

## RECOMENDACIÓN UIT-R P.530-9

**Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa**

(Cuestión UIT-R 204/3)

(1978-1982-1986-1990-1992-1994-1995-1997-1999-2001)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

- a) que para la planificación adecuada de los sistemas terrenales con visibilidad directa es necesario disponer de métodos de predicción y datos de propagación adecuados;
- b) que se han elaborado métodos que permiten predecir algunos de los parámetros de propagación más importantes que afectan a la planificación de sistemas terrenales con visibilidad directa;
- c) que, en la medida de lo posible, estos métodos se han verificado mediante datos de medidas disponibles y han demostrado una precisión compatible con la variabilidad natural de los fenómenos de propagación y adecuada para la mayoría de las aplicaciones actuales en la planificación de sistemas,

*recomienda*

**1** que para la planificación de los sistemas terrenales con visibilidad directa se adopten los métodos de predicción y las técnicas indicadas en los Anexos 1 y 2, en las respectivas gamas de validez de los parámetros indicados.

## ANEXO 1

**1 Introducción**

En el diseño de los sistemas de relevadores radioeléctricos con visibilidad directa deben tenerse en cuenta varios efectos vinculados con la propagación. Estos incluyen:

- desvanecimiento por difracción debida a la obstrucción del trayecto por obstáculos en condiciones de propagación adversas;
- atenuación debida a los gases atmosféricos;
- desvanecimiento debido a la propagación atmosférica por trayectos múltiples o a la dispersión del haz (conocida generalmente como desenfoque) asociados con la existencia de capas refractivas anormales;
- desvanecimiento debido a la propagación por los trayectos múltiples que se originan por reflexión en la superficie;
- atenuación debida a las precipitaciones o a otras partículas sólidas presentes en la atmósfera;
- variación del ángulo de llegada en el terminal receptor y del ángulo de salida en el terminal transmisor debida a la refracción;

- reducción de la discriminación por polarización cruzada (XPD) en condiciones de propagación por trayectos múltiples o durante las precipitaciones;
- distorsión de la señal debida a desvanecimientos selectivos en frecuencia y a retardos durante la propagación por trayectos múltiples.

Uno de los objetivos de este Anexo es presentar de forma concisa y detallada métodos de predicción sencillos para los efectos de propagación que deben tenerse en cuenta en la mayoría de los enlaces fijos con visibilidad directa, así como indicaciones relativas a sus gamas de validez. Otro de sus objetivos es presentar otra información y otras técnicas que puedan recomendarse en la planificación de los sistemas terrenales con visibilidad directa.

Es posible que los métodos de predicción basados en las condiciones climáticas y topográficas correspondientes al territorio de una administración tengan más ventajas que los incluidos en este Anexo.

A excepción de la interferencia que aparece como consecuencia de la reducción de la XPD, este Anexo trata únicamente de los efectos sobre la señal deseada. Aunque en el § 2.3.6 se examinan muy en general los efectos de la interferencia interna dentro de un sistema digital, el tema no se analiza en otros pasajes del presente texto. En otras Recomendaciones se tratan diversos aspectos de la interferencia a saber:

- en la Recomendación UIT-R P.452 la interferencia entre sistemas que afecta a otros enlaces terrenales y estaciones terrenas; y
- en la Recomendación UIT-R P.619 la interferencia entre sistemas que afecta a las estaciones espaciales.

Para optimizar la utilidad del presente Anexo en la planificación y el diseño de los sistemas, la información se ordena de acuerdo con los efectos sobre la propagación que deben considerarse, en lugar de hacerlo respecto a los mecanismos físicos que producen los distintos efectos.

Cabe señalar que el término «mes más desfavorable» utilizado en la presente Recomendación es equivalente al término «cualquier mes» (véase la Recomendación UIT-R P.581).

## 2 Pérdida de propagación

La pérdida de propagación, para un trayecto terrenal con visibilidad directa, respecto a las pérdidas en el espacio libre (véase la Recomendación UIT-R P.525) es la suma de las contribuciones siguientes:

- atenuación debida a los gases atmosféricos,
- desvanecimiento por difracción debido a la obstrucción parcial o total del trayecto,
- desvanecimiento debido a la propagación por trayectos múltiples, la dispersión del haz y el centelleo,
- atenuación debida a la variación de los ángulos de llegada y de salida,
- atenuación debida a las precipitaciones,
- atenuación debida a las tormentas de arena y polvo.

Cada una de estas contribuciones tiene sus características propias en función de la frecuencia, la longitud del trayecto y la ubicación geográfica, y se describen en los puntos siguientes.

A veces interesa mejorar la propagación. En tales casos se considera en función de la pérdida de propagación asociada.

## 2.1 Atenuación debida a los gases atmosféricos

Para frecuencias superiores a unos 10 GHz siempre está presente una cierta atenuación debida a la absorción del oxígeno y del vapor de agua, por lo que debe incluirse en el cálculo de la pérdida total de propagación. La atenuación a lo largo de un trayecto de longitud  $d$  (km) viene dada por:

$$A_a = \gamma_a d \quad \text{dB} \quad (1)$$

La atenuación específica  $\gamma_a$  (dB/km) se obtiene de la Recomendación UIT-R P.676.

NOTA 1 – En trayectos largos, para frecuencias superiores a unos 20 GHz, puede ser conveniente tener en cuenta las estadísticas conocidas sobre la densidad del vapor de agua y la temperatura en las proximidades del trayecto. En la Recomendación UIT-R P.836 aparece información sobre la densidad del vapor de agua.

## 2.2 Desvanecimiento por difracción

Las variaciones de las condiciones de refracción de la atmósfera pueden modificar el radio efectivo de la Tierra, es decir el factor  $k$ , con respecto a su valor mediano que es aproximadamente de 4/3 para una atmósfera normal (véase la Recomendación UIT-R P.310). Cuando la atmósfera es suficientemente subrefractiva (grandes valores positivos del gradiente del índice de refracción, valores reducidos del factor  $k$ ), los rayos se curvan de forma que la Tierra obstruye el trayecto directo entre el transmisor y el receptor, lo que da lugar a un tipo de desvanecimiento llamado desvanecimiento por difracción. Este desvanecimiento es el factor que determina la altura de las antenas.

Las estadísticas del factor  $k$  para un punto pueden determinarse a partir de medidas o predicciones del gradiente del índice de refracción en los primeros 100 m de la atmósfera (véase la Recomendación UIT-R P.453 sobre los efectos de la refracción). Estos gradientes deben promediarse para obtener el valor efectivo de  $k$  correspondiente a la longitud del trayecto en cuestión,  $k_e$ . Los valores de  $k_e$  que se exceden durante el 99,9% del tiempo se examinan en el apartado siguiente en función de los criterios de trayecto despejado.

