

Unión Internacional de Telecomunicaciones

**UIT-R**

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

**Recomendación UIT-R P.1815-1**  
(10/2009)

**Atenuación diferencial debida a la lluvia**

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



Unión  
Internacional de  
Telecomunicaciones

## Prólogo

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

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

## Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

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

### Series de las Recomendaciones UIT-R

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

Series	Título
<b>BO</b>	Distribución por satélite
<b>BR</b>	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
<b>BS</b>	Servicio de radiodifusión sonora
<b>BT</b>	Servicio de radiodifusión (televisión)
<b>F</b>	Servicio fijo
<b>M</b>	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
<b>P</b>	<b>Propagación de las ondas radioeléctricas</b>
<b>RA</b>	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, 2010

© UIT 2010

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

## RECOMENDACIÓN ITU-R P.1815-1\*

**Atenuación diferencial debida a la lluvia**

(Cuestión UIT-R 208/3)

(2007-2009)

**Cometido**

En esta Recomendación se predicen las estadísticas conjuntas de atenuación diferencial entre un satélite y dos emplazamientos en la superficie de la Tierra.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

- a) que es necesario contar con las técnicas adecuadas para predecir la atenuación diferencial debida a la lluvia entre los trayectos de satélite que van desde un solo satélite hasta varias ubicaciones en la superficie de la Tierra, a efectos de poder realizar los análisis de compartición;
- b) que se dispone de estimaciones de la correlación espacial de las intensidades de lluvia;
- c) que se han desarrollado metodologías para predecir la atenuación diferencial debida a la lluvia en los trayectos espacio-Tierra,

*recomienda*

**1** que se utilicen los métodos descritos en el Anexo 1 para predecir la atenuación diferencial debida a la lluvia en los trayectos de satélite entre un solo satélite y varias ubicaciones en la superficie de la Tierra.

**Anexo 1****Descripción y método de cálculo de la atenuación diferencial debida a la lluvia****1 Introducción**

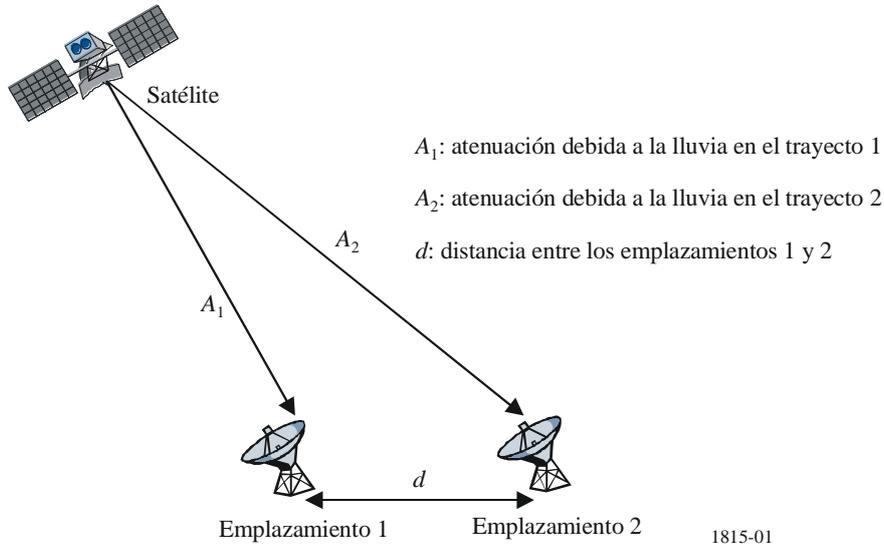
El método que se describe en este Anexo permite predecir las estadísticas conjuntas de atenuación diferencial entre un satélite y dos puntos situados en la superficie de la Tierra, y es válido para frecuencias de hasta 55 GHz, ángulos de elevación por encima de unos 10°, y distancias entre los emplazamientos entre 0 y, por lo menos, 250 km.

---

\* La Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones introdujo modificaciones redaccionales en esta Recomendación en 2016, de conformidad con la Resolución UIT-R 1.

En este método se tienen en cuenta las características estadísticas y temporales del tamaño de célula de lluvia, la intensidad de la lluvia y el movimiento de las células de lluvia como función de la atenuación diferencial debida a la lluvia.

