

**UIT-R**

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

**Recomendación UIT-R P.840-5**  
(02/2012)

# **Atenuación debida a las nubes y a la niebla**

**Serie P**  
**Propagación de las ondas radioeléctricas**



## Prólogo

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

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

## Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

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

### Series de las Recomendaciones UIT-R

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

Series	Título
<b>BO</b>	Distribución por satélite
<b>BR</b>	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
<b>BS</b>	Servicio de radiodifusión sonora
<b>BT</b>	Servicio de radiodifusión (televisión)
<b>F</b>	Servicio fijo
<b>M</b>	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
<b>P</b>	<b>Propagación de las ondas radioeléctricas</b>
<b>RA</b>	Radio astronomía
<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, 2012

© UIT 2012

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.840-5

**Atenuación debida a las nubes y a la niebla**

(Cuestión UIT-R 201/3)

(1992-1994-1997-1999-2009-2012)

**Cometido**

En esta Recomendación se facilitan métodos para predecir la atenuación debida a las nubes y a la niebla en los trayectos Tierra-espacio.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

- a) que es necesario dar pautas a los ingenieros para el diseño de los sistemas de telecomunicación Tierra-espacio en frecuencias superiores a 10 GHz;
- b) que la atenuación debida a las nube puede ser un factor importante, especialmente para los sistemas de microondas que funcionan en frecuencias muy superiores a 10 GHz o para los sistemas de baja disponibilidad;
- c) que, para el cálculo de las series temporales de la atenuación total y los métodos de predicción espaciotemporal, se requiere una expresión analítica para las estadísticas de contenido total de la columna de agua líquida de nube,

*recomienda*

- 1 que se utilicen las curvas, los modelos y los mapas del Anexo 1 para el cálculo de la atenuación debida a las nubes y a la niebla;
- 2 que se utilice la información recogida en el Anexo 1 para los cálculos globales de los efectos de propagación que se requieren, entre otros, para los modelos de canal espaciotemporal, que a su vez requieren una expresión analítica para las estadísticas de contenido total de la columna de agua líquida de nube.

**Anexo 1****1 Introducción**

Para las nubes y la niebla compuestas totalmente de gotas minúsculas, generalmente inferiores a 0,01 cm, la aproximación de Rayleigh es válida para frecuencias inferiores a 200 GHz y se puede expresar la atenuación en términos del contenido total de agua líquida por unidad de volumen. Así pues, la atenuación específica en el interior de una nube o de la niebla puede expresarse como:

$$\gamma_c = K_l M \quad \text{dB/km} \quad (1)$$

siendo:

- $\gamma_c$ : atenuación específica (dB/km) en la nube
- $K_l$ : coeficiente de la atenuación específica ((dB/km)/(g/m<sup>3</sup>))
- $M$ : densidad de agua líquida en la nube o la niebla (g/m<sup>3</sup>).

En frecuencias del orden de 100 GHz y superiores, la atenuación debida a la niebla puede ser significativa. La densidad de agua líquida en la niebla es típicamente de unos  $0,05 \text{ g/m}^3$  en la niebla moderada (visibilidad del orden de 300 m) y de  $0,5 \text{ g/m}^3$  en niebla espesa (visibilidad del orden de 50 m).

## 2 Coeficiente de atenuación específica

Para calcular el valor de  $K_l$  se puede utilizar un modelo matemático válido hasta frecuencias de 1 000 GHz basado en la dispersión de Rayleigh, que utiliza un modelo Debye doble para la permitividad dieléctrica  $\epsilon(f)$  del agua. Por tanto:

$$K_l = \frac{0,819f}{\epsilon''(1 + \eta^2)} \quad (\text{dB/km})/(\text{g/m}^3) \quad (2)$$

donde  $f$  es la frecuencia (GHz), y:

$$\eta = \frac{2 + \epsilon'}{\epsilon''} \quad (3)$$

La permitividad dieléctrica compleja del agua viene dada por:

$$\epsilon''(f) = \frac{f(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{f_p [1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{f_s [1 + (f/f_s)^2]} \quad (4)$$

$$\epsilon'(f) = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_1}{[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{[1 + (f/f_s)^2]} + \epsilon_2 \quad (5)$$

donde:

$$\epsilon_0 = 77,6 + 103,3 (\theta - 1) \quad (6)$$

$$\epsilon_1 = 5,48 \quad (7)$$

$$\epsilon_2 = 3,51 \quad (8)$$

$$\theta = 300 / T \quad (9)$$

siendo  $T$  la temperatura (K).

