente resultante de la intensidad de campo de la onda ionosférica, E_{ts} , el valor resultante cuadrático de la intensidad de campo para N modos, seleccionando N para que abarque hasta los tres modos F2 seleccionados más intensos y también, en los trayectos de hasta 4 000 km, los dos modos E más intensos, es decir:

$$E_{ts} = 10 \log_{10} \sum_{w=1}^N 10^{E_{tw} / 10} \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (25)$$

CUADRO 2

Valores de L_h que dan las atenuaciones aurorales y de otro tipo (dB)

| a) Distancias de transmisión inferiores o iguales a 2 500 km | | | | | | | | | |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---|
| Hora local t en el punto medio del trayecto, t | | | | | | | | | |
| | 01 ≤ t < 04 | 04 ≤ t < 07 | 07 ≤ t < 10 | 10 ≤ t < 13 | 13 ≤ t < 16 | 16 ≤ t < 19 | 19 ≤ t < 22 | 22 ≤ t < 01 | |
| G_n | | | | | | | | | |
| 77,5° ≤ G_n | 2,0 | 6,6 | 6,2 | 1,5 | 0,5 | 1,4 | 1,5 | 1,0 | I |
| 72,5° ≤ G_n < 77,5° | 3,4 | 8,3 | 8,6 | 0,9 | 0,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | n |
| 67,5° ≤ G_n < 72,5° | 6,2 | 15,6 | 12,8 | 2,3 | 1,5 | 4,6 | 7,0 | 5,0 | v |
| 62,5° ≤ G_n < 67,5° | 7,0 | 16,0 | 14,0 | 3,6 | 2,0 | 6,8 | 9,8 | 6,6 | i |
| 57,5° ≤ G_n < 62,5° | 2,0 | 4,5 | 6,6 | 1,4 | 0,8 | 2,7 | 3,0 | 2,0 | e |
| 52,5° ≤ G_n < 57,5° | 1,3 | 1,0 | 3,2 | 0,3 | 0,4 | 1,8 | 2,3 | 0,9 | r |
| 47,5° ≤ G_n < 52,5° | 0,9 | 0,6 | 2,2 | 0,2 | 0,2 | 1,2 | 1,5 | 0,6 | n |
| 42,5° ≤ G_n < 47,5° | 0,4 | 0,3 | 1,1 | 0,1 | 0,1 | 0,6 | 0,7 | 0,3 | o |
| 77,5° ≤ G_n | 1,4 | 2,5 | 7,4 | 3,8 | 1,0 | 2,4 | 2,4 | 3,3 | E |
| 72,5° ≤ G_n < 77,5° | 3,3 | 11,0 | 11,6 | 5,1 | 2,6 | 4,0 | 6,0 | 7,0 | q |
| 67,5° ≤ G_n < 72,5° | 6,5 | 12,0 | 21,4 | 8,5 | 4,8 | 6,0 | 10,0 | 13,7 | u |
| 62,5° ≤ G_n < 67,5° | 6,7 | 11,2 | 17,0 | 9,0 | 7,2 | 9,0 | 10,9 | 15,0 | i |
| 57,5° ≤ G_n < 62,5° | 2,4 | 4,4 | 7,5 | 5,0 | 2,6 | 4,8 | 5,5 | 6,1 | n |
| 52,5° ≤ G_n < 57,5° | 1,7 | 2,0 | 5,0 | 3,0 | 2,2 | 4,0 | 3,0 | 4,0 | o |
| 47,5° ≤ G_n < 52,5° | 1,1 | 1,3 | 3,3 | 2,0 | 1,4 | 2,6 | 2,0 | 2,6 | c |
| 42,5° ≤ G_n < 47,5° | 0,5 | 0,6 | 1,6 | 1,0 | 0,7 | 1,3 | 1,0 | 1,3 | c |
| 77,5° ≤ G_n | 2,2 | 2,7 | 1,2 | 2,3 | 2,2 | 3,8 | 4,2 | 3,8 | V |
| 72,5° ≤ G_n < 77,5° | 2,4 | 3,0 | 2,8 | 3,0 | 2,7 | 4,2 | 4,8 | 4,5 | e |
| 67,5° ≤ G_n < 72,5° | 4,9 | 4,2 | 6,2 | 4,5 | 3,8 | 5,4 | 7,7 | 7,2 | r |
| 62,5° ≤ G_n < 67,5° | 6,5 | 4,8 | 9,0 | 6,0 | 4,8 | 9,1 | 9,5 | 8,9 | a |
| 57,5° ≤ G_n < 62,5° | 3,2 | 2,7 | 4,0 | 3,0 | 3,0 | 6,5 | 6,7 | 5,0 | n |
| 52,5° ≤ G_n < 57,5° | 2,5 | 1,8 | 2,4 | 2,3 | 2,6 | 5,0 | 4,6 | 4,0 | o |
| 47,5° ≤ G_n < 52,5° | 1,6 | 1,2 | 1,6 | 1,5 | 1,7 | 3,3 | 3,1 | 2,6 | |
| 42,5° ≤ G_n < 47,5° | 0,8 | 0,6 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 1,6 | 1,5 | 1,3 | |

