

Unión Internacional de Telecomunicaciones

**UIT-R**

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

**Recomendación UIT-R P.676-11**  
(09/2016)

# **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
<b>BO</b>	Distribución por satélite
<b>BR</b>	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
<b>BS</b>	Servicio de radiodifusión (sonora)
<b>BT</b>	Servicio de radiodifusión (televisión)
<b>F</b>	Servicio fijo
<b>M</b>	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
<b>P</b>	<b>Propagación de las ondas radioeléctricas</b>
<b>RA</b>	Radioastronomía
<b>RS</b>	Sistemas de detección a distancia
<b>S</b>	Servicio fijo por satélite
<b>SA</b>	Aplicaciones espaciales y meteorología
<b>SF</b>	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
<b>SM</b>	Gestión del espectro
<b>SNG</b>	Periodismo electrónico por satélite
<b>TF</b>	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
<b>V</b>	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, 2017

© UIT 2017

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.676-11

**Atenuación debida a los gases atmosféricos**

(Cuestión UIT-R 201/3)

(1990-1992-1995-1997-1999-2001-2005-2007-2009-2012-2013-2016)

**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 mediante la suma de las rayas de absorción individuales, 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.

**Palabras clave**

Absorción gaseosa, atenuación específica, atenuación de trayecto oblicuo, atenuación total, vapor de agua, oxígeno, aire seco

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 utilice el procedimiento 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 1-350 GHz, se utilice el procedimiento que se presenta en el Anexo 2, el cual requiere menos cálculos.

**Guía para esta Recomendación**

En esta Recomendación, se describen los siguientes tres métodos para calcular la atenuación específica y la atenuación de trayecto debida a los gases producida por oxígeno y vapor de agua:

- 1 El cálculo de la atenuación específica y de trayecto debida a los gases mediante la suma raya por raya en el Anexo 1, que asume la presión atmosférica, la temperatura y la densidad del vapor de agua en función de la altura;
- 2 El cálculo aproximado de la atenuación específica y de trayecto debida a los gases se describe en el Anexo 2, asumiendo una densidad de vapor de agua en la superficie de la Tierra.
- 3 El cálculo aproximado de la atenuación de trayecto se describe también en el Anexo 2, asumiendo un contenido integrado de vapor de agua a lo largo del trayecto.

Estos métodos de predicción pueden utilizar datos meteorológicos locales o, en ausencia de esos datos locales, mapas atmosféricos o meteorológicos de referencia que corresponden con una probabilidad de rebasamiento deseada descritos en otras Recomendaciones de la serie P del UIT-R.

### Atenuación específica

La ecuación (1) del Anexo 1, aplicable a frecuencias hasta 1 000 GHz, o la suma de las ecuaciones (22) y (23) del Anexo 2, aplicable a las frecuencias hasta 350 GHz, pueden utilizarse para estimar la atenuación específica. En ambos métodos es necesario disponer de la presión, la temperatura y la densidad de vapor de agua en la ubicación donde se aplica. Si no se dispone de los datos locales, puede utilizarse una combinación de: a) el modelo normalizado de atmósferas de referencia descrito en la Recomendación UIT-R P.835, b) el mapa de la temperatura media anual en la superficie de la Recomendación UIT-R P.1510 y c) los mapas de densidad de vapor de agua en la superficie en función de la probabilidad de rebasamiento de la Recomendación UIT-R P-836, en lugar de la densidad normal del vapor de agua al nivel del suelo de  $7,5 \text{ g/m}^3$ .

### Atenuación de trayecto oblicuo (Tierra-espacio)

Puede utilizarse la ecuación (20) del Anexo 1 o las ecuaciones (28) y (29) del Anexo 2.

- En la ecuación (20) del Anexo 1, es necesario disponer de los perfiles de temperatura, presión y densidad de vapor de agua a lo largo del trayecto. Si no se dispone de los datos de los perfiles locales, pueden utilizarse los perfiles atmosféricos de referencia de la Recomendación UIT-R P.835. Puede utilizarse la densidad de vapor de agua en la superficie en función de la probabilidad de rebasamiento de la Recomendación UIT-R P-836, en lugar de la densidad normal del vapor del agua al nivel del suelo de  $7,5 \text{ g/m}^3$ .
- En la ecuación (28) del Anexo 2, es necesario disponer de la presión en la superficie, la temperatura en la superficie y la densidad del vapor de agua en la superficie. La ecuación (28) del Anexo 2 es una aproximación de la ecuación (20) aplicable a frecuencias hasta 350 GHz asumiendo una atmósfera de referencia mundial anual media y una densidad de vapor de agua en la superficie arbitraria con un perfil exponencial negativo de densidad de vapor de agua en función de la altura. La ecuación (28) del Anexo 2 puede utilizarse para estimar: a) la atenuación instantánea debida a los gases, para un valor específico de presión en la superficie, temperatura en la superficie y densidad de vapor de agua en la superficie o b) la atenuación debida a los gases correspondiente a la densidad de vapor de agua en la superficie para una probabilidad de rebasamiento deseada. Si no se dispone de los datos de densidad de vapor de agua en la superficie, pueden utilizarse los mapas de densidad de vapor de agua en la superficie de la Recomendación UIT-R P.836.
- En la ecuación (29) del Anexo 2, es necesario disponer de la temperatura en la superficie, la presión en la superficie y el contenido integrado de vapor de agua a lo largo del trayecto. De manera similar a la ecuación (28) del Anexo 2, la ecuación (29) del Anexo 2 puede utilizarse para calcular: a) la atenuación instantánea debida a los gases, para un valor específico de presión en la superficie, temperatura en la superficie y contenido integrado de vapor de agua o b) la atenuación debida a los gases correspondiente al contenido integrado de vapor de agua para una probabilidad de rebasamiento deseada. Si no se dispone de los datos locales de contenido integrado de vapor de agua en la superficie, pueden utilizarse los mapas de contenido integrado de vapor de agua de la Recomendación UIT-R P.836.