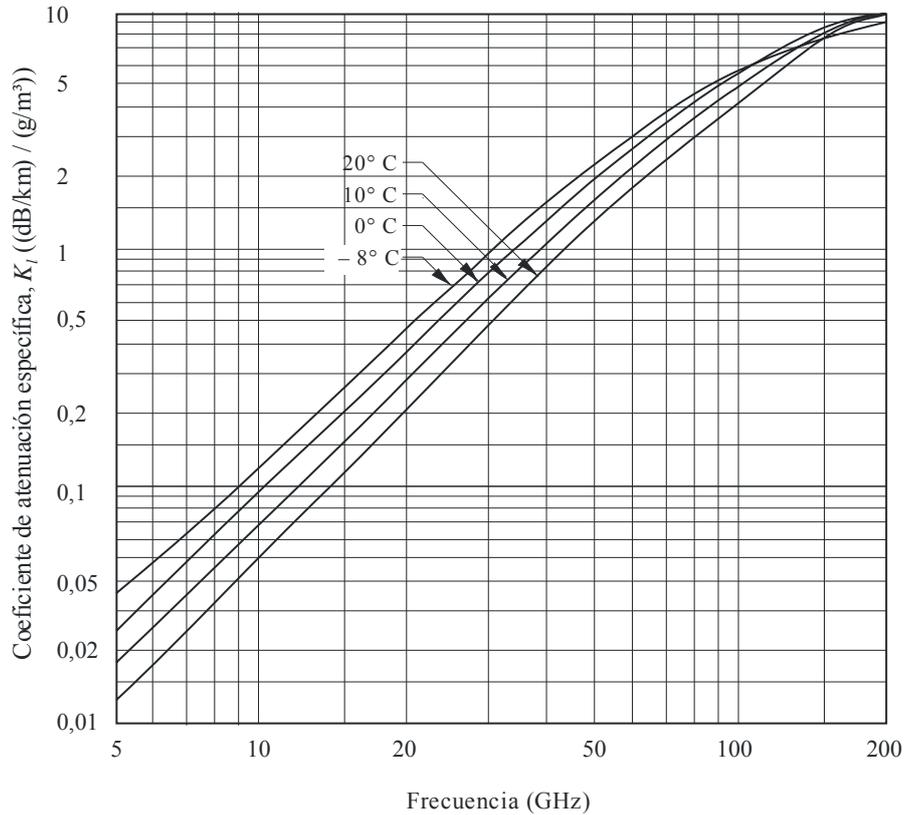
Las frecuencias de relajación principal y secundaria son:

$$f_p = 20,09 - 142 (\theta - 1) + 294 (\theta - 1)^2 \quad \text{GHz} \quad (10)$$

$$f_s = 590 - 1\,500 (\theta - 1) \quad \text{GHz} \quad (11)$$

La Fig. 1 muestra los valores de  $K_l$  en frecuencias entre 5 y 200 GHz y temperaturas entre  $-8^\circ\text{C}$  y  $20^\circ\text{C}$ . Para atenuaciones debidas a las nubes, se ha de utilizar la curva correspondiente a  $0^\circ\text{C}$ .

FIGURA 1  
Atenuación específica de las pequeñas gotas de agua a diversas temperaturas en función de la frecuencia



P0840-01

### 3 Atenuación debida a las nubes

Para obtener la atenuación debida a las nubes para un valor de probabilidad determinado, deben conocerse las estadísticas del contenido total de la columna de agua líquida  $L$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) o, de forma equivalente, milímetros de agua precipitable para un emplazamiento determinado, lo que da:

$$A = \frac{L K_l}{\text{sen } \theta} \quad \text{dB} \quad \text{para } 90^\circ \geq \theta \geq 5^\circ \quad (12)$$

siendo  $\theta$  el ángulo de elevación y  $K_l$  el que se obtiene de la Fig. 1.

