

Unión Internacional de Telecomunicaciones

**UIT-R**

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

**Recomendación UIT-R P.676-12**  
(08/2019)

# **Atenuación debida a los gases atmosféricos y efectos conexos**

**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 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, 2021

© UIT 2021

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.676-12\*

**Atenuación debida a los gases atmosféricos y efectos conexos**

(Cuestión UIT-R 201/3)

(1990-1992-1995-1997-1999-2001-2005-2007-2009-2012-2013-2016-2019)

**Cometido**

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

- a) un método, presentado en el Anexo 1, para la estimación de la atenuación causada por los gases mediante la suma de las rayas de absorción individuales, válida para la gama de frecuencias 1-1 000 GHz;
- b) dos métodos aproximados simplificados, presentados en el Anexo 2, para evaluar la atenuación debida a los gases válida en la gama de frecuencias 1-350 GHz; y
- c) otros efectos de la propagación que pueden calcularse sumando las funciones de las rayas de absorción individuales.

**Palabras clave**

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

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

la necesidad de evaluar la atenuación, la dispersión, el ruido ascendente y el ruido descendente en trayectos oblicuos y la atenuación en trayectos terrenales causados por los gases atmosféricos,

*recomienda*

**1** que, de manera general, se utilice el procedimiento del Anexo 1 para calcular la atenuación debida a los gases y otros efectos conexos;

**2** que, para estimaciones aproximadas de la atenuación debida a los gases 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.

---

\* La Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones introdujo modificaciones editoriales en esta Recomendación en 2020 y 2021, de conformidad con lo dispuesto en la Resolución UIT-R 1.

- 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.

Además de la atenuación específica y de trayecto debida a los gases, en el Anexo 1 a esta Recomendación se presentan métodos para predecir la dispersión, la temperatura de ruido ascendente y descendente, la curvatura atmosférica y el retardo de trayecto atmosférico adicional utilizando la suma línea por línea.

### **Atenuación específica**

La ecuación (1), aplicable a frecuencias hasta 1 000 GHz puede utilizarse para estimar la atenuación específica. En este método 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)**

Pueden utilizarse la ecuación (13) o las ecuaciones (40) y (41).

- En la ecuación (13), 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 (40), 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 (40) es una aproximación de la ecuación (13) 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 (40) 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 (41), 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 (40), la ecuación (41) 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 (41) que utiliza el contenido integrado local de vapor de agua se considera más exacta que la ecuación (40) 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 (41) 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 (40) con la utilización de los mapas de densidad de vapor de agua de la Recomendación UIT-R P.836.

	<b>Ecuación (13)</b>	<b>Ecuación (40)</b>	<b>Ecuación (41)</b>
Gama de frecuencias	< 1 000 GHz	< 350 GHz	< 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 exactitud para cualquier valor de presión, temperatura y humedad sumando cada una de las rayas espectrales 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.

La atenuación específica causada por los gases,  $\gamma$ , viene dada por la fórmula:

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

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 espectrales 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:

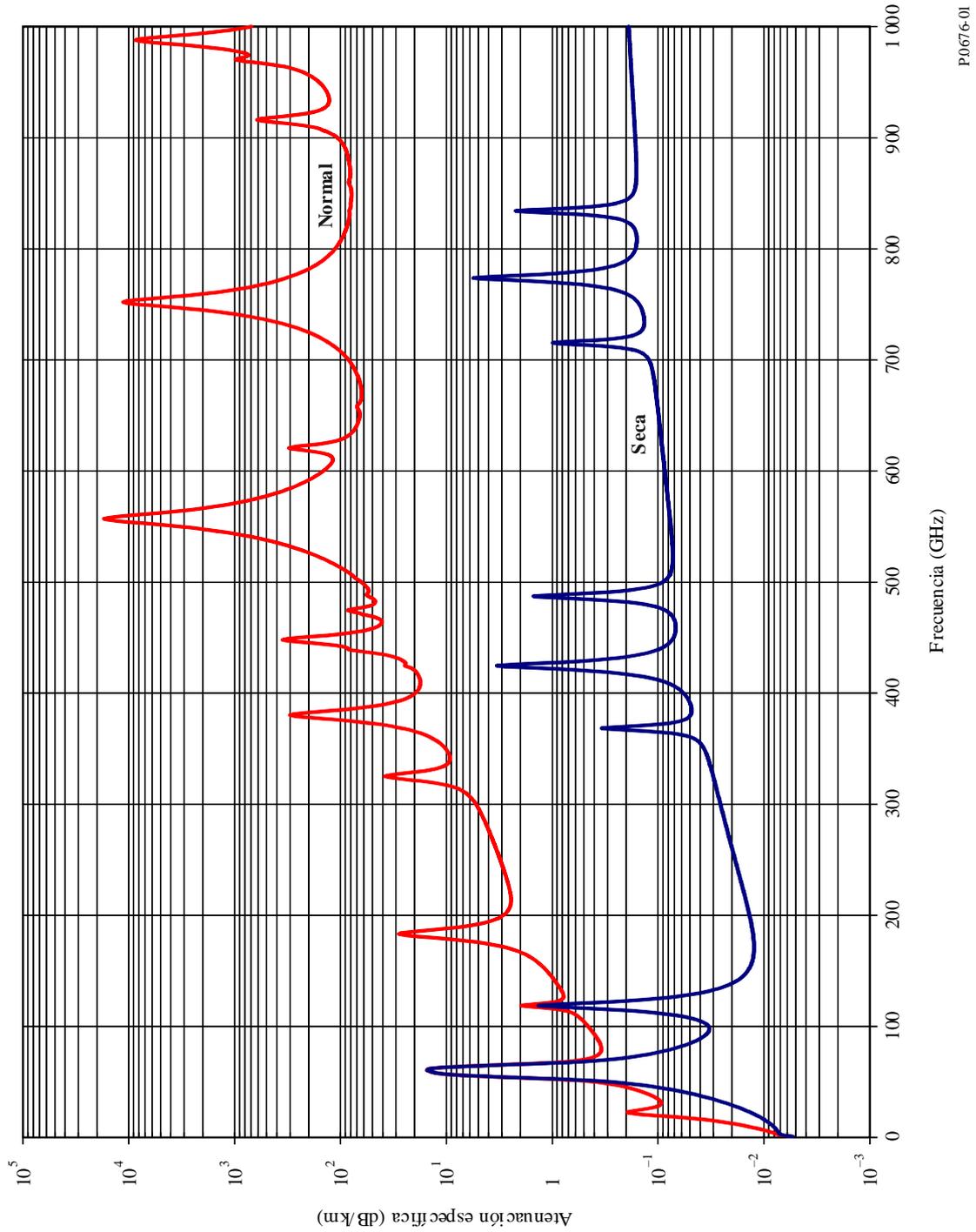
$p$ : presión del aire seco (hPa)

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

$\theta = 300/T$

$T$ : temperatura (K).

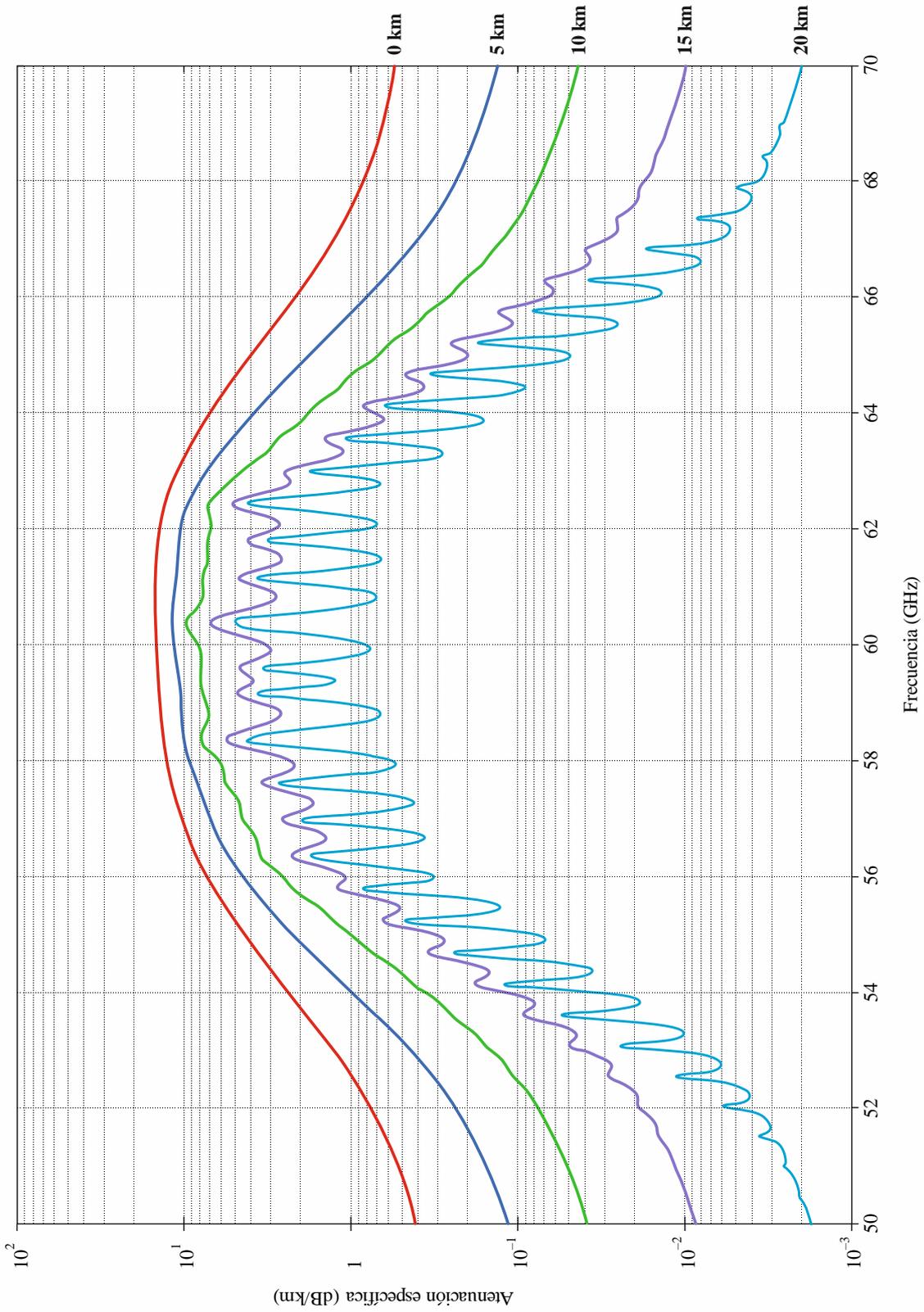
FIGURA 1  
Atenuación específica debida a los gases atmosféricos, calculada en pasos de 1 GHz e incluyendo los centros de las rayas



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.067602

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 datos locales, se utilizará una atmósfera normal de referencia adecuada descrita 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 la atenuación debida al oxígeno y la atenuación debida al vapor de agua).

