

Unión Internacional de Telecomunicaciones

**UIT-R**

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

**Recomendación UIT-R P.1853-1**  
(02/2012)

**Síntesis de las series temporales  
de atenuación troposférica**

**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, 2013

© UIT 2013

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.1853-1

**Síntesis de las series temporales de atenuación troposférica**

(2009-2011)

**Cometido**

El presente Recomendación se describen los métodos para sintetizar la atenuación debida a la lluvia y el centelleo en trayectos terrenales y Tierra-espacio y la atenuación total y el centelleo troposférico en trayectos Tierra-espacio.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

- a) que para la planificación adecuada de los sistemas de telecomunicación Tierra-espacio es necesario disponer de métodos apropiados de simulación de la dinámica temporal del canal de propagación;
- b) que se han elaborado métodos que permiten simular con suficiente precisión la dinámica temporal del canal de propagación,

*recomienda*

- 1** que para sintetizar las series temporales de la atenuación debida a la lluvia en trayectos terrenales o Tierra-espacio se utilice el método descrito en el Anexo 1;
- 2** que para sintetizar las series temporales del centelleo en trayectos terrenales o Tierra-espacio se recurra al método descrito en el Anexo 1;
- 3** que para sintetizar las series temporales de la atenuación troposférica total y el centelleo troposférico en trayectos Tierra-espacio se utilice el método descrito en el Anexo 1.

## ANEXO 1

**1 Introducción**

Al planificar y diseñar sistemas de radiocomunicaciones terrenales y Tierra-espacio es necesario sintetizar la dinámica temporal del canal de propagación. Esta información puede ser necesaria, por ejemplo, al diseñar técnicas de reducción de la atenuación, tales como la codificación y modulación adaptativas y el control de la potencia de transmisión.

En el presente Anexo se describe una técnica para sintetizar las series temporales de la atenuación debida a la lluvia y el centelleo en trayectos terrenales y Tierra-espacio y de la atenuación total y el centelleo troposférico en trayectos Tierra-espacio que sirven de aproximación a los valores estadísticos de atenuación debida a la lluvia en un determinado emplazamiento.

## 2 Método de síntesis de las series temporales de la atenuación debida a la lluvia

### 2.1 Descripción general

El método de síntesis de la serie temporal parte del supuesto de que las estadísticas a largo plazo de la atenuación debida a la lluvia presentan una distribución log normal. Si bien los métodos del UIT-R de predicción de la atenuación debida a la lluvia descritos en la Recomendación UIT-R P.530 para trayectos terrenales y en la Recomendación UIT-R P.618 para trayectos Tierra-espacio no corresponden exactamente a una distribución log-normal, ésta constituye una buena aproximación para la gama más significativa de probabilidades de rebasamiento. Los métodos de predicción de la atenuación debida a la lluvia en trayectos terrenales y Tierra-espacio generan una atenuación debida a la lluvia distinta de cero cuando la probabilidad de rebasamiento es mayor que la probabilidad de lluvia; sin embargo, el método de síntesis de las series temporales consiste en ajustar la serie temporal de la atenuación de tal modo que el valor de la atenuación debida a la lluvia correspondiente a las probabilidades de rebasamiento superiores a la probabilidad de lluvia sea igual a 0 dB.

En el caso de trayectos terrenales, el método de síntesis de las series temporales es válido para frecuencias comprendidas entre 4 GHz y 40 GHz y para longitudes de trayecto de 2 km a 60 km.

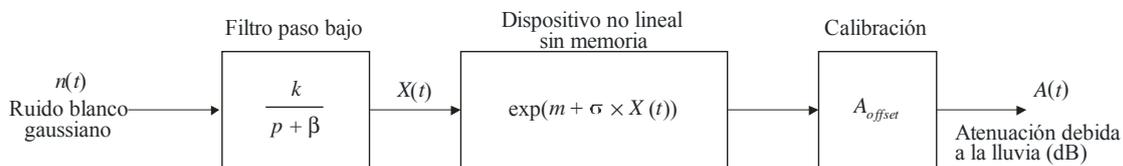
En el caso de trayectos Tierra-espacio, el método de síntesis de la serie temporal es válido para frecuencias comprendidas entre 4 GHz y 55 GHz y ángulos de elevación entre 5° y 90°.

Este método genera una serie temporal que reproduce las características espectrales, el gradiente de desvanecimiento y valores estadísticos de la duración de éste en eventos de atenuación debida a la lluvia. También se reproducen las estadísticas de la duración entre desvanecimiento pero sólo para cada caso de atenuación por separado.

Como se muestra en la Fig. 1, la serie temporal de atenuación debida a la lluvia  $A(t)$  se sintetiza a partir de un proceso de ruido blanco gaussiano discreto,  $n(t)$ . El ruido blanco gaussiano se pasa por un filtro paso bajo, se transforma de una distribución normal en una distribución log-normal en un dispositivo no lineal sin memoria y se calibra para hacerlo corresponder con la estadística de atenuación debida a la lluvia deseada.