### 2.2.1 Pérdida por difracción en función del despejamiento del trayecto

La pérdida por difracción dependerá del tipo de terreno y de la vegetación. Para un determinado despejamiento del trayecto del rayo, la pérdida por difracción variará desde un valor mínimo en el caso de un obstáculo único en arista (filo de cuchillo) hasta un valor máximo en el caso de una Tierra esférica lisa. En la Recomendación UIT-R P.526 se examinan métodos para el cálculo de la pérdida por difracción en esos dos casos y también en el de trayectos a través de terreno irregular. En la Fig. 1 se muestran esos límites superior e inferior de la pérdida por difracción.

Las pérdidas por difracción en un terreno medio pueden aproximarse, para pérdidas mayores de unos 15 dB, mediante la fórmula:

$$A_d = -20 h / F_1 + 10 \quad \text{dB} \quad (2)$$

en la que  $h$  es la altura (m) del obstáculo más importante del trayecto por encima de la trayectoria de éste ( $h$  es negativa si la parte superior del obstáculo en cuestión está por encima de la línea de visibilidad directa), y  $F_1$  es el radio del primer elipsoide de Fresnel, indicado por:

$$F_1 = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fd}} \quad \text{m} \quad (3)$$

donde:

$f$ : frecuencia (GHz)

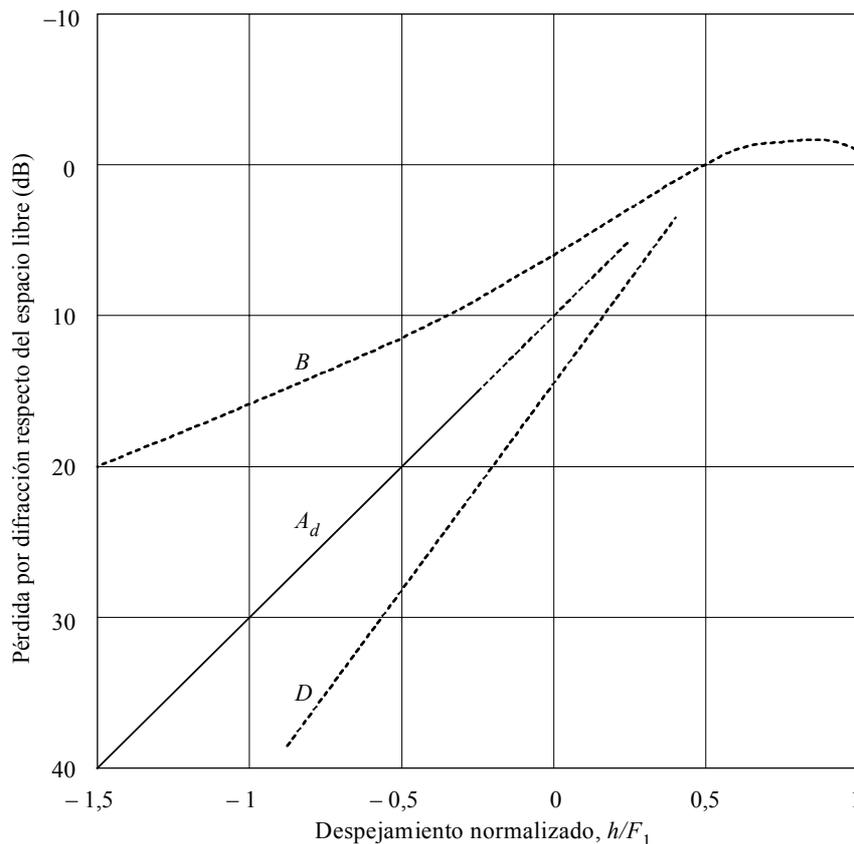
$d$ : longitud del trayecto (km)

$d_1$  y  $d_2$ : distancias (km) entre los terminales y la obstrucción del trayecto.

En la Fig. 1 se muestra también una curva, denominada  $A_d$ , basada en la ecuación (2). Esta curva, estrictamente válida para pérdidas superiores a 15 dB, se ha extrapolado hasta una pérdida de 6 dB para satisfacer la necesidad de los diseñadores de enlaces.

FIGURA 1

Pérdida por difracción en el caso de existir obstáculos en trayectos radioeléctricos de microondas con visibilidad directa



- $B$ : curva teórica de pérdida por difracción en obstáculos en filo de cuchillo
- $D$ : curva teórica de pérdida sobre la Tierra esférica lisa a 6,5 GHz y  $k_e = 4/3$
- $A_d$ : curva empírica de la pérdida por difracción basada en la ecuación (2) para terreno intermedio
- $h$ : magnitud del desajuste del trayecto radioeléctrico respecto de la superficie de la Tierra
- $F_1$ : radio de la primera zona de Fresnel

## 2.2.2 Criterios de planificación para el despejamiento del trayecto

En el pasado, el desvanecimiento por difracción de este tipo en frecuencias por encima de unos 2 GHz se aliviaba instalando antenas a altura suficiente para que, en condiciones de curvatura muy acentuada de los rayos, el receptor no se encontrase en la región de difracción cuando el radio efectivo de la Tierra es inferior a su valor normal. La teoría de la difracción indica que el trayecto directo entre el transmisor y el receptor debe estar libre de obstáculos, a partir de una altura por encima del suelo igual, como mínimo, al 60% del radio de la primera zona de Fresnel para que se cumplan las condiciones de propagación en el espacio libre. Últimamente, disponiendo de más información sobre este mecanismo y de los valores estadísticos de  $k_e$ , que se requieren para realizar predicciones estadísticas, algunas administraciones están instalando antenas a alturas que producirán algunas pequeñas interrupciones conocidas.

A falta de un procedimiento general que permita obtener una cantidad previsible de pérdidas por difracción para diversos porcentajes de tiempo pequeños, y en consecuencia, de un criterio estadístico de despejamiento del trayecto, se recomienda utilizar los siguientes procedimientos en los climas templados y tropicales.

### 2.2.2.1 Configuraciones de antena sin diversidad

*Paso 1:* Se determinan las alturas de antenas necesarias para obtener un valor mediano apropiado del factor  $k$  en el punto (véase el § 2.2; en ausencia de datos, utilícese  $k = 4/3$ ) y un despejamiento del trayecto de  $1,0 F_1$  por encima del obstáculo más alto (en climas templados y tropicales).

*Paso 2:* Se obtiene el valor de  $k_e$  (99,9%) a partir de la Fig. 2, para la longitud del trayecto en cuestión.