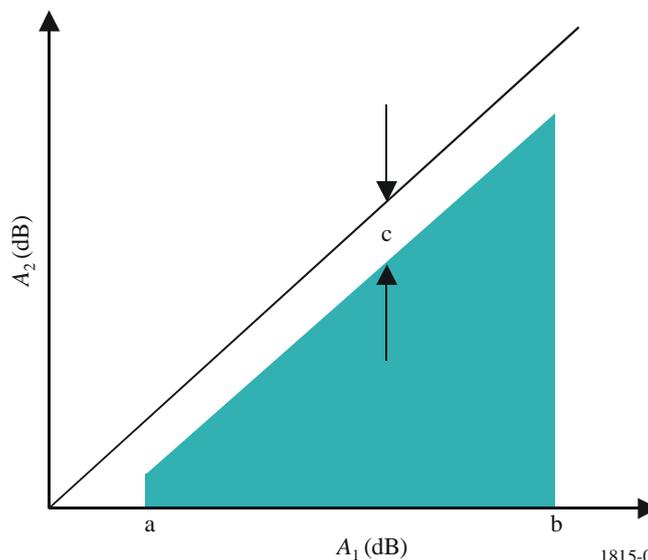
FIGURA 1  
Geometría de la atenuación diferencial



1815-01

En la Fig. 1 se muestra una geometría, en la que  $A_1$  y  $A_2$  son las atenuaciones debidas a la lluvia en los trayectos 1 y 2, respectivamente. La estadística que se quiere obtener es la probabilidad conjunta de que la atenuación en el primer trayecto,  $A_1$ , esté entre  $a$  y  $b$ , y la atenuación en segundo trayecto,  $A_2$ , sea menor o igual que  $A_1 - c$ ; es decir  $\Pr\{a < A_1 \leq b, A_2 \leq A_1 - c\}$ . En la Fig. 2 se muestra gráficamente esta probabilidad conjunta como la probabilidad integrada dentro de la región sombreada.

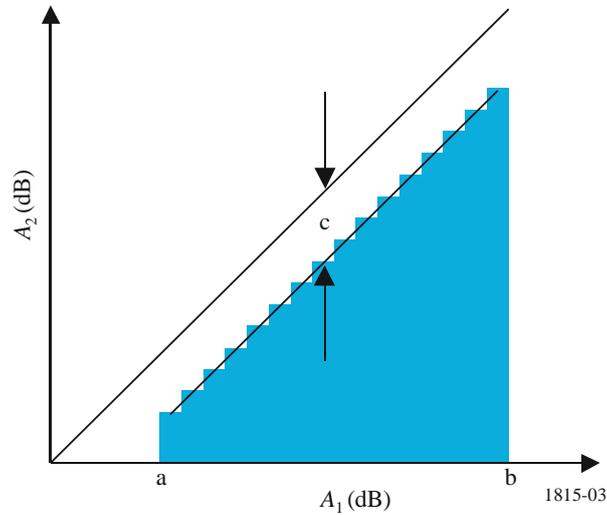
FIGURA 2  
Distribución deseada de probabilidad conjunta



1815-02

La probabilidad conjunta en la región sombreada de la Fig. 2 puede estimarse con bastante precisión como la suma de las probabilidades integradas en los rectángulos verticales que se muestran en la Fig. 3.

FIGURA 3  
Aproximación de la distribución deseada de probabilidad conjunta



A continuación, la probabilidad conjunta en la región sombreada de la Fig. 3 se puede calcular como la diferencia entre la probabilidad conjunta de la región sombreada en la Fig. 4 y la probabilidad conjunta de la región sombreada en la Fig. 5.

