

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R P.676-13
(08/2022)

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

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

Publicación electrónica
Ginebra, 2023

© UIT 2023

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.676-13*

Atenuación debida a los gases atmosféricos y efectos conexos

(Cuestión UIT-R 201/3)

(1990-1992-1995-1997-1999-2001-2005-2007-2009-2012-2013-2016-2019-2022)

Cometido

La presente Recomendación define:

- a) los métodos del Anexo 1 para calcular la atenuación gaseosa en trayectos oblicuos, la no linealidad de fase, la curvatura atmosférica, el exceso de longitud del trayecto atmosférico y las temperaturas de ruido descendente y ascendente debidas al oxígeno y al vapor de agua en la gama de frecuencias de 1 a 1 000 GHz para perfiles arbitrarios conocidos de presión, temperatura y altura del vapor de agua;
- b) el método aproximativo del Anexo 2 para determinar la atenuación gaseosa instantánea del trayecto oblicuo debida al oxígeno y al vapor de agua para la gama de frecuencias de 1 a 350 GHz cuando la presión superficial instantánea, la temperatura superficial y la densidad superficial del vapor de agua o el contenido integrado de vapor de agua¹ se conocen a partir de datos locales, un perfil de referencia o mapas digitales referenciados;
- c) el método aproximativo del Anexo 2 para calcular las estadísticas de la atenuación gaseosa en trayectos oblicuos debida al oxígeno y al vapor de agua para la gama de frecuencias de 1 a 350 GHz cuando las estadísticas de la presión superficial, la temperatura superficial y la densidad superficial del vapor de agua o el contenido integrado de vapor de agua se conocen a partir de datos locales, un perfil de referencia o mapas digitales de referencia;
- d) una aproximación de Weibull para calcular la atenuación debida al vapor de agua en trayectos oblicuos para su utilización en la Recomendación UIT-R P.1853.

Palabras clave

Atenuación gaseosa, atenuación específica, atenuación en trayectos oblicuos, vapor de agua, oxígeno, dispersión de fase, propagación ascendente, propagación descendente, curvatura

Acrónimos/siglas/glosario

Altitud	Distancia vertical respecto del nivel medio del mar
Dispersión	Variación del retardo temporal en función de la frecuencia
Descendente	Propagación descendente del ruido a través de la atmósfera
Exoatmosférico	Que tiene su origen fuera de la atmósfera
Altura	Distancia vertical respecto de la superficie de la Tierra
Isótopo	Distintos tipos de un elemento químico
Ascendente	Propagación ascendente del ruido a través de la atmósfera

* La Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones introdujo en junio de 2024 enmiendas de forma a esta Recomendación con arreglo a lo dispuesto en la resolución UIT-R 1.

¹ Por «contenido integrado de vapor de agua» se entiende la cantidad total de vapor de agua presente en una columna vertical que se extiende desde la superficie de la Tierra hasta la parte superior de la atmósfera. Los términos «contenido integrado de vapor de agua», «contenido total de vapor de agua», «vapor de agua total en columna (columnar)», «contenido columnar integrado de vapor de agua» y «contenido columnar total de vapor de agua» son sinónimos.

División Zeeman División de una línea espectral en varios componentes en presencia de un campo magnético estático

Recomendaciones y Manuales del UIT-R conexos

Recomendación UIT-R P.528

Recomendación UIT-R P.530

Recomendación UIT-R P.618

Recomendación UIT-R P.619

Recomendación UIT-R P.676

Recomendación UIT-R P.836

Recomendación UIT-R P.1144

Recomendación UIT-R P.1510

Recomendación UIT-R P.1853

Recomendación UIT-R P.2001

Recomendación UIT-R P.2041

Manual de radiometeorología

NOTA – Siempre debe utilizarse la revisión/edición más reciente de cada Recomendación en vigor.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

a) que es necesario calcular la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos, la no linealidad de fase, la curvatura atmosférica, el exceso de longitud del trayecto atmosférico y las temperaturas de ruido descendente y ascendente debidas al oxígeno y al vapor de agua en la gama de frecuencias de 1 a 1 000 GHz para perfiles arbitrarios conocidos de presión, temperatura y altura del vapor de agua;

b) que es necesario determinar la atenuación instantánea debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al oxígeno y al vapor de agua para la gama de frecuencias de 1 a 350 GHz cuando se conocen la presión instantánea en superficie, la temperatura en superficie y la densidad del vapor de agua en superficie o las estadísticas integradas del contenido de vapor de agua, bien a partir de datos locales, de un perfil de referencia o de mapas digitales de referencia;

c) que es necesario estimar las estadísticas de la atenuación gaseosa en trayectos oblicuos debida al oxígeno y al vapor de agua para la gama de frecuencias de 1 a 350 GHz cuando se conocen las estadísticas de la presión superficial, la temperatura superficial y la densidad superficial del vapor de agua o el contenido integrado de vapor de agua;

d) que es necesario efectuar una aproximación de Weibull a la atenuación del vapor de agua en trayectos oblicuos para su utilización en la Recomendación UIT-R P.1853,

recomienda

1 que, partiendo de perfiles de altura arbitrarios de temperatura, presión y densidad de vapor de agua conocidos a partir de datos locales (por ejemplo, mediciones de radiosonda o cualquiera de los perfiles de referencia de los Anexos 1, 2 ó 3 de la Recomendación UIT-R P.835), se utilice el método del Anexo 1 para calcular la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos, la no linealidad de fase, la curvatura atmosférica, el exceso de longitud del trayecto atmosférico y las temperaturas de ruido descendente y ascendente atribuibles al oxígeno y al vapor de agua para la gama de frecuencias de 1 a 1 000 GHz;

2 que, partiendo de valores instantáneos de temperatura superficial, presión superficial y densidad del vapor de agua superficial o contenido integrado de vapor de agua conocidos a partir de datos locales (por ejemplo, datos obtenidos en una estación meteorológica o datos históricos), se utilice el método aproximativo del Anexo 2 para determinar la atenuación instantánea debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al oxígeno y al vapor de agua para la gama de frecuencias de 1 a 350 GHz;

3 que, partiendo de valores de temperatura superficial, presión superficial y densidad del vapor de agua superficial o las estadísticas integradas del contenido de vapor de agua conocidas a partir de datos históricos a largo plazo o de los mapas de la Recomendación UIT-R P.2145, se utilice el método aproximado del Anexo 2 para estimar las estadísticas de la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al oxígeno y al vapor de agua para la gama de frecuencias de 1 a 350 GHz;

4 que, en la aplicación de la Recomendación UIT-R P.1853, se utilice el método del Anexo 2 para realizar una la aproximación de Weibull a la atenuación debida al vapor de agua en trayectos oblicuos.

