

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R P.676-10
(09/2013)

Atenuación debida a los gases atmosféricos

Serie P
Propagación de las ondas radioeléctricas



Unión
Internacional de
Telecomunicaciones

Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en el Anexo 1 a la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2014

© UIT 2014

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R P.676-10

Atenuación debida a los gases atmosféricos

(Cuestión UIT-R 201/3)

(1990-1992-1995-1997-1999-2001-2005-2007-2009-2012-2013)

Cometido

La presente Recomendación define métodos para evaluar la atenuación causada por los gases atmosféricos en trayectos terrenales y oblicuos mediante:

- a) una estimación de la atenuación causada por los gases, cuyo cálculo se efectúa sumando las rayas de absorción individuales, que es válida para la gama de frecuencias 1-1 000 GHz; y
- b) un método aproximado simplificado para evaluar la atenuación debida a los gases aplicable en la gama de frecuencias 1-350 GHz.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) la necesidad de evaluar la atenuación causada por los gases atmosféricos en trayectos terrenales y oblicuos,

recomienda

- 1** que, de manera general, se utilicen los procedimientos del Anexo 1 para calcular la atenuación debida a los gases en frecuencias de hasta 1 000 GHz;
- 2** que, para estimaciones aproximadas de la atenuación causada por los gases en la gama de frecuencias de 1 a 350 GHz, se utilice el procedimiento que se presenta en el Anexo 2, el cual requiere menos cálculos.

Anexo 1**Cálculo de la atenuación causada por los gases,
con el método raya por raya****1 Atenuación específica**

La atenuación específica en frecuencias de hasta 1 000 GHz debida al aire seco y al vapor de agua puede evaluarse con gran exactitud para cualquier valor de presión, temperatura y humedad. Para ello se suman cada una de las rayas de resonancia debidas al oxígeno y al vapor de agua, junto con los pequeños factores adicionales debidos al espectro de oxígeno no resonante de Debye, por debajo de 10 GHz, así como a la atenuación inducida por la presión del nitrógeno por encima de 100 GHz y al contenido de humedad por el exceso de absorción de vapor de agua, determinado de manera experimental. En la Fig. 1 se muestra la atenuación específica utilizando este modelo y calculada entre 0 y 1 000 GHz, en pasos de 1 GHz, para una presión de 1 013 hPa y una temperatura de 15° C, para los casos de densidad de vapor de agua de 7,5 g/m³ (Curva A) y de atmósfera seca (Curva B).

En las proximidades de los 60 GHz muchas rayas de absorción del oxígeno se fusionan, a presiones correspondientes al nivel del mar, para formar una sola banda ancha de absorción tal como se muestra de manera detallada en la Fig. 2. Esta Figura muestra asimismo la atenuación debida al oxígeno en alturas superiores, con las rayas individuales obtenidas a presiones inferiores. Algunas especies moleculares adicionales (por ejemplo especie isotópica del oxígeno, especie del oxígeno estimulada por vibración, ozono, especie isotópica del ozono, especie del ozono estimulada por vibración y otras especies menores) no se incluyen en el método de predicción raya a raya. Dichas rayas adicionales resultan insignificantes para atmósferas típicas, pero pueden resultar importantes para una atmósfera de aire seco.

Para obtener estimaciones rápidas y aproximadas de la atenuación específica a frecuencias de hasta 350 GHz, en los casos en que no se necesita una alta precisión, el Anexo 2 ofrece algoritmos simplificados para situaciones meteorológicas concretas.

La atenuación específica causada por los gases, γ , viene dada por la fórmula:

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0,1820 f N''(f) \text{ dB/km} \quad (1)$$

donde γ_o y γ_w son las atenuaciones específicas (dB/km) debidas al aire seco (atenuación causada por el oxígeno, atenuación del nitrógeno inducida por presión y la atenuación no resonante de Debye) y el vapor de agua, respectivamente y donde f es la frecuencia (GHz) y $N''(f)$ es la parte imaginaria del valor complejo de la refractividad, que depende de la frecuencia:

$$N''(f) = \sum_i S_i F_i + N''_D(f) \quad (2)$$

S_i es el valor de la i -ésima raya, F_i es el factor de forma de raya y la suma se extiende a todas las rayas (para frecuencias, f , por encima de la raya de oxígeno de 118,750343 GHz, sólo deben incluirse en la suma las rayas de oxígeno por encima de 60 GHz); la suma debe empezar en $i = 38$ vez de $i = 1$; $N''_D(f)$ es el espectro continuo de aire seco debido a la absorción del nitrógeno inducida por presión y al espectro de Debye.

El valor de la raya viene dado por:

$$\begin{aligned} S_i &= a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp [a_2 (1 - \theta)] && \text{para el oxígeno} \\ &= b_1 \times 10^{-1} e \theta^{3,5} \exp [b_2 (1 - \theta)] && \text{para el vapor de agua} \end{aligned} \quad (3)$$

donde:

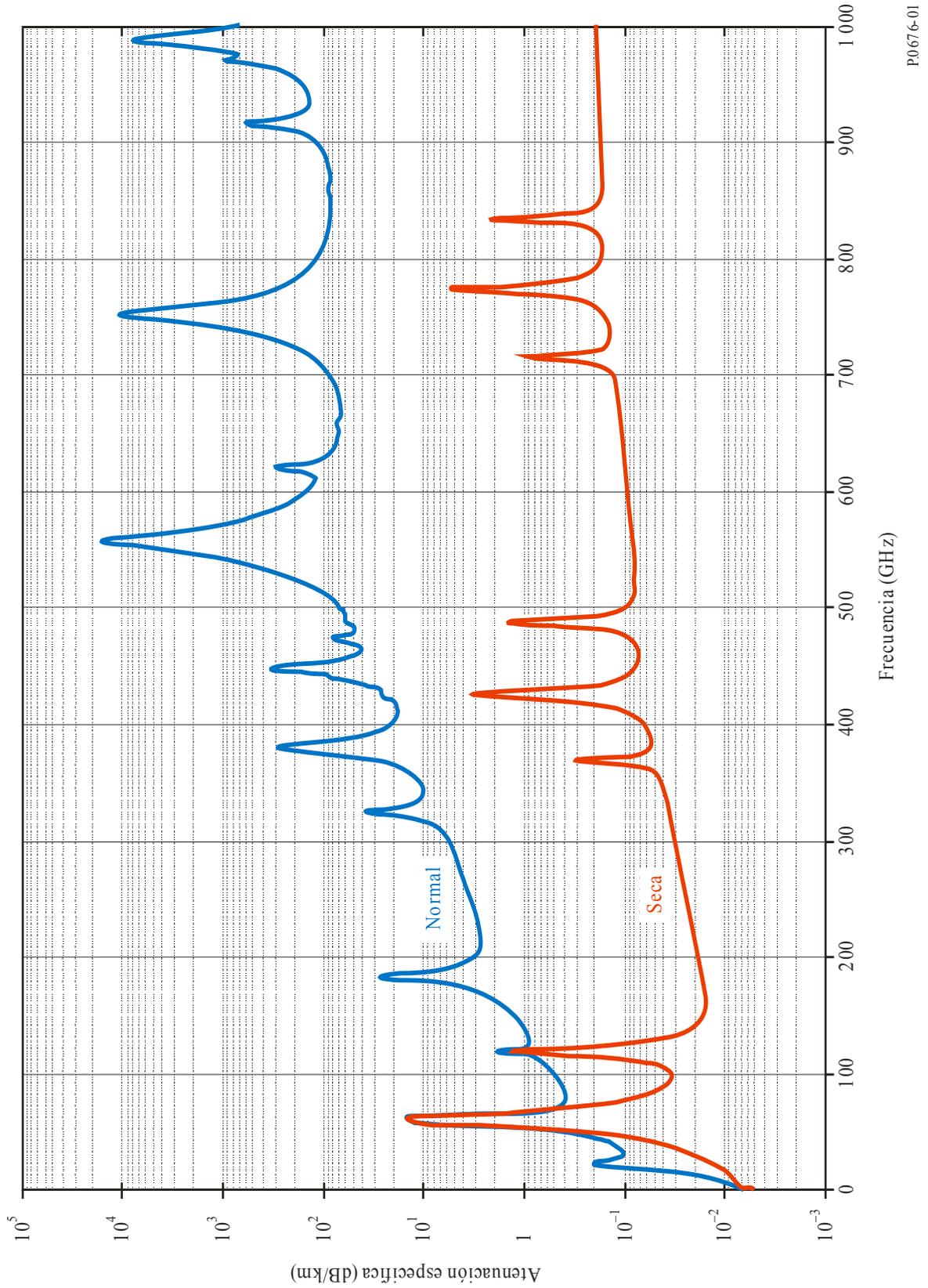
p : presión del aire seco (hPa)

e : presión parcial del vapor de agua (hPa) (presión barométrica total $p_{tot} = p + e$)