*Paso 3:* Se calculan las alturas de antena necesarias para el valor de  $k_e$  obtenido en el Paso 2 y los siguientes radios de despejamiento de la zona de Fresnel:

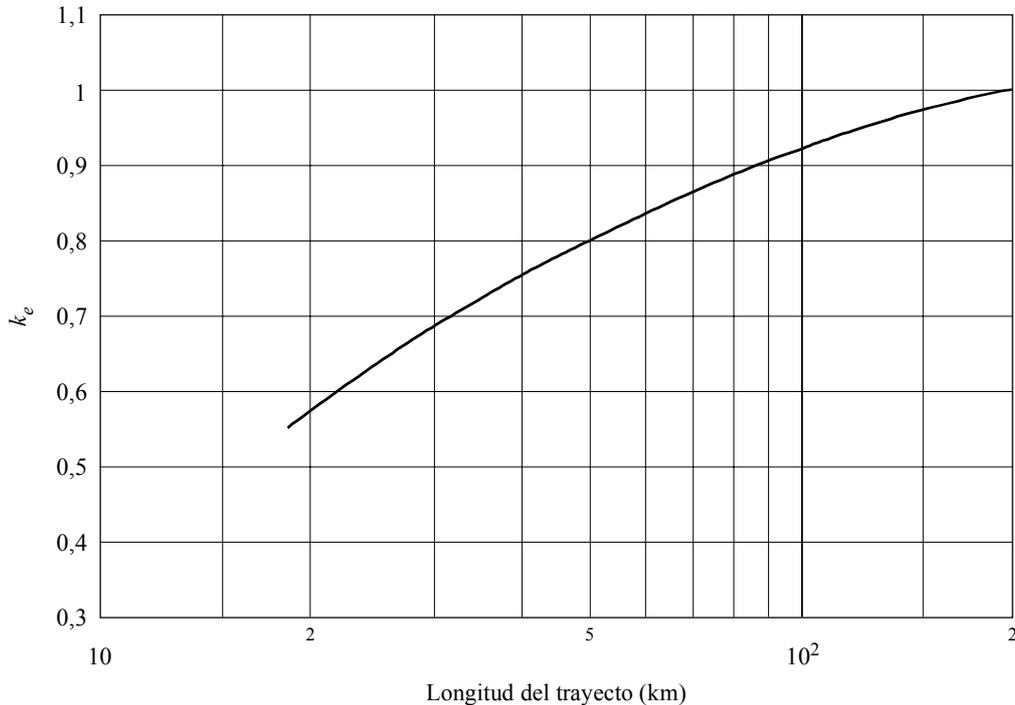
Clima templado	Clima tropical
$0,0 F_1$ (es decir, incidencia rasante) si sólo existe una obstrucción aislada del trayecto $0,3 F_1$ si la obstrucción del trayecto se extiende a lo largo de una parte de éste	$0,6 F_1$ para longitudes de trayecto superiores a unos 30 km

*Paso 4:* Utilídense las mayores alturas de antena obtenidas en los Pasos 1 y 3.

En los casos de incertidumbre sobre el tipo de clima, debe seguirse la regla de despejamiento más conservadora para climas tropicales o, al menos, una regla basada en los valores medios del despejamiento para climas templados y tropicales. En los Pasos 1 y 3 anteriores puede que sea necesario utilizar las fracciones más pequeñas de  $F_1$  para frecuencias inferiores a unos 2 GHz con objeto de evitar antenas de altura excesivamente elevada.

En el Paso 3 quizá haya que utilizar las fracciones más grandes de  $F_1$  para frecuencias superiores a unos 10 GHz a fin de reducir el riesgo de difracción en condiciones subrefractivas.

FIGURA 2  
 Valor de  $k_e$  excedido aproximadamente durante el 99,9% del mes más desfavorable  
 (Clima templado continental)



0530-02

### 2.2.2.2 Configuraciones de dos antenas con diversidad en el espacio

*Paso 1:* Se calcula la altura de la antena más baja para el valor mediano adecuado del factor  $k$  puntual (en ausencia de datos, utilícese  $k = 4/3$ ) y los siguientes radios de despejamiento de la zona de Fresnel:

0,6  $F_1$  a 0,3  $F_1$  si la obstrucción del trayecto se extiende a lo largo de una parte de éste;

0,3  $F_1$  a 0,0  $F_1$  si existen uno o dos obstáculos aislados en el perfil del trayecto.

Para no tener que aumentar las alturas de los mástiles existentes, o si la frecuencia es inferior a 2 GHz, debe elegirse uno de los valores inferiores de las dos gamas indicadas anteriormente.

De forma alternativa, puede elegirse el despejamiento de la antena más baja para lograr unas pérdidas de difracción de aproximadamente 6 dB en condiciones normales de refracción (es decir, a mediodía) o alguna otra pérdida adecuada al margen de desvanecimiento del sistema, determinada por medidas de prueba. Estas medidas deben efectuarse durante varios días a fin de evitar condiciones de refracción anómalas.

En este caso alternativo, también puede calcularse la pérdida por difracción mediante la Fig. 1 o la ecuación (2).

*Paso 2:* Se calcula la altura de la antena más elevada utilizando el procedimiento para configuraciones con una sola antena indicado anteriormente.

*Paso 3:* Se verifica que la separación entre las dos antenas satisface las necesidades de diversidad en condiciones de desvanecimiento por trayectos múltiples. Si no se satisfacen dichas necesidades debe aumentarse de forma correspondiente la altura de la antena más elevada.

Este desvanecimiento, que se produce cuando el trayecto está total o parcialmente obstruido por el terreno en condiciones subrefractivas, es el factor que rige las alturas de antena.

### 2.3 Desvanecimiento y mejora debidos a la propagación por trayectos múltiples y mecanismos conexos

Para planificar enlaces de más de unos pocos kilómetros de longitud deben tenerse en cuenta varios mecanismos de desvanecimiento en condiciones de cielo despejado cuyo origen son las capas extremadamente refractivas de la atmósfera, a saber: dispersión del haz, desalineamiento de antena y propagación por trayectos múltiples en la superficie y en la atmósfera. La mayoría de estos mecanismos pueden aparecer aislados o en combinación unos con otros (véase la Nota 1). Cuando la dispersión del haz de la señal directa se combina con una señal reflejada en la superficie dando lugar a desvanecimiento por trayectos múltiples se produce un tipo de desvanecimiento selectivo en frecuencia especialmente acusado. El desvanecimiento por centelleo debido a irregularidades en forma de turbulencias de pequeña intensidad en la atmósfera siempre está presente en estos mecanismos, pero en frecuencias inferiores a unos 40 GHz su efecto sobre la distribución de desvanecimiento global no es significativo.

NOTA 1 – El desacoplamiento de las antenas determina la anchura de haz mínima de las antenas que se debe elegir.

En el § 2.3.1 se da un método para predecir la distribución del desvanecimiento a una sola frecuencia (o de banda estrecha) para el mes más desfavorable medio en cualquier parte del mundo. Este método no utiliza el perfil de trayecto y se puede emplear para la planificación inicial, concesión de licencias o para fines de diseño. Existe un segundo método, indicado en el § 2.3.2, que sirve para todas las profundidades de desvanecimiento y emplea el procedimiento para desvanecimientos muy profundos, según convenga, y un procedimiento de interpolación cuando la profundidad del desvanecimiento es pequeña.

En el § 2.3.3 se ofrece un método para predecir la intensificación de la señal, en el que se utiliza la profundidad de desvanecimiento que puede predecirse mediante las técnicas del § 2.3.1 como único parámetro de entrada. Por último, en el § 2.3.4 se da un método para convertir las distribuciones del mes más desfavorable medio en distribuciones para el año medio.