Si se dispone de los datos de densidad de vapor de agua en la superficie y de contenido integrado de vapor de agua, la ecuación (29) del Anexo 2 que utiliza el contenido integrado local de vapor de agua se considera más exacta que la ecuación (28) del Anexo 2 que utiliza los datos locales de densidad de vapor de agua en la superficie. De manera similar, si no se dispone de los datos locales, la ecuación (29) del Anexo 2 con la utilización de los mapas de contenido integrado de vapor de agua de la Recomendación UIT-R P.836, se considera más exacta que la ecuación (28) del Anexo 2 con la utilización de los mapas de densidad de vapor de agua de la Recomendación UIT-R P.836.

	<b>Ecuación (20) del Anexo 1</b>	<b>Ecuación (28) del Anexo 2</b>	<b>Ecuación (29) del Anexo 2</b>
Gama de frecuencias	$\leq 1\ 000$ GHz	$\leq 350$ GHz	
Precisión	La mejor, suma raya a rayas	Aproximación	
Presión en función de la altura	Arbitraria	Atmósfera de referencia mundial anual media	
Temperatura en función de la altura			
Densidad de vapor de agua en función de la altura		Valor en la superficie con un perfil exponencial negativo en función de la altura	Contenido integrado de vapor de agua en vez de densidad de vapor de agua en función de la altura

## 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 el modelo de predicción, calculada entre 0 y 1 000 GHz, en pasos de 1 GHz, para una presión de 1 013,25 hPa y una temperatura de 15° C, para los casos de densidad de vapor de agua de 7,5 g/m<sup>3</sup> (Normal) y de atmósfera seca (Seca).

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 según disminuye la presión con el aumento de la altura. 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 cálculo raya por 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,  $\gamma$ , viene dada por la fórmula:

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

en este caso,  $\gamma_o$  y  $\gamma_w$  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  $f$  es la frecuencia (GHz) y  $N''_{Oxígeno}(f)$  y  $N''_{Vapor\ de\ agua}(f)$  son las partes imaginarias del valor complejo de las refractividades, que depende de la frecuencia:

$$N''_{Oxígeno}(f) = \sum_i (Oxígeno) S_i F_i + N''_D(f) \quad (2a)$$

$$N''_{Vapor\ de\ agua}(f) = \sum_i (Vapor\ de\ agua) S_i F_i \quad (2b)$$

$S_i$  es el valor de la  $i$ -ésima raya del oxígeno o el vapor de agua,  $F_i$  es el factor de forma de raya del oxígeno o el vapor de agua y la suma se extiende a todas las rayas en los Cuadros 1 y 2;

$N''_D(f)$  es el espectro continuo de aire seco debido a la absorción del nitrógeno inducida por presión y al espectro de Debye, según la ecuación (8).

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:

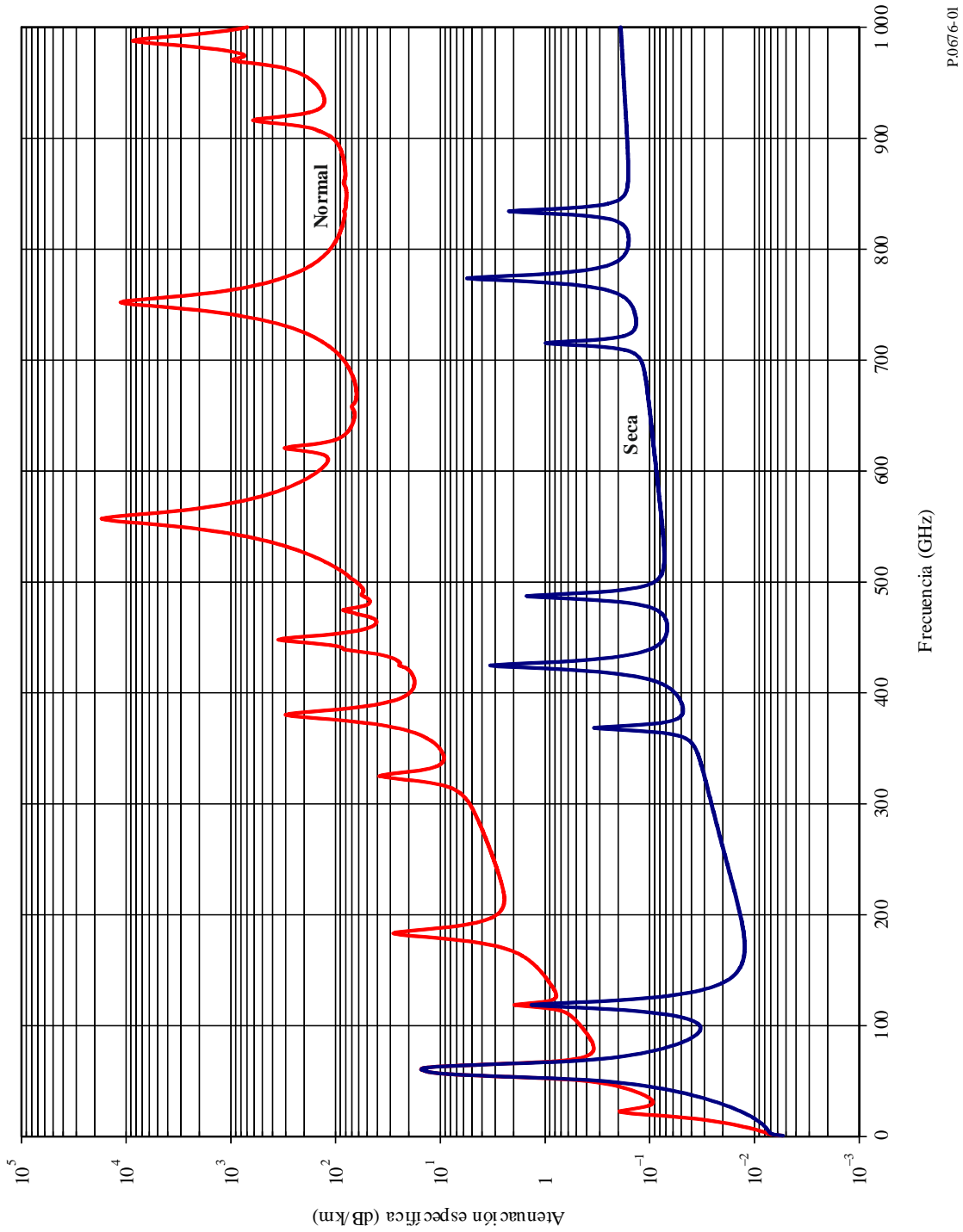
$p$ : presión del aire seco (hPa)

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

$\theta = 300/T$

$T$ : temperatura (K).