$\theta = 300/T$

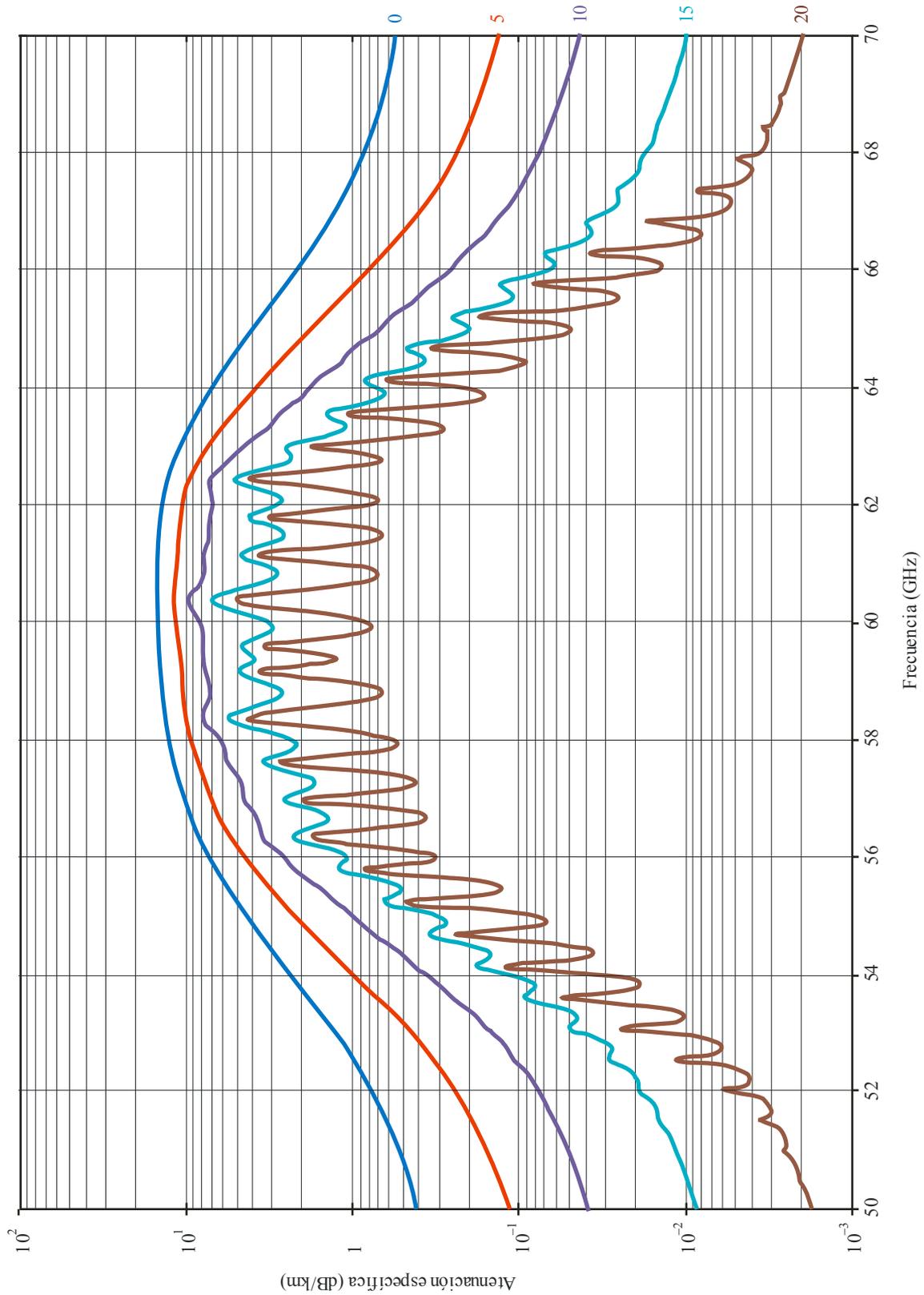
T : temperatura (K).

FIGURA 1
Atenuación específica debida a los gases atmosféricos, calculada en pasos de 1 GHz e incluyendo los centros de las rayas



P0676-01

FIGURA 2
Atenuación específica en la gama de 50-70 GHz a las alturas indicadas



Se deben utilizar valores locales de los perfiles de p , e y T medidos (por ejemplo, mediante radiosondas); no obstante, en ausencia de información local conviene utilizar el modelo de atmósferas de referencia descrito en la Recomendación UIT-R P.835. (Obsérvese que cuando se calcula la atenuación atmosférica total, se emplea la misma presión parcial del vapor de agua para calcular las atenuaciones debidas al aire seco y al vapor de agua.)

La presión parcial del vapor de agua, e , puede obtenerse a partir de la densidad de vapor de agua ρ utilizando la expresión:

$$e = \frac{\rho T}{216,7} \quad (4)$$

En el Cuadro 1 figuran los coeficientes a_1 , a_2 para el oxígeno y en el Cuadro 2, los coeficientes b_1 y b_2 para el vapor de agua.

El factor de forma de raya viene dado por:

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta (f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta (f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right] \quad (5)$$

donde f_i es la frecuencia de raya y Δf es la anchura de la raya:

$$\begin{aligned} \Delta f &= a_3 \times 10^{-4} (p \theta^{(0,8 - a_4)} + 1,1 e \theta) && \text{para el oxígeno} \\ &= b_3 \times 10^{-4} (p \theta^{b_4} + b_5 e \theta^{b_6}) && \text{para el vapor de agua} \end{aligned} \quad (6a)$$

La anchura de la raya Δf se modifica para tener en cuenta el ensanchamiento debido al efecto Doppler:

$$\begin{aligned} \Delta f &= \sqrt{\Delta f^2 + 2,25 \times 10^{-6}} && \text{para el oxígeno} \\ &= 0,535 \Delta f + \sqrt{0,217 \Delta f^2 + \frac{2,1316 \times 10^{-12} f_i^2}{\theta}} && \text{para el vapor de agua} \end{aligned}$$

δ es un factor de corrección que se introduce para tener en cuenta los efectos de interferencia en las rayas del oxígeno:

$$\begin{aligned} \delta &= (a_5 + a_6 \theta) \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0,8} && \text{para el oxígeno} \\ &= 0 && \text{para el vapor de agua} \end{aligned} \quad (7)$$

Los coeficientes espectroscópicos figuran en los Cuadros 1 y 2.

CUADRO 1

Datos espectroscópicos para la atenuación del oxígeno

f_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
50,474214	0,975	9,651	6,690	0,0	2,566	6,850
50,987745	2,529	8,653	7,170	0,0	2,246	6,800
51,503360	6,193	7,709	7,640	0,0	1,947	6,729
52,021429	14,320	6,819	8,110	0,0	1,667	6,640
52,542418	31,240	5,983	8,580	0,0	1,388	6,526
53,066934	64,290	5,201	9,060	0,0	1,349	6,206
53,595775	124,600	4,474	9,550	0,0	2,227	5,085
54,130025	227,300	3,800	9,960	0,0	3,170	3,750
54,671180	389,700	3,182	10,370	0,0	3,558	2,654
55,221384	627,100	2,618	10,890	0,0	2,560	2,952
55,783815	945,300	2,109	11,340	0,0	-1,172	6,135
56,264774	543,400	0,014	17,030	0,0	3,525	-0,978
56,363399	1331,800	1,654	11,890	0,0	-2,378	6,547
56,968211	1746,600	1,255	12,230	0,0	-3,545	6,451
57,612486	2120,100	0,910	12,620	0,0	-5,416	6,056
58,323877	2363,700	0,621	12,950	0,0	-1,932	0,436
58,446588	1442,100	0,083	14,910	0,0	6,768	-1,273
59,164204	2379,900	0,387	13,530	0,0	-6,561	2,309
59,590983	2090,700	0,207	14,080	0,0	6,957	-0,776
60,306056	2103,400	0,207	14,150	0,0	-6,395	0,699
60,434778	2438,000	0,386	13,390	0,0	6,342	-2,825
61,150562	2479,500	0,621	12,920	0,0	1,014	-0,584
61,800158	2275,900	0,910	12,630	0,0	5,014	-6,619
62,411220	1915,400	1,255	12,170	0,0	3,029	-6,759
62,486253	1503,000	0,083	15,130	0,0	-4,499	0,844
62,997984	1490,200	1,654	11,740	0,0	1,856	-6,675
63,568526	1078,000	2,108	11,340	0,0	0,658	-6,139
64,127775	728,700	2,617	10,880	0,0	-3,036	-2,895
64,678910	461,300	3,181	10,380	0,0	-3,968	-2,590
65,224078	274,000	3,800	9,960	0,0	-3,528	-3,680
65,764779	153,000	4,473	9,550	0,0	-2,548	-5,002
66,302096	80,400	5,200	9,060	0,0	-1,660	-6,091
66,836834	39,800	5,982	8,580	0,0	-1,680	-6,393
67,369601	18,560	6,818	8,110	0,0	-1,956	-6,475
67,900868	8,172	7,708	7,640	0,0	-2,216	-6,545
68,431006	3,397	8,652	7,170	0,0	-2,492	-6,600
68,960312	1,334	9,650	6,690	0,0	-2,773	-6,650
118,750334	940,300	0,010	16,640	0,0	-0,439	0,079