La presión parcial del vapor de agua  $e$ , para cualquier 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:

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

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

### 2.2 Trayectos oblicuos

En los § 2.2.1 y 2.2.2 se presentan métodos para calcular la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos Tierra-espacio para un trayecto ascendente entre un emplazamiento en la superficie de la Tierra, o cerca de la misma, y un emplazamiento por encima de la superficie de la Tierra o en el espacio utilizando el método raya por raya del Anexo 1 cuando se conocen la temperatura, la presión del aire seco y el perfil de densidad del vapor de agua. En la § 2.2.3 se amplía el método a un trayecto descendente entre un emplazamiento por encima de la superficie de la Tierra o en el espacio y un emplazamiento en la superficie de la Tierra, o cerca de la misma. En los § 2.2.4 y 2.2.5 se presentan respectivamente métodos para calcular la curvatura atmosférica y la longitud del trayecto atmosférico adicional en un trayecto Tierra-espacio.

### 2.2.1 Ángulos de elevación aparente no negativos

La atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos en un trayecto ascendente entre las alturas  $h_1$  y  $h_2$  ( $h_2 > h_1 \geq 0$  km) es:

$$A_{gas} = \int_{h_1}^{h_2} \frac{\gamma(h)}{\sin \varphi(h)} dh = \int_{h_1}^{h_2} \frac{\gamma(h)}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi(h)}} dh \quad (11)$$

donde:

$$\cos \varphi(h) = \frac{(R_E + h_1) n(h_1)}{(R_E + h) n(h)} \cos \varphi_1 \quad (12)$$

$\gamma(h)$  es la atenuación específica a la altura  $h$ ,  $R_E$  es el radio medio de la Tierra (6 371 km),  $\varphi_1$  es el ángulo de elevación aparente local a la altura  $h_1$ , y  $n(h)$  es el índice de refracción a la altura  $h$ .

Si bien la ecuación (11) puede evaluarse por integración numérica<sup>1</sup>, la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos puede estimarse adecuadamente dividiendo la atmósfera en capas que aumentan exponencialmente, determinando la atenuación específica (dB/km) de cada capa y la longitud del trayecto (km) a través de cada capa, y sumando el producto de la atenuación específica de cada capa y la longitud del trayecto a través de cada capa, como se muestra en la ecuación (13). Si no se conocen la temperatura local, la presión del aire seco y los perfiles de presión parciales del vapor de agua en función de la altura (por ejemplo, a partir de datos de radiosondas) se podrá utilizar cualquiera de las seis atmósferas normalizadas de referencia (es decir, la atmósfera de referencia mundial anual media, la atmósfera de referencia para latitudes bajas, la atmósfera de referencia estival para latitudes medias, la atmósfera de referencia invernal para latitudes medias, la atmósfera de referencia estival para latitudes altas o la atmósfera de referencia invernal para latitudes altas) descritas en la Recomendación UIT-R P.835.

$$A_{gas} = \sum_{i=1}^{i_{max}} a_i \gamma_i \quad (\text{dB}) \quad (13)$$

siendo  $\gamma_i$  la atenuación específica (dB/km) de la  $i$ -ésima capa según la ecuación (1) y  $a_i$  la longitud del trayecto (km) a través de la  $i$ -ésima capa.

Para un trayecto oblicuo entre la superficie de la Tierra y el espacio, y de acuerdo con la geometría de la Fig. 5, el grosor de las capas aumenta exponencialmente de 10 cm en la superficie de la Tierra a ~1 km a una altura de ~100 km para garantizar la exactitud de la estimación de la atenuación gaseosa en trayectos oblicuos total. El grosor de la  $i$ -ésima capa,  $\delta_i$ , es:

$$\delta_i = 0,0001 e^{\frac{i-1}{100}} \quad (\text{km}) \quad (14)$$

$h_1 = 0$ , y  $h_i$ , la altura al fondo de la capa  $i$  cuando  $i \geq 2$ , es:

$$h_i = \sum_{j=1}^{i-1} \delta_j = 0,0001 \frac{e^{\frac{i-1}{100}} - 1}{e^{\frac{1}{100}} - 1} \quad (15)$$

Si se utiliza una de las seis atmósferas normalizadas de referencia especificadas en la Recomendación UIT-R P.835, el perfil atmosférico se define para alturas geométricas de hasta 100 km, en cuyo caso  $i_{max} = 922$ ,  $\delta_{922} = 0,999\ 66$  km y  $h_{922} = 99,457$  km.

---

<sup>1</sup> La ecuación (11) puede evaluarse utilizando varios métodos en función de la implementación: por ejemplo a) la función integral en Matlab, b) la función cuadrática en Octave, c) la función cuadrática en Python, d) varias funciones Numerical Recipes, y otros métodos equivalentes.

Para un trayecto oblicuo entre una altura inferior dentro de la atmósfera,  $h_{lower}$ , y una altura superior dentro de la atmósfera,  $h_{upper}$ , ( $0 \text{ km} \leq h_{lower} < h_{upper} \leq 100 \text{ km}$ ), la atenuación del trayecto oblicuo puede calcularse poniendo  $r_1$  al radio de la altura inferior con respecto al centro de la Tierra y modificando las ecuaciones (14) y (15) para preservar aproximadamente la progresión exponencial de la altura en relación con la superficie de la Tierra, a saber:

a) Calcular  $i_{lower}$  e  $i_{upper}$ :

$$i_{lower} = \text{suelo} \left\{ 100 \ln \left[ 10^4 h_{lower} \left( e^{\frac{1}{100}} - 1 \right) + 1 \right] + 1 \right\} \quad (16a)$$

$$i_{upper} = \text{techo} \left\{ 100 \ln \left[ 10^4 h_{upper} \left( e^{\frac{1}{100}} - 1 \right) + 1 \right] + 1 \right\} \quad (16b)$$

Sabiendo que  $\text{suelo}(x)$  redondea  $x$  al entero inferior más próximo y  $\text{techo}(x)$  redondea  $x$  al entero superior más próximo.

b) Sustituir el límite inferior de la ecuación (13) por  $i = i_{lower}$  y el límite superior por  $i_{upper} - 1$ .

c) Sustituir 0,0001 de la ecuación (14) por  $m$ , donde:

$$m = \left( \frac{e^{\frac{2}{100}} - e^{\frac{1}{100}}}{e^{\frac{i_{upper}}{100}} - e^{\frac{i_{lower}}{100}}} \right) (h_{upper} - h_{lower}) \quad (16c)$$

d) Sustituir la ecuación (15) por:

$$h_i = h_{lower} + \sum_{j=i_{lower}}^{i-1} \delta_j = h_{lower} + m \frac{e^{\frac{i-1}{100}} - e^{\frac{i_{lower}-1}{100}}}{e^{\frac{1}{100}} - 1}, i_{lower} \leq i \leq i_{upper} \quad (16d)$$

Las ecuaciones (16a) a (16d) se han de utilizar con cautela pues la precisión puede degradarse para trayectos oblicuos donde  $i_{upper} - i_{lower} < 50$  (por ejemplo, trayectos entre dos plataformas en aeronaves).

$a_i$  es la longitud del trayecto a través de la  $i$ -ésima capa de grosor  $\delta_i$ , y  $n_i$  es el índice de refracción radioeléctrica de la  $i$ -ésima capa.  $n_i$  es una función de la presión del aire seco, la temperatura y la presión parcial del vapor de agua de la  $i$ -ésima capa, calculada con las ecuaciones (1) y (2) de la Recomendación UIT-R P.453.  $\alpha_i$  y  $\beta_{i+1}$  son los ángulos de incidencia de entrada y salida en la interfaz entre la  $i$ -ésima y la  $(i+1)$ <sup>a</sup> capas,  $r_i$  es el radio entre el centro de la Tierra y el principio de la  $i$ -ésima capa,  $r_{i+1} = r_i + \delta_i$ , y  $r_1$  es el radio entre el centro de la Tierra al principio de la capa más baja, generalmente el radio medio de la Tierra (6 371 km). El índice de refracción,  $n_i$ , y la atenuación específica,  $\gamma_i$ , de la  $i$ -ésima capa son sus respectivos valores en el punto medio de la  $i$ -ésima capa, es decir, a la altura  $r_i + \delta_i/2$ .