#### 2.3.1 Método para porcentajes de tiempo pequeños

*Paso 1:* Para la ubicación del trayecto en cuestión, estímesese el factor geoclimático,  $K$ , correspondiente al mes más desfavorable medio a partir de los datos de desvanecimiento de la zona geográfica que interesa, si se dispone de ellos (véase el Apéndice 1).

Si no se dispone de datos medidos para  $K$ , y se está efectuando un diseño detallado del enlace (véase la Nota 1), estímesese el factor geoclimático para el mes más desfavorable medio a partir de la expresión:

$$K = 10^{-3,9-0,003dN_1 s_a^{-0,42}} \quad (4)$$

en la que  $dN_1$  es el gradiente de refractividad puntual en los 65 m inferiores de la atmósfera que no se rebasa durante el 1% de un año medio, y  $s_a$  es la rugosidad del terreno en la zona.

La Recomendación UIT-R P.453 da el valor de  $dN_1$  en una trama de 1,5° en latitud y longitud. El valor correcto de la latitud y la longitud en el centro del trayecto debe obtenerse por interpolación lineal a partir de los valores de los cuatro puntos más próximos de la trama. Los datos van en formato tabular y pueden obtenerse de la Oficina de Radiocomunicaciones (BR).

$s_a$  se define como la desviación típica de las alturas del terreno (m) en una zona de  $110 \text{ km} \times 110 \text{ km}$  con una resolución de 30 s (por ejemplo, los datos Globe «gtopo30»). La zona debe estar alineada con la longitud, de forma que las dos mitades iguales de ésta se encuentren a cada lado de la longitud que atraviesa el centro del trayecto. Puede disponerse de datos del terreno en la Red Mundial (la BR facilita la dirección en la Red).

Si se necesita un cálculo rápido de  $K$  para aplicaciones de planificación (véase la Nota 1), puede obtenerse una estimación bastante precisa a partir de la fórmula:

$$K = 10^{-4,2-0,0029dN_1} \quad (5)$$

*Paso 2:* A partir de las alturas de antena  $h_e$  y  $h_r$  ((m) sobre el nivel del mar), calcúlese la magnitud de la inclinación del trayecto  $|\varepsilon_p|$  (mrad) a partir de:

$$|\varepsilon_p| = |h_r - h_e| / d \quad (6)$$

en la que  $d$  es la longitud del trayecto (km).

*Paso 3:* Para aplicaciones de diseño detallado del enlace (véanse las Notas 1 y 2), calcúlese el porcentaje de tiempo,  $p_w$ , durante el que se rebasa la profundidad de desvanecimiento  $A$  (dB) en el mes más desfavorable medio a partir de:

$$p_w = Kd^{3,2}(1 + |\varepsilon_p|)^{-0,97} 10^{0,032f-0,00085h_L-A/10} \quad \% \quad (7)$$

donde  $f$  es la frecuencia (GHz),  $h_L$  es la altitud de la antena inferior (es decir, el valor menor de  $h_e$  y  $h_r$ ), y donde el factor geoclimático,  $K$ , se obtiene de la ecuación (4).

Para aplicaciones de planificación rápida según se desee (véanse las Notas 1 y 2), calcúlese el porcentaje de tiempo,  $p_w$ , en el que se rebasa la profundidad de desvanecimiento  $A$  (dB) en el mes más desfavorable medio a partir de:

$$p_w = Kd^{3,0}(1 + |\varepsilon_p|)^{-1,2} 10^{0,033f-0,001h_L-A/10} \quad \% \quad (8)$$

en donde  $K$  se obtiene de la ecuación (5).

NOTA 1 – Las desviaciones típicas generales de los errores de las predicciones utilizando las ecuaciones (4) y (7), y (5) y (8), son 5,7 dB y 5,9 dB, respectivamente (incluyendo la contribución de la variabilidad de un año a otro). En la amplia gama de trayectos que se incluyen en estas Figuras, se aplica una desviación típica mínima de los errores de 5,2 dB a los trayectos sobre tierra para los que  $h_L < 700 \text{ m}$ , y un valor máximo de 7,3 dB para los trayectos sobre el agua. No obstante, la pequeña diferencia entre las desviaciones típicas generales no refleja de forma precisa la mejora en las predicciones que puede obtenerse utilizando las ecuaciones (4) y (7) para enlaces sobre terreno muy accidentado (por ejemplo, montañas) o terreno muy plano (por ejemplo, trayectos sobre el agua). Por ejemplo, las desviaciones típicas de los errores para enlaces sobre montañas ( $h_L > 700 \text{ m}$ ), se reducen en 0,6 dB, y los errores individuales para enlaces sobre regiones de montañas altas, hasta en varios decibelios.

NOTA 2 – Las ecuaciones (7) y (8), y las ecuaciones correspondientes (4) y (5) para el factor geoclimático  $K$ , se obtuvieron a partir de regresiones múltiples de los datos de desvanecimiento de 251 enlaces en varias regiones geoclimáticas del mundo con longitudes de trayecto  $d$  comprendidas entre 7,5 y 185 km, frecuencias  $f$  en la gama de 450 MHz-37 GHz, inclinaciones del trayecto  $|\varepsilon_p|$  de hasta 37 mrad, altitudes de antena inferiores  $h_L$  en la gama 17-2 300 m, gradientes de refractividad  $dN_1$  en la gama de  $-860$  a  $-150 \text{ N}$  unidades/km, y rugosidades de la superficie de la zona  $s_a$  en la gama 6-850 m (para  $s_a < 1 \text{ m}$ , se utiliza un límite inferior de 1 m).

Se espera también que las ecuaciones (7) y (8) sean válidas para frecuencias de al menos 45 GHz. Los resultados de un análisis semiempírico indican que el límite inferior de frecuencia es inversamente proporcional a la longitud del trayecto. Puede obtenerse una estimación aproximada de este límite inferior de frecuencia,  $f_{min}$ , a partir de:

$$f_{min} = 15 / d \quad \text{GHz} \quad (9)$$

### 2.3.2 Método para todos los porcentajes de tiempo

El método que se ofrece a continuación para la predicción del porcentaje de tiempo en que se excede una profundidad de desvanecimiento combina la distribución de desvanecimiento profundo que se da en el punto precedente con un procedimiento empírico de interpolación para un desvanecimiento rasante de valor decreciente de hasta 0 dB.

