

## RECOMENDACIÓN UIT-R P.835-4

**Atmósferas normalizadas de referencia para la  
atenuación debida a los gases**

(Cuestión UIT-R 201/3)

(1992-1994-1997-1999-2005)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

a) la necesidad de utilizar un modelo de atmósfera de referencia en el cálculo de la atenuación causada por los gases a lo largo de un trayecto Tierra-espacio,

*recomienda*

**1** que, cuando no se disponga de datos locales más fiables, se utilice el modelo de atmósferas del Anexo 1 para determinar los valores de temperatura, presión y presión del vapor de agua en función de la altura en el cálculo de la atenuación debida a los gases;

**2** que los datos experimentales que aparecen en los Anexos 2 y 3 se utilicen para los emplazamientos de interés en lo que se refiere a las variaciones estacionales y mensuales.

**Anexo 1****1 Atmósfera de referencia mundial anual media**

El siguiente modelo de atmósfera de referencia refleja los perfiles medios anuales cuando se promedian en todo el mundo.

**1.1 Temperatura y presión**

El modelo de atmósfera de referencia se basa en la United States Standard Atmosphere de 1976, que consiste en una atmósfera dividida en siete capas sucesivas con una variación lineal con la temperatura para cada capa, como se muestra en la Fig. 1.

La temperatura  $T$  a la altura  $h$  viene dada por:

$$T(h) = T_i + L_i (h - H_i) \quad \text{K} \quad (1)$$

donde:

$$T_i = T(H_i) \quad (2)$$

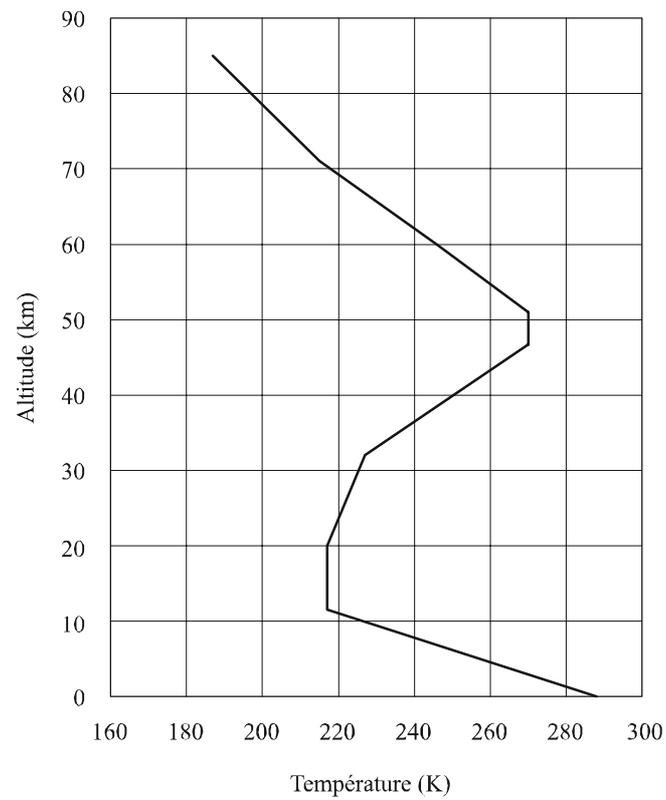
y  $L_i$  es el gradiente de temperatura que comienza a la altura  $H_i$  y viene dado en el Cuadro 1.

CUADRO 1

Subíndice, $i$	Altura, $H_i$ (km)	Gradiente de temperatura, $L_i$ (K/km)
0	0	-6,5
1	11	0,0
2	20	+1,0
3	32	+2,8
4	47	0,0
5	51	-2,8
6	71	-2,0
7	85	

FIGURA 1

## Perfil de referencia de la temperatura atmosférica



Cuando el gradiente de temperatura  $L_i \neq 0$ , la presión viene dada por la ecuación:

$$P(h) = P_i \left[ \frac{T_i}{T_i + L_i(h - H_i)} \right]^{34,163/L_i} \quad \text{hPa} \quad (3)$$

y cuando el gradiente de temperatura  $L_i = 0$ , la presión se obtiene de la ecuación:

$$P(h) = P_i \exp \left[ \frac{-34,163 (h - H_i)}{T_i} \right] \quad \text{hPa} \quad (4)$$

Los valores normalizados de temperatura y presión a nivel del suelo son:

$$\begin{aligned} T_0 &= 288,15 && \text{K} \\ P_0 &= 1\,013,25 && \text{hPa} \end{aligned} \quad (5)$$

Nótese que por encima de unos 85 km de altura, el equilibrio termodinámico local de la atmósfera comienza a descomponerse, y la ecuación hidrostática, en la que se basan las ecuaciones arriba indicadas, deja de ser válida.