Las estadísticas del contenido total de la columna de agua líquida pueden obtenerse a partir de las mediciones radiométricas o mediante lanzamientos de radiosondas.

#### 4 Contenido total de la columna de agua líquida de nube

El contenido total de la columna de agua líquida de nube, expresado en  $\text{kg}/\text{m}^2$  o, de manera equivalente, en mm de agua líquida, puede obtenerse a partir de lanzamientos de radiosondas y mediciones radiométricas. Los datos obtenidos a partir de radiosondas son fáciles de obtener; sin embargo, presentan una resolución temporal limitada y se aplican únicamente a trayectos cenitales. El contenido total de la columna de agua líquida de nube puede obtenerse a partir de mediciones radiométricas en las frecuencias apropiadas a lo largo del trayecto deseado.

Los valores anuales del contenido total de la columna de agua líquida de nube,  $L$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ), que exceden durante el 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30; 50; 60; 70; 80; 90; 95 y 99 por ciento de un año promedio están disponibles en forma de mapas digitales en el sitio web de la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones, en los archivos de datos ESAWRED\_xx\_v4.TXT, donde  $xx = 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30; 50; 60; 70; 80; 90; 95$  y 99. Los datos corresponden a  $0^\circ$  hasta  $360^\circ$  de longitud y a  $+90^\circ$  hasta  $-90^\circ$  de latitud, con una resolución de  $1,125^\circ$  tanto en latitud como en longitud. Estos datos deben utilizarse conjuntamente con los archivos de datos complementarios ESALAT\_1dot125.TXT y ESALON\_1dot125.TXT, que contienen las latitudes y longitudes de las entradas correspondientes (puntos de la cuadrícula) en los archivos de datos ESAWRED\_xx\_v4.TXT. Puede deducirse el contenido total de la columna de agua líquida de nube en cualquier emplazamiento de la superficie terrestre mediante el siguiente método de interpolación:

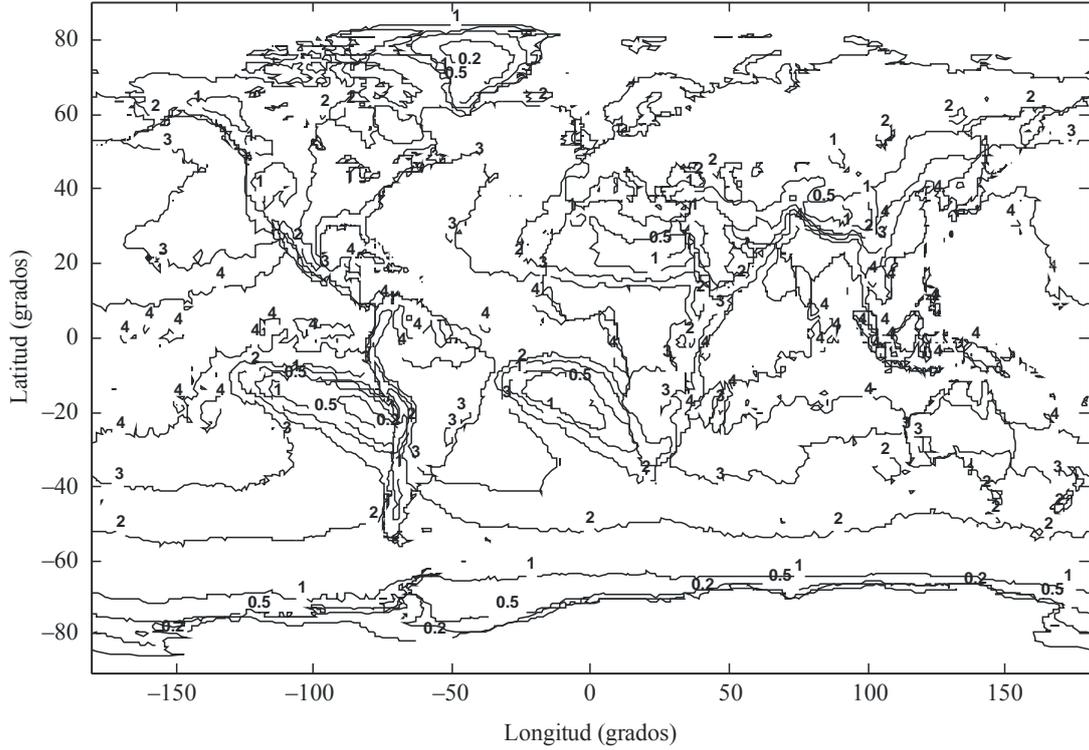
- a) determinar las dos probabilidades  $p_{encima}$  y  $p_{debajo}$ , por encima y por debajo de la probabilidad deseada,  $p$ , del conjunto: 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30; 50; 60; 70; 80; 90; 95 y 99%;
- b) para las dos probabilidades  $p_{encima}$  y  $p_{debajo}$ , determinar el contenido de la columna total de agua líquida de nube  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ , y  $L_4$  en los cuatro puntos más cercanos de la cuadrícula;
- c) determinar el contenido total de la columna de agua líquida de nube  $L_{encima}$  y  $L_{debajo}$  con las probabilidades  $p_{encima}$  y  $p_{debajo}$ , mediante una interpolación bilineal de los cuatro valores del contenido total de la columna de agua líquida de nube  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ , y  $L_4$  en los cuatro puntos de la cuadrícula, según lo descrito en la Recomendación UIT-R P.1144;
- d) determinar el contenido total de la columna de agua líquida de nube,  $L$ , con la probabilidad deseada,  $p$ , interpolando  $L_{encima}$  y  $L_{debajo}$  contra  $p_{encima}$  y  $p_{debajo}$  para  $p$  en una escala lineal  $L$  contra  $\log p$ .