FIGURA 1

Diagrama de bloques del sintetizador de series temporales de la atenuación debida a la lluvia



P.1853-01

El sintetizador de series temporales queda definido por cinco parámetros:

- $m$ : media de la distribución log-normal de la atenuación debida a la lluvia
- $\sigma$ : desviación típica de la distribución log-normal de la atenuación debida a la lluvia
- $p$ : la probabilidad de lluvia
- $\beta$ : parámetro que describe la dinámica temporal ( $s^{-1}$ )
- $A_{offset}$ : desplazamiento que permite hacer corresponder la serie temporal con la probabilidad de lluvia (dB).

## 2.2 Método paso a paso

El siguiente método paso a paso permite sintetizar la serie temporal de la atenuación  $A_{lluvia}(kT_s)$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$ , siendo  $T_s$  el intervalo de tiempo entre muestras y  $k$  el índice de cada muestra.

### A Cálculo de $m$ y $\sigma$

Los parámetros  $m$  y  $\sigma$  se determinan a partir de la distribución acumulativa de la atenuación debida a la lluvia respecto a la probabilidad de que se produzca. Las estadísticas de la atenuación debida a la lluvia pueden calcularse a partir de los datos locales medidos y, si no se dispone de éstos, puede recurrirse a los métodos de predicción de la atenuación debida a la lluvia descritos en la Recomendación UIT-R P.530 para trayectos terrenales o en la Recomendación UIT-R P.618 para trayectos Tierra-espacio.

Para el trayecto y la frecuencia de interés, se efectúa un ajuste a una distribución normal de la atenuación debida a la lluvia respecto a la probabilidad de que se produzca, como se describe a continuación:

*Paso A1:* Determinar  $P^{lluvia}$  (% del tiempo), la probabilidad de lluvia en el trayecto. Una buena aproximación de la  $P^{lluvia}$  es  $P_0(Lat, Lon)$ , obtenida de la Recomendación UIT-R P.837.

*Paso A2:* Construir el conjunto de pares  $[P_i, A_i]$ , siendo  $P_i$  (% del tiempo) la probabilidad de que se rebase la atenuación  $A_i$ (dB) donde  $P_i \leq P^{lluvia}$ . Los valores concretos de  $P_i$  deben tener en cuenta la gama de probabilidades de interés; no obstante, se propone el siguiente conjunto de porcentajes de tiempo 0,01, 0,02, 0,03, 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1, 2, 3, 5, y 10%, con la restricción de que  $P_i \leq P^{lluvia}$ .

*Paso A3:* Transformar el conjunto de pares  $[P_i, A_i]$  a  $\left[ Q^{-1}\left(\frac{P_i}{100}\right), \ln A_i \right]$ ,

donde:

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

*Paso A4:* Determinar las variables  $m_{\ln A_i}$  y  $\sigma_{\ln A_i}$  mediante un ajuste por mínimos cuadrados a

$\ln A_i = \sigma_{\ln A_i} Q^{-1}\left(\frac{P_i}{100}\right) + m_{\ln A_i}$  para todas las  $i$ . El ajuste por mínimos cuadrados puede calcularse

utilizando el procedimiento paso a paso para obtener una aproximación a una distribución acumulativa complementaria mediante la distribución acumulativa complementaria log-normal descrita en la Recomendación UIT-R P.1057.

### B Parámetro del filtro paso bajo

*Paso B1:* El parámetro  $\beta = 2 \times 10^{-4}$  (s<sup>-1</sup>).

### C Desplazamiento de la atenuación

*Paso C1:* El desplazamiento de la atenuación  $A_{desplaz.}$  (dB), se calcula mediante la siguiente expresión:

$$A_{desplaz.} = e^{m + \sigma Q^{-1}\left(\frac{P^{lluvia}}{100}\right)} \quad (2)$$

### D Síntesis de la serie temporal

La serie temporal  $A_{lluvia}(kT_s)$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$  se sintetiza del modo siguiente:

*Paso D1:* Sintetizar la serie temporal del ruido blanco gaussiano  $n(kT_s)$ , siendo  $k = 1, 2, 3, \dots$  de media igual a cero y varianza unitaria a lo largo del periodo de muestreo  $T_s$ , igual a 1 s.

