

RECOMENDACIÓN UIT-R P.1240*

**MÉTODOS DEL UIT-R PARA LA 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)

(1997)

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;
- b) que la Recomendación UIT-R P.1239 contiene cartogramas de características ionosféricas,

recomienda

- 1 que para la predicción de la MUF básica y operacional se haga uso de las fórmulas contenidas en el Anexo 1 (para las definiciones, véase la Recomendación UIT-R P.373);
- 2 que para la predicción de los trayectos del rayo se haga uso de las fórmulas contenidas en el Anexo 2.

ANEXO 1

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.

* La Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones efectuó modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2000 de conformidad con la Resolución UIT-R 44.

** Los programas de computador asociados con los procedimientos de predicción y los datos descritos en la presente Recomendación están disponibles en la páginas del sitio web del UIT-R relativas a la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones.

2 Consideraciones sobre el modo

Los modos considerados son los siguientes:

1F2	0 a $d_{máx}$
Modos de orden superior a F2	más de $d_{máx}$
1F1	2 000-3 400 km
1E	0-2 000 km
2E	2 000-4 000 km

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

$$d_{máx} = 4\,780 + (12\,610 + 2\,140/x^2 - 49\,720/x^4 - 688\,900/x^6)(1/B - 0,303)$$

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 $x = \text{foF2}/\text{foE}$, 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 $d_{máx}$

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

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

siendo:

f_H : girofrecuencia adecuada (véase la Recomendación UIT-R P.1239)

y:

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

$$\text{con } Z = 1 - 2D/d_{máx}$$

C_{3000} : valor de C_D para $D = 3\,000$ 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 $d_{máx}$ 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 $d_{máx}$

Los valores de $F2(d_{máx})$ 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 2 000 y 3 400 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 la Recomendación UIT-R P.1239) 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:

$$\begin{aligned} J_0 &= 0,16 + 2,64 \times 10^{-3} D - 0,40 \times 10^{-6} D^2 \\ J_{100} &= -0,52 + 2,69 \times 10^{-3} D - 0,39 \times 10^{-6} D^2 \end{aligned}$$

y donde D es la distancia de círculo máximo (km) (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 la Recomendación UIT-R P.1239) y el factor M_E . Basándose en cálculos del trayecto del rayo para un modelo parabólico de la capa E con $hmE = 110$ km, $ymE = 20$ 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:

$$x = \frac{D - 1150}{1150}$$

siendo D la distancia de círculo máximo (km).

5.2 Distancia sobre el suelo entre 2 000 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 1. 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 1

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

Potencia isótropa 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 2 si la MUF básica del trayecto está determinada por un modo F2.

CUADRO 2

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 la latitud geográfica de mitad del trayecto λ (Norte o Sur del Ecuador)

$\lambda \backslash t$	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
65-75°	0,68	0,71	0,75	0,76	0,75	0,70	n
55-65°	0,74	0,76	0,80	0,80	0,82	0,73	v
45-55°	0,79	0,78	0,83	0,85	0,84	0,76	i
35-45°	0,81	0,79	0,85	0,87	0,89	0,77	e
25-35°	0,81	0,74	0,86	0,82	0,85	0,78	r
15-25°	0,78	0,67	0,87	0,75	0,77	0,79	n
< 15°	0,71	0,70	0,88	0,86	0,87	0,79	o
> 75°	0,67	0,72	0,74	0,73	0,80	0,65	E
65-75°	0,70	0,75	0,76	0,74	0,82	0,69	q
55-65°	0,73	0,78	0,80	0,75	0,81	0,73	u
45-55°	0,75	0,80	0,81	0,76	0,81	0,76	i
35-45°	0,77	0,81	0,81	0,77	0,80	0,78	n
25-35°	0,78	0,80	0,82	0,78	0,81	0,74	c
15-25°	0,77	0,75	0,83	0,81	0,83	0,69	c
< 15°	0,76	0,66	0,86	0,89	0,86	0,75	o
> 75°	0,68	0,79	0,84	0,87	0,85	0,76	V
65-75°	0,70	0,81	0,83	0,86	0,86	0,77	e
55-65°	0,72	0,84	0,83	0,84	0,86	0,81	r
45-55°	0,75	0,85	0,82	0,83	0,85	0,84	a
35-45°	0,79	0,85	0,80	0,82	0,83	0,85	n
25-35°	0,79	0,82	0,78	0,80	0,81	0,80	o
15-25°	0,77	0,78	0,77	0,79	0,79	0,73	o
< 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 λ (Norte o Sur del Ecuador)

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

Inviero: 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 2 (*continuación*)

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

$\lambda \backslash t$	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
65-75°	0,69	0,74	0,77	0,72	0,72	0,78	n
55-65°	0,77	0,78	0,81	0,80	0,79	0,82	v
45-55°	0,83	0,80	0,84	0,87	0,84	0,86	i
35-45°	0,86	0,81	0,87	0,90	0,87	0,87	e
25-35°	0,83	0,76	0,89	0,90	0,88	0,86	r
15-25°	0,78	0,70	0,89	0,89	0,89	0,83	n
< 15°	0,83	0,76	0,89	0,90	0,89	0,84	o
<hr/>							
> 75°	0,66	0,67	0,75	0,66	0,70	0,72	E
65-75°	0,67	0,71	0,73	0,70	0,70	0,72	q
55-65°	0,69	0,75	0,71	0,71	0,71	0,72	u
45-55°	0,73	0,78	0,70	0,72	0,74	0,73	i
35-45°	0,79	0,82	0,75	0,78	0,80	0,84	n
25-35°	0,81	0,82	0,87	0,87	0,87	0,86	o
15-25°	0,81	0,77	0,89	0,92	0,90	0,85	c
< 15°	0,80	0,79	0,86	0,90	0,90	0,82	c
<hr/>							
> 75°	0,73	0,74	0,82	0,83	0,79	0,75	V
65-75°	0,75	0,75	0,77	0,80	0,80	0,77	e
55-65°	0,77	0,76	0,74	0,77	0,80	0,80	r
45-55°	0,79	0,76	0,73	0,75	0,80	0,84	a
35-45°	0,80	0,76	0,75	0,75	0,79	0,84	n
25-35°	0,81	0,76	0,82	0,81	0,79	0,83	o
15-25°	0,81	0,77	0,85	0,86	0,81	0,80	c
< 15°	0,80	0,79	0,86	0,89	0,85	0,78	i

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 2

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 espejular efectivo situado a la altura h_r .

En lo que sigue:

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

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

e: $y = x \text{ o } 1,8$ (el mayor valor).

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

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

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

$$= A_1 + B_1 \text{ en los demás casos}$$

$$\text{con: } A_1 = 140 + (H - 47) E_1$$

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

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

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 $x_r < 1$

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

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

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

$$\text{con: } A_2 = 151 + (H - 47) E_2$$

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

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

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

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:

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

$$\text{con: } J = -0,7126 y^3 + 5,863 y^2 - 16,13 y + 16,07$$

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