La longitud del trayecto  $a_i$  es:

$$a_i = -r_i \cos \beta_i + \sqrt{r_i^2 \cos^2 \beta_i + 2 r_i \delta_i + \delta_i^2} \quad (\text{km}) \quad (17)$$

y el ángulo  $\alpha_i$  es:

$$\alpha_i = \pi - \cos^{-1} \left( \frac{-a_i^2 - 2 r_i \delta_i - \delta_i^2}{2 a_i (r_i + \delta_i)} \right) \quad (18a)$$

$$= \text{sen}^{-1} \left( \frac{r_i}{r_i + \delta_i} \text{sen} \beta_i \right) \quad (18b)$$

La ecuación (18a) está desaconsejada por su escasa precisión.  $\beta_1$  es el ángulo cenital local en la superficie de la Tierra o cerca de la misma (complemento del ángulo de elevación aparente,  $\varphi$ ; es decir,  $\beta_1 = 90^\circ - \varphi$ ).

$\beta_{i+1}$  puede calcularse iterativamente a partir de  $\alpha_i$  aplicando la ley de Snell, a saber:

$$\beta_{i+1} = \text{sen}^{-1} \left( \frac{n_i}{n_{i+1}} \text{sen } \alpha_i \right) \quad (19a)$$

Otra posibilidad es calcular  $\beta_i$  directamente sin calcular  $\alpha_i$  aplicando la ley de Snell en coordenadas polares, a saber:

$$\beta_i = \text{sen}^{-1} \left( \frac{n_1 r_1}{n_i r_i} \text{sen } \beta_1 \right) \quad (19b)$$

y, por tanto,  $\alpha_i$  puede calcularse de la siguiente manera:

$$\alpha_i = \text{sen}^{-1} \left( \frac{n_1 r_1}{n_i r_{i+1}} \text{sen } \beta_1 \right) \quad (19c)$$

En el sentido Tierra-espacio, las ecuaciones (19a) o (19b) y (19c) pueden no ser válidas con ángulos de elevación aparente iniciales  $< 1^\circ$  (es decir, ángulo cenital aparente inicial,  $\beta_1, > 89^\circ$ ) cuando el gradiente de refractividad radioeléctrica,  $dN/dh$ , es inferior a  $-157$  N-unidades/km, lo que puede ocurrir cuando se utilizan como perfil atmosférico datos de radiosondas de ciertas partes del mundo susceptibles a la propagación por conductos. En ese caso la onda radioeléctrica se refleja en la atmósfera y sigue la curvatura de la Tierra (es decir, viaja por conductos) y el argumento de la función seno inversa en las ecuaciones (19a) o (19b) y (19c) es superior a 1. Las ecuaciones (19a), (19b) y (19c) son válidas para todos los ángulos de elevación aparente no negativos cuando se utiliza cualquiera de las seis atmósferas normalizadas de referencia de la Recomendación UIT-R P.835, pues esas atmósferas de referencia no tienen las características de gradientes de refracción de la propagación por conductos.

La Fig. 4 muestra la atenuación cenital calculada en pasos de 1 GHz para la atmósfera media anual normalizada de referencia mundial descrita en la Recomendación UIT-R P.835. La atmósfera «normalizada» es la atmósfera media anual de referencia mundial con  $\rho_0 = 7,5 \text{ g/m}^3$  y la atmósfera «seca» es la atmósfera media anual de referencia mundial con  $\rho_0 = 0 \text{ g/m}^3$ .

### 2.2.2 Ángulos de elevación aparente negativos

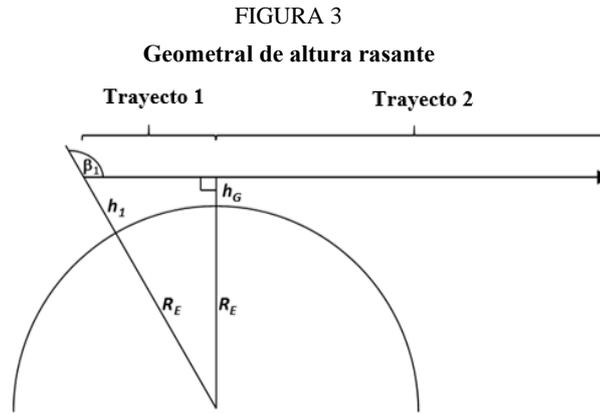
La ecuación (13) supone un aumento de la altura entre la estación terrena y el espacio. Sin embargo, cuando los ángulos de elevación aparente de una estación terrena elevada son negativos, la altura disminuye a lo largo del trayecto de propagación entre la estación terrena y la altura rasante mínima y vuelve a aumentar a lo largo del trayecto de propagación entre la altura rasante mínima y el espacio. Este caso se ilustra en la Fig. 3 para una estación a la altura  $h_1$  con un ángulo de elevación aparente de  $90^\circ - \beta_1$ .

Aplicando la ley de Snell en coordenadas polares:

$$n(h_G)(R_E + h_G) = n(h_1)(R_E + h_1) \text{sen } \beta_1 \quad (20)$$

Donde la altura rasante,  $h_G$ , puede determinarse resolviendo iterativamente la ecuación (20). El índice de refracción,  $n(h)$ , puede determinarse utilizando las ecuaciones (1) y (2) de la Recomendación UIT-R P.453 para el perfil atmosférico específico de interés, que suele ser uno de los perfiles de referencia de la Recomendación UIT-R P.835.

La atenuación gaseosa neta es la suma de las atenuaciones debidas a los gases del Trayecto 1 y el Trayecto 2. El Trayecto 1 es la atenuación debida a los gases entre una estación terrena virtual a una altura de  $h_G$  km y la estación terrena real a una altura de  $h_1$  km con un ángulo de elevación aparente de  $0^\circ$  y el Trayecto 2 es la atenuación debida a los gases entre una estación terrena virtual a una altura de  $h_G$  km y la altura atmosférica máxima (normalmente 100 km) con un ángulo de elevación aparente de  $0^\circ$ .



### 2.2.3 Reciprocidad espacio-Tierra – Tierra-espacio

Para un trayecto entre una estación espacial y una estación terrena cuando el ángulo de elevación aparente,  $\varphi_s$ , en la estación espacial es negativo y el ángulo de elevación aparente en la estación terrena es  $\varphi_e$ , los ángulos de elevación aparente tienen la siguiente relación:

$$\varphi_s = -\cos^{-1}\left(\frac{r_e n_e}{r_s n_s} \cos \varphi_e\right) \quad (21a)$$

y

$$\varphi_e = \cos^{-1}\left(\frac{r_s n_s}{r_e n_e} \cos \varphi_s\right) \quad (21b)$$

siendo  $n_e$  el índice de refracción a la altura de la estación,  $r_e$  el radio a partir del centro de la Tierra hasta la estación terrena ( $r_e \geq R_E$ ),  $n_s$  es el índice de refracción a la altura de la estación terrena y  $r_s$  es el radio a partir del centro de la Tierra hasta la estación espacial ( $r_s > r_e$ ). Si la altura de la estación espacial es superior a 100 km por encima de la superficie de la Tierra,  $n_s = 1$ .

Dado que la propagación es recíproca, la atenuación debida a los gases para un trayecto espacio-Tierra, cuando el ángulo de elevación aparente en la estación espacial es  $\varphi_s$ , es idéntica a la atenuación debida a los gases para el trayecto Tierra-espacio recíproco, cuando el ángulo de elevación aparente en la estación terrena es  $\varphi_e$ . Por consiguiente, la atenuación gaseosa para un trayecto espacio-Tierra descendente puede calcularse como la atenuación gaseosa para el correspondiente trayecto Tierra-espacio ascendente. Si  $\frac{r_s n_s}{r_e n_e} \cos \varphi_s > 1$ , el trayecto espacio-Tierra no intercepta la Tierra.

### 2.2.4 Curvatura atmosférica

La curvatura atmosférica total, *Bending*, a lo largo del trayecto Tierra-espacio es:

$$Bending = \sum_{i=1}^{i_{m\acute{a}x}-1} (\beta_{i+1} - \alpha_i) \quad (22a)$$

$$= \sum_{i=1}^{i_{m\acute{a}x}-1} \left[ \sin^{-1}\left(\frac{n_1 r_1}{n_{i+1} r_{i+1}} \sin \beta_1\right) - \sin^{-1}\left(\frac{n_1 r_1}{n_i r_{i+1}} \sin \beta_1\right) \right] \quad (22b)$$

donde el valor positivo de la curvatura implica que el rayo se curva hacia la Tierra. La ecuación (9) de la Recomendación UIT-R P.834 es una aproximación de las ecuaciones (22a) y (22b) para la atmósfera media anual de referencia mundial.

### 2.2.5 Longitud del trayecto atmosférico adicional

Dado que el índice de refracción troposférica es superior a 1, la longitud del trayecto atmosférico efectivo supera la longitud del trayecto geométrico, en cuyo caso la longitud del trayecto atmosférico adicional,  $\Delta L$ , es:

$$\Delta L = \sum_{i=1}^{l_{\max}} a_i (n_i - 1) \quad (\text{km}) \quad (23)$$

El término longitud del trayecto atmosférico adicional es sinónimo de longitud del trayecto radioeléctrico en la Recomendación UIT-R P.834. En el § 6 de la Recomendación UIT-R P.834 puede encontrarse un método para predecir la longitud del trayecto radioeléctrico adicional como función de la ubicación, el día del año y el ángulo de elevación aparente.