*Paso D2:* Aplicar  $X(0) = 0$

*Paso D3:* Filtrar la serie temporal del ruido  $n(kT_s)$ , con un filtro paso bajo recursivo definido por la siguiente expresión:

$$X(kT_s) = \rho \times X((k-1)T_s) + \sqrt{1-\rho^2} \times n(kT_s) \quad \text{para } k = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

siendo: 
$$\rho = e^{-\beta T_s} \quad (4)$$

*Paso D4:* calcular  $Y_{lluvia}(kT_s)$ , para  $k = 1, 2, 3, \dots$  del modo siguiente:

$$Y_{lluvia}(kT_s) = e^{m + \sigma X(kT_s)} \quad (5)$$

*Paso D5:* Calcular  $A_{lluvia}(kT_s)$  (dB), para  $k = 1, 2, 3, \dots$  del modo siguiente:

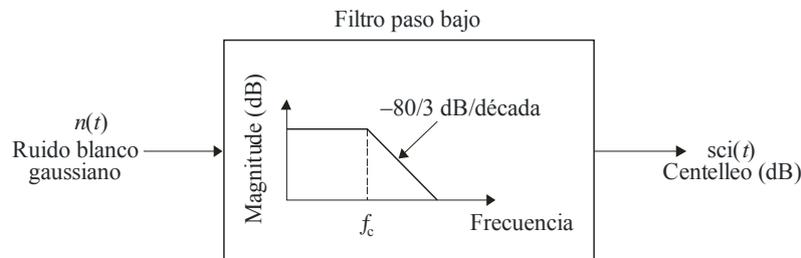
$$A_{lluvia}(kT_s) = \text{Máximo}[Y(kT_s) - A_{desplaz.,0}] \quad (6)$$

*Paso D6:* Descartar las primeras 200 000 muestras de la serie temporal sintetizada (que corresponden al transitorio del filtro). Los eventos de atenuación debida a la lluvia se representan mediante secuencias cuyos valores son mayores que 0 dB durante cierto número consecutivo de muestras.

### 3 Método de síntesis de la serie temporal del centelleo

Como se muestra en la Fig. 2, la serie temporal del centelleo,  $sci(t)$ , puede generarse filtrando el ruido blanco gaussiano  $n(t)$ , de modo que la asíntota del espectro de potencia de la serie temporal filtrada tenga una pendiente de  $f^{-8/3}$  y una frecuencia de corte  $f_c$ , de 0,1 Hz. Obsérvese que la desviación típica del centelleo aumenta al aumentar la atenuación debida a la lluvia.

FIGURA 2  
Diagrama de bloques del sintetizador de la serie temporal del centelleo



## 4 Método de síntesis de las series temporales del contenido integrado de agua líquida en las nubes

### 4.1 Descripción general

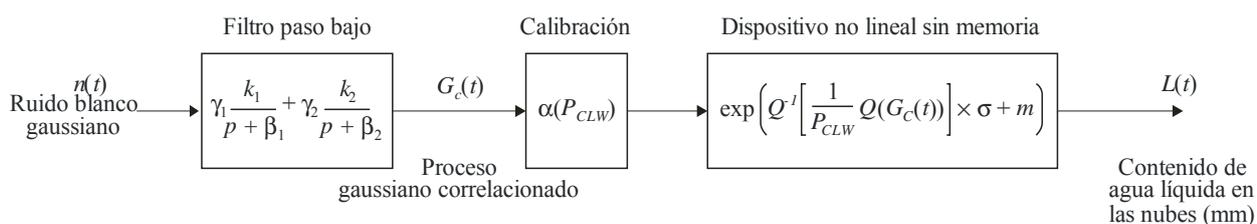
Tal y como se sugiere en la Recomendación UIT-R P.840, el método de síntesis de las series temporales sirve de aproximación a las estadísticas del contenido total integrado a largo plazo de agua líquida en las nubes mediante una distribución log normal.

El método de síntesis de las series temporales genera una serie temporal que reproduce las características espectrales, la velocidad de variación y las estadísticas de duración del contenido líquido en las nubes.

Tal y como se muestra en la Fig. 3, la serie temporal del contenido líquido,  $L(t)$ , se sintetiza a partir de un proceso de ruido blanco gaussiano discreto,  $n(t)$ . El ruido blanco gaussiano se pasa por un filtro paso bajo, se trunca para que concuerde con la probabilidad de aparición de la nube deseada y se transforma de una distribución normal truncada en una distribución log normal condicionada en un dispositivo no lineal sin memoria.

FIGURA 3

Diagrama de bloques del sintetizador de series temporales del contenido integrado de agua líquida en las nubes



P.1853-03

El sintetizador de series temporales se define mediante ocho parámetros:

- $m$ : media de la distribución log normal de la atenuación debida a la lluvia
- $\sigma$ : desviación típica de la distribución log normal de la atenuación debida a la lluvia
- $P_{CLW}$ : probabilidad de nubes
- $\alpha$ : umbral de truncamiento del ruido gaussiano correlacionado
- $\beta_1$ : parámetro que describe la dinámica temporal del elemento rápido del proceso ( $s^{-1}$ )
- $\beta_2$ : parámetro que describe la dinámica temporal del elemento lento del proceso ( $s^{-1}$ )
- $\gamma_1$ : parámetro que describe el peso del elemento rápido del proceso
- $\gamma_2$ : parámetro que describe el peso del elemento lento del proceso.

### 4.2 Método paso a paso

El siguiente método paso a paso permite sintetizar las series temporales de contenido de agua líquida en las nubes  $L(kT_s)$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$ , siendo  $T_s$  el intervalo de tiempo entre muestras y  $k$  el índice de cada muestra.