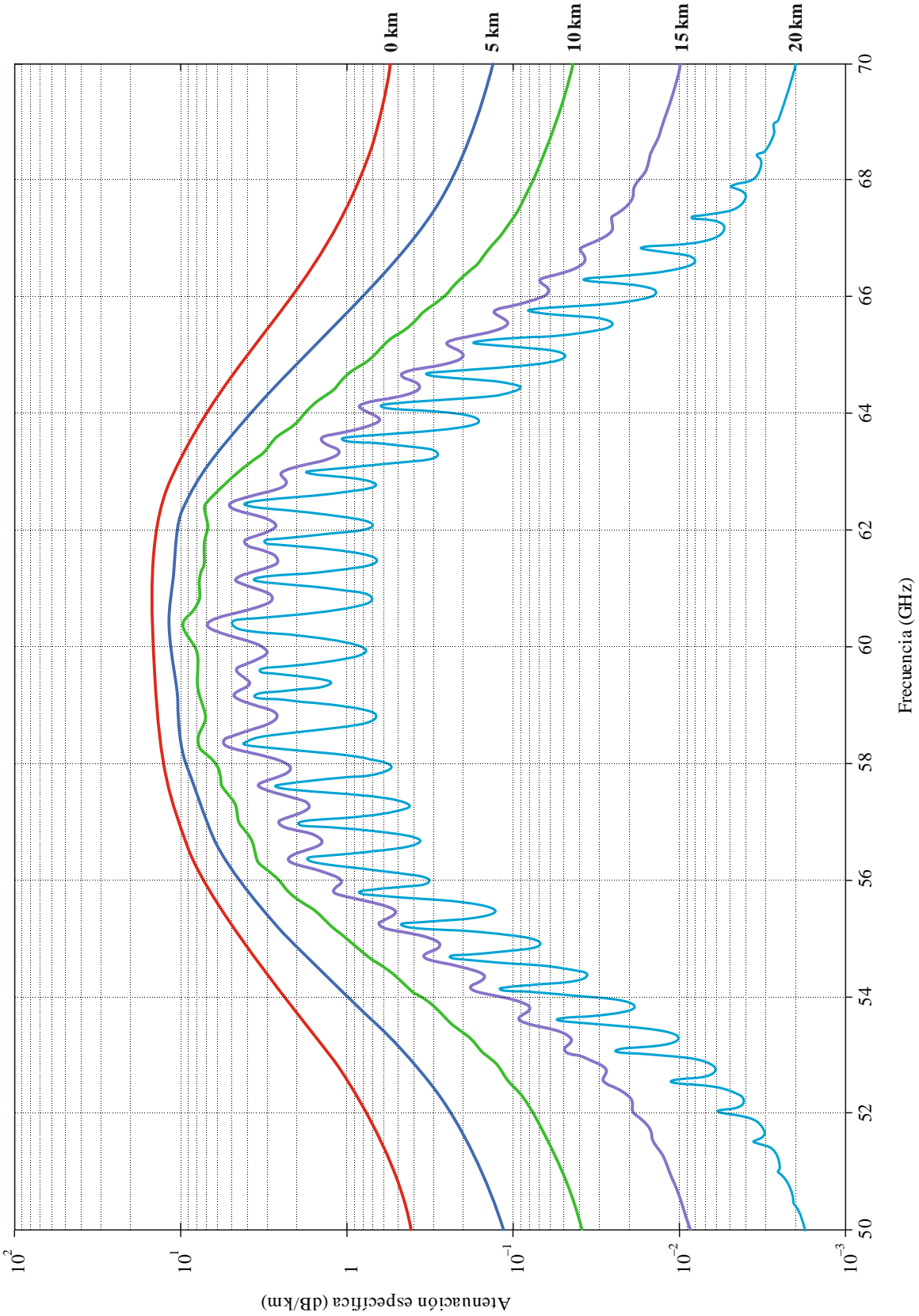
FIGURA 1  
Atenuación específica debida a los gases atmosféricos, calculada en pasos de 1 GHz e incluyendo los centros de las rayas



P.0676-01

FIGURA 2

Atenuación específica en la gama de 50-70 GHz a las alturas indicadas calculada en pasos de 10 MHz e incluyendo los centros de las rayas (0 km, 5 km, 10 km, 15 km y 20 km)



P.0676-02



Si están disponibles los perfiles locales de altura, se deben utilizar valores locales de  $p$ ,  $e$  y  $T$  (por ejemplo, mediante radiosondas). En ausencia de información local, conviene utilizar una atmósfera normal de referencia descrita 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  $e$ , para una altura dada, puede obtenerse a partir de la densidad de vapor de agua,  $\rho$  y, la temperatura,  $T$ , en esa altura, utilizando la expresión:

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

En el Cuadro 1 se muestran los datos espectroscópicos para el oxígeno y en el Cuadro 2 los datos espectroscópicos para el vapor de agua. La última fila del Cuadro 2 contiene una pseudorraya centrada en 1 780 GHz cuyo segmento inferior representa la contribución conjunta por debajo de 1 000 GHz de las resonancias del vapor de agua no incluidas en el método de predicción raya por raya (es decir, el contenido de humedad). Los parámetros de la pseudorraya están ajustados para tener en cuenta la diferencia entre la absorción medida en las ventanas atmosféricas y la absorción calculada local de las rayas.