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/m³ (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, γ , viene dada por la fórmula:

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

en este caso, γ_o y γ_w son las atenuaciones específicas (dB/km) debidas al aire seco (atenuación causada por el oxígeno, atenuación del nitrógeno inducida por presión y la atenuación no resonante de Debye) y el vapor de agua, respectivamente y 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:

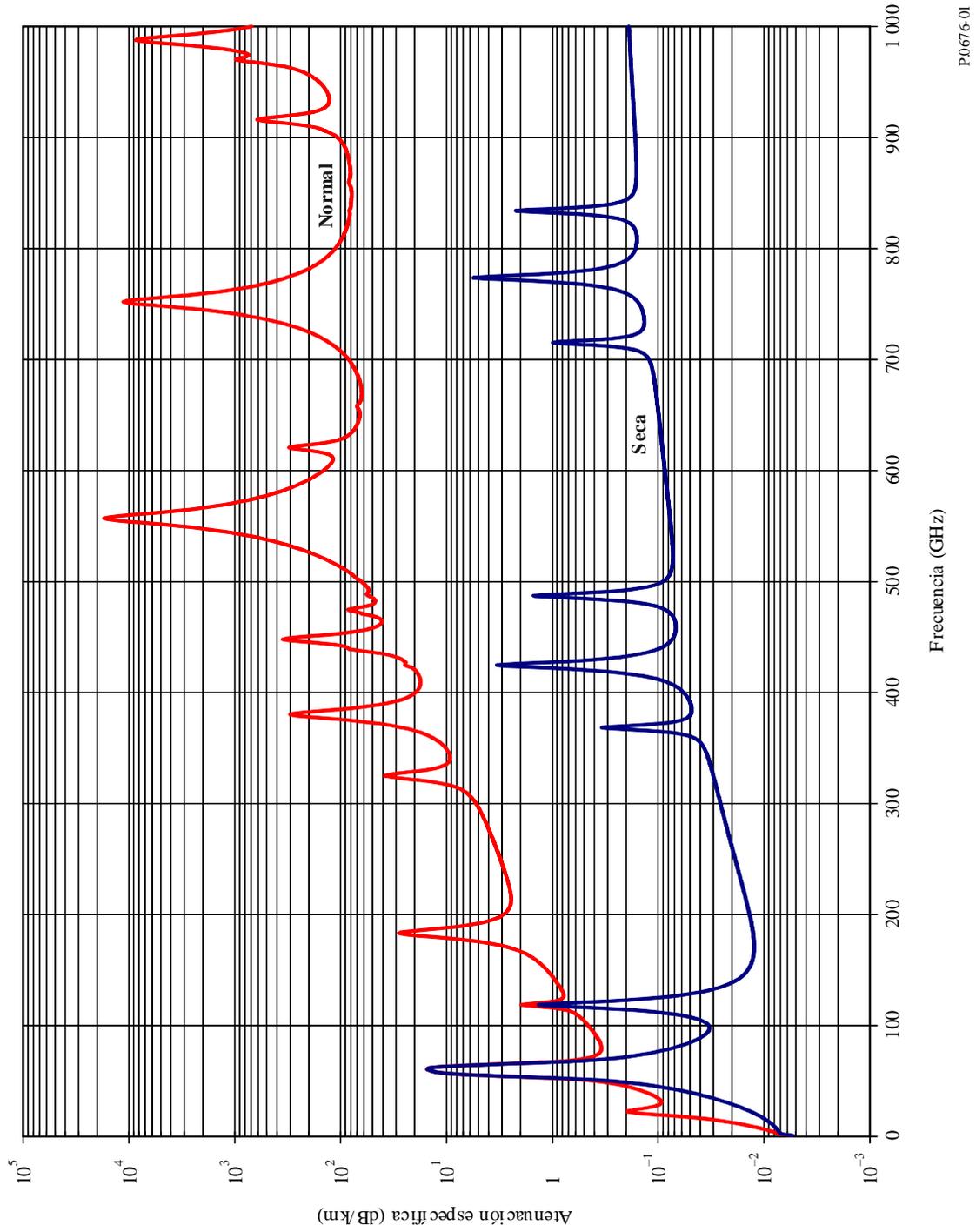
p : presión del aire seco (hPa)

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

$\theta = 300/T$

T : temperatura (K).

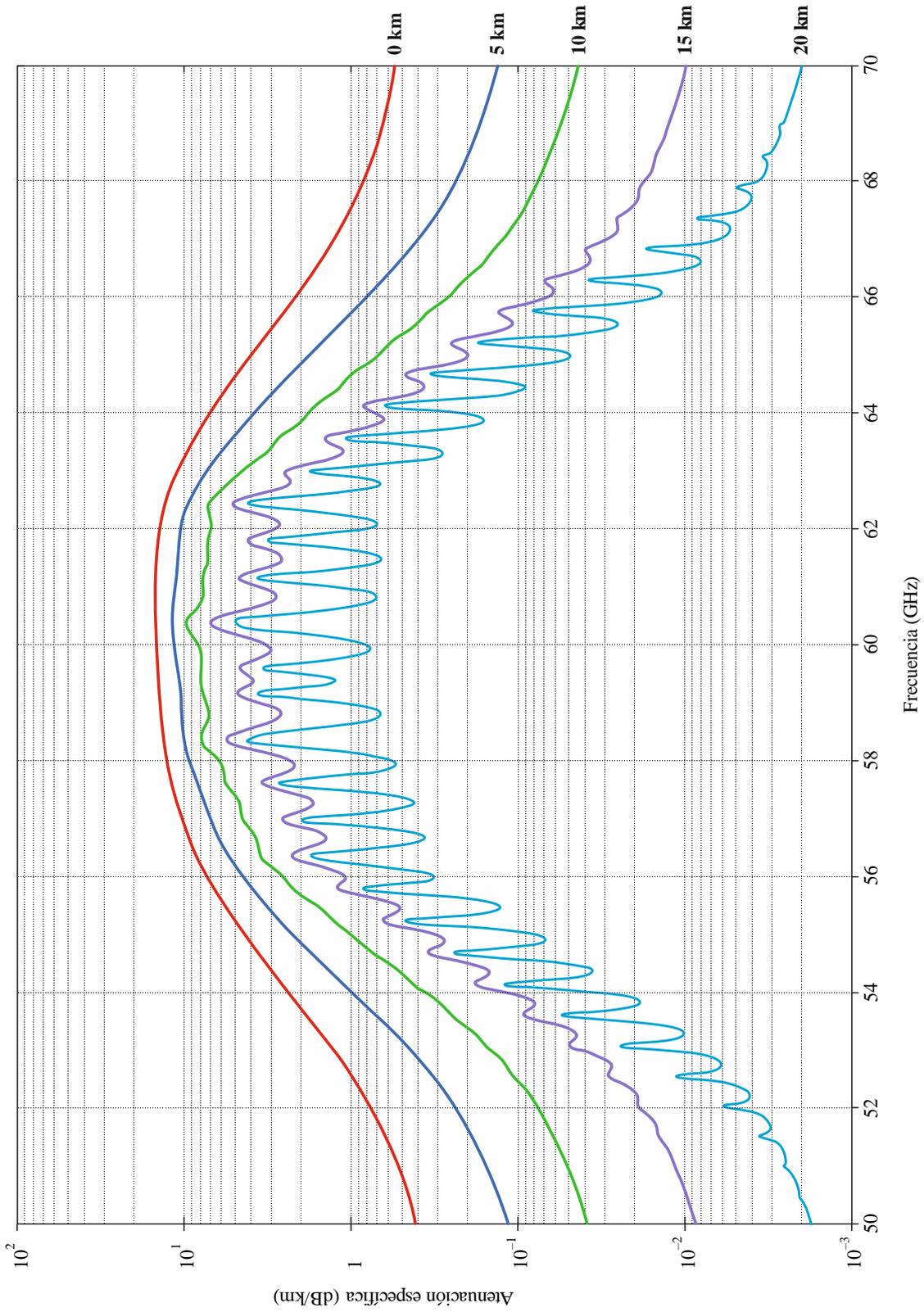
FIGURA 1
Atenuación específica debida a los gases atmosféricos, calculada
en pasos de 1 GHz e incluyendo los centros de las rayas