### A Cálculo de $m$ , $\sigma$ y $P_{CLW}$

Los parámetros de la distribución log normal correspondientes a la media,  $m$ , la desviación típica,  $\sigma$ , y la probabilidad de agua líquida,  $P_{CLW}$ , están disponibles, en forma de mapas, en la Recomendación UIT-R P.840.

Para el emplazamiento de interés, se determinan los parámetros log normales condicionales de la manera siguiente:

*Paso A1:* 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 de los mapas digitales que figuran en la Recomendación UIT-R P.840.

*Paso A2:* Determinar el valor de los parámetros  $m, \sigma$  y  $P_{CLW}$  en la ubicación deseada efectuando una interpolación bilineal de los cuatro valores de cada parámetro en los cuatro puntos de la cuadrícula, tal y como se describe en la Recomendación UIT-R P.1144.

### B Parámetros del filtro paso bajo

*Paso B1:* El parámetro  $\beta_1 = 7,17 \times 10^{-4} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ .

*Paso B2:* El parámetro  $\beta_2 = 2,01 \times 10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ .

*Paso B3:* El parámetro  $\gamma_1 = 0,349$ .

*Paso B4:* El parámetro  $\gamma_2 = 0,830$ .

### C Umbral de truncamiento

*Paso C1:* El umbral de truncamiento  $\alpha$  se calcula de la manera siguiente:

$$\alpha = Q^{-1}(P_{CLW}) \quad (7)$$

siendo la función  $Q$  la que se define en § 2.2.A y se documenta en la Recomendación UIT-R P.1057.

### D Síntesis de las series temporales

La serie temporal,  $L(kT_s)$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$  se sintetiza del modo siguiente:

*Paso D1:* Sintetizar una serie temporal del ruido blanco gaussiano,  $n(kT_s)$ , siendo  $k = 1, 2, 3, \dots$  de media igual a cero y varianza unitaria a lo largo del periodo de muestreo,  $T_s$ , igual a 1 s.

*Paso D2:* Aplicar  $X_1(0) = 0; X_2(0) = 0$

*Paso D3:* Filtrar la serie temporal del ruido,  $n(kT_s)$ , con dos filtros de paso bajo recursivos definidos mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{cases} X_1(kT_s) = \rho_1 \times X_1((k-1)T_s) + \sqrt{1-\rho_1^2} \times n(kT_s) \\ X_2(kT_s) = \rho_2 \times X_2((k-1)T_s) + \sqrt{1-\rho_2^2} \times n(kT_s) \end{cases} \quad \text{para } k = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

siendo:

$$\begin{cases} \rho_1 = e^{-\beta_1 T_s} \\ \rho_2 = e^{-\beta_2 T_s} \end{cases} \quad (9)$$

Paso D4: Calcular  $G_C(kT_s)$ , para  $k = 1, 2, 3, \dots$  del modo siguiente:

$$G_C(kT_s) = \gamma_1 \times X_1(kT_s) + \gamma_2 \times X_2(kT_s) \tag{10}$$

Paso D5: Calcular  $L(kT_s)$  (dB), para  $k = 1, 2, 3, \dots$  del modo siguiente:

$$L(kT_s) = \begin{cases} \exp\left(Q^{-1}\left[\frac{1}{P_{CLW}}Q(G_C(kT_s))\right] \times \sigma + m\right) & \text{para } G_C(kT_s) > \alpha \\ 0 & \text{para } G_C(kT_s) \leq \alpha \end{cases} \tag{11}$$

Paso D6: Descartar las primeras 500 000 muestras procedentes de la serie temporal sintetizada (que corresponden al transitorio del filtro). Los eventos debidos a las nubes se representan mediante secuencias cuyos valores son superiores a 0 mm durante un número consecutivo de muestras.

## 5 Método de síntesis de las series temporales de contenido integrado de vapor de agua

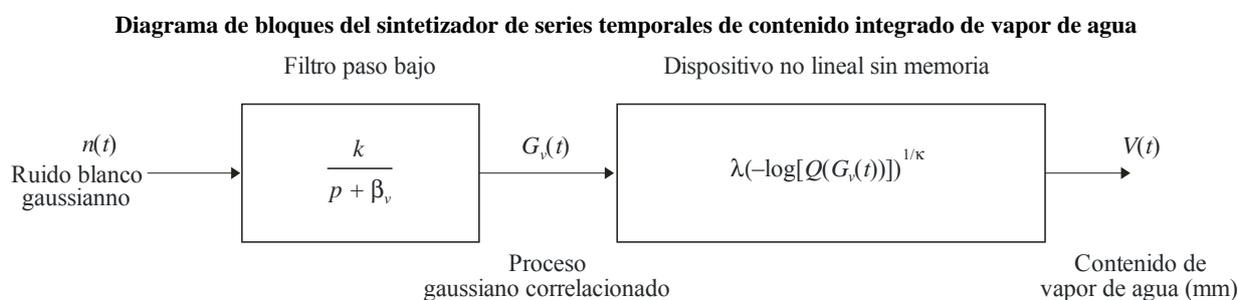
### 5.1 Descripción general

El método de síntesis de las series temporales presupone que las estadísticas a largo plazo de contenido integrado de vapor de agua describen una distribución de Weibull. Si bien las distribuciones de contenido integrado de vapor de agua que se predicen en la Recomendación UIT-R P.836 no corresponden exactamente a una distribución de Weibull, estas distribuciones constituyen una buena aproximación a la distribución de Weibull para la gama más significativa de probabilidades de rebasamiento.