Obsérvese que los mapas digitales de contenido total de la columna de agua líquida de nube incluyen el símbolo NaN (Not-a-Number) cuando no hay valor del contenido total de agua líquida de nube correspondiente a una determinada probabilidad anual de rebasamiento.

En las Figuras 2, 3, 4, 5, 6 y 7 se facilitan ejemplos de contornos del contenido total de la columna de agua líquida de nube para probabilidades de rebasamiento de 0,1; 0,5; 1; 5; 10 y 20%.

FIGURA 2

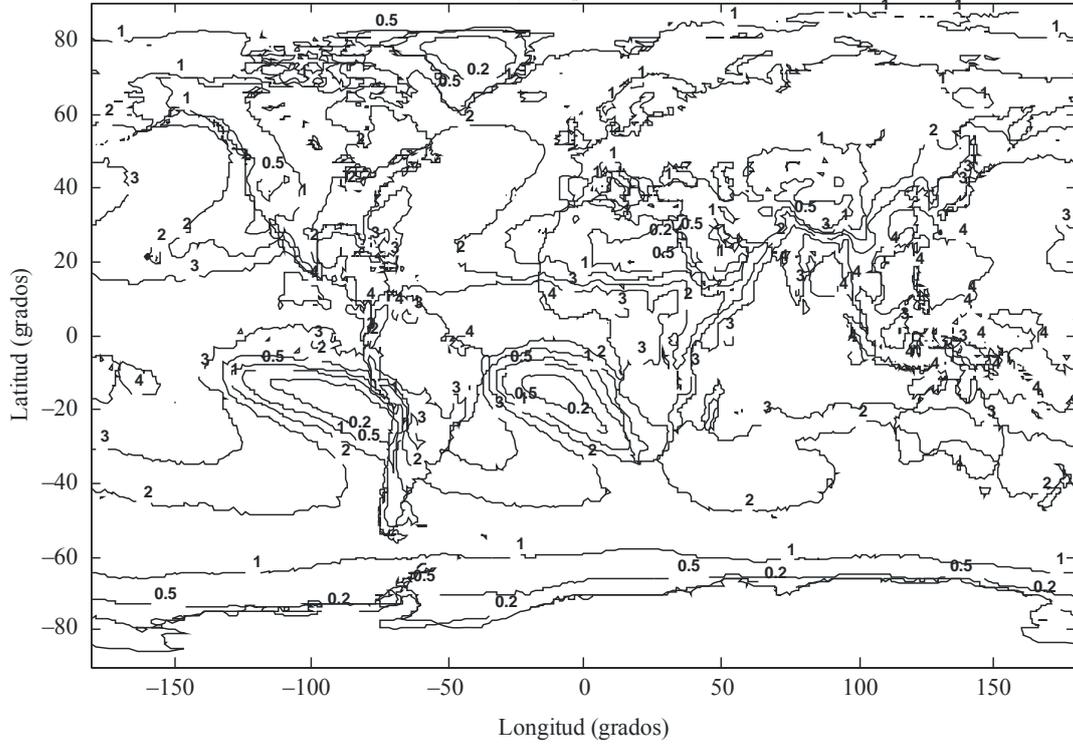
Contenido total normalizado de la columna de agua líquida de nube ( $\text{kg/m}^2$ ) rebasado durante el 0,1% del año