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 del oxígeno y el vapor de agua y  $\Delta f$  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  $\Delta f$  se modifica para tener en cuenta la separación de Zeeman de las rayas del oxígeno y el ensanchamiento debido al efecto Doppler de las rayas del vapor de agua:

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

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

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

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	0,1079	2,144	26,38	0,76	5,087	1,00
67,803960	0,0011	8,732	28,58	0,69	4,930	0,82
119,995940	0,0007	8,353	29,48	0,70	4,780	0,79
*183,310087	2,273	0,668	29,06	0,77	5,022	0,85
*321,225630	0,0470	6,179	24,04	0,67	4,398	0,54
*325,152888	1,514	1,541	28,23	0,64	4,893	0,74
336,227764	0,0010	9,825	26,93	0,69	4,740	0,61
*380,197353	11,67	1,048	28,11	0,54	5,063	0,89
390,134508	0,0045	7,347	21,52	0,63	4,810	0,55
437,346667	0,0632	5,048	18,45	0,60	4,230	0,48
439,150807	0,9098	3,595	20,07	0,63	4,483	0,52
443,018343	0,1920	5,048	15,55	0,60	5,083	0,50
*448,001085	10,41	1,405	25,64	0,66	5,028	0,67
470,888999	0,3254	3,597	21,34	0,66	4,506	0,65
474,689092	1,260	2,379	23,20	0,65	4,804	0,64
488,490108	0,2529	2,852	25,86	0,69	5,201	0,72
503,568532	0,0372	6,731	16,12	0,61	3,980	0,43
504,482692	0,0124	6,731	16,12	0,61	4,010	0,45
547,676440	0,9785	0,158	26,00	0,70	4,500	1,00
552,020960	0,1840	0,158	26,00	0,70	4,500	1,00
*556,935985	497,0	0,159	30,86	0,69	4,552	1,00
620,700807	5,015	2,391	24,38	0,71	4,856	0,68
645,766085	0,0067	8,633	18,00	0,60	4,000	0,50
658,005280	0,2732	7,816	32,10	0,69	4,140	1,00
*752,033113	243,4	0,396	30,86	0,68	4,352	0,84
841,051732	0,0134	8,177	15,90	0,33	5,760	0,45
859,965698	0,1325	8,055	30,60	0,68	4,090	0,84

CUADRO 2 (*fin*)

$f_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
899,303175	0,0547	7,914	29,85	0,68	4,530	0,90
902,611085	0,0386	8,429	28,65	0,70	5,100	0,95
906,205957	0,1836	5,110	24,08	0,70	4,700	0,53
916,171582	8,400	1,441	26,73	0,70	5,150	0,78
923,112692	0,0079	10,293	29,00	0,70	5,000	0,80
970,315022	9,009	1,919	25,50	0,64	4,940	0,67
987,926764	134,6	0,257	29,85	0,68	4,550	0,90
*1 780,000000	17506	0,952	196,3	2,00	24,15	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 calcularse como sigue:

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

donde  $r_0$  es la longitud del trayecto (km).

### 2.2 Trayectos oblicuos

En este punto proporciona un método para integrar la atenuación específica calculada utilizando el modelo de cálculo 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 descrito en 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 descrita en 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 (Normal) y de atmósfera seca (Seca).

La atenuación total producida en trayectos oblicuos,  $A(h, \varphi)$ , a partir de una estación con altitud,  $h$ , y ángulo de elevación,  $\varphi$ , 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  $\Phi$  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 las ecuaciones (1) y (2) de la Recomendación UIT-R P.453.

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

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

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

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

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

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

Al integrar las ecuaciones (11) y (16), se debe prestar atención pues 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  $u^4 = H - h_{\text{mín}}$  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  $\delta_n$  que tiene un índice de refracción  $n_n$ .  $\alpha_n$  y  $\beta_n$  son los ángulos de incidencia de entrada y de salida.  $r_n$  es el radio 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  $\alpha_n$  puede calcularse a partir de:

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

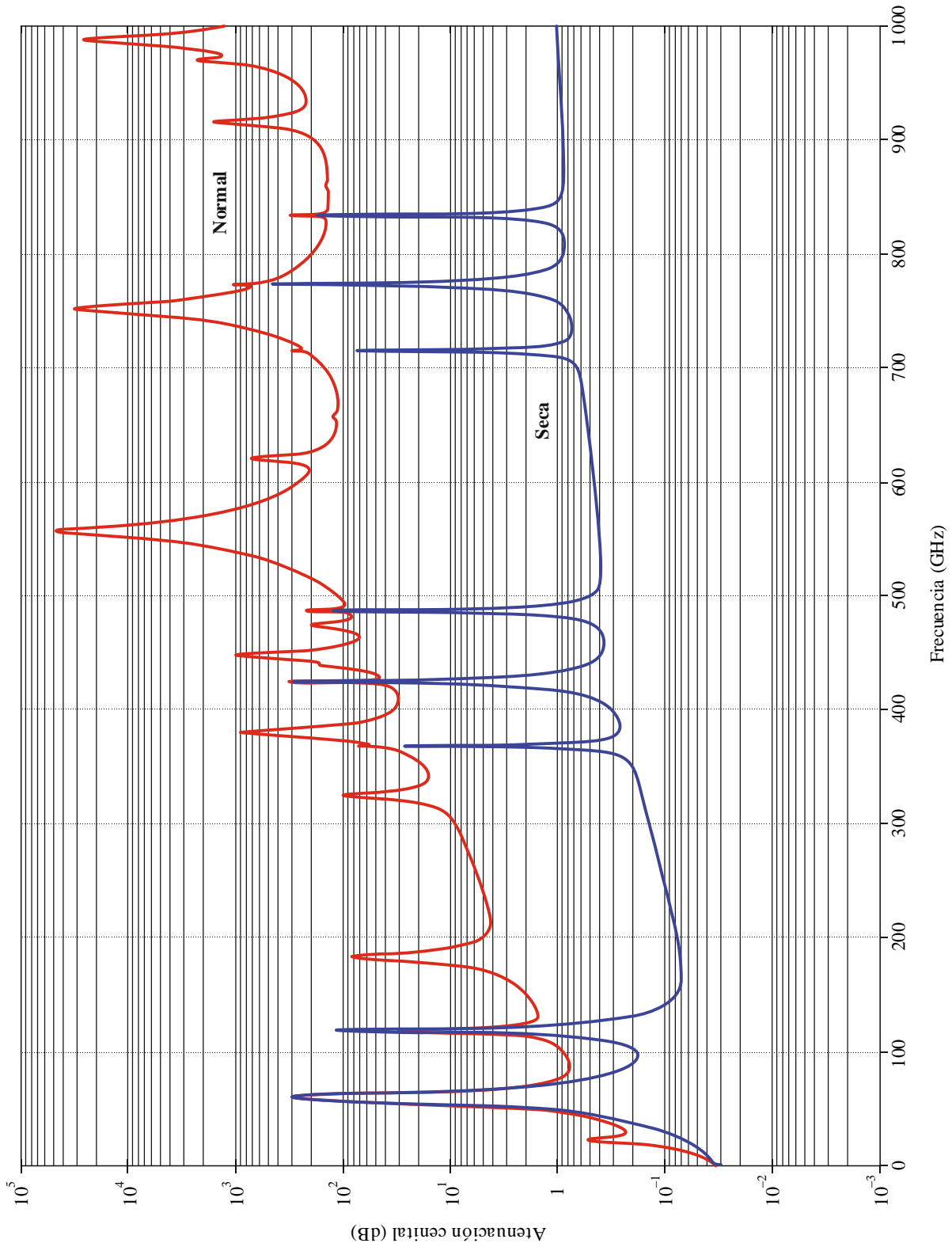
$\beta_1$  es el ángulo de incidencia en la estación terrena (el complemento del ángulo de elevación  $\varphi$ ).  $\beta_{n+1}$  puede calcularse a partir de  $\alpha_n$  utilizando la siguiente ley de Snell:

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

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 inferiores a  $-157$  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 cenital debida a los gases atmosféricos, calculada en pasos de 1 GHz e incluyendo los centros de las rayas



P0676-03

Puede obtenerse la atenuación total,  $A_{gas}$ , mediante la fórmula:

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

donde  $\gamma_n$  es la atenuación específica de la n-ésima raya obtenida según la ecuación (1).

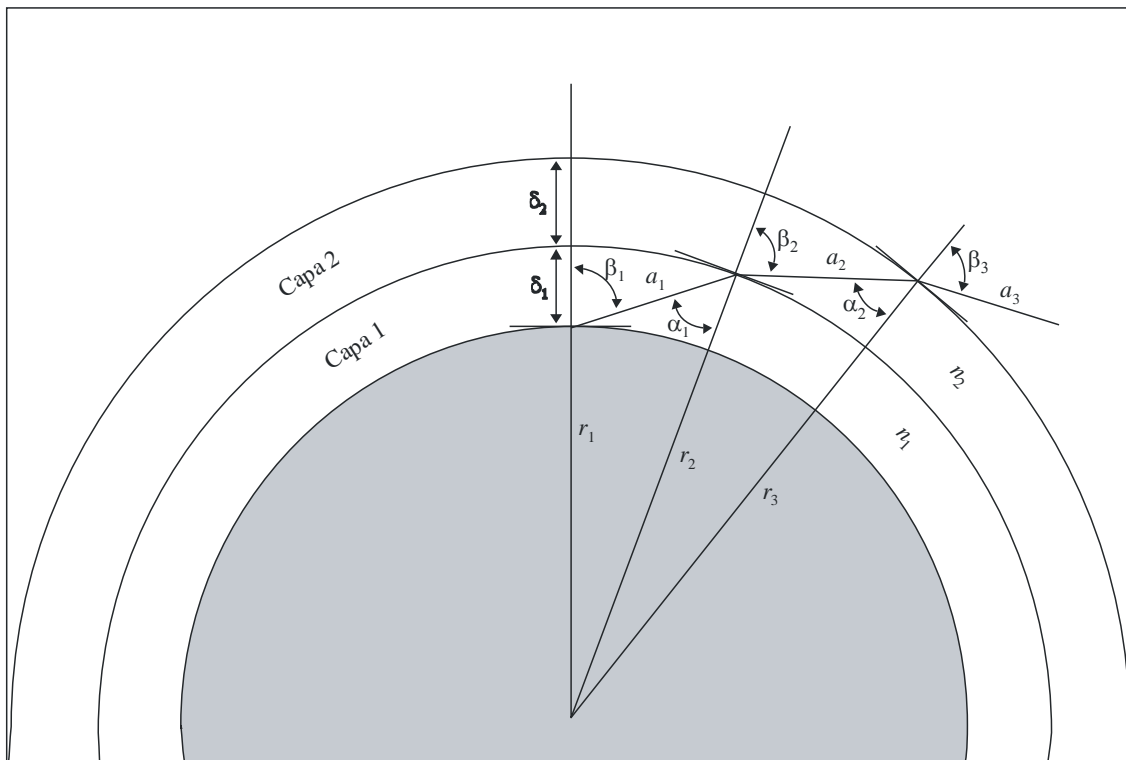
Para asegurar una estimación precisa de la atenuación en el trayecto, el espesor de las capas debe aumentar exponencialmente, desde 10 cm para la capa inferior (nivel del suelo) hasta 1 km a una altura de 100 km, de acuerdo con la siguiente ecuación:

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

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 hasta por lo menos 30 km, y hasta 100 km en las frecuencias de raya central del oxígeno.

FIGURA 4  
Trayecto a través de la atmósfera





### 3 Efectos de dispersión

Además de la atenuación descrita en los párrafos anteriores, basada en la parte imaginaria de la refractividad compleja dependiente de la frecuencia, el oxígeno y el vapor de agua también producen dispersión, basada en la parte real de la refractividad compleja dependiente de la frecuencia. Este efecto se describe en términos de fase en función de la frecuencia (grados/km) o de retardo de grupo en función de la frecuencia (ps/km); y, de manera similar a la atenuación, puede calcularse para los trayectos oblicuos. Los efectos de dispersión se examinan en el Capítulo 6 del Manual de Radiometeorología del UIT-R, que contiene un modelo para calcular la dispersión sobre la base del método de predicción 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 en 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 estimaciones aproximadas 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 atenuación específica del oxígeno y el vapor de agua del cálculo raya por raya, y en las alturas efectivas de oxígeno y de vapor de agua. Estas aproximaciones son coherentes con el cálculo raya por raya. Sin embargo, 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.