CUADRO 1 (Fin)

f_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
368,498246	67,400	0,048	16,400	0,0	0,000	0,000
424,763020	637,700	0,044	16,400	0,0	0,000	0,000
487,249273	237,400	0,049	16,000	0,0	0,000	0,000
715,392902	98,100	0,145	16,000	0,0	0,000	0,000
773,839490	572,300	0,141	16,200	0,0	0,000	0,000
834,145546	183,100	0,145	14,700	0,0	0,000	0,000

CUADRO 2

Datos espectroscópicos para la atenuación del vapor de agua

f_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
22,235080	0,1130	2,143	28,11	0,69	4,800	1,00
67,803960	0,0012	8,735	28,58	0,69	4,930	0,82
119,995940	0,0008	8,356	29,48	0,70	4,780	0,79
183,310091	2,4200	0,668	30,50	0,64	5,300	0,85
321,225644	0,0483	6,181	23,03	0,67	4,690	0,54
325,152919	1,4990	1,540	27,83	0,68	4,850	0,74
336,222601	0,0011	9,829	26,93	0,69	4,740	0,61
380,197372	11,5200	1,048	28,73	0,54	5,380	0,89
390,134508	0,0046	7,350	21,52	0,63	4,810	0,55
437,346667	0,0650	5,050	18,45	0,60	4,230	0,48
439,150812	0,9218	3,596	21,00	0,63	4,290	0,52
443,018295	0,1976	5,050	18,60	0,60	4,230	0,50
448,001075	10,3200	1,405	26,32	0,66	4,840	0,67
470,888947	0,3297	3,599	21,52	0,66	4,570	0,65
474,689127	1,2620	2,381	23,55	0,65	4,650	0,64
488,491133	0,2520	2,853	26,02	0,69	5,040	0,72
503,568532	0,0390	6,733	16,12	0,61	3,980	0,43
504,482692	0,0130	6,733	16,12	0,61	4,010	0,45
547,676440	9,7010	0,114	26,00	0,70	4,500	1,00
552,020960	14,7700	0,114	26,00	0,70	4,500	1,00
556,936002	487,4000	0,159	32,10	0,69	4,110	1,00
620,700807	5,0120	2,200	24,38	0,71	4,680	0,68
645,866155	0,0713	8,580	18,00	0,60	4,000	0,50
658,005280	0,3022	7,820	32,10	0,69	4,140	1,00
752,033227	239,6000	0,396	30,60	0,68	4,090	0,84
841,053973	0,0140	8,180	15,90	0,33	5,760	0,45
859,962313	0,1472	7,989	30,60	0,68	4,090	0,84

CUADRO 2 (Fin)

f_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
899,306675	0,0605	7,917	29,85	0,68	4,530	0,90
902,616173	0,0426	8,432	28,65	0,70	5,100	0,95
906,207325	0,1876	5,111	24,08	0,70	4,700	0,53
916,171582	8,3400	1,442	26,70	0,70	4,780	0,78
923,118427	0,0869	10,220	29,00	0,70	5,000	0,80
970,315022	8,9720	1,920	25,50	0,64	4,940	0,67
987,926764	132,1000	0,258	29,85	0,68	4,550	0,90
1 780,000000	22 300,0000	0,952	176,20	0,50	30,500	5,00

El contenido espectral de aire seco proviene del espectro de oxígeno no resonante de Debye, por debajo de 10 GHz, y de la atenuación del nitrógeno inducida por presión, por encima de 100 GHz.

$$N_D''(f) = f p \theta^2 \left[\frac{6,14 \times 10^{-5}}{d \left[1 + \left(\frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1,4 \times 10^{-12} p \theta^{1,5}}{1 + 1,9 \times 10^{-5} f^{1,5}} \right] \quad (8)$$

donde d es el parámetro de anchura de banda del espectro de Debye:

$$d = 5,6 \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0,8} \quad (9)$$

2 Atenuación del trayecto

2.1 Trayectos terrenales

Para los trayectos terrenales y los ligeramente inclinados junto al suelo, la atenuación en el trayecto, A , puede expresarse como sigue:

$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{dB} \quad (10)$$

donde r_0 es la longitud del trayecto (km).

2.2 Trayectos oblicuos

En este punto se presenta un método para integrar la atenuación específica calculada utilizando el modelo raya por raya antes citado, a diferentes presiones, temperaturas y humedades a través de la atmósfera. Por este medio, la atenuación en el trayecto para sistemas de comunicaciones de cualquier configuración geométrica y con enlaces dentro y fuera de la atmósfera de la Tierra, puede determinarse con precisión simplemente dividiendo la atmósfera en capas horizontales, especificando las características de los parámetros meteorológicos de presión, temperatura y humedad a lo largo del trayecto. A falta de datos locales, obtenidos con radiosonda por ejemplo, puede utilizarse el modelo normalizado de atmósferas de referencia de la Recomendación UIT-R P.835, tanto para

aplicaciones universales como en latitudes bajas (anual), medias (verano e invierno) y altas (verano e invierno).

La Fig. 3 muestra la atenuación cenital calculada en pasos de 1 GHz con este modelo para la atmósfera de referencia mundial según la Recomendación UIT-R P.835, con capas horizontales de 1 km de espesor. Presenta la suma de las atenuaciones producidas en cada capa, para los casos de atmósfera húmeda (Curva A) y de atmósfera seca (Curva B).

La atenuación total producida en trayectos oblicuos, $A(h, \varphi)$, a partir de una estación con altitud, h , y ángulo de elevación, φ , puede calcularse del modo siguiente cuando $\varphi \geq 0$:

$$A(h, \varphi) = \int_h^{\infty} \frac{\gamma(H)}{\text{sen } \Phi} dH \quad (11)$$

donde el valor de Φ puede determinarse como sigue, basándose en la ley de Snell en coordenadas polares:

$$\Phi = \arccos \left(\frac{c}{(r+H) \times n(H)} \right) \quad (12)$$

donde:

$$c = (r+h) \times n(h) \times \cos \varphi \quad (13)$$

donde $n(h)$ es el índice de refracción del radio atmosférico, calculado a partir de la presión, la temperatura y la presión del vapor de agua a lo largo del trayecto (véase la Recomendación UIT-R P.835) utilizando la Recomendación UIT-R P.453.

Por otra parte, cuando $\varphi < 0$, hay un altura mínima, $h_{mín}$, para la cual el haz radioeléctrico se hace paralelo a la superficie de la Tierra. El valor de $h_{mín}$ puede determinarse mediante la ecuación transcendental siguiente:

$$(r + h_{mín}) \times n(h_{mín}) = c \quad (14)$$

Ésta puede resolverse fácilmente repitiendo el cálculo siguiente, utilizando $h_{mín} = h$ como valor inicial:

$$h'_{mín} = \frac{c}{n(h_{mín})} - r \quad (15)$$

Por lo tanto, $A(h, \varphi)$ puede calcularse como sigue:

$$A(h, \varphi) = \int_{h_{mín}}^{\infty} \frac{\gamma(H)}{\text{sen } \Phi} dH + \int_{h_{mín}}^h \frac{\gamma(H)}{\text{sen } \Phi} dH \quad (16)$$

Al integrar las ecuaciones (11) y (16) se debe prestar atención al hecho de que el integrando se hace infinito para $\Phi = 0$. Sin embargo, esta singularidad puede eliminarse mediante una conversión de variables adecuada, por ejemplo, utilizando $u^4 = H - h$ en la ecuación (11) y $u^4 = H - h_{mín}$ en la ecuación (16).

Se puede obtener una solución numérica para la atenuación debida a los gases atmosféricos con el siguiente algoritmo.