## 1.2 Presión del vapor de agua

La distribución del vapor de agua en la atmósfera es generalmente muy variable, pero puede aproximarse por la ecuación:

$$\rho(h) = \rho_0 \exp(-h / h_0) \quad \text{g/m}^3 \quad (6)$$

donde la altura de escala  $h_0 = 2$  km, y la densidad normal del vapor del agua al nivel del suelo es:

$$\rho_0 = 7,5 \quad \text{g/m}^3 \quad (7)$$

La presión del vapor se obtiene a partir de la densidad mediante la ecuación (véase la Recomendación UIT-R P.453):

$$e(h) = \frac{\rho(h) T(h)}{216,7} \quad \text{hPa} \quad (8)$$

La densidad del vapor de agua disminuye exponencialmente al aumentar la altura, hasta una altura en la que se verifica la relación de combinación  $e(h)/P(h) = 2 \times 10^{-6}$ . Por encima de esta altura, la relación de combinación se supone que es constante.

## 1.3 Cálculo de la atenuación debida a la atmósfera seca

El perfil de la densidad de los gases atmosféricos diferentes del vapor de agua (la «atmósfera seca») puede obtenerse a partir de los perfiles de temperatura y presión indicados en el § 1.1.

En los cálculos de la atenuación, este perfil de densidad se puede aproximar mediante un perfil exponencial según la ecuación (6) con:

$$h_0 = 6 \text{ km} \quad (9)$$

## 2 Atmósfera de referencia anual para latitudes bajas

Para las latitudes bajas (inferiores a 22°) las variaciones estacionales no son muy importantes y puede utilizarse un único perfil anual.

La temperatura  $T$  (K) a la altura  $h$  (km) viene dada por:

$$\begin{aligned} T(h) &= 300,4222 - 6,3533 h + 0,005886 h^2 && \text{para } 0 \leq h < 17 \\ T(h) &= 194 + (h - 17) 2,533 && \text{para } 17 \leq h < 47 \\ T(h) &= 270 && \text{para } 47 \leq h < 52 \\ T(h) &= 270 - (h - 52) 3,0714 && \text{para } 52 \leq h < 80 \\ T(h) &= 184 && \text{para } 80 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

siendo la presión  $P$  (hPa):

$$\begin{aligned} P(h) &= 1012,0306 - 109,0338 h + 3,6316 h^2 && \text{para } 0 \leq h < 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp [-0,147 (h - 10)] && \text{para } 10 \leq h < 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp [-0,165 (h - 72)] && \text{para } 72 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

donde  $P_{10}$  y  $P_{72}$  son las presiones a 10 y 72 km respectivamente.

Para el vapor de agua ( $\text{g/m}^3$ ):

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 19,6542 \exp [-0,2313 h - 0,1122 h^2 + 0,01351 h^3 \\ &\quad - 0,0005923 h^4] && \text{para } 0 \leq h \leq 15 \\ \rho(h) &= 0 && \text{para } h > 15 \end{aligned}$$

### 3 Atmósfera de referencia para latitudes medias

En el caso de latitudes medias (entre  $22^\circ$  y  $45^\circ$ ) pueden utilizarse los siguientes perfiles para el verano y el invierno.

#### 3.1 Latitud media en verano

La temperatura  $T$  (K) a la altura  $h$  (km) viene dada por:

$$\begin{aligned} T(h) &= 294,9838 - 5,2159 h - 0,07109 h^2 && \text{para } 0 \leq h < 13 \\ T(h) &= 215,5 && \text{para } 13 \leq h < 17 \\ T(h) &= 215,5 \exp [(h - 17) 0,008128] && \text{para } 17 \leq h < 47 \\ T(h) &= 275 && \text{para } 47 \leq h < 53 \\ T(h) &= 275 + \{1 - \exp [(h - 53) 0,06]\} 20 && \text{para } 53 \leq h < 80 \\ T(h) &= 175 && \text{para } 80 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

siendo la presión  $P$  (hPa):

$$\begin{aligned} P(h) &= 1012,8186 - 111,5569 h + 3,8646 h^2 && \text{para } 0 \leq h < 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp [-0,147 (h - 10)] && \text{para } 10 \leq h < 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp [-0,165 (h - 72)] && \text{para } 72 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

donde  $P_{10}$  y  $P_{72}$  son las presiones a 10 y 72 km respectivamente.