FIGURA 4  
 $\Pr(A_1 \geq a) - \Pr(A_1 \geq b)$

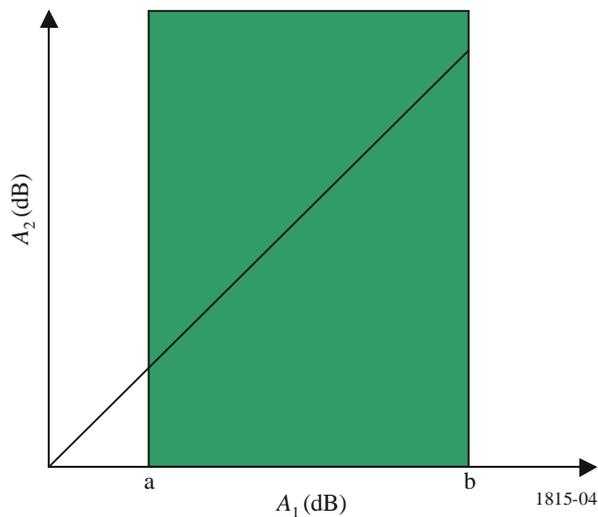
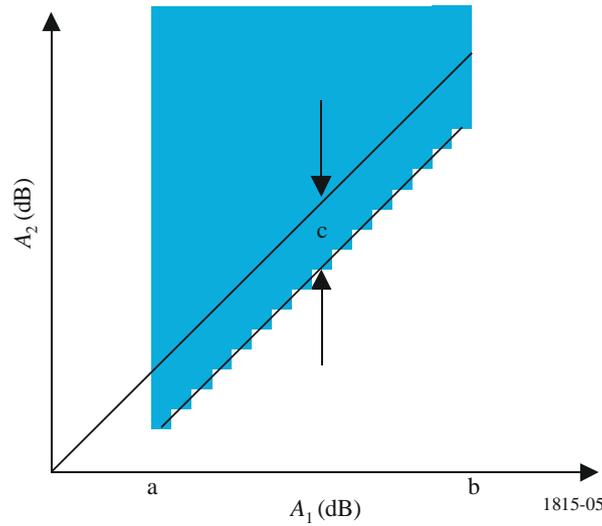


FIGURA 5

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \Pr \left( A_1 \geq a + (i-1)\delta - \frac{\delta}{2}, A_2 \geq a + (i-1)\delta - c \right) - \Pr \left( A_1 \geq a + (i-1)\delta + \frac{\delta}{2}, A_2 \geq a + (i-1)\delta - c \right) \right\}$$



Es posible efectuar una buena aproximación de la probabilidad común  $\Pr\{a < A_1 \leq b, A_2 \leq A_1 - c\}$  a partir de las Figs. 4 y 5 mediante el cálculo siguiente:

$$\begin{aligned} & \Pr\{a < A_1 \leq b, A_2 \leq A_1 - c\} \\ &= \Pr(A_1 \geq a) - \Pr(A_1 \geq b) \\ & - \sum_{i=1}^n \left\{ \Pr \left( A_1 \geq a + (i-1)\delta - \frac{\delta}{2}, A_2 \geq a + (i-1)\delta - c \right) - \Pr \left( A_1 \geq a + (i-1)\delta + \frac{\delta}{2}, A_2 \geq a + (i-1)\delta - c \right) \right\} \end{aligned}$$

donde:

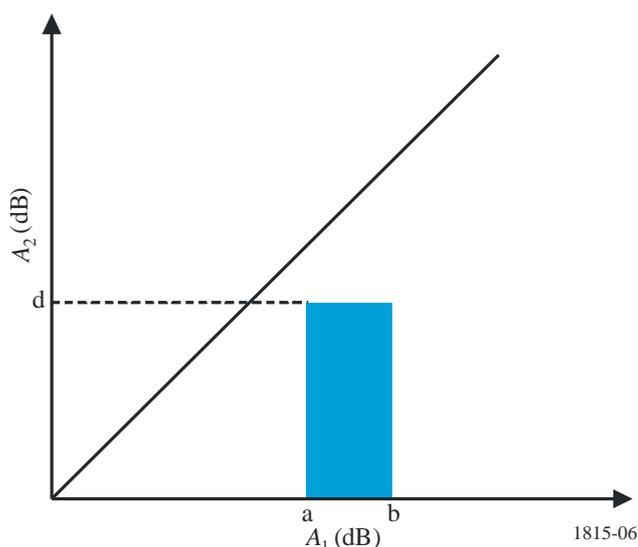
$$\delta = \frac{b-a}{n}$$

y donde se escoge el número de puntos,  $n$ , de tal manera que se obtenga la precisión deseada. Por lo general, basta con un paso,  $\delta$ , de 0,01 dB para obtener suficiente precisión.

Este método también se puede emplear para calcular otras probabilidades conjuntas deseadas. Así, por ejemplo, la probabilidad conjunta  $\Pr\{a < A_1 \leq b, A_2 \leq d\}$  que se muestra en la región sombreada de la Fig. 6 es:

$$\Pr\{a < A_1 \leq b, A_2 \leq d\} = \Pr(A_1 \geq a) - \Pr(A_1 \geq b) - [\Pr(A_1 \geq a, A_2 \geq d) - \Pr(A_1 \geq b, A_2 \geq d)]$$