Para calcular la atenuación total correspondiente a un enlace por satélite se necesita saber no sólo la atenuación específica en cada punto del enlace, sino también la longitud del trayecto para cada atenuación específica. Para determinar la longitud de los trayectos se necesita considerar también la curvatura de radiación debida a la forma esférica de la Tierra.

Si se utiliza la Fig. 4 como referencia, a_n es la longitud del trayecto a través de la capa n , con un espesor δ_n que tiene un índice de refracción n_n . α_n y β_n son los ángulos de incidencia de entrada y de salida. r_n son los radios a partir del centro de la Tierra hasta el comienzo de la capa n . Entonces a_n puede expresarse del siguiente modo:

$$a_n = -r_n \cos \beta_n + \frac{1}{2} \sqrt{4 r_n^2 \cos^2 \beta_n + 8 r_n \delta_n + 4 \delta_n^2} \quad (17)$$

El ángulo α_n puede calcularse a partir de:

$$\alpha_n = \pi - \arccos \left(\frac{-a_n^2 - 2 r_n \delta_n - \delta_n^2}{2 a_n r_n + 2 a_n \delta_n} \right) \quad (18)$$

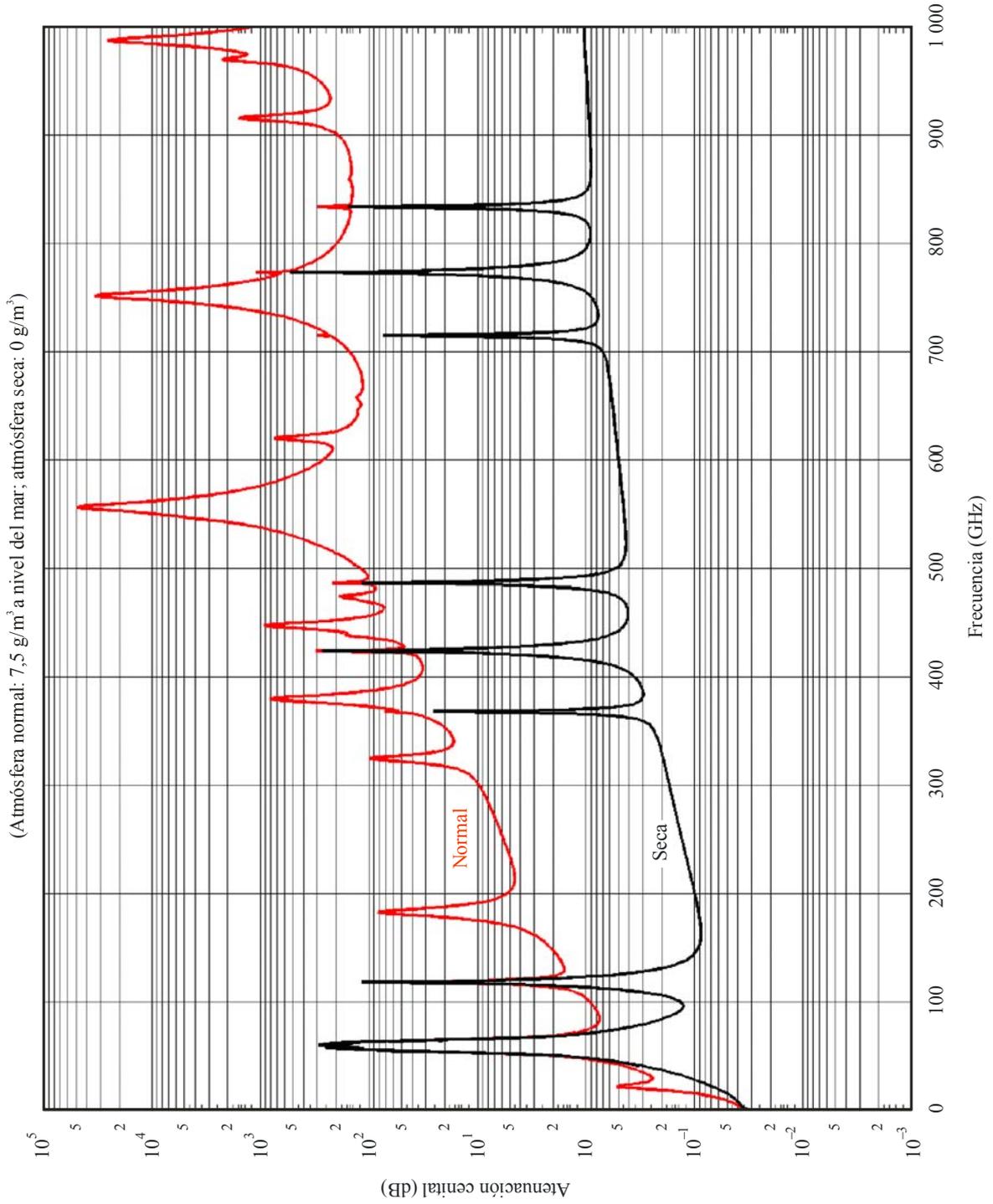
β_1 es el ángulo de incidencia en la estación terrena (el complemento del ángulo de elevación φ). β_{n+1} puede calcularse a partir de α_n utilizando la ley de Snell, cuya expresión en este caso será:

$$\beta_{n+1} = \arcsen \left(\frac{n_n}{n_{n+1}} \sen \alpha_n \right) \quad (19)$$

donde n_n y n_{n+1} son los índices de refracción de las capas n y $n+1$.

La ecuación (19) puede resultar inválida para ángulos de elevación muy bajos ($\varphi < 1^\circ$) cuando los datos de la radiosonda procedentes de ciertas regiones del mundo susceptibles de que aparezcan condiciones de propagación por conducto se utilizan como datos de partida. En tales casos, están presentes capas de aire con gradientes de refractividad radioeléctrica más pequeños en magnitud que -157 N/km y el algoritmo de trazado de rayos (ecuaciones (17) a (19)) basado en óptica geométrica, ya no es aplicable. La función arcsen de la ecuación (19) pasa a ser compleja en esas condiciones anómalas ya que su argumento es ligeramente superior a 1. Cabe señalar que la ecuación (19) es válida para todos los ángulos de elevación cuando las atmósferas normalizadas de referencia descritas en la Recomendación UIT-R P.835 se utilizan como base, ya que estas atmósferas idealizadas, evidentemente sin gradientes de refractividad negativa intensos, no favorecen estas condiciones de propagación anómalas.

FIGURA 3
Atenuación específica debida a los gases atmosféricos, calculada en pasos de 1 GHz e incluyendo los centros de las rayas



El término (de dispersión) restante dependiente de la frecuencia tiene una influencia marginal en el resultado (alrededor del 1%), pero puede calcularse este efecto a partir del método indicado en el Manual de Radiometeorología del UIT-R.

Puede obtenerse la atenuación total mediante la fórmula:

$$A_{gas} = \sum_{n=1}^k a_n \gamma_n \quad \text{dB} \quad (20)$$

donde γ_n es la atenuación específica obtenida mediante la ecuación (1).

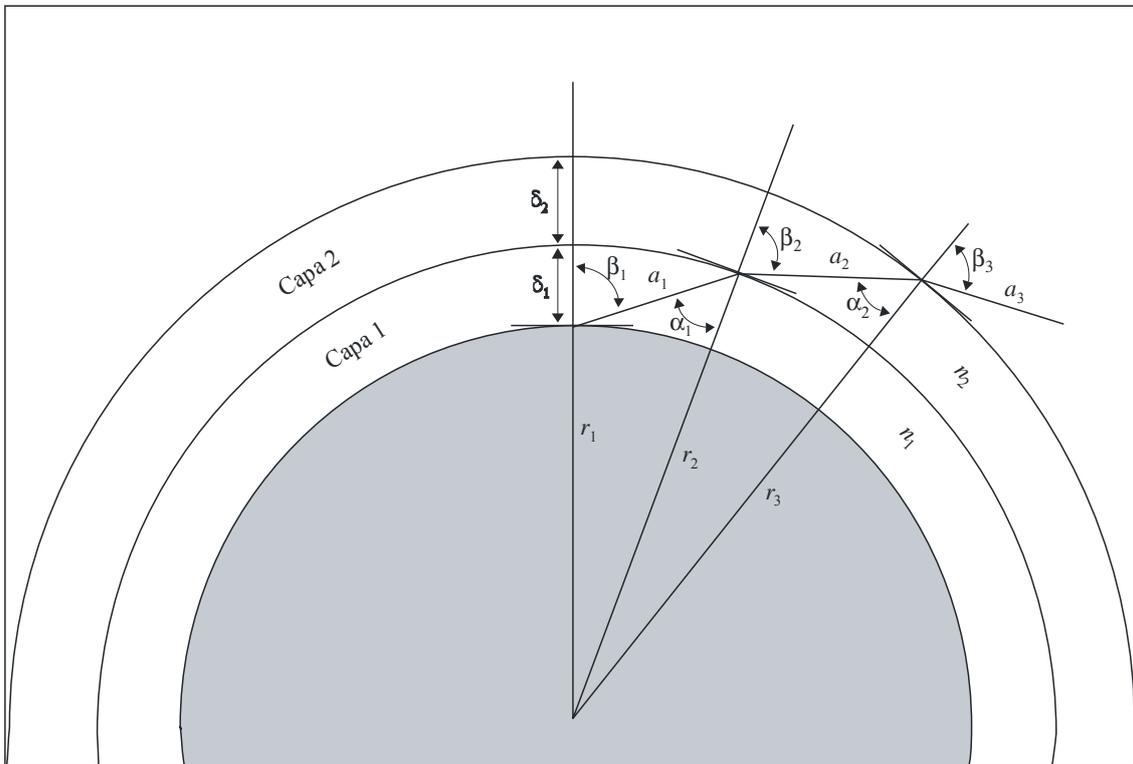
Para asegurar una estimación precisa de la atenuación en el trayecto, el espesor de las capas debe aumentar exponencialmente, desde 10 cm para la capa inferior (nivel del suelo) hasta 1 km a una altura de 100 km, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\delta_i = 0,0001 \exp \left\{ \frac{i - 1}{100} \right\} \quad \text{km} \quad (21)$$