Para el vapor de agua ( $\text{g/m}^3$ ):

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 14,3542 \exp [-0,4174 h - 0,02290 h^2 + 0,001007 h^3] && \text{para } 0 \leq h \leq 10 \\ \rho(h) &= 0 && \text{para } h > 10 \end{aligned}$$

### 3.2 Latitud media en invierno

La temperatura  $T$  (K) a la altura  $h$  (km) viene dada por:

$T(h) = 272,7241 - 3,6217 h - 0,1759 h^2$	para $0 \leq h < 10$
$T(h) = 218$	para $10 \leq h < 33$
$T(h) = 218 + (h - 33) 3,3571$	para $33 \leq h < 47$
$T(h) = 265$	para $47 \leq h < 53$
$T(h) = 265 - (h - 53) 2,0370$	para $53 \leq h < 80$
$T(h) = 210$	para $80 \leq h \leq 100$

siendo la presión  $P$  (hPa):

$P(h) = 1018,8627 - 124,2954 h + 4,8307 h^2$	para $0 \leq h < 10$
$P(h) = P_{10} \exp [-0,147 (h - 10)]$	para $10 \leq h < 72$
$P(h) = P_{72} \exp [-0,155 (h - 72)]$	para $72 \leq h \leq 100$

donde  $P_{10}$  y  $P_{72}$  son las presiones a 10 y 72 km respectivamente.

Para el vapor de agua ( $\text{g/m}^3$ ):

$\rho(h) = 3,4742 \exp [-0,2697 h - 0,03604 h^2 + 0,0004489 h^3]$	para $0 \leq h \leq 10$
$\rho(h) = 0$	para $h > 10$

## 4 Atmósfera de referencia para latitudes altas

En el caso de latitudes altas (superiores a  $45^\circ$ ) pueden utilizarse los siguientes perfiles para el verano e invierno.

### 4.1 Latitud alta en verano

La temperatura  $T$  (K) a la altura  $h$  (km) viene dada por:

$T(h) = 286,8374 - 4,7805 h - 0,1402 h^2$	para $0 \leq h < 10$
$T(h) = 225$	para $10 \leq h < 23$
$T(h) = 225 \exp [(h - 23) 0,008317]$	para $23 \leq h < 48$
$T(h) = 277$	para $48 \leq h < 53$
$T(h) = 277 - (h - 53) 4,0769$	para $53 \leq h < 79$
$T(h) = 171$	para $79 \leq h \leq 100$

siendo la presión  $P$  (hPa):

$P(h) = 1008,0278 - 113,2494 h + 3,9408 h^2$	para $0 \leq h < 10$
$P(h) = P_{10} \exp [-0,140 (h - 10)]$	para $10 \leq h < 72$
$P(h) = P_{72} \exp [-0,165 (h - 72)]$	para $72 \leq h \leq 100$

donde  $P_{10}$  y  $P_{72}$  son las presiones a 10 y 72 km respectivamente.

Para el vapor de agua ( $\text{g/m}^3$ ):

$\rho(h) = 8,988 \exp [-0,3614 h - 0,005402 h^2 - 0,001955 h^3]$	para $0 \leq h \leq 15$
$\rho(h) = 0$	para $h > 15$

## 4.2 Latitud alta en invierno

La temperatura  $T$  (K) a la altura  $h$  (km) viene dada por:

$$\begin{aligned} T(h) &= 257,4345 + 2,3474 h - 1,5479 h^2 + 0,08473 h^3 && \text{para } 0 \leq h < 8,5 \\ T(h) &= 217,5 && \text{para } 8,5 \leq h < 30 \\ T(h) &= 217,5 + (h - 30) 2,125 && \text{para } 30 \leq h < 50 \\ T(h) &= 260 && \text{para } 50 \leq h < 54 \\ T(h) &= 260 - (h - 54) 1,667 && \text{para } 54 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

siendo la presión  $P$  (hPa):

$$\begin{aligned} P(h) &= 1010,8828 - 122,2411 h + 4,554 h^2 && \text{para } 0 \leq h < 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp [-0,147 (h - 10)] && \text{para } 10 \leq h < 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp [-0,150 (h - 72)] && \text{para } 72 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

donde  $P_{10}$  y  $P_{72}$  son las presiones a 10 y 72 km respectivamente.