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.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 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, ρ 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 Δf es la anchura de la raya:

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

La anchura de la raya Δf se modifica para tener en cuenta la separación de Zeeman de las rayas del oxígeno y el ensanchamiento debido al efecto Doppler de las rayas del vapor de agua:

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

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

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

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 el § 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), φ_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 numérica², 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 γ_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, δ_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.

² 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 δ_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. α_i y β_{i+1} son los ángulos de incidencia de entrada y salida en la interfaz entre la i -ésima y la $(i+1)$ ^a 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, γ_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 α_i es:

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

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

La ecuación (18a) está desaconsejada por su escasa precisión. β_1 es el ángulo cenital local en la superficie de la Tierra o cerca de la misma (complemento del ángulo de elevación aparente, φ ; es decir, $\beta_1 = 90^\circ - \varphi$).

β_{i+1} puede calcularse iterativamente a partir de α_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 β_i directamente sin calcular α_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, α_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 $90^\circ - \beta_1$.

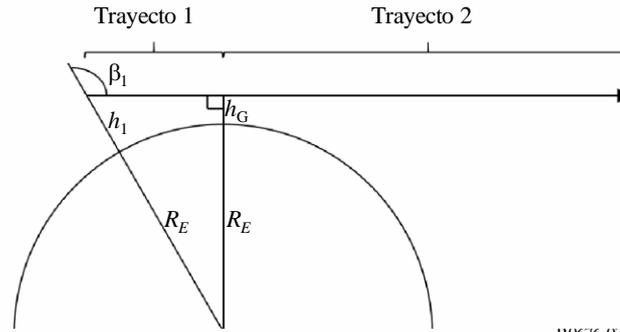
Aplicando la ley de Snell en coordenadas polares:

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

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° 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° .

FIGURA 3
Geometral de altura rasante



P.0676-03

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, φ_s , en la estación espacial es negativo y el ángulo de elevación aparente en la estación terrena es φ_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 φ_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 φ_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:

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

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

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

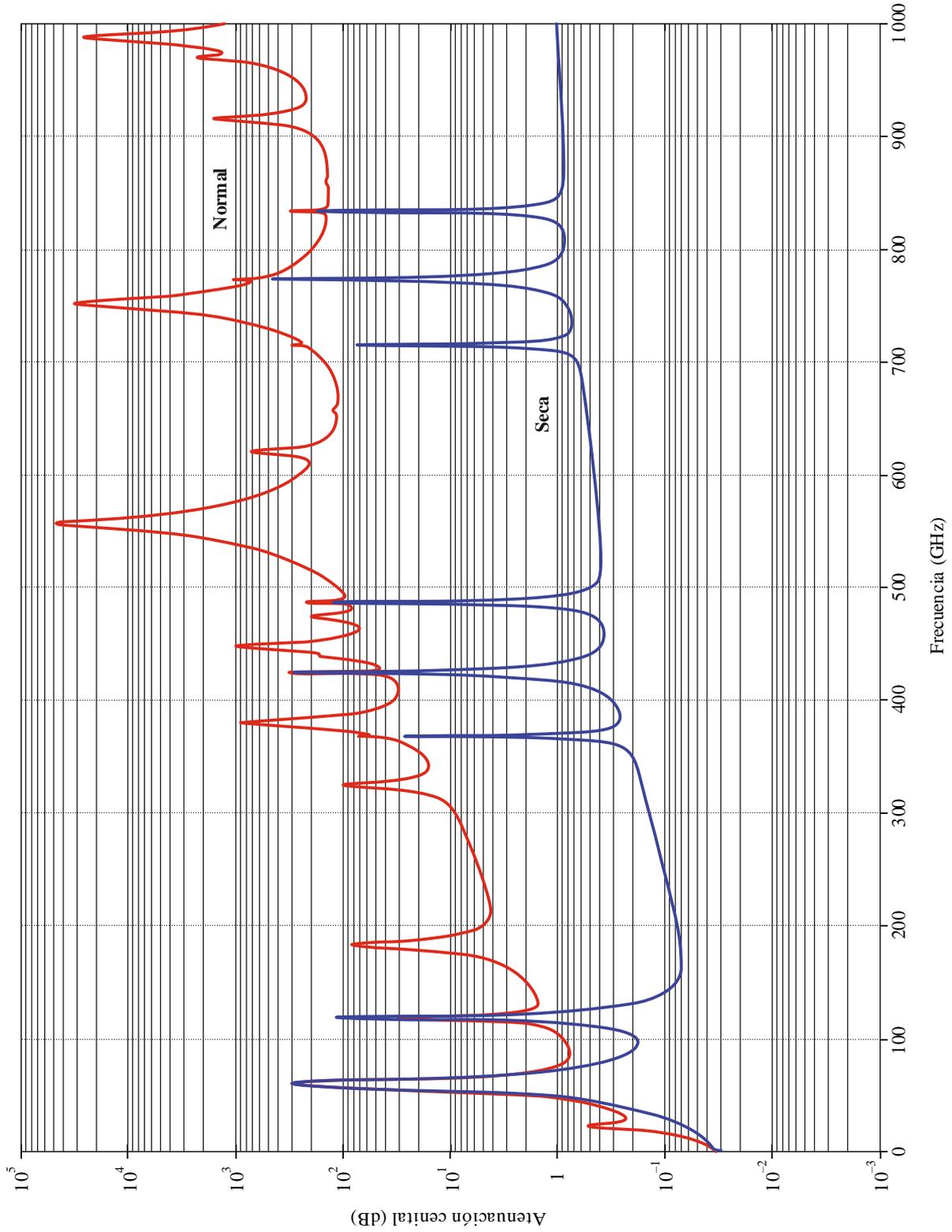
Dado que el índice de refracción troposférica es superior a 1, la longitud del trayecto atmosférico efectivo supera la longitud del trayecto geométrico, en cuyo caso la longitud del trayecto atmosférico adicional, ΔL , es:

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

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.