FIGURA 4

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

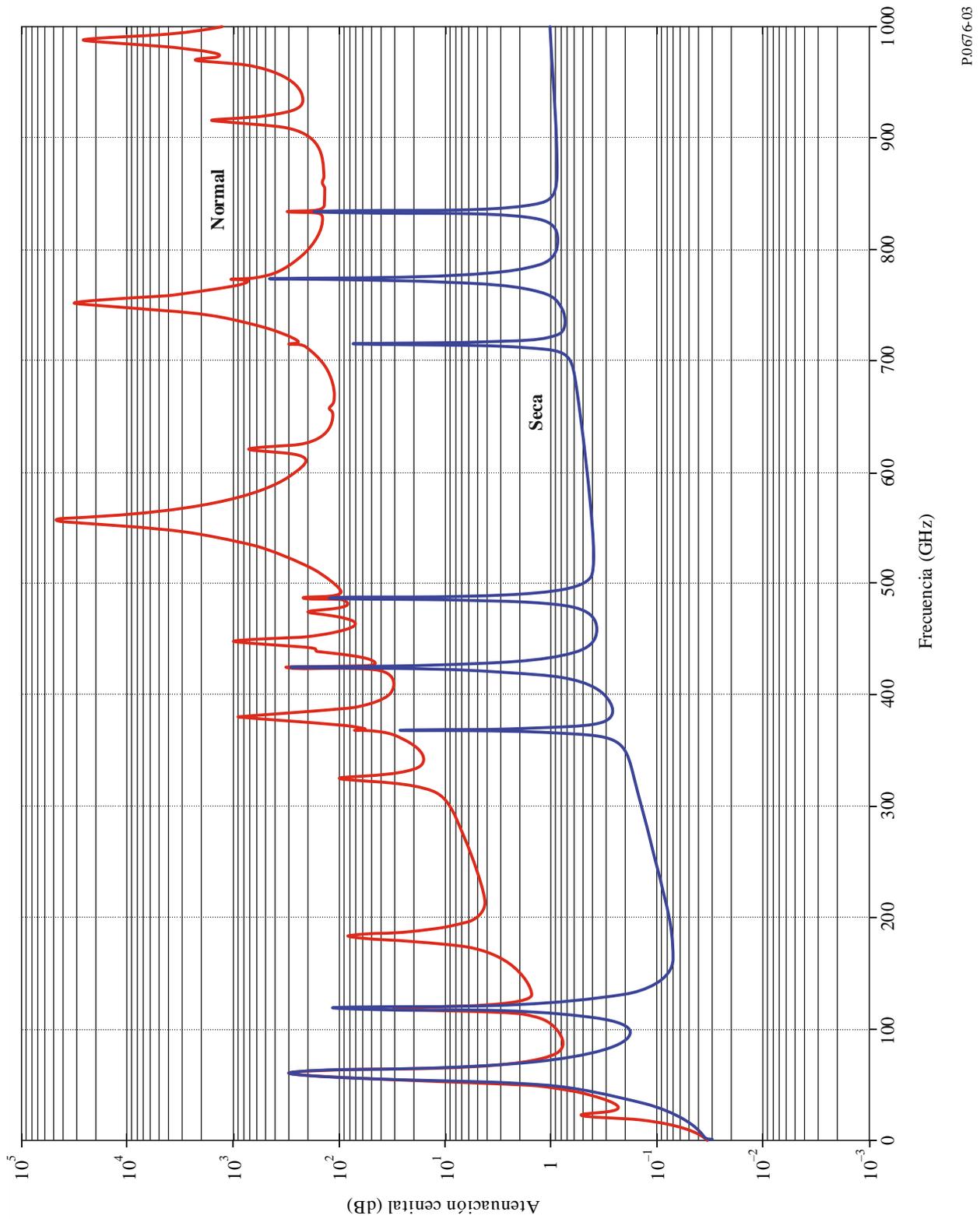
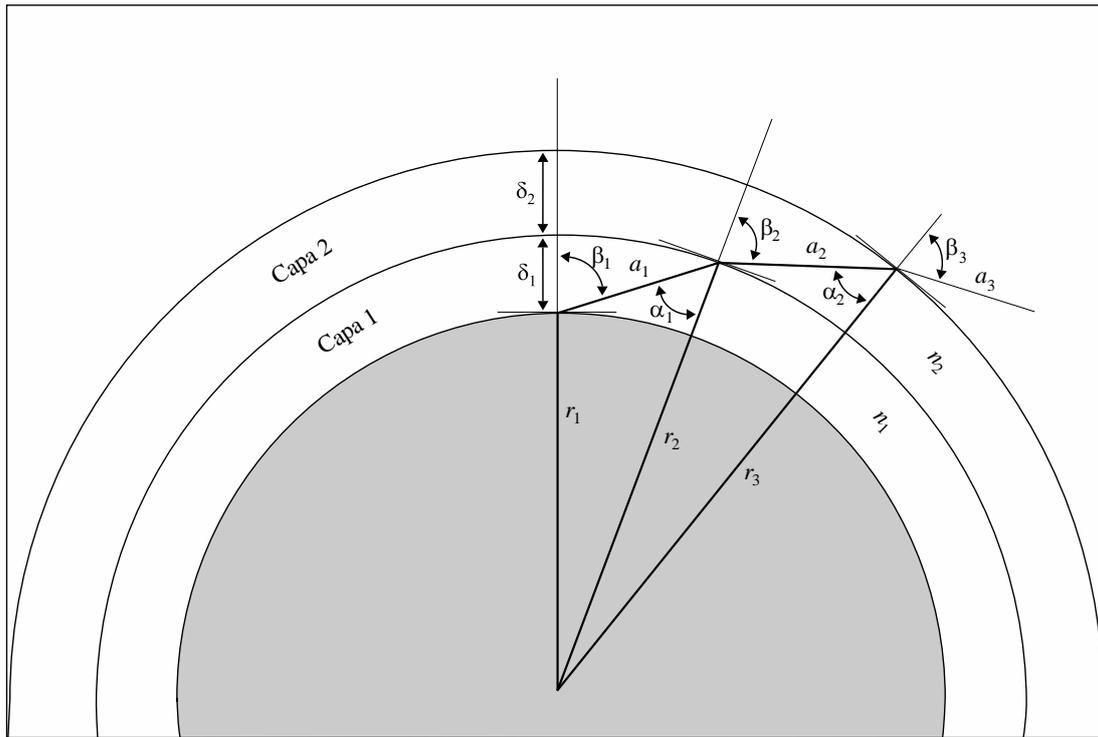


FIGURA 5  
Trayecto a través de la atmósfera



P.0676-05

### 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 producen dispersión, basada en la parte real de la refractividad compleja dependiente de la frecuencia. Este efecto se describe en términos de dispersión 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, la dispersión puede calcularse para los trayectos oblicuos.

De manera semejante a la ecuación (1), la dispersión de fase gaseosa específica,  $\varphi$ , se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\varphi = \varphi_o + \varphi_w = -1,2008f(N'_{\text{oxígeno}}(f) + N'_{\text{vapor de agua}}(f)) \quad (\text{grados/km}) \quad (24)$$

Siendo  $\varphi_o$  la dispersión de fase específica (grados/km) debida al aire seco,  $\varphi_w$  la dispersión de fase específica debida al vapor de agua,  $f$  la frecuencia (GHz) y  $N'_{\text{oxígeno}}(f)$  y  $N'_{\text{vapor de agua}}(f)$  las partes reales de la refracción compleja dependiente de la frecuencia:

$$N'_{\text{oxígeno}}(f) = \sum_i (\text{oxígeno}) S_i F'_i + N'_D(f) \quad (25a)$$

$$N'_{\text{vapor de agua}}(f) = \sum_i (\text{vapor de agua}) S_i F'_i \quad (25b)$$

donde:

$S_i$  es el valor de la  $i$ -ésima raya de oxígeno o vapor de agua de la ecuación (3),  $F'_i$  es la parte real del factor de forma de raya del oxígeno o el vapor de agua:

$$F'_i = \frac{f}{f_i} \left[ \frac{(f_i - f) + \delta \Delta f}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} - \frac{(f_i + f) + \delta \Delta f}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right] \quad (25c)$$

y la suma se extiende a todas las rayas espectrales en los Cuadros 1 y 2.

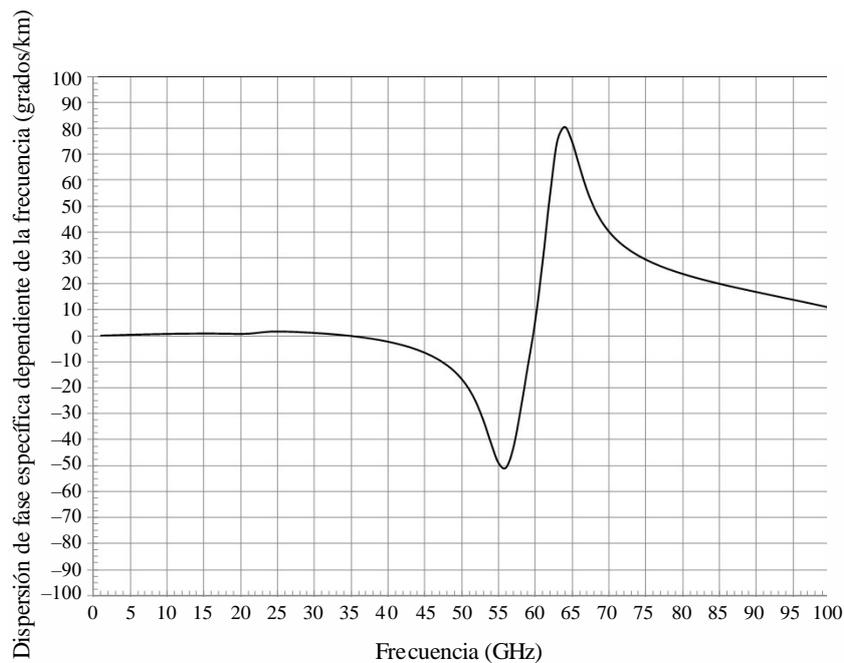
$N'_D(f)$  es la parte real del espectro continuo de seco debido a la absorción del nitrógeno inducida por la presión:

$$N'_D(f) = \frac{-6,14 \times 10^{-5} p \theta^2 f^2}{f^2 + d^2} \quad (25d)$$

$\Delta f$  se define en la ecuación (6b),  $\Delta f \delta$  se define en la ecuación (7) y  $d$  se define en la ecuación (9).