El método de síntesis de la serie temporal genera una serie temporal que reproduce las características espectrales y la distribución del contenido de vapor de agua.

Tal y como se muestra en la Fig. 4, la serie temporal del contenido de vapor de agua,  $V(t)$ , se sintetiza a partir de un proceso de ruido blanco gaussiano discreto,  $n(t)$ . El ruido blanco gaussiano se pasa por un filtro paso bajo y se transforma de una distribución normal en una distribución de Weibull en un dispositivo no lineal sin memoria.

FIGURA 4



El sintetizador de series temporales se define mediante tres parámetros:

$\kappa$ : parámetro de la distribución de Weibull del contenido integrado de vapor de agua

$\lambda$ : parámetro de la distribución de Weibull del contenido integrado de vapor de agua

$\beta_V$ : parámetro que describe la dinámica temporal ( $s^{-1}$ )

## 5.2 Método paso a paso

El siguiente método paso a paso permite sintetizar las series temporales de contenido integrado de vapor de agua  $V(kT_s)$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$ , siendo  $T_s$  el intervalo de tiempo entre muestras y  $k$  el índice de cada muestra.

### A Cálculo de $\kappa$ y $\lambda$

Los parámetros  $\kappa$  y  $\lambda$  se determinan a partir de la distribución acumulativa del contenido integrado de vapor de agua con respecto a la probabilidad de ocurrencia. Las estadísticas de contenido integrado de vapor de agua pueden determinarse a partir de datos procedentes de mediciones locales; en ausencia de mediciones, pueden utilizarse los métodos de predicción de contenido integrado de vapor de agua que figuran en la Recomendación UIT-R P.836.

Para el emplazamiento de interés, se efectúa un ajuste de Weibull del contenido integrado de vapor de agua con respecto a la probabilidad de ocurrencia, de la manera siguiente:

*Paso A1:* Construir los conjuntos de pares  $[P_i, V_i]$ , siendo  $P_i$  (% de tiempo) la probabilidad de que se rebase el contenido integrado de vapor de agua  $V_i$ (mm). Los valores específicos de  $P_i$  deben tener en cuenta la gama de probabilidades de interés; no obstante, se sugiere el siguiente conjunto de porcentajes de tiempo: 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30 y 50%.

*Paso A2:* Transformar el conjunto de pares  $[P_i, V_i]$  en  $[\ln(-\ln P_i), \ln V_i]$ .

*Paso A3:* Determinar las variables intermedias  $a$  y  $b$  mediante un ajuste por mínimos cuadrados a la función lineal:

$$\ln(-\ln P_i) = a \ln V_i + b \quad (12)$$

del modo siguiente:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{n \sum_{i=1}^n \ln V_i \ln(-\ln P_i) - \sum_{i=1}^n \ln V_i \sum_{i=1}^n \ln(-\ln P_i)}{n \sum_{i=1}^n [\ln V_i]^2 - \left[ \sum_{i=1}^n \ln V_i \right]^2} \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(-\ln P_i) - a \sum_{i=1}^n \ln V_i}{n} \end{array} \right. \quad (13)$$

*Paso A4:* Determinar los parámetros  $\kappa$  y  $\lambda$  del modo siguiente:

$$\begin{cases} \kappa = a \\ \lambda = \exp\left(-\frac{b}{a}\right) \end{cases} \quad (14)$$

### **B Parámetros del filtro paso bajo**

*Paso B1:* El parámetro  $\beta_V = 3,24 \times 10^{-6} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ .

### **C Síntesis de las series temporales**

La serie temporal  $V(kT_s)$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$  se sintetiza del modo siguiente:

*Paso C1:* Sintetizar una serie temporal de ruido blanco gaussiano,  $n(kT_s)$ , siendo  $k = 1, 2, 3, \dots$  de media igual a cero y varianza unitaria a lo largo de un período de muestreo,  $T_s$ , de 1 s.