*Paso 1:* Utilizando el método del § 2.3.1, calcular el factor de ocurrencia de propagación por trayectos múltiples,  $p_0$  (es decir, la intersección de la distribución de desvanecimiento profundo con el eje de porcentaje de tiempo):

$$p_0 = Kd^{3,2} (1 + |\varepsilon_p|)^{-0,97} 10^{0,032f - 0,00085h_L} \quad \% \quad (10)$$

para aplicaciones de diseño detallado del enlace, obteniendo  $K$  de la ecuación (4), y

$$p_0 = Kd^{3,0} (1 + |\varepsilon_p|)^{-1,2} 10^{0,033f - 0,001h_L} \quad \% \quad (11)$$

para aplicaciones de planificación rápida, obteniendo  $K$  a partir de la ecuación (5). Véase que las ecuaciones (10) y (11) son equivalentes a las ecuaciones (7) y (8), respectivamente, con  $A = 0$ .

*Paso 2:* Calcular el valor de la profundidad del desvanecimiento,  $A_t$ , al que se produce la transición entre la distribución de desvanecimiento profundo y la distribución de desvanecimiento rasante obtenida por medio del procedimiento de interpolación empírica:

$$A_t = 25 + 1,2 \log p_0 \quad \text{dB} \quad (12)$$

El procedimiento depende ahora de si  $A$  es mayor o menor que  $A_t$ .

*Paso 3a:* Si la profundidad de desvanecimiento requerida,  $A$ , es igual o mayor que  $A_t$ :

Calcular el porcentaje de tiempo en que se excede  $A$  en el mes más desfavorable medio:

$$p_w = p_0 \times 10^{-A/10} \quad \% \quad (13)$$

Obsérvese que la ecuación (13) es equivalente a la ecuación (7), o a la (8) según el caso.

*Paso 3b:* Si la profundidad de desvanecimiento requerida,  $A$ , es menor que  $A_t$ :

Calcular el porcentaje de tiempo,  $p_t$ , en que se excede  $A_t$  en el mes más desfavorable medio:

$$p_t = p_0 \times 10^{-A_t/10} \quad \% \quad (14)$$

Obsérvese que la ecuación (14) es equivalente a la ecuación (7), o a la (8) según el caso, con  $A = A_t$ .

Calcular  $q'_a$  a partir del desvanecimiento de transición,  $A_t$ , y del porcentaje de tiempo de transición,  $p_t$ :

$$q'_a = -20 \log_{10} \left\{ -\ln \left[ \left( 100 - p_t \right) / 100 \right] \right\} / A_t \quad (15)$$

Calcular  $q_t$  a partir de  $q'_a$  y del desvanecimiento de transición,  $A_t$ :

$$q_t = (q'_a - 2) / \left[ \left( 1 + 0,3 \times 10^{-A_t/20} \right) 10^{-0,016 A_t} \right] - 4,3 \left( 10^{-A_t/20} + A_t/800 \right) \quad (16)$$

Calcular  $q_a$  a partir del desvanecimiento requerido,  $A$ :

$$q_a = 2 + \left[ 1 + 0,3 \times 10^{-A/20} \right] \left[ 10^{-0,016 A} \right] \left[ q_t + 4,3 \left( 10^{-A/20} + A/800 \right) \right] \quad (17)$$

Calcular el porcentaje de tiempo,  $p_w$ , en el que se excede la profundidad de desvanecimiento,  $A$  (dB), en el mes más desfavorable medio:

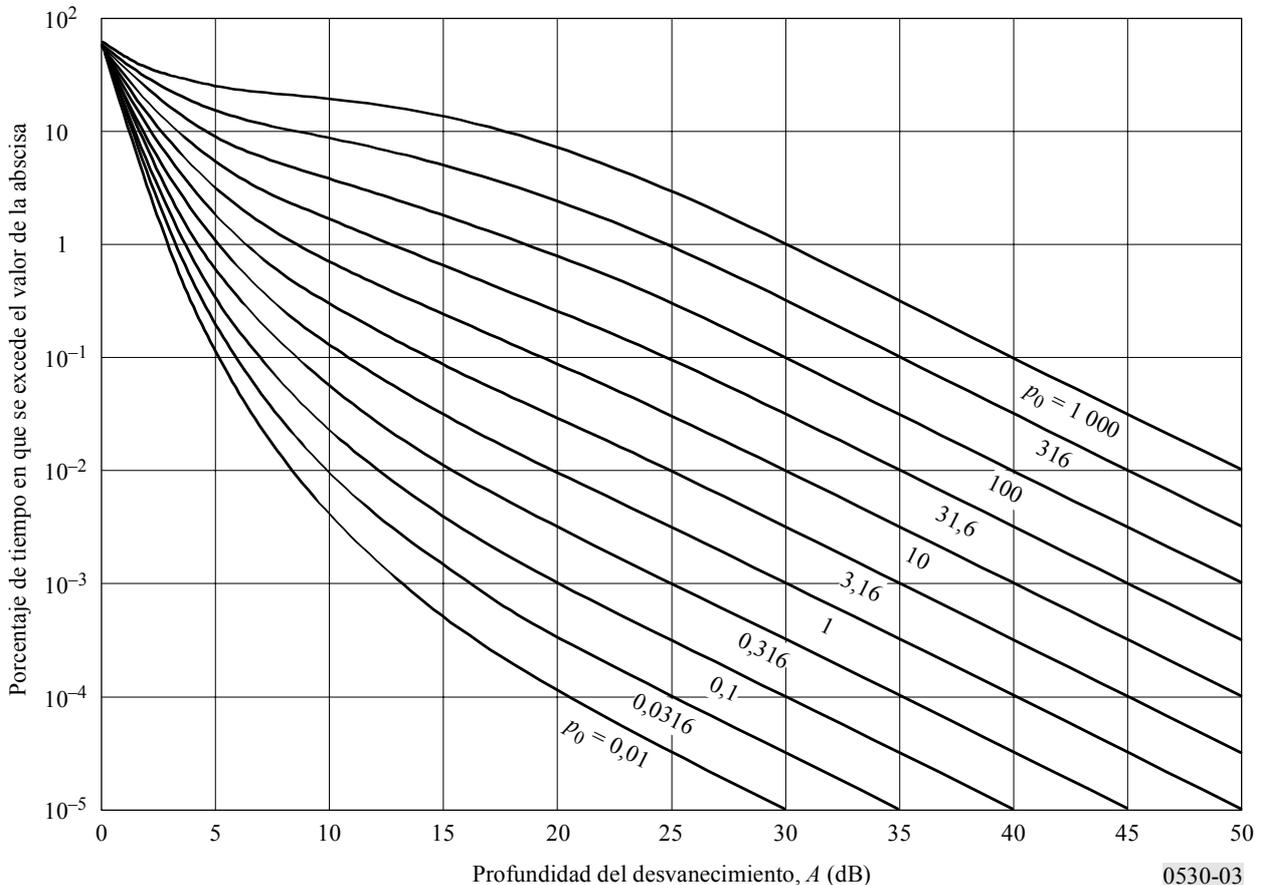
$$p_w = 100 \left[ 1 - \exp \left( -10^{-q_a A/20} \right) \right] \quad \% \quad (18)$$

A condición de que  $p_0 < 2000$ , el procedimiento anterior produce una variación monótona de  $p_w$  frente a  $A$  que puede utilizarse para calcular  $A$  para un determinado valor de  $p_w$  utilizando una iteración simple.