Para el vapor de agua ( $\text{g/m}^3$ ):

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 1,2319 \exp [0,07481 h - 0,0981 h^2 + 0,00281 h^3] && \text{para } 0 \leq h \leq 10 \\ \rho(h) &= 0 && \text{para } h > 10 \end{aligned}$$

## Bibliografía

BRUSSAARD, G., DAMOSSO, E. y STOLA, L. [octubre de 1983] Characterisation of the 50-70 GHz band for space communications. *CSELT Rapporti Tecnici*, Vol. XI, 5.

## Anexo 2

### 1 Datos experimentales de perfiles verticales atmosféricos

Se han calculado para 353 emplazamientos en todo el mundo los valores medios mensuales de los perfiles verticales de temperatura, presión y humedad relativa, utilizando las observaciones realizadas por radiosonda a lo largo de un periodo de 10 años (1980-1989). Este conjunto de datos (DST.STD) está disponible en la Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT y contiene los valores medios mensuales de los perfiles verticales, para las horas 00.00 UTC y 12.00 UTC, de la presión, temperatura y humedad relativa. Estos perfiles, calculados en ausencia de ganancia, van de 0 a 16 km con incrementos de 500 m. Los valores medios mensuales de los perfiles figuran en ficheros ASCII cuyo nombre es **<WMO\_code>.dat**, siendo *WMO\_code* el nombre del código del emplazamiento según la Organización Mundial de Meteorología (por ejemplo, en 03496.dat, 03496 es el código OMM de la estación para Hemsby, en Norfolk). En el Cuadro 2 aparece un ejemplo de uno de estos perfiles. La lista de emplazamientos figura en ficheros ASCII (en el formato CSV, campos separados por comas) cuyo nombre es **dst\_std\_lst.csv**. Cada registro en este fichero contiene los siguientes campos: código OMM, nombre de la estación, país, latitud, longitud, altitud sobre el nivel del mar. En el Cuadro 3 figura un ejemplo de este tipo de registro.

Por encima de la máxima altitud puede realizarse una extrapolación utilizando los perfiles de referencia que aparecen en Anexo 1. Para transformar la humedad relativa en valores absolutos de densidad de vapor de agua deben utilizarse las fórmulas que aparecen en la Recomendación UIT-R P.453.

CUADRO 2

**Formato de datos DST.STD – Ejemplo de valores medios mensuales de los perfiles (estación 10410)**

YYMMDDHH NL			
99 199 0 33			
Presión (hPa)	Z (km)	Temp (K)	HR (%/100)
1 016,905	0,00	273,62	0,864E+00
956,686	0,50	273,33	0,830E+00
898,555	1,00	271,74	0,754E+00
844,014	1,50	269,59	0,665E+00
791,860	2,00	267,15	0,591E+00
742,661	2,50	264,56	0,518E+00
696,285	3,00	261,89	0,470E+00
651,977	3,50	258,94	0,458E+00
610,086	4,00	255,88	0,448E+00
570,467	4,50	252,69	0,445E+00
533,076	5,00	249,33	0,451E+00
497,767	5,50	245,90	0,453E+00
464,123	6,00	242,32	0,450E+00
432,441	6,50	238,75	0,450E+00
402,414	7,00	235,16	0,443E+00
374,177	7,50	231,59	0,437E+00
347,236	8,00	228,12	0,433E+00
322,281	8,50	224,88	0,427E+00
298,474	9,00	221,89	0,421E+00
276,492	9,50	219,27	0,416E+00
255,527	10,00	217,08	0,411E+00
236,297	10,50	215,62	0,402E+00
218,415	11,00	214,79	0,393E+00
201,366	11,50	214,14	0,348E+00
186,214	12,00	214,02	0,205E+00
172,093	12,50	214,24	0,104E+00
158,709	13,00	214,66	0,368E-01
146,492	13,50	214,94	0,351E-02
135,813	14,00	214,88	0,120E-02
125,690	14,50	214,50	0,117E-02
116,027	15,00	214,01	0,113E-02
106,798	15,50	213,56	0,110E-02
98,291	16,00	213,26	0,107E-02

*Leyenda relativa al Cuadro 2:*

YY: Año (99 para los perfiles promediados mensualmente)

MM: Mes (1 = enero, 2 = febrero, ...)

DD: Día del mes (99 para los perfiles promediados mensualmente)

HH: Hora del día (UTC)

NL: Número de niveles verticales (NL = 33 para STD.DST)

Presión (hPa): Presión atmosférica total

Z (km): Altura sobre la superficie de la Tierra

Temp (K): Temperatura del aire

HR (%/100): Humedad relativa (fraccionaria)

NOTA 1 – Los valores de la temperatura y la presión pueden ponerse a cero si no se han registrado.