CUADRO 2 (Continuación)

| b) Distancias de transmisión superiores a 2 500 km | | | | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|--|
| Hora local t en el punto medio del trayecto, t | | | | | | | | | |
| $01 \leq t < 04$ $04 \leq t < 07$ $07 \leq t < 10$ $10 \leq t < 13$ $13 \leq t < 16$ $16 \leq t < 19$ $19 \leq t < 22$ $22 \leq t < 01$ | | | | | | | | | |
| G_n | | | | | | | | | |
| $77,5^\circ \leq G_n$ | 1,5 | 2,7 | 2,5 | 0,8 | 0,0 | 0,9 | 0,8 | 1,6 | I n v i e r n o |
| $72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$ | 2,5 | 4,5 | 4,3 | 0,8 | 0,3 | 1,6 | 2,0 | 4,8 | |
| $67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$ | 5,5 | 5,0 | 7,0 | 1,9 | 0,5 | 3,0 | 4,5 | 9,6 | |
| $62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$ | 5,3 | 7,0 | 5,9 | 2,0 | 0,7 | 4,0 | 4,5 | 10,0 | |
| $57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$ | 1,6 | 2,4 | 2,7 | 0,6 | 0,4 | 1,7 | 1,8 | 3,5 | |
| $52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$ | 0,9 | 1,0 | 1,3 | 0,1 | 0,1 | 1,0 | 1,5 | 1,4 | |
| $47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$ | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 0,1 | 0,1 | 0,6 | 1,0 | 0,5 | |
| $42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$ | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 0,3 | 0,5 | 0,4 | |
| $77,5^\circ \leq G_n$ | 1,0 | 1,2 | 2,7 | 3,0 | 0,6 | 2,0 | 2,3 | 1,6 | E q u i n o c c i o |
| $72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$ | 1,8 | 2,9 | 4,1 | 5,7 | 1,5 | 3,2 | 5,6 | 3,6 | |
| $67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$ | 3,7 | 5,6 | 7,7 | 8,1 | 3,5 | 5,0 | 9,5 | 7,3 | |
| $62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$ | 3,9 | 5,2 | 7,6 | 9,0 | 5,0 | 7,5 | 10,0 | 7,9 | |
| $57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$ | 1,4 | 2,0 | 3,2 | 3,8 | 1,8 | 4,0 | 5,4 | 3,4 | |
| $52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$ | 0,9 | 0,9 | 1,8 | 2,0 | 1,3 | 3,1 | 2,7 | 2,0 | |
| $47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$ | 0,6 | 0,6 | 1,2 | 1,3 | 0,8 | 2,0 | 1,8 | 1,3 | |
| $42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$ | 0,3 | 0,3 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 1,0 | 0,9 | 0,6 | |
| $77,5^\circ \leq G_n$ | 1,9 | 3,8 | 2,2 | 1,1 | 2,1 | 1,2 | 2,3 | 2,4 | V e r a n o |
| $72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$ | 1,9 | 4,6 | 2,9 | 1,3 | 2,2 | 1,3 | 2,8 | 2,7 | |
| $67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$ | 4,4 | 6,3 | 5,9 | 1,9 | 3,3 | 1,7 | 4,4 | 4,5 | |
| $62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$ | 5,5 | 8,5 | 7,6 | 2,6 | 4,2 | 3,2 | 5,5 | 5,7 | |
| $57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$ | 2,8 | 3,8 | 3,7 | 1,4 | 2,7 | 1,6 | 4,5 | 3,2 | |
| $52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$ | 2,2 | 2,4 | 2,2 | 1,0 | 2,2 | 1,2 | 4,4 | 2,5 | |
| $47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$ | 1,4 | 1,6 | 1,4 | 0,6 | 1,4 | 0,8 | 2,9 | 1,6 | |
| $42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$ | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,3 | 0,7 | 0,4 | 1,4 | 0,8 | |