Con  $p_0$  como parámetro, la Fig. 3 proporciona una familia de curvas que representa el método gráficamente.

FIGURA 3

Porcentaje del tiempo,  $p_w$ , en que se excede la profundidad del desvanecimiento,  $A$ , en un mes más desfavorable medio para valores de  $p_0$  (de la ecuación (10) o la (11), según sea el caso) comprendidos entre 0,01 y 1 000



### 2.3.3 Método de predicción de la intensificación

Se observan intensificaciones de gran magnitud durante las mismas condiciones generales de propagación por conductos frecuentes, resultantes en desvanecimientos debidos a la propagación por trayectos múltiples. Para la predicción de la intensificación superior a 10 dB durante el mes más desfavorable medio se utilizará:

$$p_w = 100 - 10^{(-1,7 + 0,2 A_{0,01} - E)/3,5} \quad \% \quad \text{para } E > 10 \text{ dB} \quad (19)$$

siendo  $E$  (dB) el valor de la intensificación no excedido durante un  $p\%$  de tiempo y  $A_{0,01}$  la profundidad de desvanecimiento acusado predicha mediante la ecuación (7) o la (8), según el caso, excedida durante un  $p_w = 0,01\%$  del tiempo.

La intensificación comprendida entre 10 y 0 dB se calcula aplicando el siguiente procedimiento paso a paso:

*Paso 1:* Cálculo del porcentaje de tiempo,  $p'_w$  con una intensificación menor o igual a 10 dB ( $E' = 10$ ) mediante la ecuación (19).

*Paso 2:* Cálculo de  $q'_e$  aplicando:

$$q'_e = -\frac{20}{E'} \left( \log_{10} \left[ -\ln \left( 1 - \frac{100 - p'_w}{58,21} \right) \right] \right) \quad (20)$$

*Paso 3:* Cálculo del parámetro  $q_s$  mediante:

$$q_s = 2,05 q'_e - 20,3 \quad (21)$$

*Paso 4:* Cálculo de  $q_e$  para la  $E$  deseada aplicando:

$$q_e = 8 + \left[ 1 + 0,3 \times 10^{-E/20} \right] \left[ 10^{-0,7E/20} \right] \left[ q_s + 12 \left( 10^{-E/20} + E/800 \right) \right] \quad (22)$$

*Paso 5:* Obtención del porcentaje de tiempo en que la intensificación  $E$  (dB) no es excedida mediante:

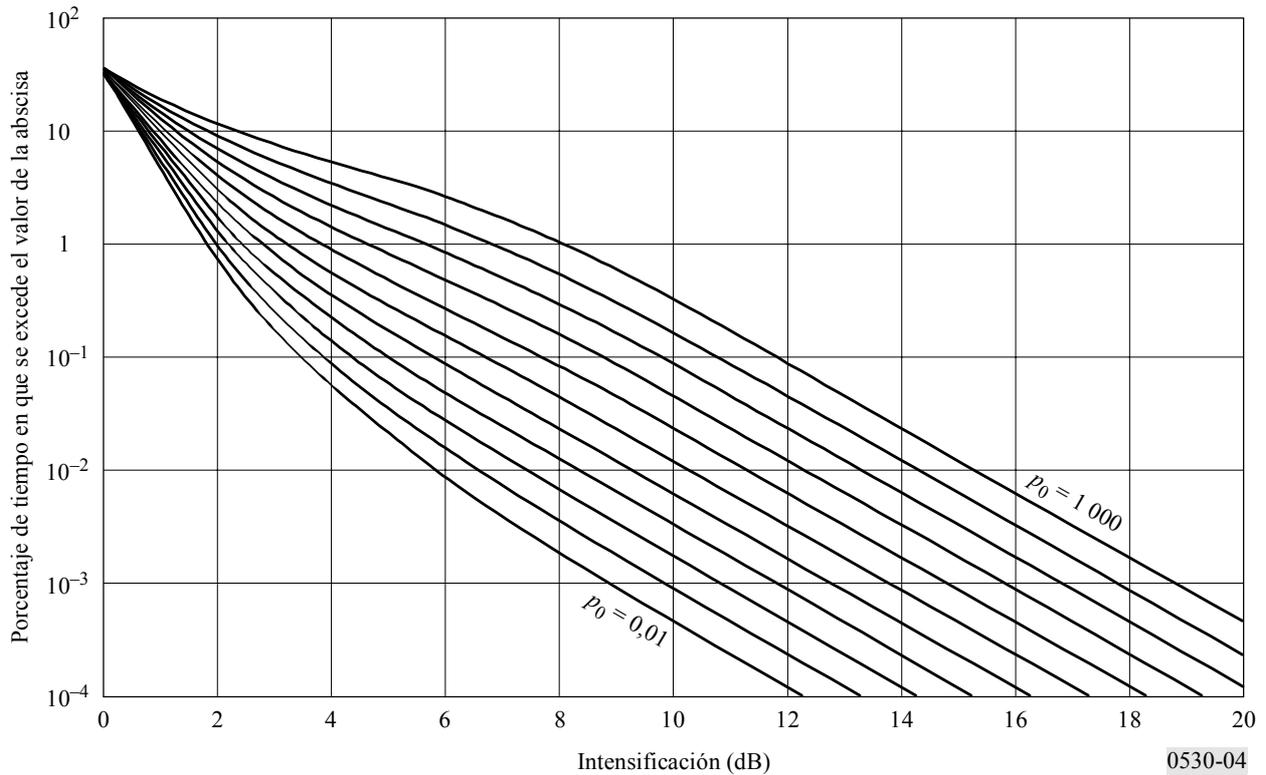
$$p_w = 100 - 58,21 \left[ 1 - \exp \left( -10^{-q_e E/20} \right) \right] \quad (23)$$

El conjunto de curvas de la Fig. 4 proporciona una representación apropiada del método con  $p_0$  como parámetro (véase la ecuación (10) o la (11), según el caso). Cada curva de la Fig. 4 corresponde a la curva de la Fig. 3 con el mismo valor de  $p_0$ . Se señala que en la Fig. 4 se da el porcentaje de tiempo durante el que se exceden las intensificaciones y que corresponde a  $(100 - p_w)$ , siendo  $p_w$  el valor dado por las ecuaciones (19) y (23).

Para la predicción de los porcentajes excedidos para el año medio en vez del mes más desfavorable medio, véase el § 2.3.4.

FIGURA 4

Porcentaje de tiempo  $(100 - p_w)$  en que se excede la intensificación  $E$ , en un mes más desfavorable medio para valores de  $p_0$  (de la ecuación (10) o la (11), según sea el caso) comprendidos entre 0,01 y 1 000



### 2.3.4 Conversión de distribuciones para el mes más desfavorable medio en distribuciones para el año medio

Las distribuciones de desvanecimiento y de intensificación para el mes más desfavorable medio obtenidas con los métodos indicados en los § 2.3.1 a 2.3.3 se pueden convertir en distribuciones para el año medio empleando el siguiente procedimiento:

*Paso 1:* Se calcula el porcentaje de tiempo,  $p_w$ , en que se rebasa una profundidad de desvanecimiento,  $A$ , en la gran cola de distribución para el mes más desfavorable medio, con la ecuación (7) o la (8), según el caso.