P.0840-02

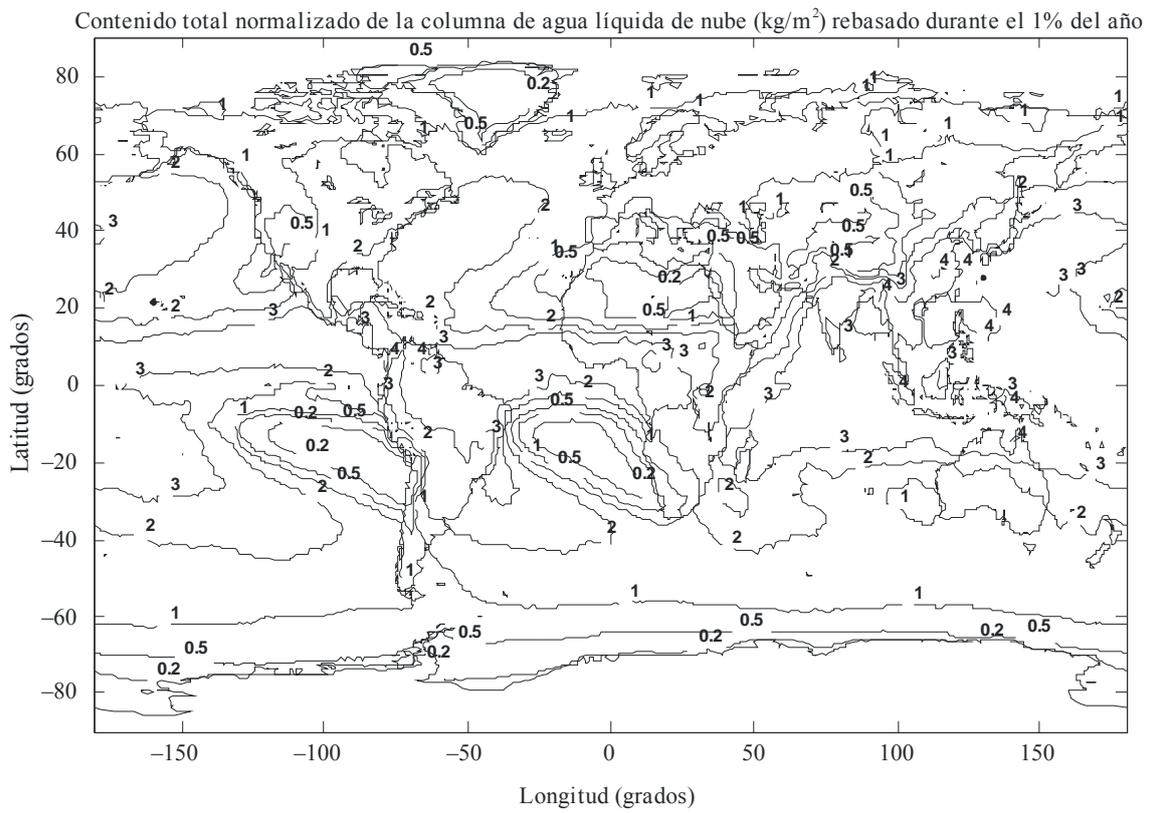
FIGURA 3

Contenido total normalizado de la columna de agua líquida de nube ( $\text{kg/m}^2$ ) rebasado durante el 0,5% del año