FIGURA 6  
 $\Pr\{a < A_1 \leq b, A_2 \leq d\}$



## 2 Estadísticas anuales de atenuación diferencial

Cuando se requieran estadísticas anuales de atenuación diferencial, es posible calcular la probabilidad  $\Pr\{A_1 \geq a, A_2 \geq b\}$  utilizando el método de predicción que se describe en el Anexo 2, basado en la interpolación de las atenuaciones debidas a la lluvia en un solo emplazamiento como función de las probabilidades anuales de ocurrencia,  $\Pr\{A_1 \geq a\}$  y  $\Pr\{A_2 \geq b\}$ , con distribución de probabilidad del tipo log-normal. Es posible predecir la atenuación debida a la lluvia en función de la probabilidad anual de ocurrencia mediante el método que se describe en el § 2.2.1.1 de la Recomendación UIT-R P.618.

Las estadísticas de atenuación diferencial anual se pueden obtener mediante el siguiente procedimiento:

*Paso 1:* Se obtiene la atenuación anual debida a la lluvia en función de la probabilidad de ocurrencia, utilizando el método de predicción de atenuación debida a la lluvia del UIT-R que se describe en el § 2.2.1.1 de la Recomendación UIT-R P.618.

*Paso 2:* Se aplica el método de predicción de la atenuación diferencial debida a la lluvia que se describe en el § 1, en el que se calculan las probabilidades  $\Pr(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2)$  utilizando el método que se describe en el Anexo 2.

## 3 Estadística de atenuación diferencial para el mes más desfavorable

Si se requieren estadísticas de atenuación diferencial para el mes más desfavorable, se puede utilizar la Recomendación UIT-R P.841 para convertir las estadísticas de atenuación anual debida a la lluvia, en un solo emplazamiento, en estadísticas de atenuación debida a la lluvia para el mes más desfavorable.

Se pueden obtener las estadísticas de atenuación diferencial para el mes más desfavorable utilizando el siguiente procedimiento:

*Paso 1:* Se obtiene la atenuación debida a lluvias en función de la probabilidad de ocurrencia, utilizando el método de predicción de atenuación debida a la lluvia del UIT-R, que se describe en el § 2.2.1.1 de la Recomendación UIT-R P.618.

*Paso 2:* Se convierten las estadísticas de atenuación anual debida a lluvia en estadísticas de atenuación de lluvia para el mes más desfavorable, utilizando el método del UIT-R de conversión al mes más desfavorable, que se describe en la Recomendación UIT-R P.841.

*Paso 3:* Se aplica el método de predicción de atenuación diferencial debida a lluvia que se describe en el § 1, para el cual se calculan las probabilidades correspondientes  $\Pr(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2)$  mediante el método que se describe en el Anexo 2.

## Anexo 2

### Descripción del método de predicción de la atenuación diferencial debida a la lluvia

#### 1 Análisis

En el método de predicción de atenuación diferencial anual debida a lluvias se parte de la hipótesis de que se tiene una distribución log-normal de la intensidad de lluvia y de la atenuación debida a la lluvia.

Con este método se predice  $\Pr(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2)$ , la probabilidad conjunta (%) de que la atenuación en el trayecto hasta el primer emplazamiento sea mayor que  $a_1$  y de que la atenuación en el trayecto hasta el segundo emplazamiento sea mayor que  $a_2$ .  $\Pr(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2)$  es el producto de dos probabilidades conjuntas:

$P_r$ : la probabilidad conjunta de que esté lloviendo en ambos emplazamientos, y

$P_a$ : la probabilidad conjunta condicional de que las atenuaciones superen los valores  $a_1$  y  $a_2$ , respectivamente, en caso de que esté lloviendo en ambos emplazamientos, es decir:

$$\Pr(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2) = 100 \times P_r \times P_a \quad \% \quad (1)$$

Estas probabilidades son:

$$P_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_r^2}} \int_{R_1}^{\infty} \int_{R_2}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{r_1^2 - 2\rho_r r_1 r_2 + r_2^2}{2(1-\rho_r^2)}\right)\right] dr_2 dr_1 \quad (2)$$

donde:

$$\rho_r = 0,7 \exp(-d/60) + 0,3 \exp\left[-(d/700)^2\right] \quad (3)$$

y

$$P_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_a^2}} \int_{\frac{\ln a_1 - m_{\ln A_1}}{\sigma_{\ln A_1}}}^{\infty} \int_{\frac{\ln a_2 - m_{\ln A_2}}{\sigma_{\ln A_2}}}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{b_1^2 - 2\rho_a b_1 b_2 + b_2^2}{2(1-\rho_a^2)}\right)\right] db_2 db_1 \quad (4)$$

donde:

$$\rho_a = 0,94 \exp(-d/30) + 0,06 \exp\left[-(d/500)^2\right] \quad (5)$$

y  $P_a$  y  $P_r$  son las distribuciones normales bivariadas complementarias<sup>1</sup>.