*Paso C2:* Aplicar  $G_V(0) = 0$

*Paso C3:* Filtrar las series de ruido temporal,  $n(kT_s)$ , con un filtro paso bajo recursivo definido por:

$$G_V(kT_s) = \rho \times G_V((k-1)T_s) + \sqrt{1-\rho^2} \times n(kT_s) \quad \text{para } k = 1, 2, 3, \dots \quad (15)$$

siendo:  $\rho = e^{-\beta_V T_s}$  (16)

*Paso C4:* Calcular  $V(kT_s)$ , para  $k = 1, 2, 3, \dots$  del modo siguiente:

$$V(kT_s) = \lambda(-\log[Q(G_V(kT_s))])^{1/\kappa} \quad (17)$$

siendo la función  $Q$  la que se define en § 2.2.A y se documenta en la Recomendación UIT-R P.1057.

*Paso C5:* Descartar los primeros 5 000 000 de muestras de la serie temporal sintetizada (que corresponden al transitorio del filtro).

## **6 Método de síntesis de las series temporales de la atenuación total y del centelleo para trayectos Tierra-espacio**

### **6.1 Descripción general**

Las series temporales de la atenuación total y el centelleo se generan mediante el esquema que se muestra en la Fig. 5 y a partir de los métodos descritos en las secciones anteriores. Se ha introducido una correlación adecuada entre nubes y lluvia. Este coeficiente de correlación, así como el hecho de que la probabilidad de que haya nubes en el enlace es mayor que la probabilidad de lluvia, garantiza que siempre se generarán nubes durante los eventos de lluvia.

El contenido de agua líquida en las nubes se interpola si se cumplen simultáneamente los dos criterios siguientes:

- se genera un evento de lluvia (la atenuación sintética de la lluvia es superior a 0 dB);
- el contenido integrado de agua líquida rebasa el umbral de 1 mm.

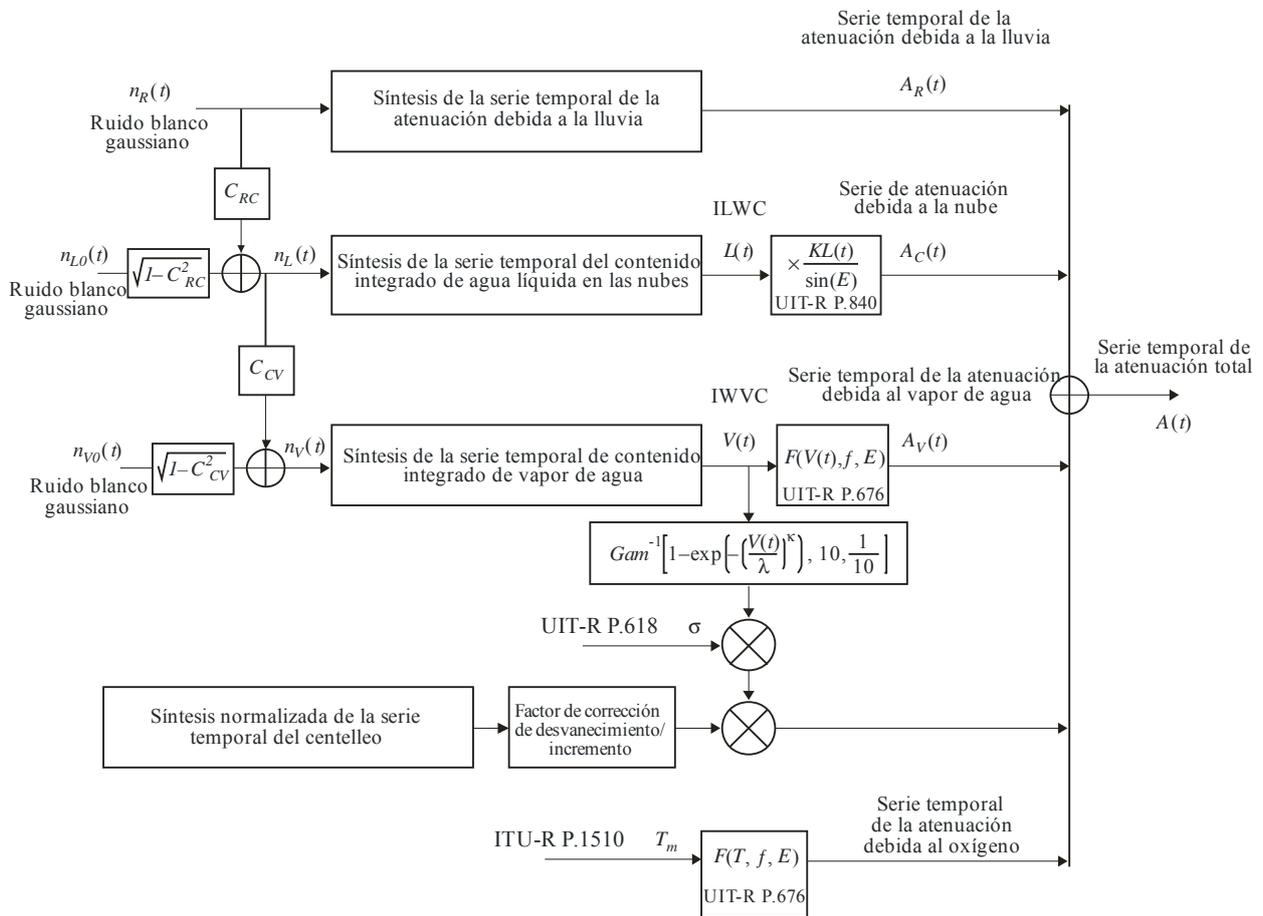
A causa del valor muy bajo del parámetro dinámico para el elemento de contenido integrado de vapor de agua, deben descartarse las primeras  $5 \cdot 10^6$  muestras de la serie temporal sintetizada para todos los efectos estudiados (que corresponden al transitorio del filtro de contenido integrado de vapor de agua).