5.2 Trayectos superiores a 9 000 km

En este método, se hacen las previsiones dividiendo el trayecto en un número mínimo, n , de saltos de longitud igual, ninguno superior a 4 000 km.

La intensidad de campo mediana resultante E_{tl} viene dada por la fórmula:

$$E_{tl} = E_0 \left[1 - \frac{(f_M + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2 + (f_L + f_H)^2} \left[\frac{(f_L + f_H)^2}{(f + f_H)^2} + \frac{(f + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2} \right] \right] - 36,4 + P_t + G_{tl} + G_{ap} - L_y \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (26)$$

en la que E_0 es la intensidad de campo en el espacio libre para una p.i.r.e. de 3 MW. En este caso:

$$E_0 = 139,6 - 20 \log p' \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (27)$$

donde p' se calcula por las ecuaciones (17) y (11) con $h_r = 300$ km.

G_H : valor más alto de la ganancia de la antena de transmisión para el acimut requerido en la gama de elevación 0 a 8° (dB)

G_{ap} : aumento de la intensidad de campo debido al enfoque (convergencia) a largas distancias, dado por:

$$G_{ap} = 10 \log \frac{D}{R_0 |\sin(D/R_0)|} \quad \text{dB} \quad (28)$$

Como el valor de G_{ap} dado por la fórmula anterior tiende a infinito cuando D es un múltiplo de πR_0 , su valor se limita a 15 dB.

L_y : término con un concepto similar a L_z . El valor recomendado actual es -3,7 dB.

NOTA 1 – Debe señalarse que los valores de L_y y L_z dependen de los elementos del método de predicción, por lo que cualesquiera cambios en estos elementos deben ir acompañados idealmente por la revisión de los valores L_y y L_z .

f_H : media de los valores de la girofrecuencia de los electrones determinados en los puntos de control del Cuadro 1a)

f_M : frecuencia de referencia superior. Se determina por separado para los dos puntos de control indicados en el Cuadro 1a) y se toma el valor más bajo de los dos:

$$f_M = K \cdot f_g \quad \text{MHz} \quad (29)$$

$$K = 1,2 + W \frac{f_g}{f_{g,mediodía}} + X \left[\sqrt[3]{\frac{f_{g,mediodía}}{f_g}} - 1 \right] + Y \left[\frac{f_{g,mín}}{f_{g,mediodía}} \right]^2 \quad (30)$$

f_g : F2(4000)MUF = 1,1 F2(3000)MUF

$f_{g,mediodía}$: valor de f_g a la hora local del mediodía

$f_{g,mín}$: valor más bajo de f_g durante 24 h.

Los valores de W , X e Y vienen dados en el Cuadro 3. El acimut del trayecto del círculo máximo se determina en el punto medio del trayecto total y este ángulo se utiliza para la interpolación lineal de los ángulos entre los valores Este-Oeste y Norte-Sur.

CUADRO 3

Valores de W , X e Y utilizados para determinar el factor de corrección K

| | W | X | Y |
|------------|-----|-----|-----|
| Este-Oeste | 0,1 | 1,2 | 0,6 |
| Norte-Sur | 0,2 | 0,2 | 0,4 |

f_L : frecuencia de referencia inferior

$$f_L = \left(5,3 \times I \left[\frac{(1 + 0,009 R_{12}) \sum_1^{2n} \cos \frac{1}{2} \chi}{\cos i_{90} \log_e \left[\frac{9,5 \times 10^6}{p'} \right]} \right]^{\frac{1}{2}} - f_H \right) \cdot A_w \quad \text{MHz} \quad (31)$$

donde R_{12} no satura para los valores más altos.