*Paso 2:* Se calcula el factor de conversión geoclimático logarítmico  $\Delta G$  mediante la siguiente expresión:

$$\Delta G = 10,5 - 5,6 \log \left( 1,1 \pm |\cos 2\xi|^{0,7} \right) - 2,7 \log d + 1,7 \log (1 + |\varepsilon_p|) \quad \text{dB} \quad (24)$$

siendo  $\Delta G \leq 10,8$  dB. En la ecuación (24) se emplea el signo positivo para  $\xi \leq 45^\circ$  y el signo negativo para  $\xi > 45^\circ$ , y donde:

$\xi$ : latitud ( $^\circ\text{N}$  o  $^\circ\text{S}$ )

$d$ : longitud del trayecto (km)

$|\varepsilon_p|$ : magnitud de la inclinación del trayecto (calculada con la ecuación (6)).

*Paso 3:* Se calcula el porcentaje de tiempo,  $p$ , en que se rebasa una profundidad de desvanecimiento,  $A$ , en la gran cola de distribución de la profundidad de desvanecimiento para el año medio, mediante la siguiente expresión:

$$p = 10^{-\Delta G/10} p_w \quad \% \quad (25)$$

*Paso 4:* Si se requiere la gama de desvanecimiento rasante de la distribución, se debe seguir el método indicado en el § 2.3.2, reemplazando  $p_w$  por  $p$ .

*Paso 5:* Si se requiere predecir la distribución de la intensificación para el año medio, debe seguirse el método del § 2.3.3, donde  $A_{0,01}$  es ahora la profundidad de desvanecimiento rebasada en el 0,01% del tiempo en el año medio. Se obtiene primero  $p_w$  invirtiendo la ecuación (25) y utilizando un valor de  $p = 0,01\%$ . Se obtiene entonces la profundidad de desvanecimiento,  $A_{0,01}$ , rebasada durante el 0,01% del tiempo en el año medio invirtiendo la ecuación (7) o la (8), según el caso y empleando  $p$  en lugar de  $p_w$ .

### 2.3.5 Conversión del mes medio más desfavorable a periodos de tiempo más cortos más desfavorables

El porcentaje de tiempo  $p_w$  durante el que se rebasa una profundidad de desvanecimiento  $A$  en el mes más desfavorable medio puede convertirse en un porcentaje de tiempo  $p_{sw}$  de rebasamiento de la misma profundidad de desvanecimiento durante un periodo de tiempo más desfavorable que sea más corto,  $T$ , mediante las relaciones:

$$p_{sw} = p_w 10^{1,3-0,46\log T} \quad \% \quad 1 \text{ h} \leq T < 720 \text{ h para trayectos relativamente planos} \quad (26)$$

$$p_{sw} = p_w 10^{2-0,7\log T} \quad \% \quad 1 \text{ h} \leq T < 720 \text{ h para trayectos ondulados} \quad (27)$$

$$p_{sw} = p_w 10^{2,5-0,87\log T} \quad \% \quad 1 \text{ h} \leq T < 720 \text{ h para trayectos montañosos} \quad (28)$$

NOTA 1 – Las ecuaciones (26) a (28) se obtuvieron a partir de datos de 25 enlaces en regiones templadas en las que se estimó el valor de  $p_w$  a partir de datos de meses de verano.

### 2.3.6 Predicción de la interrupción de la transmisión no selectiva (véase la Nota 1)

En el diseño de un enlace digital, se calcula la probabilidad de la interrupción de la transmisión,  $P_{ns}$ , debido a un componente no selectivo del desvanecimiento (véase el § 7) a partir de:

$$P_{ns} = p_w / 100 \quad (29)$$

donde  $p_w(\%)$  es el porcentaje de tiempo en que el margen de desvanecimiento plano  $A = F$  (dB) correspondiente a la proporción de bits erróneos (BER) especificada resulta excedido en el mes y medio más desfavorable (obtenido del § 2.3.1 ó 2.3.2, según el caso). El margen de desvanecimiento plano,  $F$ , se obtiene calculando el enlace y procesando la información facilitada con el equipo de que se trate, y teniendo en cuenta también las posibles reducciones ocasionadas por la interferencia en el diseño real del enlace.

NOTA 1 – Por razones de conveniencia, la interrupción de la transmisión se define aquí como la probabilidad de que la BER sobrepase un determinado umbral cualquiera que sea éste (para mayor información, véase el § 7).

### 2.3.7 Ocurrencia de desvanecimientos simultáneos en enlaces con múltiples secciones

Los datos experimentales indican que, en condiciones de cielo despejado, casi no existe ninguna correlación entre sucesos de desvanecimiento en los que se superan los 20 dB en secciones adyacentes de un enlace con múltiples secciones, lo que induce a pensar que, en el caso de sistemas

analógicos con grandes márgenes de protección contra el desvanecimiento, la duración de las interrupciones para una serie de secciones en tándem vendrá dada aproximadamente por la suma de las duraciones de las interrupciones de cada una de las secciones.

Si las profundidades del desvanecimiento no superan los 10 dB, la probabilidad de rebasar simultáneamente una profundidad de desvanecimiento dada en dos secciones adyacentes puede estimarse mediante la siguiente fórmula:

$$P_{12} = (P_1 P_2)^{0,8} \quad (30)$$

donde  $P_1$  y  $P_2$  son las probabilidades de rebasar esta profundidad de desvanecimiento en cada una de las secciones (véase la Nota 1).

La correlación entre desvanecimientos en secciones adyacentes disminuye a medida que aumenta la profundidad del desvanecimiento entre 10 y 20 dB, de modo que la probabilidad de rebasar simultáneamente una profundidad de desvanecimiento superior a 20 dB puede expresarse aproximadamente mediante:

$$P_{12} = P_1 P_2 \quad (31)$$

NOTA 1 – Se piensa que la correlación entre desvanecimientos en secciones adyacentes depende de la longitud del trayecto. La ecuación (30) es un valor medio basado en los resultados de las mediciones efectuadas en 47 pares de secciones adyacentes con visibilidad directa funcionando en la banda de 5 GHz, con longitudes de trayecto entre 11 y 97 km y una longitud de trayecto media de 45 km.