para $i = 1$ a 922, observándose que $\delta_{922} \cong 1,0$ km y $\sum_{i=1}^{922} \delta_i \cong 100$ km.

Para aplicaciones Tierra-espacio, la integración debe llevarse a cabo por lo menos hasta 30 km, y hasta 100 km en las frecuencias de raya central del oxígeno.

FIGURA 4



3 Efectos de dispersión

Los efectos de dispersión se examinan en el Manual de Radiometeorología del UIT-R, que contiene un modelo para calcular la dispersión sobre la base del cálculo raya por raya. A efectos prácticos, los efectos de dispersión no deben imponer limitaciones importantes a los sistemas de comunicaciones terrenales en ondas milimétricas que operan con anchuras de banda de hasta unos pocos cientos de MHz en sistemas de corto alcance (por ejemplo, inferiores a unos 20 km), especialmente en las regiones de ventana del espectro correspondientes a frecuencias desplazadas de los centros con más rayas de absorción. Para los sistemas de comunicaciones por satélite, las longitudes de trayecto más largas a través de la atmósfera obligan a desplazar las frecuencias de funcionamiento hacia las regiones de ventana del espectro donde la atenuación atmosférica y la dispersión correspondiente sean bajas.

Anexo 2

Estimación aproximada de la atenuación causada por los gases en la gama de frecuencias 1-350 GHz

Este Anexo contiene algoritmos simplificados para una estimación rápida y aproximada de la atenuación causada por los gases para un número limitado de condiciones meteorológicas y una variedad limitada de configuraciones geométricas.

1 Atenuación específica

Las atenuaciones específicas debidas al aire seco y al vapor de agua, y consideradas a partir del nivel del mar hasta una altura de 10 km, pueden estimarse utilizando los siguientes algoritmos simplificados, que se basan en la adaptación de curvas al cálculo de raya por raya, y permiten los cálculos más exactos dentro de una media del $\pm 10\%$ para frecuencias desplazadas de los centros con más rayas de absorción. La diferencia absoluta entre los resultados obtenidos con estos algoritmos y con el cálculo raya por raya es generalmente menor de 0,1 dB/km y alcanza un máximo de 0,7 dB/km cerca de los 60 GHz. Para alturas superiores a 10 km, y en los casos en que se necesita una mayor precisión, se deberá utilizar el cálculo raya por raya.

En el caso de aire seco, la atenuación γ_o (dB/km) viene dada por las siguientes ecuaciones:

Para $f \leq 54$ GHz:

$$\gamma_o = \left[\frac{7,2r_t^{2,8}}{f^2 + 0,34r_p^2 r_t^{1,6}} + \frac{0,62\xi_3}{(54-f)^{1,16\xi_1} + 0,83\xi_2} \right] f^2 r_p^2 \times 10^{-3} \quad (22a)$$

Para $54 \text{ GHz} < f \leq 60 \text{ GHz}$:

$$\gamma_o = \exp \left[\frac{\ln \gamma_{54}}{24} (f-58)(f-60) - \frac{\ln \gamma_{58}}{8} (f-54)(f-60) + \frac{\ln \gamma_{60}}{12} (f-54)(f-58) \right] \quad (22b)$$

Para 60 GHz $< f \leq 62$ GHz:

$$\gamma_o = \gamma_{60} + (\gamma_{62} - \gamma_{60}) \frac{f - 60}{2} \quad (22c)$$

Para 62 GHz $< f \leq 66$ GHz:

$$\gamma_o = \exp \left[\frac{\ln \gamma_{62}}{8} (f - 64)(f - 66) - \frac{\ln \gamma_{64}}{4} (f - 62)(f - 66) + \frac{\ln \gamma_{66}}{8} (f - 62)(f - 64) \right] \quad (22d)$$

Para 66 GHz $< f \leq 120$ GHz:

$$\gamma_o = \left\{ 3,02 \times 10^{-4} r_t^{3,5} + \frac{0,283 r_t^{3,8}}{(f - 118,75)^2 + 2,91 r_p^2 r_t^{1,6}} + \frac{0,502 \xi_6 [1 - 0,0163 \xi_7 (f - 66)]}{(f - 66)^{1,4346 \xi_4} + 1,15 \xi_5} \right\} f^2 r_p^2 \times 10^{-3} \quad (22e)$$

Para 120 GHz $< f \leq 350$ GHz:

$$\gamma_o = \left[\frac{3,02 \times 10^{-4}}{1 + 1,9 \times 10^{-5} f^{1,5}} + \frac{0,283 r_t^{0,3}}{(f - 118,75)^2 + 2,91 r_p^2 r_t^{1,6}} \right] f^2 r_p^2 r_t^{3,5} \times 10^{-3} + \delta \quad (22f)$$

siendo:

$$\xi_1 = \varphi(r_p, r_t, 0,0717; -1,8132; 0,0156; -1,6515) \quad (22g)$$

$$\xi_2 = \varphi(r_p, r_t, 0,5146; -4,6368; -0,1921; -5,7416) \quad (22h)$$

$$\xi_3 = \varphi(r_p, r_t, 0,3414; -6,5851; 0,2130; -8,5854) \quad (22i)$$

$$\xi_4 = \varphi(r_p, r_t, -0,0112; 0,0092; -0,1033; -0,0009) \quad (22j)$$

$$\xi_5 = \varphi(r_p, r_t, 0,2705; -2,7192; -0,3016; -4,1033) \quad (22k)$$

$$\xi_6 = \varphi(r_p, r_t, 0,2445; -5,9191; 0,0422; -8,0719) \quad (22l)$$

$$\xi_7 = \varphi(r_p, r_t, -0,1833; 6,5589; -0,2402; 6,131) \quad (22m)$$

$$\gamma_{54} = 2,192 \varphi(r_p, r_t, 1,8286; -1,9487; 0,4051; -2,8509) \quad (22n)$$

$$\gamma_{58} = 12,59 \varphi(r_p, r_t, 1,0045; 3,5610; 0,1588; 1,2834) \quad (22o)$$

$$\gamma_{60} = 15,0 \varphi(r_p, r_t, 0,9003; 4,1335; 0,0427; 1,6088) \quad (22p)$$

$$\gamma_{62} = 14,28 \varphi(r_p, r_t, 0,9886; 3,4176; 0,1827; 1,3429) \quad (22q)$$

$$\gamma_{64} = 6,819 \varphi(r_p, r_t, 1,4320; 0,6258; 0,3177; -0,5914) \quad (22r)$$

$$\gamma_{66} = 1,908 \varphi(r_p, r_t, 2,0717; -4,1404; 0,4910; -4,8718) \quad (22s)$$

$$\delta = -0,00306 \varphi(r_p, r_t, 3,211; -14,94; 1,583; -16,37) \quad (22t)$$

$$\varphi(r_p, r_t, a, b, c, d) = r_p^a r_t^b \exp[c(1 - r_p) + d(1 - r_t)] \quad (22u)$$

donde:

- f : frecuencia (GHz)
- $r_p = p/1013$
- $r_t = 288/(273 + t)$
- p : presión (hPa)
- t : temperatura (°C), donde los valores medios de la temperatura pueden extraerse de los mapas que aparecen en la Recomendación UIT-R P.1510, cuando no se disponga de datos adecuados sobre la temperatura.