En la suma, el valor de χ se calcula para cada paso del trayecto del rayo a la altura de 90 km. Cuando $\chi > 90^\circ$, $\cos^{1/2}\chi$ se considera igual a cero.

i_{90} : ángulo de incidencia a la altura de 90 km

I : viene dado en el Cuadro 4.

CUADRO 4

Valores de I utilizados en la expresión de f_L

| Latitudes geográficas | | Mes | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------|------|------|---|---|------|------|------|------|---|---|------|------|
| Un terminal | Otro terminal | E | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
| > 35° N | > 35° N | 1,1 | 1,05 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,05 | 1,1 |
| > 35° N | 35° N-35° S | 1,05 | 1,02 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,02 | 1,05 |
| > 35° N | > 35° S | 1,05 | 1,02 | 1 | 1 | 1,02 | 1,05 | 1,05 | 1,02 | 1 | 1 | 1,02 | 1,05 |
| 35° N-35° S | 35° N-35° S | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 35° N-35° S | > 35° S | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,02 | 1,05 | 1,05 | 1,02 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| > 35° S | > 35° S | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,05 | 1,1 | 1,1 | 1,05 | 1 | 1 | 1 | 1 |

A_w : factor de anomalía invernal determinado en la mitad del trayecto, que es igual a la unidad para latitudes geográficas comprendidas entre 0° y 30° y a 90° y alcanza los valores máximos indicados en el Cuadro 5 para 60° de latitud. Los valores para latitudes intermedias se determinan por interpolación lineal.

CUADRO 5

Valores del factor de anomalía invernal, A_w , a 60° de latitud geográfica, utilizados en la ecuación para f_L

| Hemisferio | Mes | | | | | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | E | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
| Norte | 1,30 | 1,15 | 1,03 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,03 | 1,15 | 1,30 |
| Sur | 1 | 1 | 1 | 1,03 | 1,15 | 1,30 | 1,30 | 1,15 | 1,03 | 1 | 1 | 1 |

Los valores de f_L se calculan para cada hora hasta el instante t_r en que $f_L \leq 2f_{LN}$

siendo:

$$f_{LN} = \sqrt{\frac{D}{3000}} \quad \text{MHz} \quad (32)$$

Durante las tres horas siguientes f_L se calcula según la fórmula:

$$f_L = 2f_{LN} e^{-0,23 t} \quad (33)$$

siendo t el número de horas después del instante t_r . Para las horas siguientes $f_L = f_{LN}$ hasta el momento en que la ecuación (31) da un valor más elevado.

5.3 Trayectos comprendidos entre 7 000 y 9 000 km

En esta gama de distancias, la intensidad de campo mediana de la onda ionosférica E_{ti} se determina por interpolación entre los valores de E_{ts} y E_{tl} . E_{ts} es el valor resultante cuadrático de las intensidades de campo dado por la ecuación (25) para hasta tres modos más intensos de los seis modos F2 posibles que cumplen los tres criterios del § 5.1.1. E_{tl} se refiere a un modo mixto definido por la ecuación (26).

$$E_{ti} = 100 \log_{10} X_i \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (34)$$

con

$$X_i = X_s + \frac{D - 7000}{2000} (X_l - X_s)$$

donde: $X_s = 10^{0,01} E_{ts}$

y $X_l = 10^{0,01} E_{tl}$

La MUF básica del trayecto es igual al menor de los valores de $F2(d_{m\acute{a}x})MUF$ dados por la ecuación (3) en los dos puntos de control indicados en el Cuadro 1a).

6 Potencia intermedia disponible en el receptor

A distancias de hasta 7 000 km, para las cuales la intensidad de campo se calcula por el método del § 5.1, para un modo w determinado con una intensidad de campo de onda ionosférica E_{rw} (dB(1 $\mu\text{V/m}$)) a una frecuencia f (MHz), la potencia de señal disponible P_{rw} (dBW) procedente de una antena receptora exenta de pérdidas y con ganancia G_{rw} (dB con relación a un radiador isótopo) en la dirección de incidencia de la señal, es:

$$P_{rw} = E_{rw} + G_{rw} - 20 \log_{10} f - 107,2 \quad \text{dBW} \quad (35)$$