La atenuación específica para el caso de aire seco,  $\gamma_o$  (dB/km), y la atenuación específica para aire húmedo,  $\gamma_w$  (dB/km), vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\gamma_o = 0,1820 f \left( \sum_{i(\text{Oxígeno})} S_i F_i + N_D''(f) \right) \quad (22)$$

$$\gamma_w = 0,1820 f \sum_{i(\text{Vapor de agua})} S_i F_i \quad (23)$$

donde  $S_i$ ,  $F_i$  y  $N_D''(f)$  están definidos en las ecuaciones (3), (5), (6a), (7), (8) y (9) para el oxígeno, y  $S_i$ , y  $F_i$  están definidos en las ecuaciones (3), (4), (5), (6a) y (7) para el vapor de agua. La ecuación (6b) no está incluida pues no es necesario considerar la separación de Zeeman del oxígeno y el ensanchamiento debido al efecto Doppler de las rayas del vapor de agua a alturas inferiores a 10 km. La suma para el oxígeno se realiza con todas las rayas del Cuadro 1 y la suma para el vapor de agua se realiza con el subconjunto de las 9 rayas de vapor de agua marcadas con un asterisco en el Cuadro 2.

La presión seca,  $p$ , y la temperatura,  $T$ , son la presión seca y la temperatura en la superficie de la Tierra. Si no se dispone de datos locales, se puede utilizar la atmósfera de referencia mundial anual media descrita en la Recomendación UIT-R P.835 para determinar la presión seca y la temperatura a la altura de la superficie de la Tierra.

La Fig. 5 muestra la atenuación específica del aire seco (Aire seco), la atenuación causada por el vapor de agua únicamente con una densidad de  $7,5 \text{ g/m}^3$  (Vapor de agua) y la atenuación total (Total), de 1 a 350 GHz a nivel del mar para la atmósfera de referencia mundial anual media de la Recomendación UIT-R P.835.

## 2 Atenuación en el trayecto

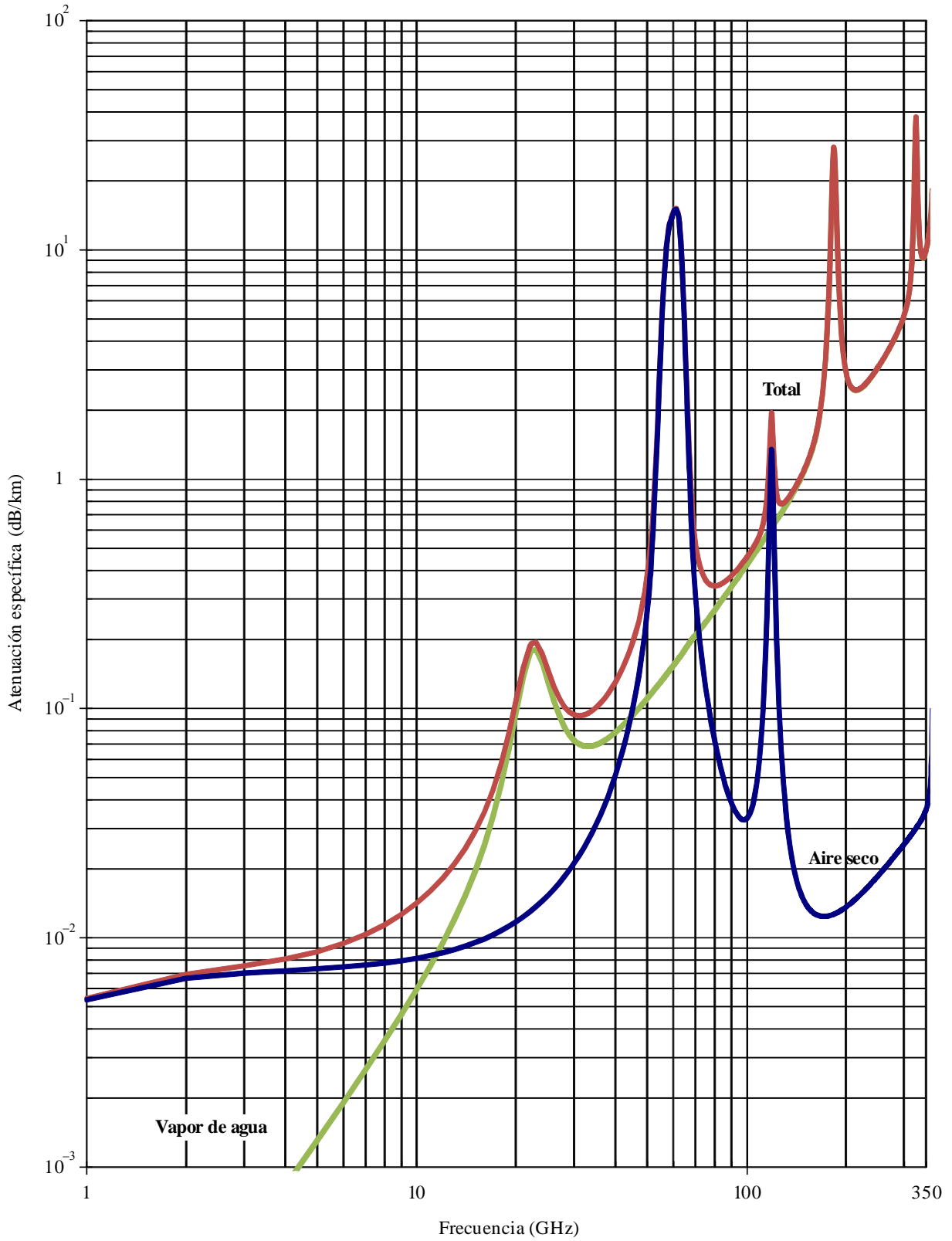
### 2.1 Trayectos terrenales

En un trayecto horizontal, o ligeramente inclinado y próximo al suelo, la atenuación en el trayecto,  $A$ , puede calcularse 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  
(Presión=1 013,25 hPa; Temperatura = 15°C; Densidad de vapor de agua = 7,5 g/m<sup>3</sup>)



## 2.2 Trayectos oblicuos

Este punto contiene algoritmos de complejidad reducida 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 párrafo 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  $\pm 10\%$  para aire seco y  $\pm 5\%$  para vapor de agua, desde el nivel del mar hasta altitudes de aproximadamente 10 km, utilizando la presión, la temperatura y la 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 pretende reproducir de manera precisa 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; las atenuaciones resultantes representan efectivamente los valores mínimos aproximados en la banda 50-70 GHz. Posteriormente puede determinarse la atenuación del trayecto para ángulos de elevación distintos del cenit utilizando los procedimientos descritos más adelante en esta sección.