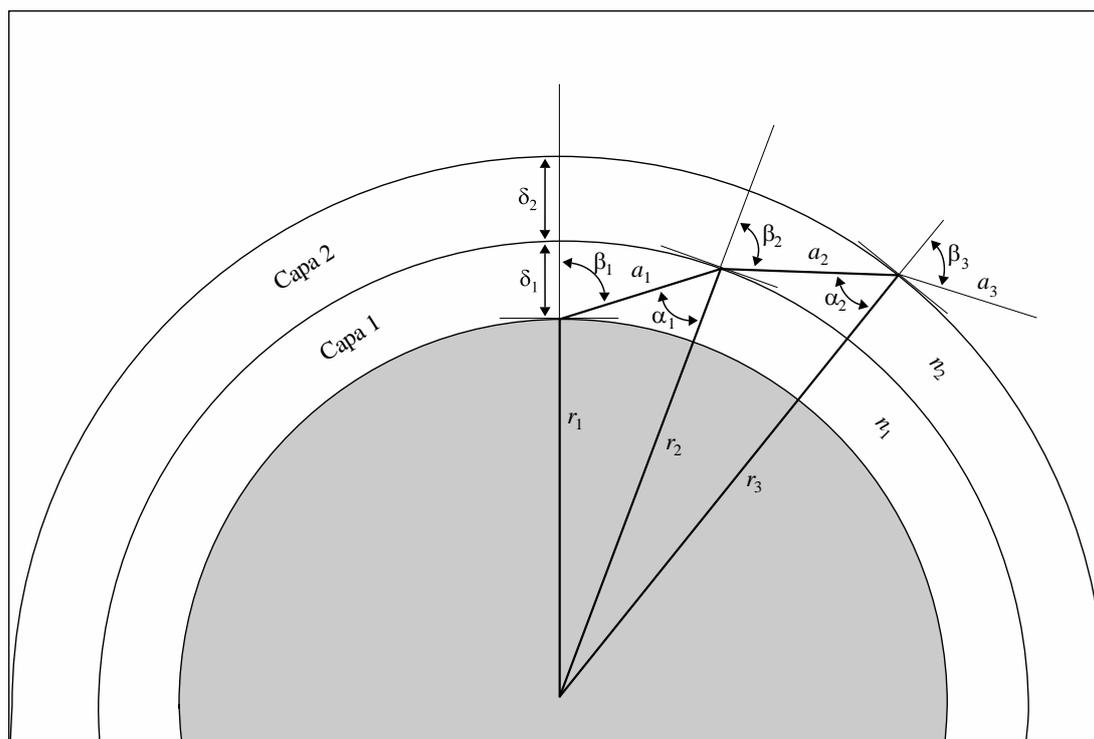
FIGURA 4

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



P.0676-03

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, φ , se obtiene con la siguiente ecuación:

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

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

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

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

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.

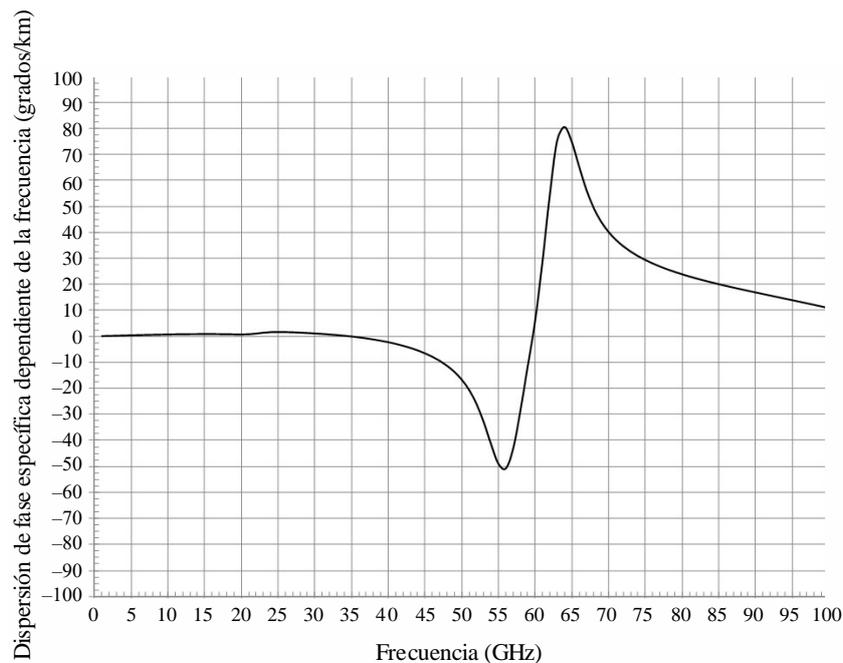
$N'_D(f)$ es la parte real del espectro continuo de seco debido a la absorción del nitrógeno inducida por la presión:

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

Δf 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/m³, $T = 15^\circ\text{C}$).

FIGURA 6
Dispersión de fase específica dependiente de la frecuencia para una atmósfera normalizada
($p = 1\,013,25$ hPa, $\rho = 7,5$ g/m³, $T = 15^\circ\text{C}$)



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 γ_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:

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

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

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

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

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

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

ϵ : la emisividad de la superficie de la Tierra

ρ : la reflectividad de la superficie de la Tierra

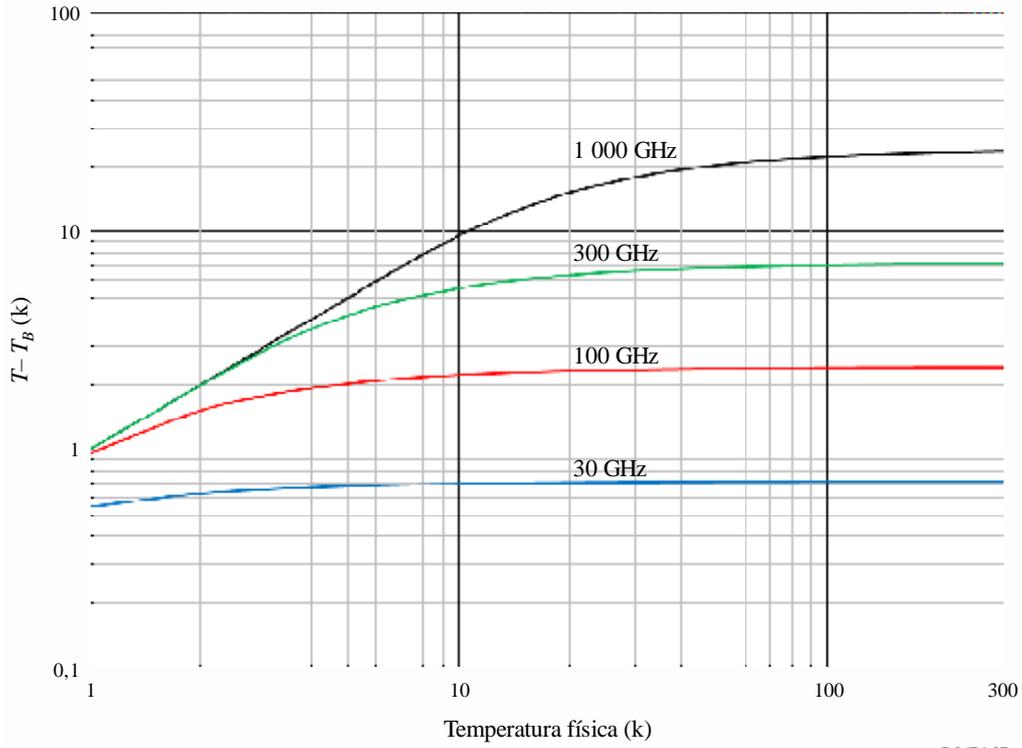
$$\rho = 1 - \epsilon.$$

Si no se dispone de datos locales u otras orientaciones, puede utilizarse un valor de ϵ 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

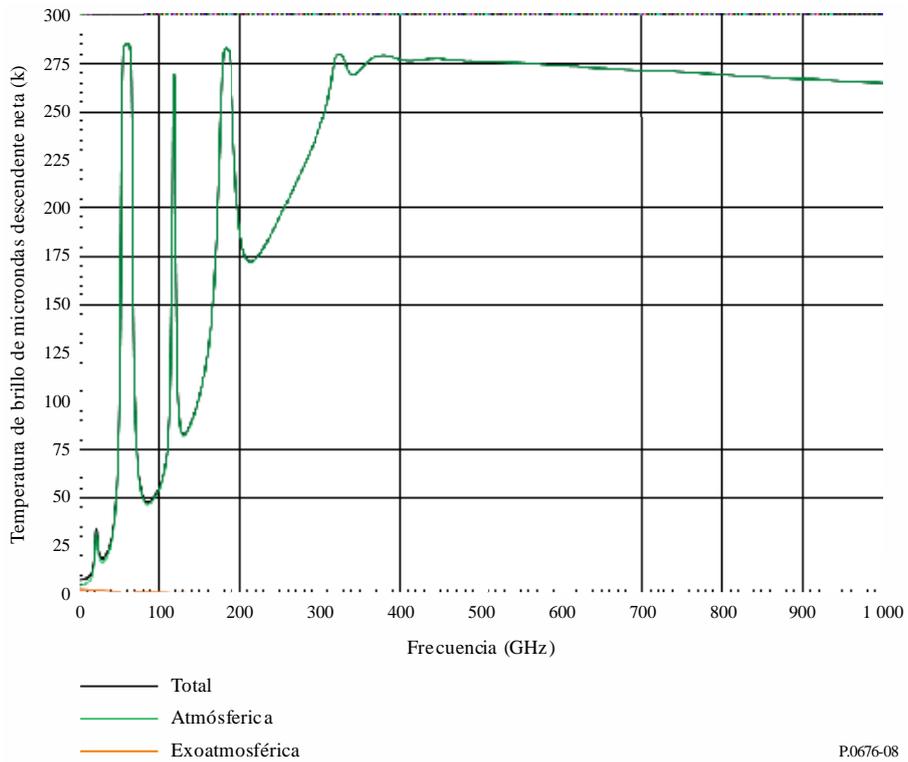
Diferencia entre la temperatura física y la temperatura de brillo de microondas de un cuerpo oscuro



P.0676-07

FIGURA 8

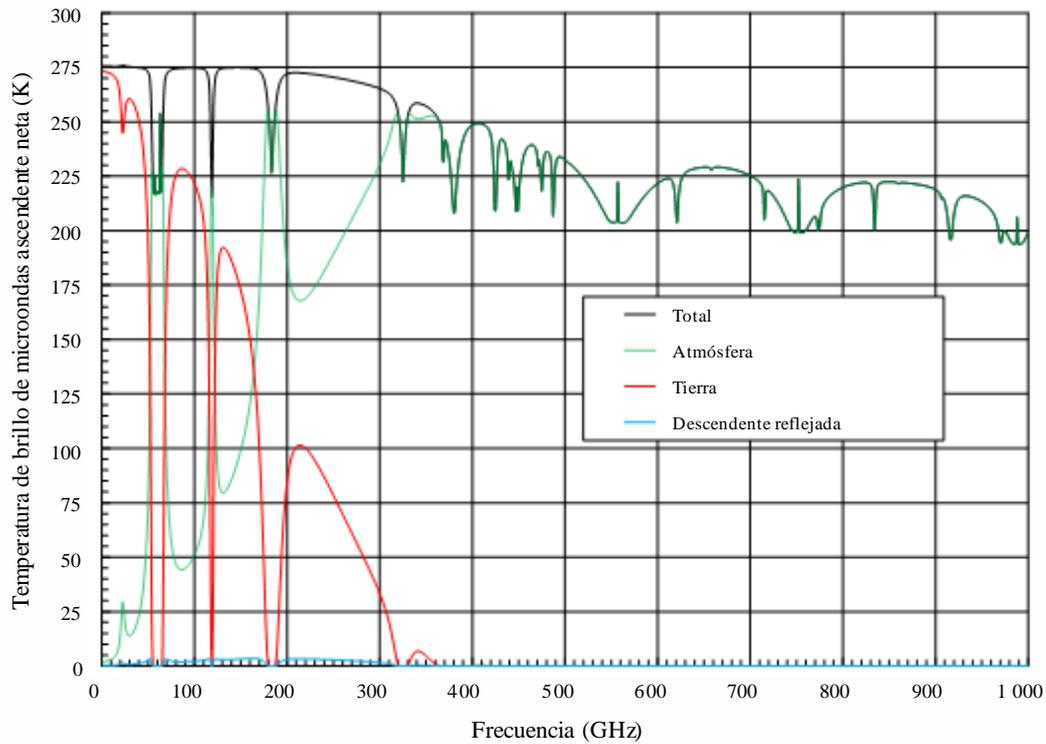
Temperatura de brillo de microondas descendente cenital para una atmósfera normalizada (centro 1 GHz)



P.0676-08

FIGURA 9

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



P.0676-09

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, ρ , 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

Atenuación en trayectos oblicuos causada por los gases en la gama de frecuencias 1-350 GHz