En los trayectos Tierra-espacio, el método de síntesis de las series temporales es válido para frecuencias comprendidas entre 4 GHz y 55 GHz y ángulos de elevación comprendidos entre  $5^\circ$  y  $90^\circ$ . En determinadas circunstancias (por ejemplo, frecuencias bajas, elevaciones moderadas a altas, zonas templadas), la atenuación debida a la lluvia permitirá hacer una aproximación lo suficientemente precisa de la atenuación total.

El método de síntesis de las series temporales genera una serie temporal que reproduce las características espectrales, la pendiente de desvanecimiento y las estadísticas de duración de desvanecimiento de eventos de atenuación total. También se reproducen las estadísticas de la duración entre desvanecimientos, pero solo en eventos de atenuación individuales.

FIGURA 5

Diagrama de bloques del sintetizador de las series temporales de la atenuación total y el centelleo



## 6.2 Método paso a paso

El siguiente método paso a paso se emplea para sintetizar las series temporales de atenuación  $A(kT_s)$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$ , siendo  $T_s$  el intervalo de tiempo entre muestras y  $k$  el índice de cada muestra.

### A Coeficientes de correlación

*Paso A1:* El parámetro  $C_{RC} = 1$ .

*Paso A2:* El parámetro  $C_{CV} = 0,8$ .

### B Polinomios de centelleo

*Paso B1:* Definir los polinomios de desvanecimiento e incremento del centelleo como:

$$\begin{aligned} a_{\text{Desvanecimiento}}(P) &= -0,061 \times (\log_{10}(P))^3 + 0,072 \times (\log_{10}(P))^2 - 1,71 \times \log_{10}(P) + 3,0 \\ a_{\text{Incremento}}(P) &= -0,0597 \times (\log_{10}(P))^3 - 0,0835 \times (\log_{10}(P))^2 - 1,258 \times \log_{10}(P) + 2,672 \end{aligned} \quad (18)$$

### C Síntesis de la serie temporal

La serie temporal,  $A(kT_s)$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$  se sintetiza del modo siguiente:

*Paso C1:* Sintetizar una serie temporal de ruido blanco gaussiano,  $n_R(kT_s)$ , siendo  $k = 1, 2, 3, \dots$  de media igual a cero y varianza unitaria a lo largo de un período de muestreo,  $T_s$ , de 1 s.

*Paso C2:* Sintetizar una serie temporal de ruido blanco gaussiano,  $n_{L0}(kT_s)$ , siendo  $k = 1, 2, 3, \dots$  de media igual a cero y varianza unitaria a lo largo de un período de muestreo,  $T_s$ , de 1 s.

*Paso C3:* Sintetizar una serie temporal de ruido blanco gaussiano,  $n_{V0}(kT_s)$ , siendo  $k = 1, 2, 3, \dots$  de media igual a cero y varianza unitaria a lo largo de un período de muestreo,  $T_s$ , de 1 s.

*Paso C4:* Sintetizar una serie temporal de ruido blanco gaussiano,  $n_L(kT_s)$ , siendo  $k = 1, 2, 3, \dots$  como sigue:

$$n_L(kT_s) = C_{RC} \times n_R(kT_s) + \sqrt{1 - C_{RC}^2} \times n_{L0}(kT_s) \quad (19)$$

*Paso C5:* Sintetizar una serie temporal de ruido blanco gaussiano,  $n_V(kT_s)$ , siendo  $k = 1, 2, 3, \dots$  como sigue:

$$n_V(kT_s) = C_{CV} \times n_L(kT_s) + \sqrt{1 - C_{CV}^2} \times n_{V0}(kT_s) \quad (20)$$

*Paso C6:* Calcular la serie temporal de atenuación debida a la lluvia  $A(kT_s)$  a partir de la serie temporal de ruido gaussiano,  $n_R(kT_s)$ , siguiendo el procedimiento recomendado en § 2 de la presente Recomendación y sustituir el *paso D6* de § 2 por el siguiente: descartar los primeros 5 000 000 de muestras de la serie temporal sintetizada.

*Paso C7:* Calcular la serie temporal de contenido integrado de agua líquida debido a las nubes  $L(kT_s)$  a partir de la serie temporal de ruido gaussiano,  $n_L(kT_s)$ , siguiendo el procedimiento recomendado en § 4 de la presente Recomendación y sustituir el *paso D6* de § 4 por el siguiente: descartar los primeros 5 000 000 de muestras de la serie temporal sintetizada.