En la Fig. 6 se muestra la dispersión de fase específica dependiente de la frecuencia para una atmósfera normalizada ( $p = 1\,013,25$  hPa,  $\rho = 7,5$  g/m<sup>3</sup>,  $T = 15^\circ\text{C}$ ).

FIGURA 6  
Dispersión de fase específica dependiente de la frecuencia para una atmósfera normalizada  
( $p = 1\,013,25$  hPa,  $\rho = 7,5$  g/m<sup>3</sup>,  $T = 15^\circ\text{C}$ )



P.0676-06

#### 4 Temperatura de brillo de microondas descendente y ascendente

La temperatura de brillo de microondas se define como la temperatura de ruido en la salida de una antena sin pérdidas debida al brillo atmosférico incidente. La densidad espectral de potencia de ruido,  $S(f)$ , y la temperatura de ruido,  $T(f)$ , están relacionadas de manera que  $S(f) = k T(f)$ , siendo  $k$  la constante de Boltzmann. La temperatura de brillo de microondas espacio-Tierra descendente mirando hacia arriba y la temperatura de brillo de microondas Tierra-espacio ascendente mirando hacia abajo pueden calcularse como la ecuación (13). La capa 1 suele ser la superficie de la Tierra y la capa  $k$  está en la parte superior de la atmósfera (generalmente 100 km). La temperatura de brillo de microondas combinada es la suma de las temperaturas de brillo de microondas de cada capa atmosférica multiplicada por la pérdida entre la capa atmosférica y el punto de observación. Se supone que la atmósfera se encuentra en equilibrio termodinámico local y que la dispersión es inapreciable.

A continuación  $T_B(f_{GHz}, T_j)$  es la temperatura de brillo de microondas de la  $j$ -ésima capa definida por:

$$T_B(f_{GHz}, T_j) = 0,048 f_{GHz} \left[ \frac{1}{\exp\left(\frac{0,048 f_{GHz}}{T_j}\right) - 1} \right] \quad (\text{K}) \quad (26)$$

siendo  $T_j$  la temperatura física de la  $j$ -ésima capa.  $T_B(f_{GHz}, T_j)$  puede aproximarse adecuadamente con  $T_j$  para  $f_{GHz} < 0,42 T_j$ ; siendo  $\gamma_j$  la atenuación específica (dB/km) de la  $j$ -ésima capa obtenida con la ecuación (1), y  $a_j$  la longitud del trayecto (km) por la  $j$ -ésima capa de la ecuación (17).

La diferencia entre la temperatura física,  $T$ , y la temperatura de brillo de microondas de un cuerpo negro,  $T_B$ , se ilustra en la Fig. 7. Para una frecuencia determinada,  $f_{GHz}$ , a medida que la temperatura física,  $T$ , aumenta,  $T - T_B \rightarrow 0,024 f_{GHz}$ .

#### 4.1 Temperatura de brillo de microondas descendente debida a los gases

Si se conocen los perfiles de temperatura física, presión y vapor de agua a lo largo del trayecto, la temperatura de brillo de microondas descendente, que es la suma de: a) la temperatura de brillo de microondas cósmica atenuada por la atenuación atmosférica y b) la temperatura de brillo de microondas atmosférica descendente puede calcularse de la siguiente manera:

$$T_{descendente} = T_B(f_{GHz}, 2,73) 10^{-\left(\frac{\sum_{j=1}^k a_j \gamma_j}{10}\right)} + \sum_{j=1}^k T_B(f_{GHz}, T_j) \left(10^{\frac{a_j \gamma_j}{10}} - 1\right) 10^{-\left(\frac{\sum_{i=1}^j a_i \gamma_i}{10}\right)} \quad (\text{K}) \quad (27)$$

Sin embargo, puede resultar más conveniente implementar la temperatura de brillo de microondas neta como recursión utilizando el siguiente método:

$$\text{Paso 1: poner } T_{B,descendente} = 0,048 \left[ \frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0,048 f_{GHz}}{2,73}\right) - 1} \right] \quad (27a)$$

Repetir los pasos 2 a 5 para  $j = k$  a  $j = 1$  reduciendo  $j$  en 1 a cada iteración:

$$\text{Paso 2: poner } T_{B,descendente,última} = T_{B,descendente} \quad (27b)$$

$$\text{Paso 3: poner } T_B = 0,048 \left[ \frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0,048 f_{GHz}}{T_j}\right) - 1} \right] \quad (27c)$$

$$\text{Paso 4: poner } L_j = 10^{-\frac{a_j \gamma_j}{10}} \quad (27d)$$

$$\text{Paso 5: poner } T_{B,descendente} = [T_{B,descendente,última} L_j + (1 - L_j) T_B] \quad (27e)$$

siendo 2,73 K la temperatura de cuerpo oscuro de fondo de microondas cósmica exoatmosférica.

En la Fig. 8 se muestran la temperatura de brillo de microondas descendente para un trayecto cenital y una atmósfera normalizada.

De no conocerse los perfiles, puede utilizarse el método del § 3 del Anexo 1 a la Recomendación UIT-R P.618 para estimar la temperatura de brillo de microondas descendente, incluidos otros efectos de la atenuación atmosférica total.

Puede utilizarse la Recomendación UIT-R P.372 para determinar la temperatura de ruido del sistema de la estación terrena a partir de las temperaturas de brillo.

#### 4.2 Temperatura de brillo de microondas ascendente

La temperatura de brillo de microondas ascendente neta, que es la suma de: a) la temperatura de brillo de microondas atmosférica ascendente, b) la temperatura de brillo de microondas atmosférica descendente reflejada por la superficie de la Tierra y atenuada por la atenuación atmosférica neta, y c) la temperatura de brillo de microondas ascendente de la superficie de la Tierra atenuada por la atenuación atmosférica, puede calcularse de la siguiente manera:

$$T_{B,ascendente} = (\epsilon T_B(f_{GHz}, T_{Tierra}) + \rho T_{descendente}) \times 10^{-\left(\frac{\sum_{j=1}^k a_j \gamma_j}{10}\right)} + \sum_{j=1}^k T_B(f_{GHz}, T_j) \left(10^{\frac{a_j \gamma_j}{10}} - 1\right) 10^{-\left(\frac{\sum_{i=j}^k a_i \gamma_i}{10}\right)} \quad (\text{K}) \quad (28)$$

Sin embargo, puede resultar más conveniente implementar la temperatura de brillo de microondas neta como recursión utilizando el siguiente método:

$$\text{Paso 1: poner } T_{B,ascendente} = \epsilon 0,048 \left[ \frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0,048 f_{GHz}}{T_{Tierra}}\right)} - 1 \right] + \rho T_{B,descendente} \quad (28a)$$

Repetir los pasos 2 a 5 para  $j = 1$  a  $j = k$  aumentando  $j$  en 1 a cada iteración:

$$\text{Paso 2: poner } T_{B,ascendente,última} = T_{B,ascendente} \quad (28b)$$

$$\text{Paso 3: poner } T_B = 0,048 \left[ \frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0,048 f_{GHz}}{T_j}\right)} - 1 \right] \quad (28c)$$

$$\text{Paso 4: poner } L_j = 10^{\frac{-a_j \gamma_j}{10}} \quad (28d)$$

$$\text{Paso 5: poner } T_{B,ascendente} = [T_{B,ascendente,última} L_j + (1 - L_j) T_B] \quad (28e)$$

siendo:

$\epsilon$  : la emisividad de la superficie de la Tierra

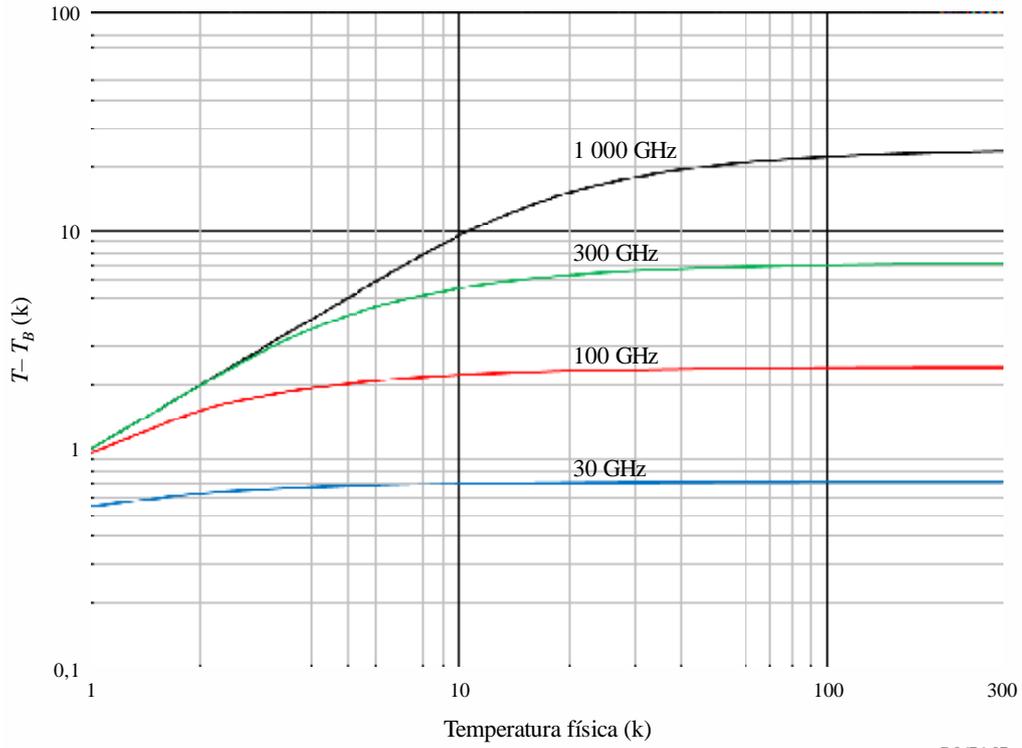
$\rho$  : la reflectividad de la superficie de la Tierra

$$\rho = 1 - \epsilon.$$

Si no se dispone de datos locales u otras orientaciones, puede utilizarse un valor de  $\epsilon$  de 0,95.