Lista de símbolos

A_o	atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al oxígeno
A_w	atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al vapor de agua
A_{total}	atenuación total debida a los gases en trayectos oblicuos
$N''_{oxígeno}$	parte imaginaria de la refractividad compleja atribuible al oxígeno
$N''_{vapor\ de\ agua}$	parte imaginaria de la refractividad compleja atribuible al vapor de agua
θ	ángulo de elevación
p	probabilidad de rebasamiento
γ_o	atenuación específica debida a los gases atribuible al oxígeno
γ_w	atenuación específica debida a los gases atribuible al vapor de agua
f	frecuencia
P_s	presión superficial instantánea total (barométrica)
$P_s(p)$	presión superficial total en función de la probabilidad de rebasamiento
p_s	presión superficial seca instantánea
\bar{p}_s	presión superficial seca media
T_s	temperatura superficial instantánea
\bar{T}_s	temperatura superficial media
$T_s(p)$	temperatura superficial en función de la probabilidad de rebasamiento

ρ_{w_s}	densidad superficial instantánea de vapor de agua
$\overline{\rho_{w_s}}$	densidad superficial media de vapor de agua
$\rho_{w_s}(p)$	densidad superficial de vapor de agua en función de la probabilidad de rebasamiento
e_s	presión parcial instantánea de vapor de agua
\bar{e}_s	presión parcial media de vapor de agua
V_s	contenido integrado medio de vapor de agua
$V_s(p)$	contenido integrado de vapor de agua en función de la probabilidad de rebasamiento
a_o, b_o, c_o, d_o	coeficientes de h_o
h_o	altura equivalente del oxígeno
A, B, f_i, a_i, b_i	coeficientes de h_w
h_w	altura equivalente del vapor de agua
a_v, b_v, c_v, d_v	coeficientes de K_v
K_v	coeficiente de absorción de masa del vapor de agua
k_{V_s}	parámetro de forma de Weibull del contenido integrado de vapor de agua
λ_{V_s}	parámetro de escala de Weibull del contenido integrado de vapor de agua

El presente Anexo contiene métodos de predicción que estiman la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos entre la superficie de la Tierra y el espacio para ángulos de elevación iguales o superiores a 5 grados y frecuencias comprendidas entre 1 y 350 GHz. Los métodos de predicción incluyen métodos de predicción instantánea, en los que se conocen la presión superficial total (barométrica) local, la temperatura superficial y la densidad superficial del vapor de agua o el contenido integrado de vapor de agua (véase la nota 1) (por ejemplo a partir de datos procedentes de una estación meteorológica o de una radiosonda); y métodos de predicción estadística, en los que las probabilidades de rebasamiento de la presión superficial total (barométrica), la temperatura superficial, la densidad superficial del vapor de agua, el contenido integrado de vapor de agua y los parámetros de escala y forma de Weibull se conocen a partir de datos locales a largo plazo o de los mapas digitales integrales de la Recomendación UIT-R P.2145. Se facilita la aproximación de Weibull a la atenuación debido a los gases en trayectos oblicuos atribuible al vapor de agua para su utilización en la Recomendación UIT-R P.1853.

La atenuación neta debida a los gases en trayectos oblicuos es la suma de la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al oxígeno, A_o , y la atribuible al vapor de agua, A_w ; es decir, $A_{total} = A_o + A_w$. En el Cuadro 3 se muestra un resumen de los métodos instantáneos y estadísticos de predicción de la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos. Al igual que en el Anexo 1, estos métodos de predicción no incluyen la atenuación debida a los gases atribuible a isótopos de oxígeno, oxígeno estimulado por vibraciones, ozono, isótopos del ozono, ozono estimulado por vibraciones y otras moléculas traza. La atenuación debida a los gases causada por estos componentes atmosféricos es relativamente insignificante para los trayectos oblicuos típicos entre la superficie de la Tierra y el espacio.

1 Métodos de predicción de la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al oxígeno

Existen dos métodos de predicción de la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al oxígeno:

- 1) como se describe en el § 1.1, un método de predicción instantánea en el que se conoce la presión superficial total (barométrica), la temperatura superficial y la densidad superficial del vapor de agua a partir de datos locales medidos instantáneos; y
- 2) como se describe en el § 1.2, un método de predicción estadística, en el que se conoce la presión superficial total (barométrica), la temperatura superficial y la densidad superficial del vapor de agua, a partir de datos locales o de los mapas integrales de la Recomendación UIT-R P.2145.

CUADRO 3

Resumen de los métodos de predicción instantánea y estadística de la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos

	Método de predicción instantánea	Método de predicción estadística
Atenuación debida al oxígeno	Sección 1.1 $A_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = \frac{\gamma_o(f, p_s, T_s, e_s) \cdot h_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s})}{\text{sen } \theta}$ siendo: $h_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = a_o(f) + b_o(f) \cdot T_s + c_o(f) \cdot P_s + d_o(f) \cdot \rho_{w_s}$ y: $e_s = \frac{\rho_{w_s} T_s}{216,7}; \quad p_s = P_s - e_s$	Sección 1.2 $A_o(f, p) = \frac{\gamma_o(f, \bar{p}_s, \bar{T}_s, \bar{e}_s) \cdot h_o(f, P_s(p), T_s(p), \rho_{w_s}(p))}{\text{sen } \theta}$ siendo: $h_o(f, P_s(p), T_s(p), \rho_{w_s}(p)) = a_o(f) + b_o(f) \cdot T_s(p) + c_o(f) \cdot P_s(p) + d_o(f) \cdot \rho_{w_s}(p)$ y: $\bar{e}_s = \frac{\bar{\rho}_{w_s} \bar{T}_s}{216,7}; \quad \bar{p}_s = \bar{P}_s - \bar{e}_s$
Atenuación debida al vapor de agua	Sección 2.1 $A_w(f, p_s, T_s, \rho_{w_s}) = \frac{\gamma_w(f, p_s, T_s, e_s) \cdot h_w(f)}{\text{sen } \theta}$ siendo: $h_w(f) = A \cdot f + B + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i}{(f - f_i)^2 + b_i}$ y: $e_s = \frac{\rho_{w_s} T_s}{216,7}; \quad p_s = P_s - e_s$	Sección 2.3 $A_w(f, p) = \frac{K_V(f, \bar{P}_s, \bar{T}_s, \bar{\rho}_{w_s}) \cdot V_s(p)}{\text{sen } \theta}$ siendo: $K_V(f, \bar{P}_s, \bar{T}_s, \bar{\rho}_{w_s}) = a_V(f) + b_V(f) \cdot \bar{\rho}_{w_s} + c_V(f) \cdot \bar{T}_s + d_V(f) \cdot \bar{P}_s$
	Sección 2.2 $A_w(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = \frac{K_V(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) \cdot V_s}{\text{sen } \theta}$ siendo: $K_V(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = a_V(f) + b_V(f) \cdot \rho_{w_s} + c_V(f) \cdot T_s + d_V(f) \cdot P_s$	