El parámetro  $d$  es la distancia entre los dos emplazamientos (km). Los umbrales  $R_1$  y  $R_2$  son las soluciones de la ecuación:

$$P_k^{lluvia} = 100 \times Q(R_k) = 100 \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{R_k}^{\infty} \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) dr \quad (6)$$

es decir:

$$R_k = Q^{-1}\left(\frac{P_k^{lluvia}}{100}\right) \quad (7)$$

donde:

- $R_k$ : es el umbral del  $k$ -ésimo emplazamiento, respectivamente
- $P_k^{lluvia}$ : es la probabilidad de que llueva (%)
- $Q$ : es la distribución normal acumulativa complementaria
- $Q^{-1}$ : es la inversa de la distribución normal acumulativa complementaria
- $P_k^{lluvia}$ : para determinar una ubicación se puede obtener utilizando el paso 3 del Anexo 1 de la Recomendación UIT-R P.837, bien sea utilizando datos locales o bien mediante los mapas de densidad de lluvia del UIT-R.

Se determinan los valores de los parámetros  $m_{\ln A_1}$ ,  $m_{\ln A_2}$ ,  $\sigma_{\ln A_1}$ , y  $\sigma_{\ln A_2}$  mediante la interpolación de la atenuación debida a la lluvia en un solo emplazamiento,  $A_i$ , en función de la probabilidad de ocurrencia,  $P_i$ , en una distribución log-normal:

$$P_i = P_k^{lluvia} Q\left(\frac{\ln A_i - m_{\ln A_i}}{\sigma_{\ln A_i}}\right) \quad (8)$$

Es posible obtener estos parámetros para cada ubicación, o simplemente utilizar una sola de ellas. Se puede predecir la atenuación debida a la lluvia en función de la probabilidad anual de ocurrencia, utilizando el método que se describe en el § 2.2.1.1 de la Recomendación UIT-R P.618.

Para cada emplazamiento, se efectúa la interpolación log-normal de la atenuación debida a la lluvia en función de la probabilidad de ocurrencia como sigue:

*Paso 1:* Se calcula  $P_k^{lluvia}$  (% de tiempo), probabilidad de lluvia en el trayecto  $k$ -th.

*Paso 2:* Se crea el conjunto de pares  $[P_i, A_i]$  donde  $P_i$  (% de tiempo) es la probabilidad de que se rebase la atenuación  $A_i$  (dB) donde  $P_i \leq P_k^{lluvia}$ . Los valores específicos de  $P_i$  deben considerar la

---

<sup>1</sup> Se dispone de una aproximación a dicha integral en Z. Drezner y G.O. Wesolowsky. «On the Computation of the Bivariate Normal Integral», Journal of Statistical Computation and Simulation. Vol. 35, 1989, págs. 101–107. La colección de herramientas estadísticas Matlab contiene la función Matlab incorporada «mvncdf» que calcula la integral normal bivalente, y la biblioteca Python contiene la función incorporada «mvndst» que calcula la integral normal bivalente.

gama de probabilidades de interés. Sin embargo, una serie de porcentajes de tiempo propuestos es 0,01%, 0,02%, 0,03%, 0,05%, 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,5%, 1%, 2%, 3%, 5% y 10%, con la limitación de que  $P_i \leq P_k^{lluvia}$ .

*Paso 3:* Se transforma el conjunto de pares a  $[P_i, A_i]$  a  $\left[ Q^{-1}\left(\frac{P_i}{P_k^{lluvia}}\right), \ln A_i \right]$ ,

donde:

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

*Paso 4:* Se calculan las variables  $m_{\ln A_i}$  y  $\sigma_{\ln A_i}$  efectuando una interpolación de mínimos cuadrados a la fórmula  $\ln A_i = \sigma_{\ln A_i} Q^{-1}\left(\frac{P_i}{P_k^{lluvia}}\right) + m_{\ln A_i}$  para todo  $i$ . La interpolación de mínimos cuadrados puede determinarse utilizando el «procedimiento paso a paso para aproximar una distribución acumulativa complementaria mediante una distribución acumulativa complementaria log-normal» descrito en la Recomendación UIT-R P.1057.

---