La potencia intermedia de señal disponible resultante P_r (dBW) viene dada por la sumatoria de las potencias originadas por los distintos modos; la contribución de cada modo depende de la ganancia de la antena receptora en la dirección de incidencia del modo. Para N modos que contribuyen a la sumatoria se tiene:

$$P_r = 10 \log_{10} \sum_{w=1}^N 10^{P_{rw}/10} \quad \text{dBW} \quad (36)$$

A distancias superiores a 9 000 km, para las cuales la intensidad de campo se calcula por el método del § 5.2, la intensidad de campo E_{tl} es la resultante de los modos compuestos. En este caso, P_r se determina mediante la ecuación (35), donde G_{rw} es el valor más grande de la ganancia de la antena receptora en el acimut considerado con un ángulo de elevación de 0 a 8°.

En la gama intermedia de 7 000 a 9 000 km, la potencia se determina mediante la ecuación (34) empleando las potencias correspondientes a E_{ts} y E_{tl} .

7 Valor intermedio mensual de la relación señal/ruido

En la Recomendación UIT-R P.372 se proporcionan valores de la potencia intermedia de ruido atmosférico para la recepción con una antena monopolo vertical corta sin pérdidas encima de un suelo perfecto y también se indican las intensidades correspondientes de ruido artificial y ruido cósmico. Sea F_a (dB(kTb)) el factor de ruido externo resultante a la frecuencia f (MHz), cuando la recepción se efectúa con el referido monopolo vertical corto sin pérdidas ideal, sobre un suelo plano perfectamente conductor, con k la constante de Boltzmann y T una temperatura de referencia de 288 K. En general, cuando se utiliza otra antena de recepción práctica el factor de ruido resultante puede diferir de este valor de F_a (véase la Recomendación UIT-R P.372). No obstante, en ausencia de datos completos de medición del ruido para diferentes antenas, es apropiado suponer, como primera aproximación, que se aplica la misma F_a . Por consiguiente, la relación señal/ruido S/N (dB) obtenida en una anchura de banda b (Hz) es:

$$S/N = P_r - F_a - 10 \log_{10} b + 204 \quad (37)$$

8 Relaciones señal/ruido correspondientes a otros porcentajes de tiempo

Se utilizan las ecuaciones (11) y (12) del Informe UIT-R P.266 para determinar la relación señal/ruido correspondiente a un porcentaje de tiempo concreto en función de las desviaciones decilas durante una hora y de un día a otro de las señales y del ruido. Los márgenes de desvanecimiento de la señal son los adoptados por la segunda reunión de la CAMR HFBC-87 con una desviación decila a corto plazo de 5 dB del decilo superior y 8 dB del decilo inferior. Para el desvanecimiento de la señal a largo plazo se toman las desviaciones decilas en función de la relación entre la frecuencia de funcionamiento y la MUF básica del trayecto, según se indica en el Cuadro 2 de la Recomendación UIT-R P.842.

En el caso del ruido atmosférico, las desviaciones decilas de la potencia de ruido originadas por la variabilidad de un día a otro, se toman de la Recomendación UIT-R P.372. Actualmente no se aplica ningún margen para la variabilidad durante una hora. Para el ruido artificial, en ausencia de información directa sobre la variabilidad temporal, se toman las desviaciones decilas indicadas en la Recomendación UIT-R P.372, que están estrictamente relacionadas con una combinación de variabilidad temporal y espacial. La variabilidad decila durante una hora y de un día a otro combinada del ruido galáctico se considera igual a ± 2 dB.

9 Frecuencia mínima utilizable (LUF)

La LUF se define en la Recomendación UIT-R P.373. Según esta definición, la LUF es la frecuencia más baja, redondeada al 0,1 MHz más próximo, a la que la relación señal/ruido mediana mensual permite alcanzar el valor requerido de relación señal/ruido.

10 Fiabilidad básica del circuito

La fiabilidad básica del circuito se define en la Recomendación UIT-R P.842. Se evalúa sobre la base de las relaciones señal/ruido y teniendo en cuenta las variaciones del decilo durante una hora y de un día a otro de la intensidad de campo de la señal y del ruido de fondo. La distribución en torno al valor mediano se formula de acuerdo con la Recomendación UIT-R P.842. Cabe observar que este método no prevé ningún margen para la degradación del sistema debida a la dispersión de la señal, que puede revestir una importancia considerable para las transmisiones digitales.