1.1 Método de predicción instantánea de la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al oxígeno

La atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al oxígeno, A_o , obtenida mediante predicción instantánea, viene dada por:

$$A_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = \frac{\gamma_o(f, p_s, T_s, e_s) \cdot h_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s})}{\text{sen } \theta} \quad (29)$$

siendo:

- f : frecuencia considerada, en GHz
- P_s : presión superficial instantánea total (barométrica), en hPa, en la ubicación considerada
- e_s : presión parcial superficial instantánea de vapor de agua, en hPa, en la ubicación considerada, donde $e_s = \frac{\rho_{w_s} T_s}{216,7}$
- p_s : presión superficial seca instantánea, en hPa, en la ubicación considerada, $p_s = P_s - e_s$
- T_s : temperatura superficial instantánea, en K, en la ubicación considerada
- ρ_{w_s} : densidad superficial instantánea de vapor de agua, en g/m³, en la ubicación considerada
- θ : ángulo de elevación
- γ_o : atenuación específica debida a los gases atribuible al oxígeno, en dB/km, que viene dada por:

$$\gamma_o = 0,1820 f N''_{\text{oxígeno}}(f) \quad (30)$$

$N''_{\text{oxígeno}}(f)$ es la parte imaginaria de la refractividad radioeléctrica compleja del oxígeno dada por la ecuación (2a) del Anexo 1; y:

$$h_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = a_o(f) + b_o(f) \cdot T_s + c_o(f) \cdot P_s + d_o(f) \cdot \rho_{w_s} \quad (31)$$

Los coeficientes a_o , b_o , c_o y d_o en la frecuencia considerada se obtienen por interpolación lineal de las frecuencias que figura en el fichero de datos Parte 1, que forma parte integrante de la presente Recomendación³. El fichero de datos contiene los coeficientes a_o , b_o , c_o y d_o para frecuencias comprendidas entre 1 GHz y 350 GHz en incrementos de 0,5 GHz y una frecuencia adicional de 118,75 GHz.

1.2 Método de predicción estadística de la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al oxígeno

La atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al oxígeno, A_o , obtenida mediante predicción estadística, viene dada por:

$$A_o(f, p) = \frac{\gamma_o(f, \bar{p}_s, \bar{T}_s, \bar{e}_s) \cdot h_o(f, P_s(p), T_s(p), \rho_{w_s}(p))}{\text{sen } \theta} \quad (32)$$

³ Los ficheros de datos, Parte 1 y 2, pueden consultarse en: <https://www.itu.int/oth/R1101000002/es>.

siendo:

f : la frecuencia considerada, en GHz

\bar{P}_s : presión superficial media total (barométrica), en hPa, en la ubicación considerada

\bar{e}_s : presión superficial parcial media de vapor de agua, en hPa, en la ubicación considerada,

siendo:

$$\bar{e}_s = \frac{\bar{\rho}_{w_s} \bar{T}_s}{216,7}$$

\bar{p}_s : presión superficial seca media, en hPa, en la ubicación considerada, $\bar{p}_s = \bar{P}_s - \bar{e}_s$

\bar{T}_s : temperatura superficial media, en K, en la ubicación considerada

$\bar{\rho}_{w_s}$: densidad superficial media de vapor de agua, en g/m³, en la ubicación considerada

p : probabilidad de rebasamiento (CCDF)⁴ considerada, en %

$P_s(p)$: presión superficial total (barométrica) para una probabilidad de rebasamiento p , en hPa, en la ubicación considerada

$T_s(p)$: temperatura de superficie para una probabilidad de rebasamiento p , en K, en la ubicación considerada

$\rho_{w_s}(p)$: densidad superficial de vapor de agua para una probabilidad de rebasamiento p , en g/m³, en la ubicación considerada

θ : ángulo de elevación

γ_o : la atenuación específica debida a los gases atribuible al oxígeno, en dB/km, viene dada por:

$$\gamma_o = 0,1820 f N''_{\text{oxígeno}}(f) \quad (33)$$

$N''_{\text{oxígeno}}(f)$ es la parte imaginaria de la refractividad radioeléctrica compleja del oxígeno dada por la ecuación (2a) del Anexo 1; y

$$h_o(f, P_s(p), T_s(p), \rho_{w_s}(p)) = a_o(f) + b_o(f) \cdot T_s(p) + c_o(f) \cdot P_s(p) + d_o(f) \cdot \rho_{w_s}(p) \quad (34)$$

Los coeficientes a_o , b_o , c_o y d_o en la frecuencia considerada se obtienen por interpolación lineal de las frecuencias que figura en el fichero de datos Parte 1, que forma parte integrante de la presente Recomendación. El fichero de datos contiene los coeficientes a_o , b_o , c_o y d_o para frecuencias comprendidas entre 1 GHz y 350 GHz en incrementos de 0,5 GHz y una frecuencia adicional de 118,75 GHz.

⁴ Los términos «probabilidad de rebasamiento» y «función de distribución acumulativa complementaria (CCDF)» son sinónimos.

2 Métodos de predicción de la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al vapor de agua

Existen cuatro métodos de predicción de la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al vapor de agua:

- 1) como se describe en el § 2.1, un método de predicción instantánea en el que se conoce la presión superficial total (barométrica), la temperatura superficial y la densidad superficial del vapor de agua a partir de datos locales medidos instantáneos;
- 2) como se describe en el § 2.2, un método de predicción instantánea en el que se conoce la presión superficial total (barométrica), la temperatura superficial, la densidad superficial del vapor de agua y el contenido integrado de vapor de agua a partir de datos locales medidos instantáneos;
- 3) como se describe en el § 2.3, a un método de predicción estadística, en el que se conoce la presión superficial total (barométrica), la temperatura superficial, la densidad superficial del vapor de agua y el contenido integrado de vapor de agua, a partir de datos locales o de los mapas integrales en la ubicación considerada de la Recomendación UIT-R P.2145; y
- 4) como se describe en el § 2.4, una aproximación de Weibull al método de predicción estadística, cuando se conocen los parámetros de escala y forma de Weibull a partir de datos locales o de los mapas integrales en la ubicación considerada de la Recomendación UIT-R P.2145.

En caso de disponer simultáneamente de los valores instantáneos de la densidad del vapor de agua superficial y del contenido integrado de vapor de agua, se utilizará el método de predicción instantánea del vapor de agua a partir del valor instantáneo del contenido integrado de vapor de agua.