En el caso de vapor de agua, la atenuación γ_w (dB/km) viene dada por:

$$\gamma_w = \left\{ \begin{aligned} & \frac{3,98 \eta_1 \exp [2,23(1-r_t)]}{(f-22,235)^2 + 9,42\eta_1^2} g(f,22) + \frac{11,96 \eta_1 \exp [0,7(1-r_t)]}{(f-183,31)^2 + 11,14 \eta_1^2} \\ & + \frac{0,081 \eta_1 \exp [6,44(1-r_t)]}{(f-321,226)^2 + 6,29 \eta_1^2} + \frac{3,66 \eta_1 \exp [1,6(1-r_t)]}{(f-325,153)^2 + 9,22 \eta_1^2} \\ & + \frac{25,37 \eta_1 \exp [1,09(1-r_t)]}{(f-380)^2} + \frac{17,4 \eta_1 \exp [1,46(1-r_t)]}{(f-448)^2} \\ & + \frac{844,6 \eta_1 \exp [0,17(1-r_t)]}{(f-557)^2} g(f,557) + \frac{290 \eta_1 \exp [0,41(1-r_t)]}{(f-752)^2} g(f,752) \\ & + \frac{8,3328 \times 10^4 \eta_2 \exp [0,99(1-r_t)]}{(f-1780)^2} g(f,1780) \end{aligned} \right\} f^2 r_t^{2,5} \rho \times 10^{-4} \quad (23a)$$

siendo:

$$\eta_1 = 0,955 r_p r_t^{0,68} + 0,006 \rho \quad (23b)$$

$$\eta_2 = 0,735 r_p r_t^{0,5} + 0,0353 r_t^4 \rho \quad (23c)$$

$$g(f, f_i) = 1 + \left(\frac{f - f_i}{f + f_i} \right)^2 \quad (23d)$$

donde ρ es la densidad de vapor de agua (g/m^3).

La Fig. 5 muestra la atenuación específica de 1 a 350 GHz a nivel del mar para aire seco y para vapor de agua con una densidad de $7,5 \text{ g/m}^3$.

2 Atenuación en el trayecto

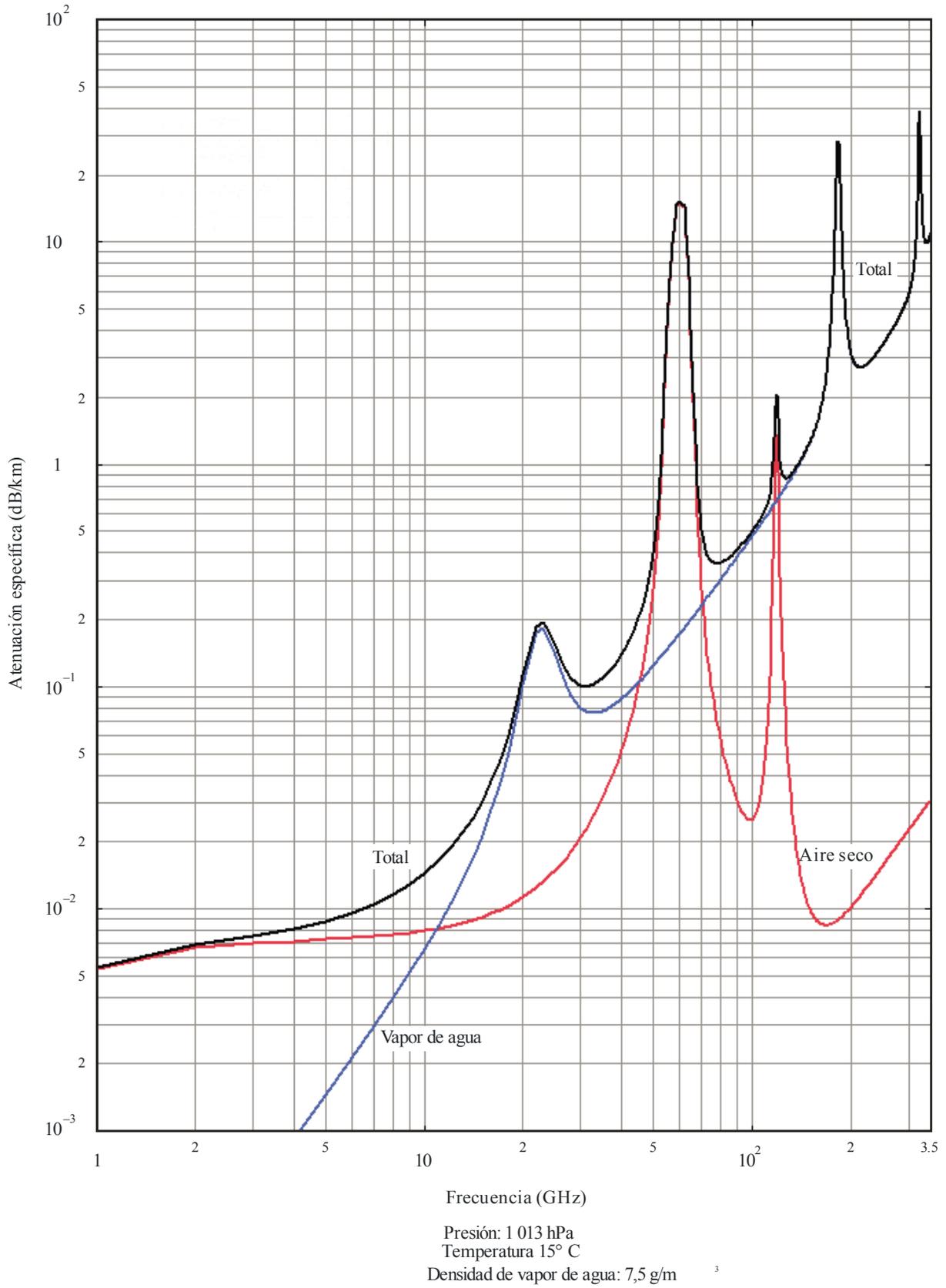
2.1 Trayectos terrenales

En un trayecto horizontal o ligeramente inclinado y próximo al suelo, la atenuación en el trayecto, A , puede escribirse como sigue:

$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{dB} \quad (24)$$

donde r_0 es la longitud del trayecto (km).

FIGURA 5
Atenuación específica debida a los gases



2.2 Trayectos oblicuos

Este punto contiene algoritmos sencillos para estimar la atenuación gaseosa a lo largo de trayectos inclinados que atraviesan la atmósfera de la Tierra, definiendo una altura equivalente que puede multiplicarse por la atenuación específica calculada en el § 1 para obtener la atenuación cenital. Las alturas equivalentes dependen de la presión y, por tanto, pueden emplearse para determinar la atenuación cenital desde el nivel del mar hasta unos 10 km de altitud. Las atenuaciones cenitales resultantes tienen una precisión de $\pm 10\%$ desde el nivel del mar hasta altitudes de aproximadamente 10 km, utilizando la presión, temperatura y densidad de vapor de agua adecuadas a la altitud de interés. Para altitudes superiores a 10 km, y, en particular, para frecuencias que se encuentran a menos de 0,5 GHz de los centros de las rayas de resonancia a cualquier altitud, debe utilizarse el procedimiento del Anexo 1. Obsérvese que la función Gaussiana en la ecuación (25b) que describe la altura equivalente para el oxígeno en la banda de 60 GHz puede dar lugar a errores superiores al 10% a ciertas frecuencias, dado que este procedimiento no puede reproducir la estructura que muestra la Fig. 7. Las siguientes ecuaciones se han obtenido de las atenuaciones cenitales calculadas con el procedimiento descrito en el Anexo 1, e integran las atenuaciones numéricas en una anchura de banda de 500 MHz; por consiguiente, las atenuaciones resultantes representan efectivamente los valores mínimos aproximados en la banda 50-70 GHz. Luego puede determinarse la atenuación del trayecto para ángulos de elevación distintos del cenit utilizando los procedimientos descritos más adelante en este punto. Para el aire seco, la altura equivalente viene dada por:

$$h_o = \frac{6,1}{1 + 0,17 r_p^{-1,1}} (1 + t_1 + t_2 + t_3) \quad (25a)$$

siendo:

$$t_1 = \frac{4,64}{1 + 0,066 r_p^{-2,3}} \exp \left[- \left(\frac{f - 59,7}{2,87 + 12,4 \exp(-7,9 r_p)} \right)^2 \right] \quad (25b)$$