### CUADRO 3

#### Fichero de información relativa a la estación DST\_STD\_LST.CSV– Ejemplo de la estructura del registro

Código OMM	Nombre de la estación	País	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Asl (m)
10 410	ESSEN	DL	51,4	6,967	153

NOTA 1 – Los valores de la latitud y la longitud están en grados decimales (es decir, 51,4 = 51° 24').

## Anexo 3

### 1 Datos numéricos de previsiones meteorológicas de perfiles verticales atmosféricos

Los valores medios mensuales, según la hora del día, de los perfiles verticales de temperatura, presión, y densidad de vapor de agua se calcularon utilizando el conjunto de datos de los últimos 15 años ECMWF (ERA15). Este conjunto de datos (ESA\_STD\_PROF) está disponible en la Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT y contiene los valores medios mensuales de los perfiles verticales, para las horas 00.00, 06.00, 12.00 y 18.00 UTC, de la presión total, la temperatura y la densidad de vapor de agua del aire. Estos perfiles van desde una altura de referencia situada aproximadamente al nivel de la superficie de la Tierra hasta unos 30 km por encima de este nivel, y constan de 32 niveles correspondientes a los niveles del modelo ERA15. Los datos de la longitud varían entre 0° y 360° y la latitud entre +90° y -90°, con una resolución de 1,5° en los dos casos. Todos los datos están almacenados en los ficheros en la representación normalizada de coma flotante IEEE de precisión simple (4 bytes, 32 bits) y en formato Big-Endian (se almacena primero la parte menos significativa).

Los valores medios mensuales de los perfiles de cada parámetro meteorológico se almacenan en ficheros binarios con el nombre *<param>\_<hh>.bin*, siendo *param* el nombre del parámetro meteorológico (**pres** = presión total de aire [hPa], **temp** = temperatura del aire [K], **vapd** = densidad de vapor de agua [g/m<sup>3</sup>]) y *hh* la hora del día (por ejemplo, 00, 06, 12 y 18 [UTC]). Los niveles de las alturas de los perfiles se almacenan aparte en un fichero binario, con el nombre

**hght.bin**, que contiene los perfiles verticales de los valores medios mensuales de las alturas de los niveles. En el Cuadro 4 se muestra un ejemplo de los datos que contiene la base de datos de un determinado sistema.

CUADRO 4

**Contenido de ESA\_STD\_PROF – Ejemplo de perfil a un cierto punto de la cuadrícula (Latitud = 45 (grados) y Longitud = 9 (grados)) a las 12 UTC de julio**

Altura (m)	Presión (hPa)	Temp (K)	Vapd (g/m <sup>3</sup> )
668,309	939,255	298,373	9,823
701,645	935,673	298,125	9,617
819,406	923,092	296,598	9,302
1 029,200	900,957	294,292	8,811
1 312,119	871,693	291,459	8,099
1 653,510	837,298	288,287	6,992
2 042,286	799,373	285,107	5,706
2 470,212	759,191	282,116	4,555
2 931,283	717,723	279,045	3,641
3 421,197	675,691	275,934	2,692
3 937,159	633,633	272,913	1,855
4 477,475	591,936	269,707	1,286
5 040,996	550,876	266,183	0,911
5 627,126	510,656	262,354	0,636
6 235,769	471,427	258,213	0,428
6 867,105	433,307	253,687	0,277
7 521,528	396,390	248,780	0,173
8 199,571	360,767	243,521	0,103
8 901,801	326,527	237,971	0,058
9 629,047	293,764	232,319	0,034
10 382,883	262,580	226,984	0,019
11 167,396	233,064	222,845	0,009
11 990,928	205,263	220,483	0,003
12 864,380	179,195	219,279	0,001
13 799,389	154,827	218,154	0,001
14 812,536	132,043	217,057	0,001
15 934,765	110,604	216,026	0,000
17 228,709	90,110	215,674	0,000
18 821,158	70,037	216,262	0,000
20 964,607	50,038	219,300	0,000
24 270,756	30,039	223,166	0,000
31 430,756	10,320	232,854	0,000

*Leyenda relativa al Cuadro 4:*

Z (m): Altura con respecto al nivel del mar

Presión (hPa): Presión atmosférica total

Temp (K): Temperatura del aire

Vapd ( $\text{g/m}^3$ ): Densidad de vapor de agua

NOTA 1 – En la dirección web del UIT-R relativa a la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones existen funciones de Matlab y Fortran para acceder a los datos ESA\_STD\_PROF.

---