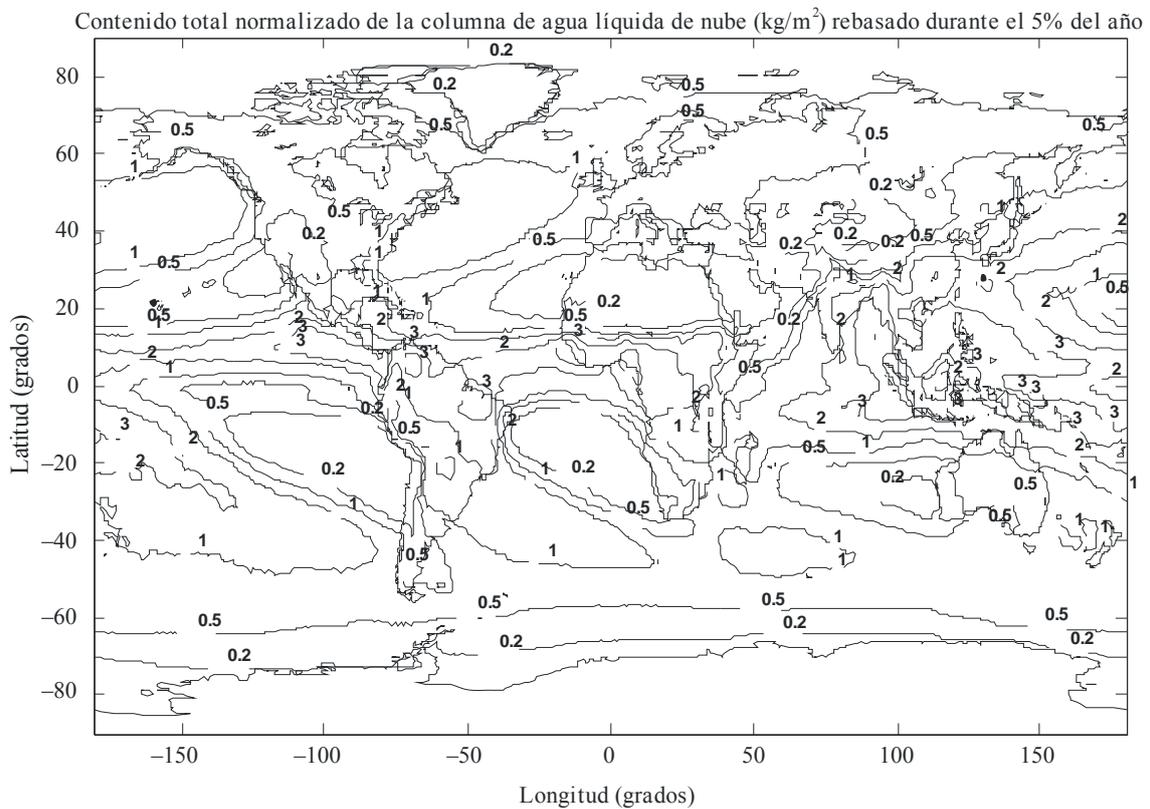
P.0840-03

FIGURA 4



P0840-04

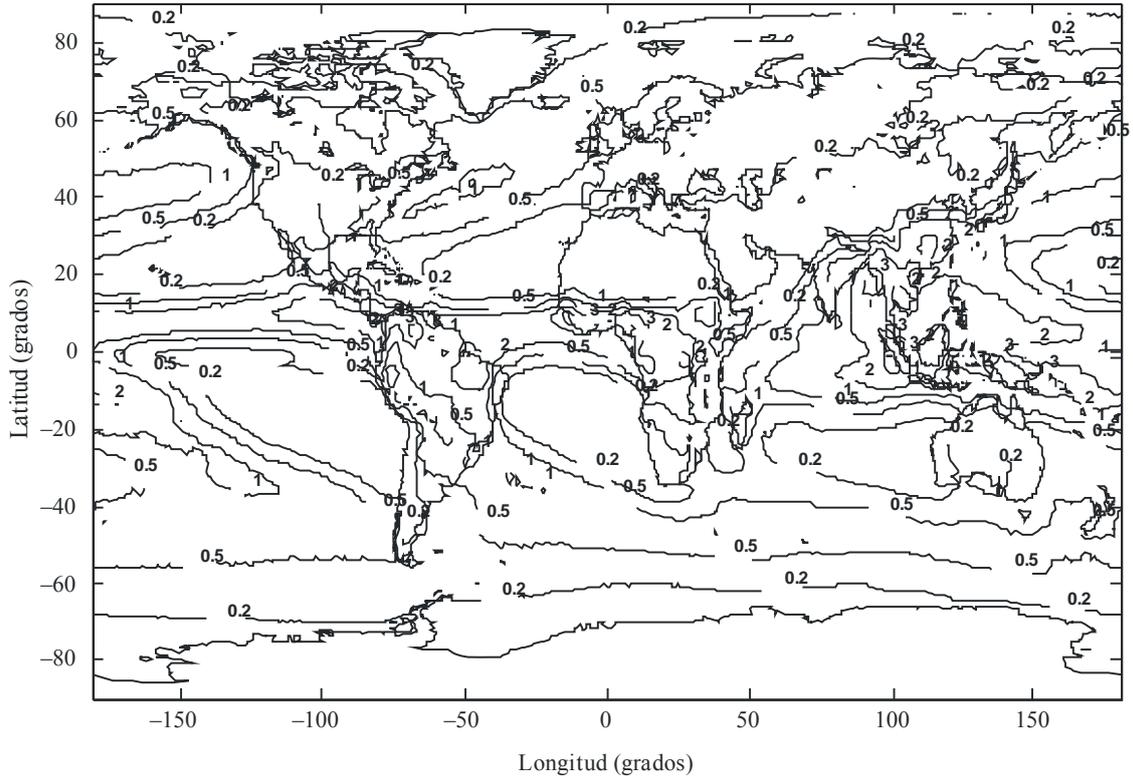
FIGURA 5



P0840-05

FIGURA 6