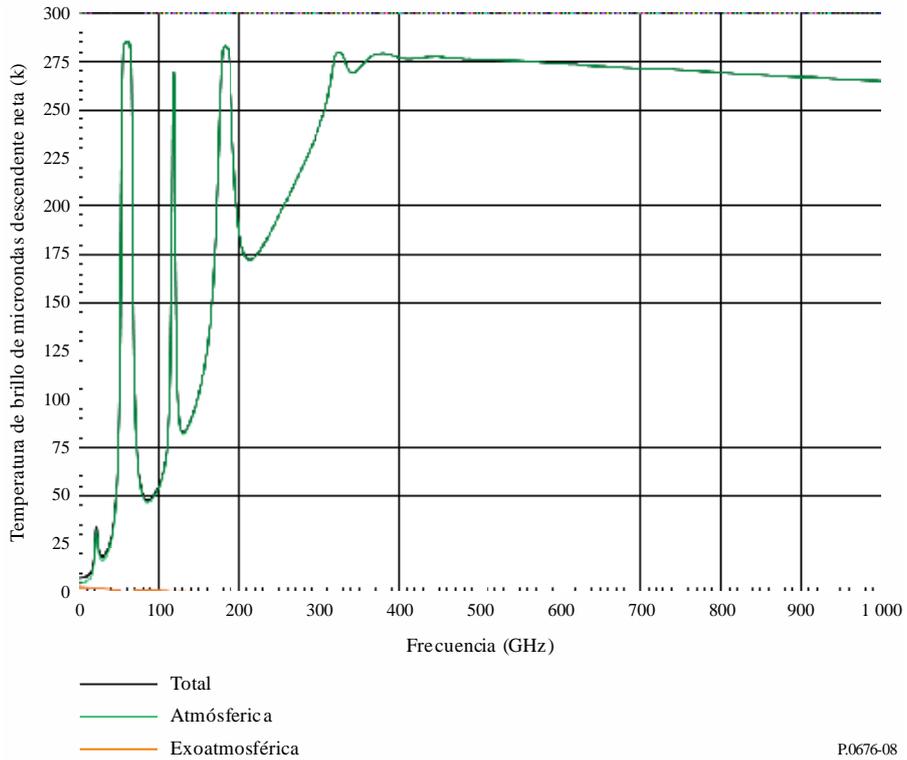
En la Fig. 9 se ilustra la temperatura de brillo de microondas ascendente para un trayecto cenital y una atmósfera normalizada (es decir, la atmósfera media anual de referencia mundial) con  $\epsilon = 0,95$ ,  $\rho = 0,05$  y  $T_{Tierra} = 290$  K.

FIGURA 7  
**Diferencia entre la temperatura física y la temperatura de brillo de microondas de un cuerpo oscuro**



P.0676-07

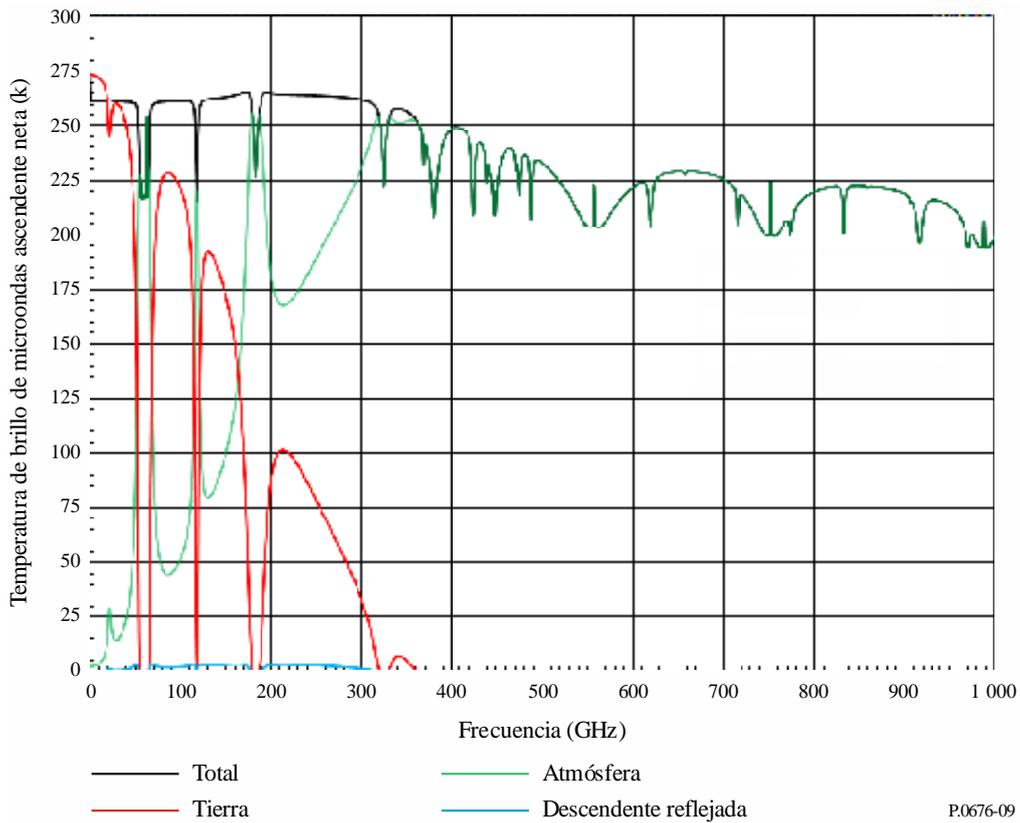
FIGURA 8  
**Temperatura de brillo de microondas descendente cenital para una atmósfera normalizada (centro 1 GHz)**



P.0676-08

FIGURA 9

**Temperatura de brillo de microondas ascendente cenital  
para una atmósfera normalizada (centro 1 GHz)**



## 5 Atenuación en trayectos oblicuos utilizando perfiles atmosféricos verticales

La atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos para cualquier perfil específico del Anexo 3 a la Recomendación UIT-R P.835 puede calcularse con el procedimiento del § 2.2 del Anexo 1, de la siguiente manera:

- 1) Convertir la densidad de vapor de agua,  $\rho$ , en presión parcial de vapor de agua,  $e$ , con la ecuación (4).
- 2) Convertir la presión del aire total ( $p_{tot} = p_{dry} + e$ ) en presión de aire seco,  $p_{dry}$ , restando la presión parcial del vapor de agua,  $e$ .
- 3) Calcular la atenuación total con la ecuación (13) sabiendo que los grosores de capa exponenciales se definen en la ecuación (14).
- 4) Si la altura de la superficie de la Tierra por encima del nivel medio del mar no se conoce a partir de los datos locales, puede obtenerse una estimación en la Recomendación UIT-R P.1511.
- 5) La suma de la ecuación (13) debe abarcar de la altura de la superficie de la Tierra por encima del nivel medio del mar a la altura máxima indicada en los datos disponibles.
- 6) Los 32 niveles de cada perfil deben interpolarse y extrapolarse (con respecto a la superficie de la Tierra, de ser necesario) por cada grosor de capa exponencial definido en la ecuación (14) suponiendo:
  - a) Una relación lineal entre el logaritmo de presión y la altura.
  - b) Una relación lineal entre la temperatura y la altura.
  - c) Una relación lineal entre el logaritmo de densidad de vapor de agua y la altura.

De ser necesario, pueden utilizarse las ecuaciones (24a) a (24c) del Anexo 1 a la Recomendación UIT-R P.834 (y los mapas asociados) para interpolar y extrapolar esos perfiles.

- 7) El ángulo de elevación en la superficie de la Tierra o cerca de ella es el ángulo de elevación aparente, en lugar del ángulo de elevación en el espacio libre. Para ángulos de elevación en el espacio libre iguales o inferiores a 10 grados, el ángulo de elevación aparente puede calcularse a partir del ángulo de elevación en el espacio libre con la ecuación (13) de la Recomendación UIT-R P.834.
- 8) La atenuación gaseosa en trayectos oblicuos aproximada en cualquier latitud y longitud entre puntos de la cuadrícula puede estimarse mediante interpolación bilineal de las estimaciones correspondientes de la atenuación gaseosa en trayectos oblicuos en los puntos de la cuadrícula circundantes utilizando el procedimiento del Anexo 1 de la Recomendación UIT-R P.1144. La atenuación gaseosa en trayectos oblicuos en cada punto de la cuadrícula circundante debe ir de la altura de la superficie de la Tierra por encima del nivel medio del mar en la latitud y longitud de interés a la altura máxima de cada perfil.

## 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 una gama de frecuencias limitada de 1 GHz a 350 GHz, ángulos de elevación del trayecto iguales o superiores a 5 grados, un número limitado de condiciones meteorológicas y una variedad limitada de configuraciones geométricas.

#### 1 Atenuación específica

La atenuación específica debida al oxígeno,  $\gamma_o$  (dB/km), y la atenuación específica debida al vapor de agua,  $\gamma_w$  (dB/km) son idénticas a  $\gamma_o$  y  $\gamma_w$  en la ecuación (1). La atenuación específica para aire húmedo debida al oxígeno,  $\gamma_o$  (dB/km), y la atenuación específica para aire húmedo debida al vapor de agua,  $\gamma_w$  (dB/km), utilizadas en estos métodos simplificados son idénticas a  $\gamma_o$  y  $\gamma_w$  en la ecuación (1).

La presión seca,  $p$ , la temperatura,  $T$ , y la densidad de vapor de agua,  $\rho$ , son valores 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  $p$ ,  $T$  y  $\rho$ .