*Paso C8:* Convertir la serie temporal de contenido integrado de agua líquida debido a las nubes  $L(kT_s)$  en una serie temporal de atenuación debida a las nubes  $A_C(kT_s)$  siguiendo el método recomendado en la Recomendación UIT-R P.840.

*Paso C9:* Identificar los sellos temporales  $k_1T_s$ ,  $k_2T_s$ ,  $k_3T_s$ , ... si se dan simultáneamente las dos condiciones siguientes:

$$\begin{aligned} 1 - A_R(kT_s) &> 0 \\ 2 - L(kT_s) &> 1 \end{aligned} \quad (21)$$

*Paso C10:* Descartar los valores calculados de  $A_C(kT_s)$  correspondientes a los sellos temporales  $k_1T_s$ ,  $k_2T_s$ ,  $k_3T_s$ , ... identificados en el *Paso C8* y, en su lugar, calcular  $A_C(kT_s)$  para estos sellos temporales a partir de una interpolación lineal con respecto al tiempo, empezando por los valores no descartados de las atenuaciones debidas a las nubes.

*Paso C11:* Calcular la serie temporal de contenido integrado de vapor de agua  $V(kT_s)$  a partir de la serie temporal de ruido gaussiano,  $n_V(kT_s)$ , siguiendo el procedimiento recomendado en § 5 de la presente Recomendación.

*Paso C12:* Convertir la serie temporal de contenido integrado de vapor de agua  $V(kT_s)$  en una serie temporal de atenuación debida al vapor de agua  $A_V(kT_s)$  siguiendo el método de estimación aproximada de la atenuación debida al vapor de agua en trayectos oblicuos recomendada en la Recomendación UIT-R P.676 (Anexo 2, § 2.3).

*Paso C13:* Calcular la temperatura media anual  $T_m$  para el emplazamiento de interés utilizando valores experimentales, si se dispone de ellos. En caso contrario, se puede utilizar el método que se proporciona en la Recomendación UIT-R P.1510 para predecir  $T_m$ .

*Paso C14:* Convertir la temperatura media anual  $T_m$  en atenuación media anual debida al oxígeno  $A_O$  siguiendo el método recomendado en la Recomendación UIT-R P.676.

*Paso C15:* Sintetizar la varianza unitaria de la serie temporal de centelleo  $Sci_0(kT_s)$  siguiendo el método recomendado en § 3 de la presente Recomendación.

*Paso C16:* Calcular la serie temporal del coeficiente de corrección  $C_x(kT_s)$  para distinguir los desvanecimientos del centelleo de los incrementos:

$$C_x(kT_s) = \begin{cases} \frac{a_{Desvanecimiento} (100 \times Q[Sci_0(K.Ts)])}{a_{Incremento} (100 \times Q[Sci_0(K.Ts)])} & \text{para } Sci_0(K.Ts) > 0 \\ 1 & \text{para } Sci_0(K.Ts) \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

siendo la función  $Q$  la que se define en § 2.2.A y se documenta en la Recomendación UIT-R P.1057.

*Paso C17:* Transformar la serie temporal del contenido integrado de vapor de agua  $V(kT_s)$  en una serie temporal de distribución Gamma  $Z(kT_s)$  del modo siguiente:

$$Z(kT_s) = Gam^{-1} \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{V(kT_s)}{\lambda} \right)^{\kappa} \right), 10, \frac{1}{10} \right] \quad (23)$$

siendo  $\kappa$  y  $\lambda$  los parámetros de distribución de Weibull del contenido integrado de vapor de agua y la función *Gam* la función complementaria de distribución gamma que se documenta en la Recomendación UIT-R P.1057 y se define como:

$$Gam(x, k, \vartheta) = \int_x^{\infty} \frac{x^{k-1} \exp(-x/\vartheta)}{\Gamma(k)\vartheta^k} dt \quad (24)$$

*Paso C18:* Calcular la desviación típica de centelleo  $\sigma$  siguiendo el método recomendado en la Recomendación UIT-R P.618.

*Paso C19:* Calcular las series temporales de centelleo  $Sci(kT_s)$  del modo siguiente:

$$Sci(kT_s) = \begin{cases} \sigma \times Sci_0(kT_s) \times C_x(k.Ts) \times Z(kT_s) \times [A_R(kT_s)]^{5/12} & \text{para } A_R(kT_s) > 1 \\ \sigma \times Sci_0(kT_s) \times C_x(k.Ts) \times Z(kT_s) & \text{para } A_R(kT_s) \leq 1 \end{cases} \quad (25)$$

*Paso C20:* Calcular las series temporales de atenuación troposférica total  $A(kT_s)$  del modo siguiente:

$$A(kT_s) = A_R(kT_s) + A_C(kT_s) + A_V(kT_s) + A_O + Sci(kT_s) \quad (26)$$

---