$$t_2 = \frac{0,14 \exp(2,12 r_p)}{(f - 118,75)^2 + 0,031 \exp(2,2 r_p)} \quad (25c)$$

$$t_3 = \frac{0,0114}{1 + 0,14 r_p^{-2,6}} f \frac{-0,0247 + 0,0001f + 1,61 \times 10^{-6} f^2}{1 - 0,0169f + 4,1 \times 10^{-5} f^2 + 3,2 \times 10^{-7} f^3} \quad (25d)$$

con la restricción de que:

$$h_o \leq 10,7 r_p^{0,3} \quad \text{cuando } f < 70 \text{ GHz} \quad (25e)$$

y para el vapor de agua, la altura equivalente es:

$$h_w = 1,66 \left(1 + \frac{1,39 \sigma_w}{(f - 22,235)^2 + 2,56 \sigma_w} + \frac{3,37 \sigma_w}{(f - 183,31)^2 + 4,69 \sigma_w} + \frac{1,58 \sigma_w}{(f - 325,1)^2 + 2,89 \sigma_w} \right) \quad (26a)$$

para $f \leq 350$ GHz

$$\sigma_w = \frac{1,013}{1 + \exp[-8,6 (r_p - 0,57)]} \quad (26b)$$

La atenuación cenital entre 50 y 70 GHz es una función complicada de la frecuencia, como puede observarse en la Fig. 7, y los anteriores algoritmos para la altura equivalente pueden proporcionar únicamente una estimación aproximada, en general, de los niveles mínimos de atenuación que probablemente aparezcan en esta gama de frecuencias. Para obtener una mayor precisión, debe utilizarse el procedimiento descrito en el Anexo 1.

El concepto de altura equivalente se basa en la hipótesis de una atmósfera exponencial especificada mediante una altura de escala que describe la disminución de densidad con la altitud. Nótese que estas alturas de escala para el aire seco y el vapor de agua pueden variar con la latitud, la estación y/o el clima y que las distribuciones del vapor de agua en la atmósfera real pueden diferir considerablemente de la exponencial, con los cambios correspondientes de las alturas equivalentes. Los valores indicados más arriba se aplican hasta altitudes de aproximadamente 10 km.

La atenuación cenital total entonces será:

$$A = \gamma_o h_o + \gamma_w h_w \quad \text{dB} \quad (27)$$

La Fig. 6 muestra la atenuación cenital total a nivel del mar, así como la atenuación debida a la atmósfera seca y el vapor de agua, utilizando la atmósfera de referencia mundial anual media indicada en la Recomendación UIT-R P.835. Entre 50 y 70 GHz puede obtenerse una mayor precisión con las curvas de la Fig. 7, a partir de 0 km de altura. Esta Figura se obtuvo utilizando el cálculo raya por raya que se describe en el Anexo 1.

2.2.1 Ángulos de elevación comprendidos entre 5° y 90°

2.2.1.1 Trayectos Tierra-espacio

Para un ángulo, φ , de elevación comprendida entre 5° y 90°, la atenuación en el trayecto se obtiene mediante la ley de la cosecante como sigue:

Para la atenuación en el trayecto basado en los datos meteorológicos en la superficie:

$$A = \frac{A_o + A_w}{\text{sen } \varphi} \quad \text{dB} \quad (28)$$

donde $A_o = h_o \gamma_o$ y $A_w = h_w \gamma_w$

Para la atenuación en el trayecto basado en el contenido integrado de vapor de agua:

$$A(p) = \frac{A_o + A_w(p)}{\text{sen } \varphi} \quad \text{dB} \quad (29)$$

donde $A_w(p)$ aparece en el § 2.3.

2.2.1.2 Trayectos oblicuos

Para conocer los valores de la atenuación sobre un trayecto oblicuo entre una estación situada a una altitud h_1 y otra a una altitud mayor h_2 , siendo ambas altitudes inferiores a 10 km por encima del nivel medio del mar, deberán sustituirse en la ecuación (28) los valores h_o y h_w respectivamente por los valores h'_o y h'_w :

$$h'_o = h_o \left[e^{-h_1/h_o} - e^{-h_2/h_o} \right] \quad \text{km} \quad (30)$$

$$h'_w = h_w \left[e^{-h_1/h_w} - e^{-h_2/h_w} \right] \quad \text{km} \quad (31)$$

teniendo en cuenta que el valor ρ de la densidad de vapor de agua utilizado en la ecuación (23) es el valor hipotético al nivel del mar, calculado del siguiente modo:

$$\rho = \rho_1 \times \exp(h_1/2) \quad (32)$$

donde ρ_1 es el valor correspondiente a la altitud h_1 de la estación de que se trate, y se supone que la altura equivalente de densidad de vapor de agua es de 2 km (véase la Recomendación UIT-R P.835).

Las ecuaciones (30), (31) y (32) utilizan diferentes normalizaciones para las alturas equivalentes de aire seco y vapor de agua. Si bien la presión media de aire relativa al nivel del mar puede considerarse constante en todo el mundo (igual a 1 013 hPa), la densidad de vapor de agua no sólo tiene una amplia gama de variabilidad climática, sino que se mide en la superficie (es decir a la altura de la estación terrena). Para los valores de la densidad de vapor de agua en la superficie, véase la Recomendación UIT-R P.836.

2.2.2 Ángulos de elevación comprendidos entre 0° y 5°

2.2.2.1 Trayectos Tierra-espacio

En este caso, debe utilizarse el Anexo 1 de esta Recomendación. También debe utilizarse el citado Anexo para elevaciones menores que cero.

2.2.2.2 Trayectos oblicuos

La atenuación en un trayecto inclinado entre una estación situada a una altura h_1 y una altura superior a h_2 (donde ambas alturas son inferiores a 10 km por encima del nivel medio del mar), puede determinarse de la siguiente manera:

$$A = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x_1) e^{-h_1/h_o}}{\cos \phi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x_2) e^{-h_2/h_o}}{\cos \phi_2} \right] + \gamma_w \sqrt{h_w} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x'_1) e^{-h_1/h_w}}{\cos \phi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x'_2) e^{-h_2/h_w}}{\cos \phi_2} \right] \quad \text{dB} \quad (33)$$

donde:

R_e : radio efectivo de la Tierra, teniendo en cuenta la refracción, dado en la Recomendación UIT-R P.834, expresado en km (en general es aceptable un valor de 8 500 km para lugares próximos a la superficie de la Tierra)

φ_1 : ángulo de elevación para la altura h_1

F: función definida por:

$$F(x) = \frac{1}{0,661x + 0,339\sqrt{x^2 + 5,51}} \quad (34)$$

$$\varphi_2 = \arccos\left(\frac{R_e + h_1}{R_e + h_2} \cos \varphi_1\right) \quad (35a)$$

$$x_i = \operatorname{tg} \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_o}} \quad \text{para } i = 1, 2 \quad (35b)$$

$$x'_i = \operatorname{tg} \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_w}} \quad \text{para } i = 1, 2 \quad (35c)$$

teniendo en cuenta que el valor ρ de la densidad de vapor de agua utilizado en la ecuación (23) es el valor hipotético al nivel del mar calculado del siguiente modo:

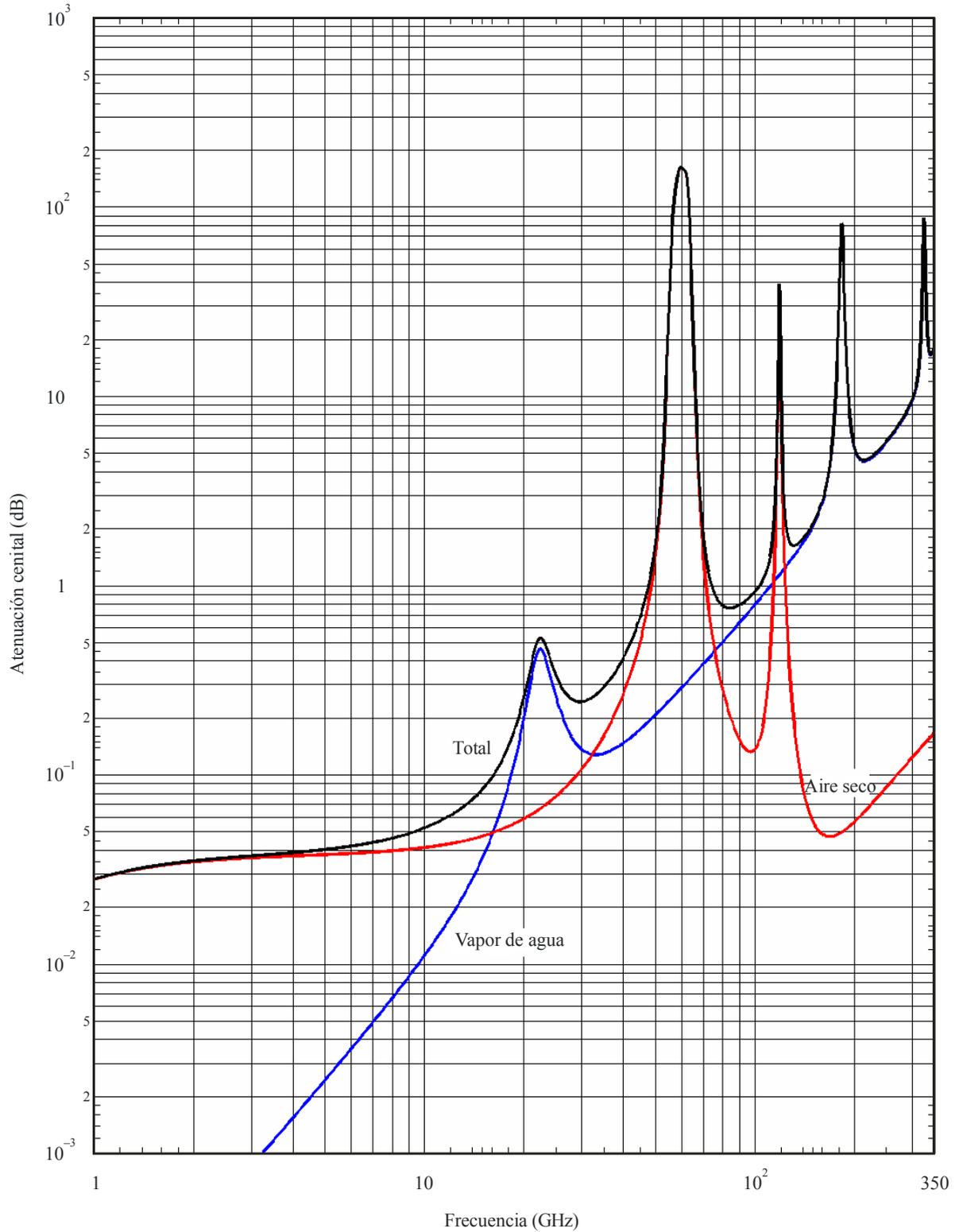
$$\rho = \rho_1 \cdot \exp(h_1 / 2) \quad (36)$$

donde ρ_1 es el valor correspondiente a la altura h_1 de la estación de que se trate, y se considera que la altura equivalente de densidad de vapor de agua es de 2 km (véase la Recomendación UIT-R P.835).

Los valores para la ρ_1 en la superficie pueden encontrarse en la Recomendación UIT-R P.836. La formulación diferente para el aire seco y el vapor de agua está explicada al final del § 2.2.

FIGURA 6

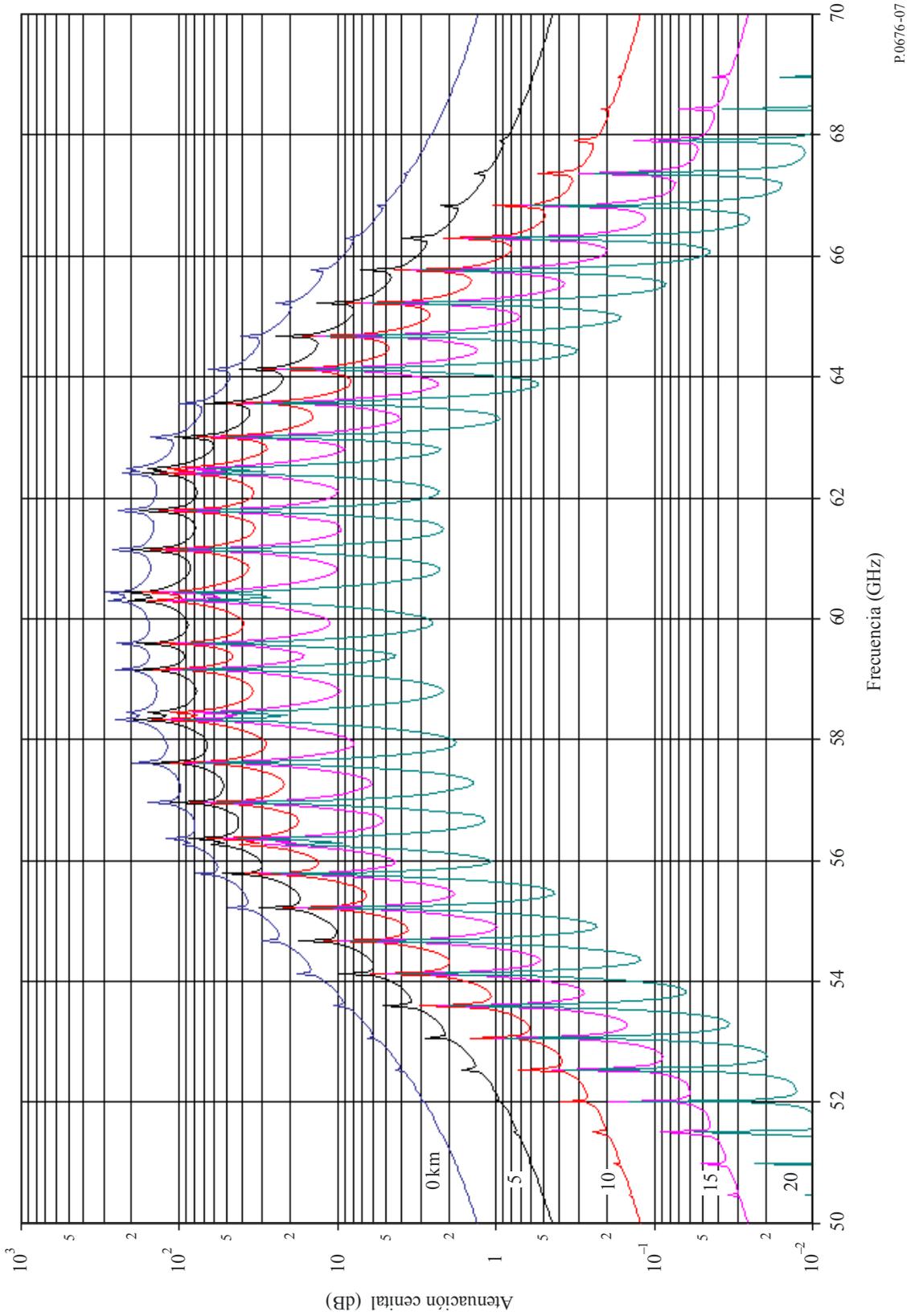
Atenuación cenital total a nivel del mar debida a la atmósfera seca y al vapor de agua



Presión en la superficie: 1 013 hPa
Temperatura en la superficie: 15° C
Densidad de vapor de agua en la superficie: 7,5 g/m³

FIGURA 7

Atenuación producida por el oxígeno en la dirección del cenit, a partir de las alturas indicadas, calculada en pasos de 50 MHz e incluyendo los centros de las rayas (0 km, 5 km, 10 km, 15 km y 20 km)



2.3 Atenuación causada por el vapor de agua en trayectos cenitales

El método de cálculo de la atenuación en trayectos oblicuos causada por el vapor de agua, antes citado, se basa en el conocimiento de las características de la presión (o densidad) del vapor de agua a lo largo del trayecto. En los casos en que se conozca el contenido integrado del vapor de agua a lo largo del trayecto, V_t , puede utilizarse un método sustitutivo. La atenuación total causada por el vapor de agua puede calcularse del siguiente modo:

$$A_w(P) = \frac{0,0173 V_t(P) \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})} \quad \text{dB} \quad (37)$$

siendo:

f : fréquence (GHz)

f_{ref} : 20,6 (GHz)

p_{ref} = 780 (hPa)

$\rho_{v,ref}$ = $\frac{V_t(P)}{4}$ (g/m³)

t_{ref} = $14 \ln \left(\frac{0,22 V_t(P)}{4} \right) + 3$ (°C)

$V_t(P)$: contenido de vapor de agua integrado en el porcentaje de tiempo necesario (kg/m² o mm), que puede obtenerse de los perfiles de la radiosonda, de mediciones radiométricas o de la Recomendación UIT-R P.836 (kg/m² o mm)

$\gamma_w(f, p, \rho, t)$: atenuación específica en función de la frecuencia, la presión, la densidad del vapor de agua y la temperatura, calculada mediante la ecuación (23a) (dB/km).