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

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

donde:

$$r_p = (p + e)/1013,25$$

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 en función de 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 del perfil exponencial, con los correspondientes cambios de las alturas equivalentes. Los valores indicados más arriba se aplican hasta altitudes de aproximadamente 10 km.

La atenuación cenital total será entonces:

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

La Fig. 6 muestra la atenuación cenital total a nivel del mar (Total), así como la atenuación debida a la atmósfera seca (Aire seco) y el vapor de agua (Vapor de agua), utilizando la atmósfera de referencia mundial anual media definida en la Recomendación UIT-R P.835. Entre 50 y 70 GHz, puede obtenerse una mayor precisión con la curva de 0 km de la Fig. 7, obtenida 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,  $\varphi$ , 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  $A_w = h_w \gamma_w$

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

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

donde  $A_w$  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  $\rho$  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  $\rho_1$  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 1 013,25 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 Anexo 1 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:

$$A = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[ \frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x_1) e^{-h_1/h_o}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x_2) e^{-h_2/h_o}}{\cos \varphi_2} \right] + \gamma_w \sqrt{h_w} \left[ \frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x'_1) e^{-h_1/h_w}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x'_2) e^{-h_2/h_w}}{\cos \varphi_2} \right] \quad \text{dB} \quad (33)$$

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)

$\varphi_1$ : 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  $\rho$  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  $\rho_1$  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).

FIGURA 6

Atenuación cenital total a nivel del mar debida a la atmósfera seca y al vapor de agua  
(Presión=1 013,25 hPa; Temperatura = 15°C; Densidad de vapor de agua = 7,5 g/m<sup>3</sup>)