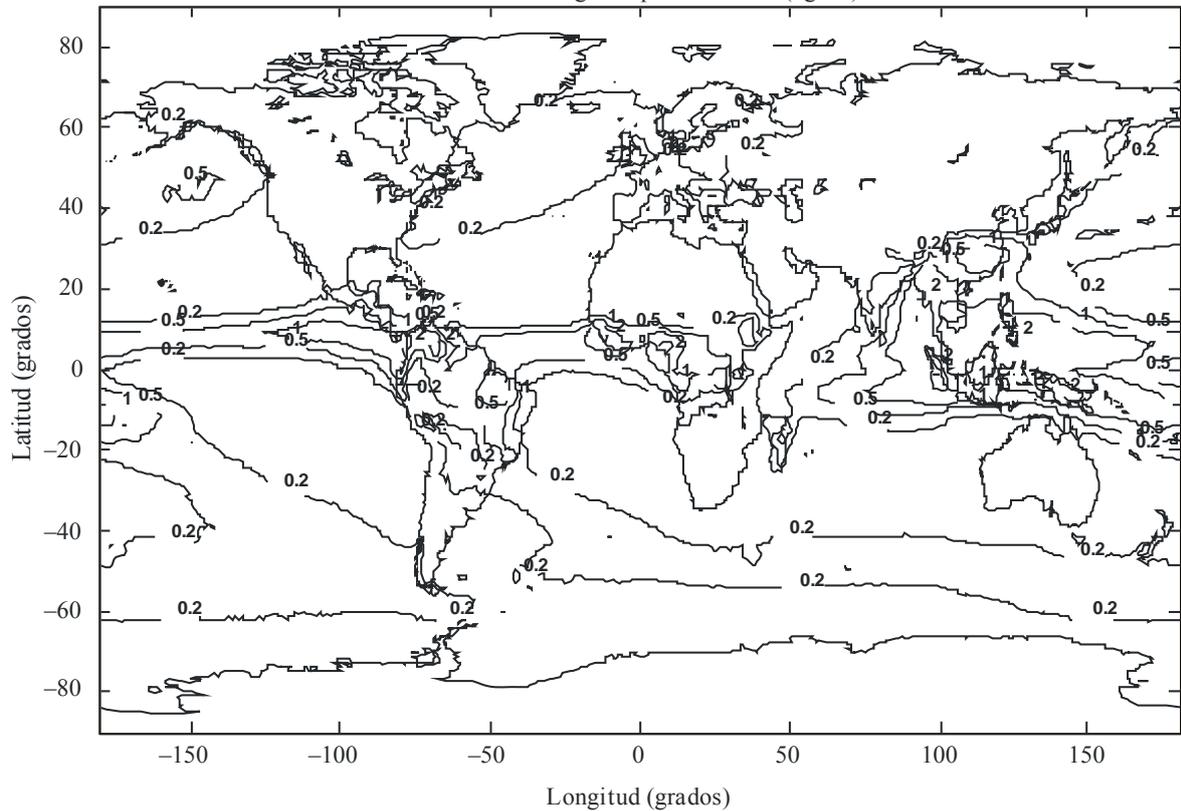
Contenido total normalizado de la columna de agua líquida de nube (kg/m<sup>3</sup>) rebasado durante el 10% del año