La Fig. 10 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. Además, los valores para  $\rho$  en la superficie de la Tierra pueden encontrarse en la Recomendación UIT-R P.836.

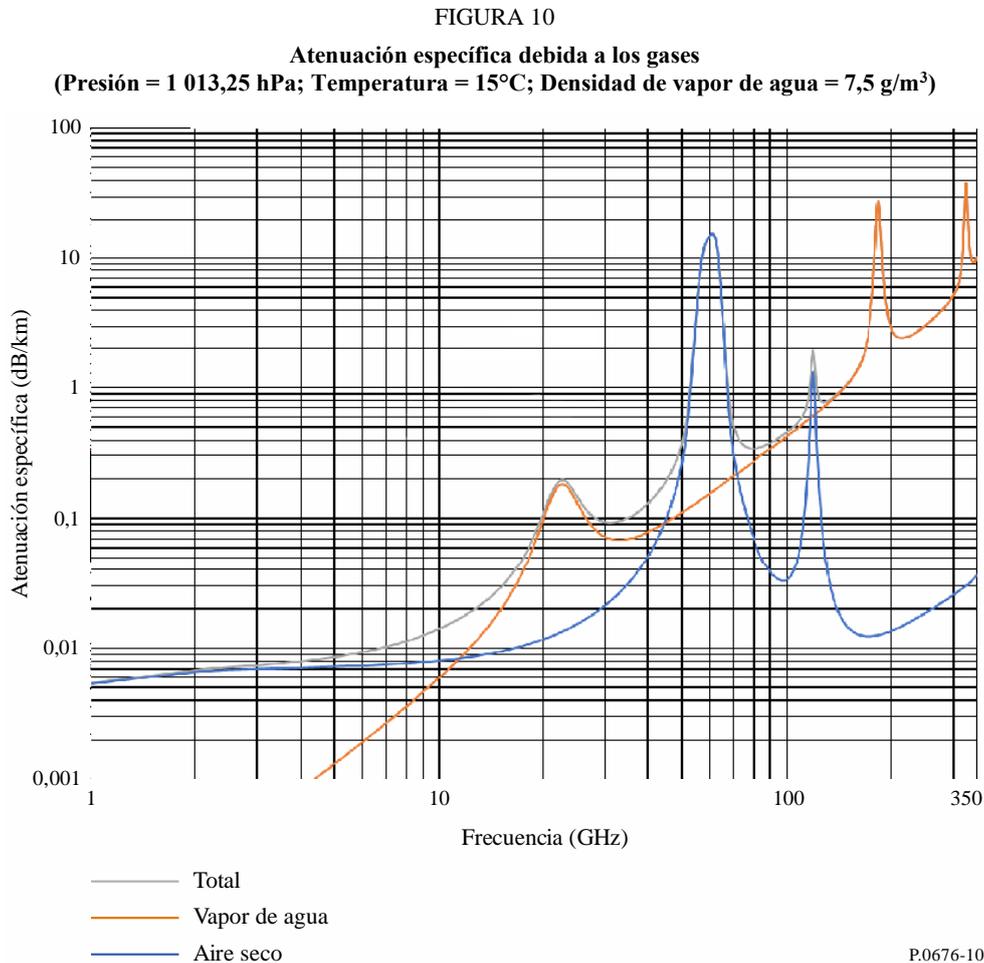
## 2 Atenuación en el trayecto

### 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:

$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{dB} \quad (29)$$

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



### 2.2 Trayectos oblicuos

En esta sección se recogen algoritmos para estimar la atenuación gaseosa total para trayectos inclinados a través de la atmósfera de la Tierra definiendo las alturas equivalentes de oxígeno y vapor de agua por las que se multiplican las atenuaciones específicas de oxígeno y vapor de agua para estimar las correspondientes atenuaciones cenitales de oxígeno y vapor de agua. Las atenuaciones específicas del oxígeno y del vapor de agua se calculan a la presión, temperatura y densidad del vapor de agua correspondientes a la altitud de la estación terrenal utilizando el método de la sección 1 del Anexo 1; y las alturas equivalentes de oxígeno y vapor de agua se calculan a la presión, temperatura y densidad del vapor de agua en la superficie de la Tierra. El concepto de altura equivalente supone un descenso exponencial de la atenuación específica de la atmósfera respecto de la altitud. Estos algoritmos pueden utilizarse para calcular la atenuación gaseosa total del trayecto inclinado para frecuencias distintas de 0,5 GHz de los centros de las rayas espectroscópicas para altitudes de estaciones terrenales de hasta 10 km sobre la superficie de la Tierra. Para frecuencias dentro de

los 0,5 GHz de los centros de las rayas espectroscópicas a cualquier altitud de la estación terrenal, debe utilizarse el método línea por línea del Anexo 1. Las ecuaciones que figuran a continuación se han obtenido a partir de los perfiles atmosféricos de referencia del Anexo 1 de la Recomendación UIT-R P.835 y tienen una precisión de hasta el 10 por ciento para estos perfiles atmosféricos específicos. La precisión de estos algoritmos en un lugar y momento específicos puede evaluarse comparando la atenuación estimada por estos algoritmos con la atenuación calculada utilizando el método del Anexo 1 para los perfiles atmosféricos representativos de los Anexos 2 y 3 de la Recomendación UIT-R P.835, o los datos de radiosondas.

La altura equivalente debida al componente de oxígeno de la atenuación gaseosa viene dada por:

$$h_o = \frac{6,1A}{1+0,17r_p^{-1,1}}(1+t_1+t_2+t_3) \tag{30}$$

siendo:

$$t_1 = \frac{5,1040}{(1+0,066r_p^{-2,3})} \exp\left(-\left(\frac{f-59,7}{2,87+12,4 \times \exp(-7,9r_p)}\right)^2\right) \tag{31}$$

$$t_2 = \sum_{i=1}^7 \frac{c_i \exp(2,12r_p)}{(f-f_i)^2 + 0,025 \exp(2,2r_p)} \tag{32}$$

$$t_3 = \frac{0,0114f}{1+0,14r_p^{-2,6}} \frac{15,02f^2 - 1353f + 5,333 \times 10^4}{f^3 - 151,3f^2 + 9629f - 6803} \tag{33}$$

$$A = 0,7832 + 0,00709(T - 273,15) \tag{34}$$

donde  $f_i$  y  $c_i$  en función de  $i$  son los que se muestran en el Cuadro 3.

CUADRO 3

Parámetros  $f_i$  y  $c_i$

$i$	$c_i$	$f_i$ (GHz)
1	0,1597	118,750334
2	0,1066	368,498246
3	0,1325	424,763020
4	0,1242	487,249273
5	0,0938	715,392902
6	0,1448	773,839490
7	0,1374	834,145546

con la restricción de que:

$$h_o \leq 10,7r_p^{0,3} \text{ cuando } f < 70 \text{ GHz} \tag{35a}$$

$T$  es la temperatura en la superficie de la Tierra en K,  $\rho$  es la densidad del vapor de agua en la superficie de la tierra en  $\text{g/m}^3$ ,  $e = \frac{\rho T}{216,7}$  hPa, y  $r_p = (p + e)/1013,25$ .

La altura equivalente debida al componente de vapor de agua de la atenuación gaseosa es:

$$h_w = A + B \times \sum_{i=1}^{14} \frac{a_i \sigma_w}{(f - f_i)^2 + b_i \sigma_w} \quad (35b)$$

siendo  $a_i$ ,  $b_i$  y  $f_i$  en función de  $i$  como se muestran en el Cuadro 4 y:

$$A = 1,9298 - 0,04166(T - 273,15) + 0,0517\rho \quad (36)$$

$$B = 1,1674 - 0,00622(T - 273,15) + 0,0063\rho \quad (37)$$

$$\sigma_w = \frac{1,013}{1 + \exp[-8,6(r_p - 0,57)]} \quad (38)$$

CUADRO 4

**Parámetros  $f_i$ ,  $a_i$  y  $b_i$**

$i$	$f_i$ (GHz)	$a_i$	$b_i$
1	22,235080	1,52	2,56
2	183,310087	7,62	10,2
3	325,152888	1,56	2,70
4	380,197353	4,15	5,70
5	439,150807	0,20	0,91
6	448,001085	1,63	2,46
7	474,689092	0,76	2,22
8	488,490108	0,26	2,49
9	556,935985	7,81	10,0
10	620,70087	1,25	2,35
11	752,033113	16,2	20,0
12	916,171582	1,47	2,58
13	970,315022	1,36	2,44
14	987,926764	1,60	1,86

$T$  es la temperatura en la superficie de la Tierra en K,  $\rho$  es la densidad de vapor de agua en la superficie de la Tierra en  $\text{g/m}^3$ ,  $e = \frac{\rho T}{216,7}$  hPa y  $r_p = (p + e)/1013,25$ .

La atenuación cenital entre 50 y 70 GHz es una función complicada de la frecuencia, como puede observarse en la Fig. 12, y las anteriores expresiones para la altura equivalente pueden proporcionar únicamente una estimación aproximada, en general, de los niveles de atenuación que probablemente aparezcan en esta gama de frecuencias. Para obtener una mayor precisión, debe utilizarse el procedimiento descrito en el Anexo 1.

La atenuación cenital total será entonces:

$$A = \gamma_o h_o + \gamma_w h_w \quad \text{dB} \quad (39)$$

La Fig. 11 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.