2.1 Método 1 de predicción instantánea de la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al vapor de agua

La atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al vapor de agua, A_w , obtenida mediante predicción instantánea, viene dada por:

$$A_w(f, p_s, T_s, \rho_{w_s}) = \frac{\gamma_w(f, p_s, T_s, e_s) \cdot h_w(f)}{\sin \theta} \quad (35)$$

siendo:

- f : frecuencia considerada, en GHz
- P_s : presión superficial instantánea total (barométrica), en hPa, en la ubicación considerada
- e_s : presión parcial superficial instantánea de vapor de agua, en hPa, en la ubicación considerada, donde $e_s = \frac{\rho_{w_s} T_s}{216,7}$
- p_s : presión superficial seca instantánea, en hPa, en la ubicación considerada, $p_s = P_s - e_s$
- T_s : temperatura superficial instantánea, en K, en la ubicación considerada
- ρ_{w_s} : densidad superficial instantánea de vapor de agua, en g/m³, en la ubicación considerada
- θ : ángulo de elevación
- γ_w : atenuación específica debida a los gases atribuible al vapor de agua, en dB/km, que viene dada por:

$$\gamma_w = 0,1820 f N''_{\text{vapor de agua}}(f) \quad (36)$$

$N''_{\text{vapor de agua}}(f)$ es la parte imaginaria de la refractividad radioeléctrica compleja del oxígeno dada por la ecuación (2b) del Anexo 1; y

$$h_w(f) = A \cdot f + B + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i}{(f-f_i)^2 + b_i} \quad (37)$$

siendo $A = 5,6585 \times 10^{-5}$, $B = 1,8348$ y los coeficientes f_i , a_i y b_i se indican en el Cuadro 4.

CUADRO 4

Coeficientes f_i , a_i y b_i

i	f_i (GHz)	a_i	b_i
1	22,235080	2,6846	2,7649
2	183,310087	5,8905	4,9219
3	325,152888	2,9810	3,0748

2.2 Método 2 de predicción instantánea de la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al vapor de agua

La atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al vapor de agua, A_w , obtenida mediante predicción instantánea, viene dada por:

$$A_w(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = \frac{K_V(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) \cdot V_s}{\text{sen } \theta} \quad (38)$$

siendo:

- f : frecuencia considerada, en GHz
- P_s : presión superficial instantánea total (barométrica), en hPa, en la ubicación considerada
- T_s : temperatura superficial instantánea, en K, en la ubicación considerada
- ρ_{w_s} : densidad superficial instantánea de vapor de agua, en g/m^3 , en la ubicación considerada
- V_s : contenido integrado de vapor de agua, en kg/m^2 o mm, de la superficie de la Tierra en la ubicación considerada
- θ : ángulo de elevación

y

$$K_V(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = a_V(f) + b_V(f) \cdot \rho_{w_s} + c_V(f) \cdot T_s + d_V(f) \cdot P_s \quad (39)$$

Los coeficientes a_V , b_V , c_V y d_V en la frecuencia considerada se obtienen por interpolación lineal de las frecuencias que figura en el fichero de datos Parte 2, que forma parte integrante de la presente Recomendación⁵. El fichero de datos contiene los coeficientes a_V , b_V , c_V y d_V en las columnas 2, 3, 4 y 5, respectivamente, para frecuencias comprendidas entre 1 GHz y 350 GHz en incrementos de 0,5 GHz en la columna 1.

⁵ Los ficheros de datos, Partes 1 y 2, pueden consultarse en: <https://www.itu.int/oth/R1101000002/es>.

2.3 Método de predicción estadística de la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al vapor de agua

La atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al vapor de agua, A_w , obtenida mediante predicción estadística, viene dada por:

$$A_w(f, p) = \frac{K_V(f, \bar{P}_s, \bar{T}_s, \bar{\rho}_{w_s}) \cdot V_s(p)}{\text{sen } \theta} \quad (40)$$

siendo:

- f : frecuencia considerada, en GHz
- \bar{P}_s : presión superficial media total (barométrica), en hPa, en la ubicación considerada
- \bar{T}_s : temperatura superficial media, en K, en la ubicación considerada
- $\bar{\rho}_{w_s}$: densidad superficial media de vapor de agua, en g/m³, en la ubicación considerada
- p : probabilidad de rebasamiento (CCDF) considerada, en %
- $V_s(p)$: contenido integrado de vapor de agua para la probabilidad de rebasamiento p , en kg/m² o mm, de la superficie de la Tierra en la ubicación considerada
- θ : ángulo de elevación

y

$$K_V(f, \bar{P}_s, \bar{T}_s, \bar{\rho}_{w_s}) = a_V(f) + b_V(f) \cdot \bar{\rho}_{w_s} + c_V(f) \cdot \bar{T}_s + d_V(f) \cdot \bar{P}_s \quad (41)$$

Los coeficientes a_V , b_V , c_V y d_V en la frecuencia considerada se obtienen por interpolación lineal de las frecuencias que figura en el fichero de datos Parte 2, que forma parte integrante de la presente Recomendación. El fichero de datos contiene los coeficientes a_V , b_V , c_V y d_V en las columnas 2, 3, 4 y 5, respectivamente, para frecuencias comprendidas entre 1 GHz y 350 GHz en incrementos de 0,5 GHz en la columna 1.

2.4 Aproximación de Weibull a la predicción estadística de la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al vapor de agua

La aproximación de Weibull a la predicción estadística de la atenuación debida a los gases en trayectos oblicuos atribuible al vapor de agua, A_w , viene dada por:

$$A_w(f, p) = \frac{\lambda_{V_s} \cdot K_V(f, \bar{P}_s, \bar{T}_s, \bar{\rho}_{w_s}) \cdot \left[-\ln\left(\frac{p}{100}\right) \right]^{\frac{1}{k_{V_s}}}}{\text{sen } \theta} \quad (42)$$

siendo:

- f : frecuencia considerada, en GHz
- \bar{P}_s : presión superficial media total (barométrica), en hPa, en la ubicación considerada
- \bar{T}_s : temperatura superficial media, en K, en la ubicación considerada
- $\bar{\rho}_{w_s}$: densidad superficial media de vapor de agua, en g/m³, en la ubicación considerada
- p : probabilidad de rebasamiento (CCDF) considerada, en %
- λ_{V_s} : parámetro de escala de Weibull de superficie para el vapor de agua en la ubicación considerada

k_{V_s} : parámetro de forma de Weibull de superficie para el vapor de agua en la ubicación considerada

θ : ángulo de elevación

y

$$K_V(f, \bar{P}_s, \bar{T}_s, \overline{\rho_{w_s}}) = a_V(f) + b_V(f) \cdot \overline{\rho_{w_s}} + c_V(f) \cdot \bar{T}_s + d_V(f) \cdot \bar{P}_s \quad (43)$$

Los coeficientes a_V , b_V , c_V y d_V en la frecuencia considerada se obtienen por interpolación lineal de las frecuencias que figura en el fichero de datos Parte 2, que forma parte integrante de la presente Recomendación. El fichero de datos contiene los coeficientes a_V , b_V , c_V y d_V en las columnas 2, 3, 4 y 5, respectivamente, para frecuencias comprendidas entre 1 GHz y 350 GHz en incrementos de 0,5 GHz en la columna 1.