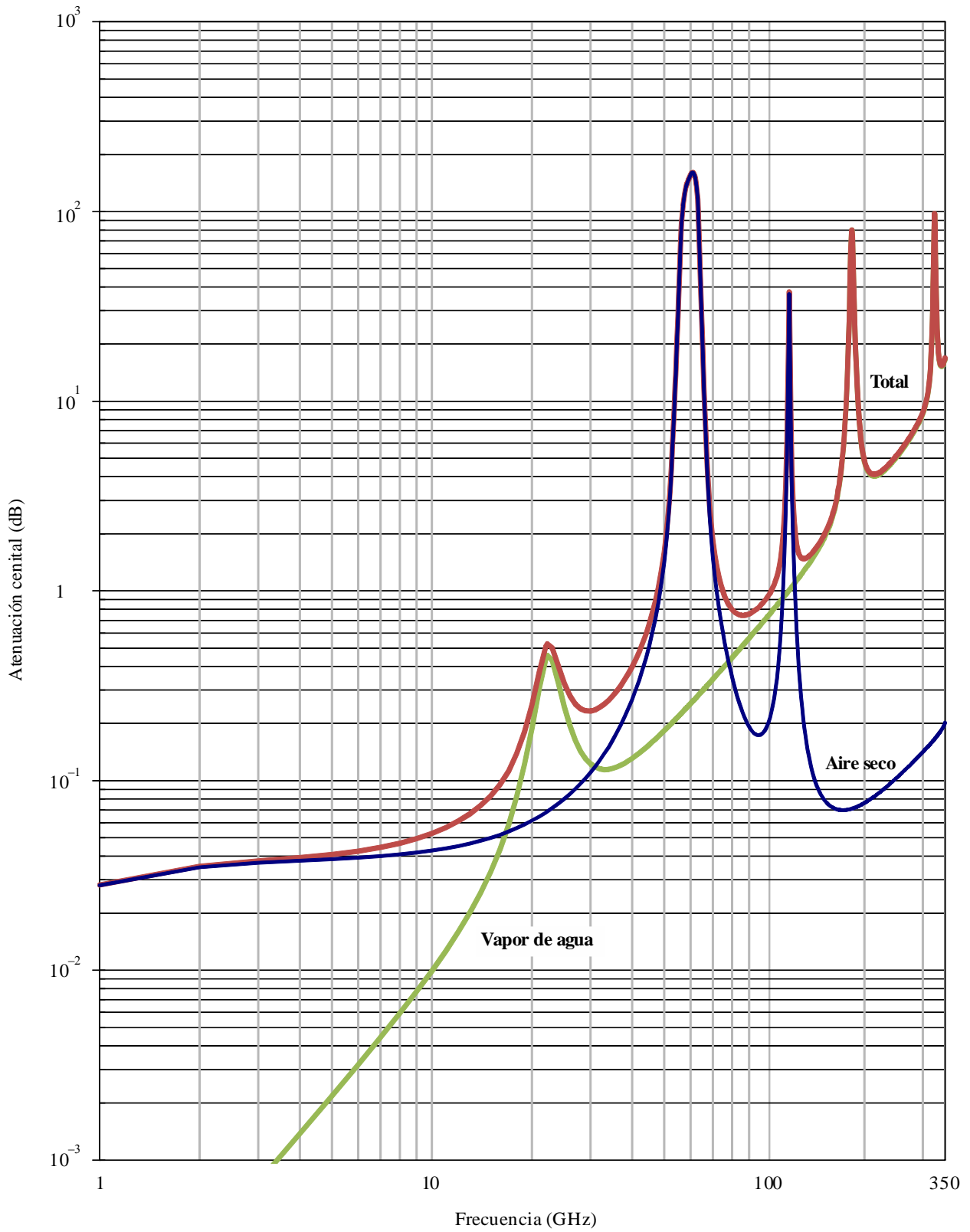
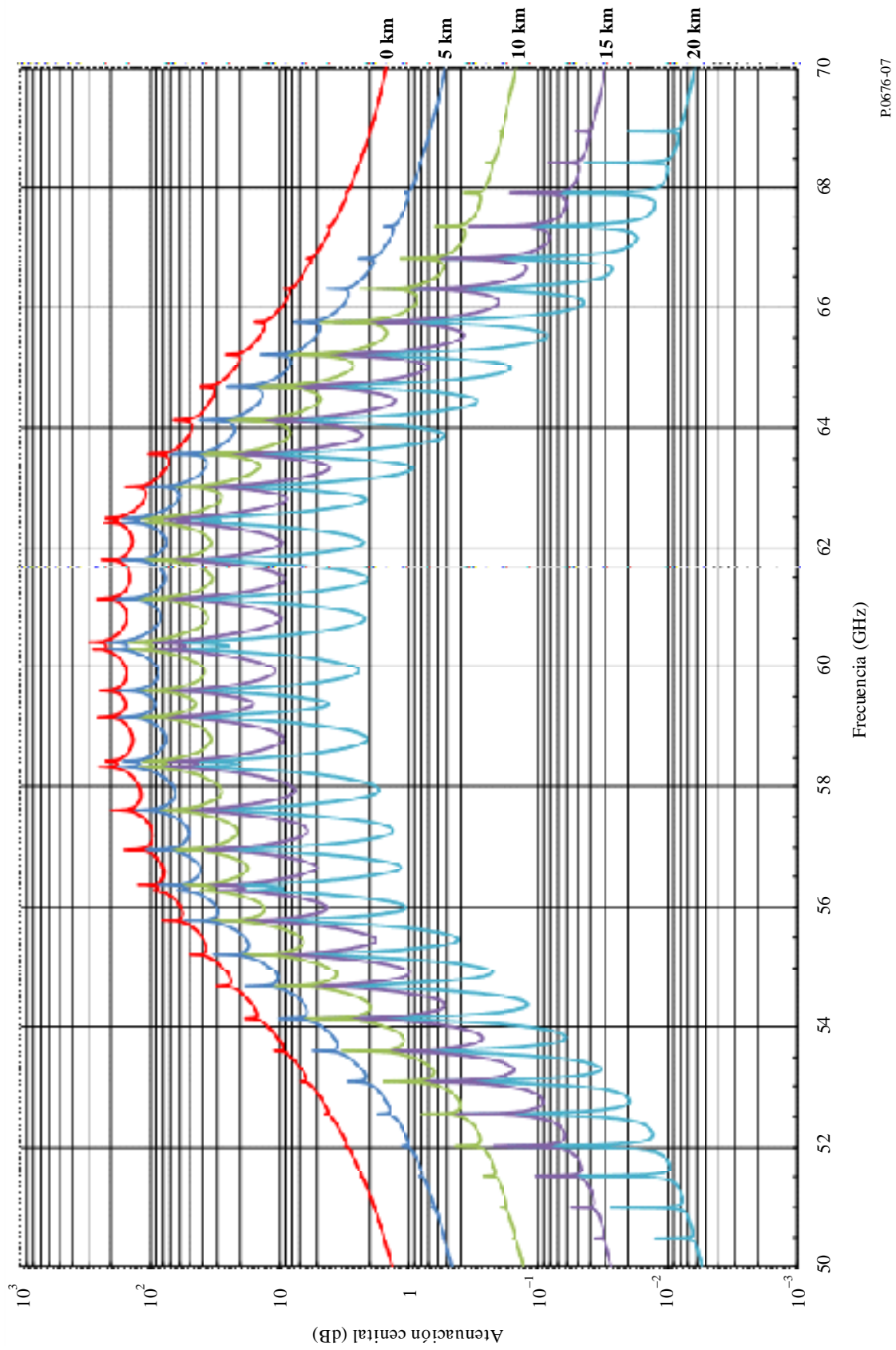




FIGURA 7

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



Los valores de  $\rho_1$  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 en el § 2.2.2.2.

### 2.3 Atenuación causada por el vapor de agua en trayectos cenitales

El método de cálculo de la atenuación en trayectos oblicuos antes citado, se basa en el conocimiento de la densidad del vapor de agua en la superficie. Si se conoce el contenido integrado del vapor de agua,  $V_t$ , la atenuación total causada por el vapor de agua puede calcularse del siguiente modo:

$$A_w = \begin{cases} \frac{0,0176 V_t \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}, & 1 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz} \\ \frac{0,0176 V_t \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})} (ah^b + 1), & 20 \text{ GHz} < f \leq 350 \text{ GHz} \end{cases} \text{ dB} \quad (37)$$

siendo:

$$\begin{aligned} a &= 0,2048 \exp \left[ - \left( \frac{f - 22,43}{3,097} \right)^2 \right] + 0,2326 \exp \left[ - \left( \frac{f - 183,5}{4,096} \right)^2 \right] \\ &+ 0,2073 \exp \left[ - \left( \frac{f - 325}{3,651} \right)^2 \right] - 0,113 \\ b &= 8,741 \times 10^4 \exp(-0,587f) + 312,2f^{-2,38} + 0,723 \end{aligned}$$

$$h = \begin{cases} h_s & h_s \leq 4 \text{ km} \\ 4 & h_s > 4 \text{ km} \end{cases}$$

y

$f$ : frecuencia (GHz)

$f_{ref}$ : 20,6 (GHz)

$p_{ref}$  = 815 (hPa)

$$\rho_{v,ref} = \frac{V_t}{3,67} \text{ (g/m}^3\text{)}$$

$$t_{ref} = 14 \ln \left( \frac{0,22 V_t}{3,67} \right) + 3 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$V_t$ : contenido de vapor de agua integrado proveniente de: a) datos de sonda local o radiométrica, o b) en el porcentaje de tiempo necesario ( $\text{kg/m}^2$  o mm), datos obtenidos de los mapas digitales de la Recomendación UIT-R P.836 ( $\text{kg/m}^2$  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 (23) (dB/km).

$h_s$ : altura de la estación sobre el nivel medio del (km).