P0840-06

FIGURA 7

Contenido total normalizado de la columna de agua líquida de nube (kg/m<sup>3</sup>) rebasado durante el 20% del año



P0840-07

## 5 Distribución estadística del contenido total de la columna de agua líquida de nube

Puede obtenerse una aproximación de las estadísticas del contenido total de la columna de agua líquida de nube mediante una distribución logarítmica normal. Los parámetros de media,  $m$ , desviación standard,  $\sigma$ , y probabilidad de agua líquida,  $P_{clw}$  de la distribución logarítmica normal están disponibles en forma de mapas digitales en el sitio web de la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones, en los archivos de datos WRED\_LOGNORMAL\_MEAN\_v4.TXT, WRED\_LOGNORMAL\_STDEV\_v4.TXT, y WRED\_LOGNORMAL\_PCLW\_v4.TXT. Los datos van de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  de longitud y de  $+90^\circ$  a  $-90^\circ$  de latitud, con una resolución de  $1,125^\circ$  tanto en longitud como en latitud. Estos datos deben utilizarse conjuntamente con los archivos de datos complementarios ESALAT\_1dot125.TXT y ESALON\_1dot125.TXT, que contienen las latitudes y longitudes de las entradas correspondientes (puntos de la cuadrícula) en los archivos de datos WRED\_LOGNORMAL\_MEAN\_v4.TXT, WRED\_LOGNORMAL\_STDEV\_v4.TXT, y WRED\_LOGNORMAL\_PCLW\_v4.TXT. Puede deducirse el contenido total de la columna de agua líquida de nube en cualquier emplazamiento de la superficie terrestre mediante el siguiente método de interpolación:

- determinar los parámetros  $m_1, m_2, m_3, m_4, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, P_{CLW1}, P_{CLW2}, P_{CLW3}$  y  $P_{CLW4}$  en los cuatro puntos más próximos de la cuadrícula;
- determinar el contenido total de la columna de agua líquida de nube  $L_1, L_2, L_3,$  y  $L_4$  para la probabilidad deseada,  $p$ , en los cuatro puntos más próximos de la cuadrícula a partir de los parámetros  $m_1, m_2, m_3, m_4, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, P_{CLW1}, P_{CLW2}, P_{CLW3}$  y  $P_{CLW4}$  de la siguiente manera:

$$L_i = e^{m_i + \sigma_i Q^{-1}\left(\frac{P}{P_{CLWi}}\right)} \quad \text{para } i = 1, 2, 3, 4 \quad (13)$$

donde:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (14)$$

- determinar el contenido total de la columna de agua líquida de nube en el lugar deseado procediendo a una interpolación bilineal de los cuatro valores del contenido total de la columna de agua líquida de nube  $L_1, L_2, L_3,$  y  $L_4$  en los cuatro puntos de la cuadrícula, según se describe en la Recomendación UIT-R P.1144.

Obsérvese que los mapas digitales de parámetros log-normales incluyen el símbolo NaN (Not-a-Number) cuando no hay valor del contenido total de agua líquida de nube correspondiente a una determinada probabilidad anual de rebasamiento, en los mapas digitales del contenido total de la columna de agua líquida de nube.