## 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:

$$A = \frac{A_o + A_w}{\text{sen } \varphi} \quad \text{dB} \quad (40)$$

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:

$$A = \frac{A_o + A_w}{\text{sen } \varphi} \quad \text{dB} \quad (41)$$

donde  $A_o = h_o \gamma_o$  y  $A_w$  aparecen 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 (39) los valores  $h_o$  y  $h_w$  respectivamente por los valores  $h'_o$  y  $h'_w$ :

$$h'_o = h_o \left[ e^{-h_1/h_o} - e^{-h_2/h_o} \right] \quad \text{km} \quad (42)$$

$$h'_w = h_w \left[ e^{-h_1/h_w} - e^{-h_2/h_w} \right] \quad \text{km} \quad (43)$$

teniendo en cuenta que el valor  $\rho$  de la densidad de vapor de agua utilizado en la ecuación (1) es el valor hipotético al nivel del mar, calculado del siguiente modo:

$$\rho = \rho_1 \times \exp(h_1/2) \quad (44)$$

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 (42) y (43) 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 grados

### 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:

$$A = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[ \frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x_1) e^{-h_1/h_o}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x_2) e^{-h_2/h_o}}{\cos \varphi_2} \right] \\ + \gamma_w \sqrt{h_w} \left[ \frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x'_1) e^{-h_1/h_w}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x'_2) e^{-h_2/h_w}}{\cos \varphi_2} \right] \quad \text{dB} \quad (45)$$

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:

$$F(x) = \frac{1}{0,661 x + 0,339 \sqrt{x^2 + 5,51}} \quad (46)$$

$$\varphi_2 = \arccos \left( \frac{R_e + h_1}{R_e + h_2} \cos \varphi_1 \right) \quad (47a)$$

$$x_i = \text{tg } \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_o}} \quad \text{para } i = 1, 2 \quad (47b)$$

$$x'_i = \text{tg } \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_w}} \quad \text{para } i = 1, 2 \quad (47c)$$

teniendo en cuenta que el valor  $\rho$  de la densidad de vapor de agua utilizado en la ecuación (1) es el valor hipotético al nivel del mar calculado del siguiente modo:

$$\rho = \rho_1 \cdot \exp(h_1/2) \quad (48)$$

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 11

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>)

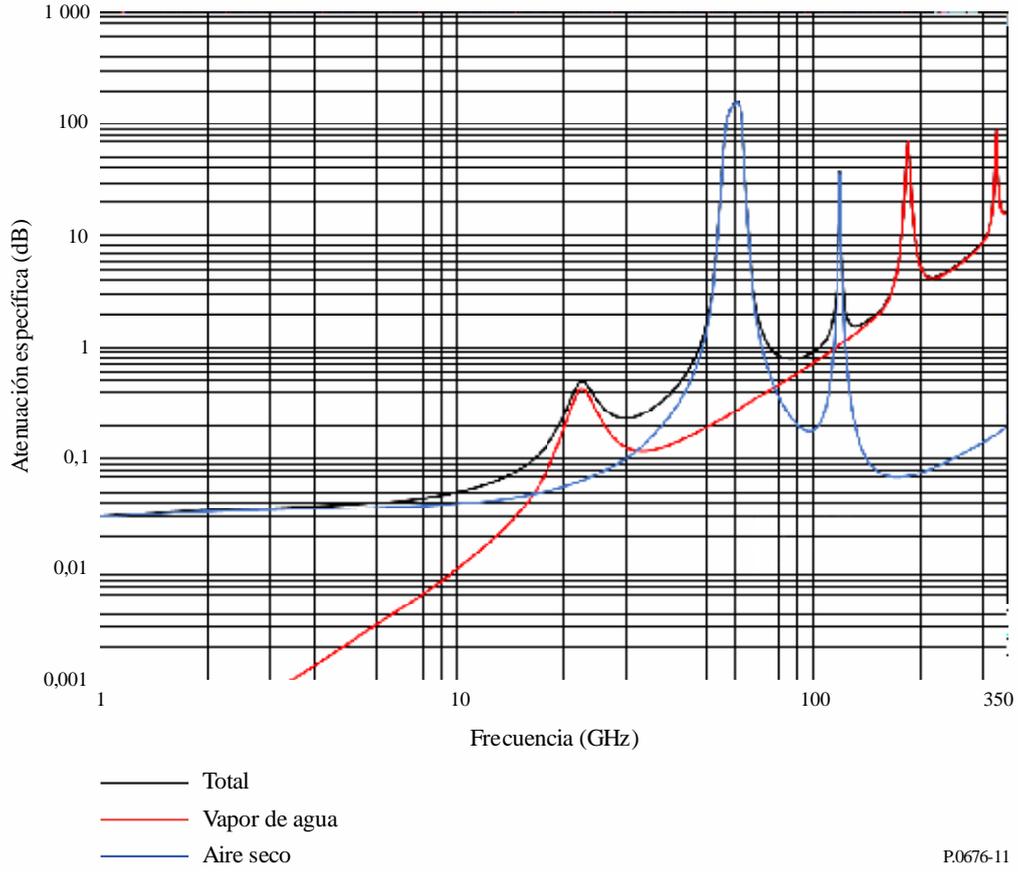
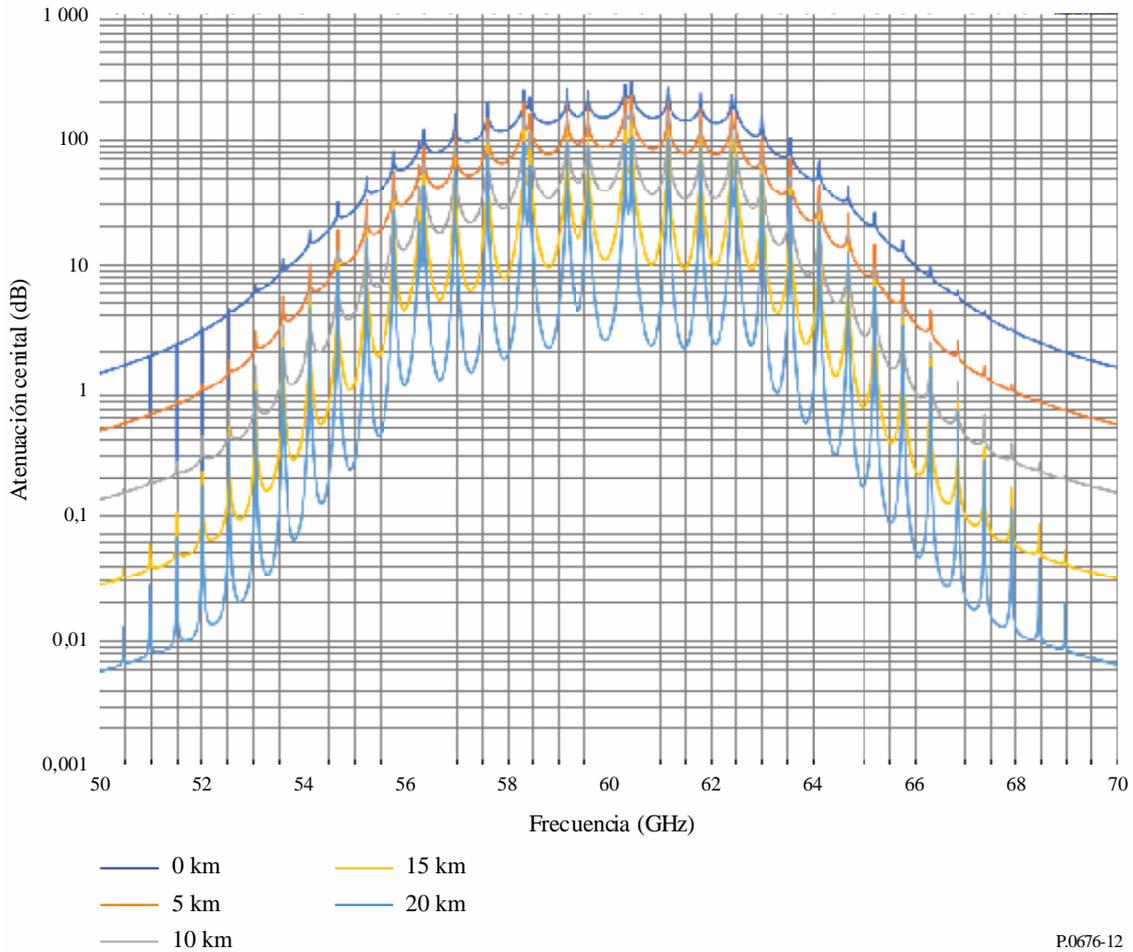


FIGURA 12

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 de la Tierra. Si se conoce el contenido integrado del vapor de agua,  $V_i$ , la atenuación total causada por el vapor de agua puede calcularse del siguiente modo:

$$A_w = \begin{cases} \frac{0,0176 V_i \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}, & 1 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz} \\ \frac{0,0176 V_i \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})} (ah^b + 1), & 20 \text{ GHz} < f \leq 350 \text{ GHz} \end{cases} \text{ dB} \quad (49)$$

siendo:

$$a = 0,2048 \exp \left[ - \left( \frac{f - 22,43}{3,097} \right)^2 \right] + 0,2326 \exp \left[ - \left( \frac{f - 183,5}{4,096} \right)^2 \right] + 0,2073 \exp \left[ - \left( \frac{f - 325}{3,651} \right)^2 \right] - 0,1113 \quad (50)$$

$$b = 8,741 \times 10^4 \exp(-0,587f) + 312,2f^{-2,38} + 0,723 \quad (51)$$

$$h = \begin{cases} 0 & h_s < 0 \text{ km} \\ h_s & 0 \text{ km} \leq h_s \leq 4 \text{ km} \\ 4 & h_s > 4 \text{ km} \end{cases} \quad (\text{km}) \quad (52)$$

$$\rho_{v,ref} = \frac{V_t}{2,38} \text{ (g/m}^3\text{)} \quad (53)$$

$$t_{ref} = 14 \ln\left(0,22 \frac{V_t}{2,38}\right) + 3 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (54)$$

y

$f$ : frecuencia (GHz)

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

$p_{ref}$  = 845 (hPa)

$V_t$ : 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 a partir del componente de vapor de agua de la ecuación (1) (dB/km).

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

---