## 2.4 Atenuación debida a hidrometeoros

También puede producirse atenuación como resultado de la absorción y dispersión provocadas por hidrometeoros como la lluvia, la nieve, el granizo y la niebla. Aunque puede hacerse caso omiso de la atenuación debida a la lluvia para frecuencias por debajo de unos 5 GHz, debe incluirse en los cálculos de diseño a frecuencias superiores, en las que su importancia aumenta rápidamente. En el § 2.4.1 figura una técnica de estimación de las estadísticas a largo plazo de la atenuación debida a la lluvia. En trayectos a latitudes elevadas o en trayectos a latitudes bajas y altitudes elevadas, la nieve húmeda puede provocar una atenuación significativa en una gama de frecuencias aun mayor. En la Recomendación UIT-R P.840 figura información más detallada sobre la atenuación causada por hidrometeoros distintos de la lluvia.

En las frecuencias en que deben tenerse en cuenta tanto la atenuación debida a la lluvia como el desvanecimiento debido a la propagación por trayectos múltiples, pueden añadirse los porcentajes excedidos para una profundidad de desvanecimiento determinada correspondientes a cada uno de estos mecanismos.

### 2.4.1 Estadísticas de la atenuación debida a la lluvia a largo plazo

Para estimar las estadísticas de la atenuación debida a la lluvia a largo plazo puede utilizarse la siguiente técnica sencilla:

*Paso 1:* Se obtiene el índice de precipitación  $R_{0,01}$  superado durante el 0,01% del tiempo (con un tiempo de integración de 1 min). Si no se dispone de esta información a partir de las fuentes locales de medidas a largo plazo puede obtenerse una estimación utilizando la información que aparece en la Recomendación UIT-R P.837.

*Paso 2:* Se calcula la atenuación específica,  $\gamma_R$  (dB/km), para la frecuencia, polarización e índice de precipitación de interés, utilizando la Recomendación UIT-R P.838.

*Paso 3:* Se calcula la longitud efectiva del trayecto,  $d_{eff}$ , del enlace multiplicando la longitud del trayecto real,  $d$ , por un factor de distancia,  $r$ . Una estimación de este factor viene dada por:

$$r = \frac{1}{1 + d/d_0} \quad (32)$$

donde, para  $R_{0,01} \leq 100$  mm/h:

$$d_0 = 35 e^{-0,015 R_{0,01}} \quad (33)$$

Para  $R_{0,01} > 100$  mm/h utilícese el valor 100 mm/h en vez de  $R_{0,01}$ .

*Paso 4:* Una estimación de la atenuación del trayecto excedida durante el 0,01% del tiempo viene dada por:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{eff} = \gamma_R dr \quad \text{dB} \quad (34)$$

*Paso 5:* Para enlaces radioeléctricos situados a  $30^\circ$  o más (Norte o Sur) de latitud, las atenuaciones excedidas durante otros porcentajes de tiempo  $p$  en la gama de 0,001% a 1% pueden deducirse de la siguiente ley exponencial:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log_{10} p)} \quad (35)$$

Esta fórmula se ha elaborado de manera que dé 0,12, 0,39, 1 y 2,14 para el 1%, 0,1%, 0,01% y 0,001%, respectivamente, y sólo se utilizará con esta gama.

*Paso 6:* Para enlaces radioeléctricos situados por debajo de  $30^\circ$  (Norte o Sur) de latitud, las atenuaciones excedidas durante otros porcentajes de tiempo  $p$  en la gama de 0,001% a 1% pueden deducirse de la siguiente ley exponencial:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,07 p^{-(0,855 + 0,139 \log_{10} p)} \quad (36)$$

Esta fórmula se ha elaborado de manera que dé 0,07, 0,36, 1 y 1,44 para el 1%, 0,1%, 0,01% y 0,001%, respectivamente y sólo se utilizará dentro de esta gama.

*Paso 7:* Si se desean obtener las estadísticas relativas al mes más desfavorable, se calculan los porcentajes de tiempo anual,  $p$ , correspondientes a los porcentajes de tiempo del mes más desfavorable,  $p_w$ , mediante la información relativa al clima especificada en la Recomendación UIT-R P.841. Los valores de  $A$  rebasados durante los porcentajes de tiempo  $p$  anualmente, serán superados por los correspondientes porcentajes de tiempo  $p_w$  en los meses más desfavorables.

El procedimiento de predicción indicado anteriormente se considera válido en todo el mundo, al menos para frecuencias de hasta 40 GHz y longitudes de trayecto de hasta 60 km.

#### 2.4.2 Extrapolación a diferentes frecuencias de las estadísticas de la atenuación debida a la lluvia a largo plazo para una frecuencia

Cuando se dispone de estadísticas fiables de la atenuación a largo plazo para una frecuencia, puede utilizarse la siguiente expresión empírica para obtener una primera estimación de las estadísticas sobre atenuación a otras frecuencias de la gama de 7 a 50 GHz, para una misma longitud de la reflexión y en la misma región climática:

$$A_2 = A_1 (\Phi_2 / \Phi_1)^{1 - H(\Phi_1, \Phi_2, A_1)} \quad (37)$$

donde:

$$\Phi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4} f^2} \quad (38)$$

$$H(\Phi_1, \Phi_2, A_1) = 1,12 \times 10^{-3} (\Phi_2 / \Phi_1)^{0,5} (\Phi_1 A_1)^{0,55} \quad (39)$$

$A_1$  y  $A_2$  son los valores equiprobables de la atenuación por lluvia en exceso a las frecuencias  $f_1$  y  $f_2$  (GHz), respectivamente.

### 2.4.3 Extraprolación de las estadísticas de la atenuación debida a la lluvia a largo plazo, para polarizaciones ortogonales

Cuando se dispone de estadísticas a largo plazo de la atenuación con una determinada polarización (sea vertical (V) u horizontal (H)) para un enlace dado, puede estimarse la atenuación para la otra polarización en el mismo enlace mediante las siguiente fórmulas:

$$A_V = \frac{300 A_H}{335 + A_H} \quad \text{dB} \quad (40)$$

o

$$A_H = \frac{335 A_V}{300 - A_V} \quad \text{dB} \quad (41)$$

Estas expresiones se consideran válidas para las gamas de longitudes de trayecto y frecuencias del método de predicción del § 2.4.1.

### 2.4.4 Estadísticas sobre la duración de los sucesos y su número

Aunque se dispone todavía de poca información sobre la distribución global de la duración de los desvanecimientos, hay algunos datos, así como un modelo empírico, de estadísticas específicas tales como la duración media de un suceso de desvanecimiento y el número de esos sucesos. La diferencia observada entre los valores medios y medianos de la duración indica, sin embargo, una asimetría en la distribución global de la duración. Además, hay pruebas fehacientes de que la duración de los sucesos de desvanecimiento en condiciones de lluvia es mucho mayor que en condiciones de propagación por trayectos múltiples.

Un suceso de atenuación se define aquí como el exceso de atenuación,  $A$ , durante un cierto periodo de tiempo (por ejemplo, 10 s o bien un periodo de un tiempo superior). La relación entre el número de sucesos de atenuación,  $N(A)$ , la duración media,  $D_m(A)$ , de tales sucesos y el tiempo total,  $T(A)$ , durante el cual la persistencia del exceso de atenuación,  $A$ , es superior a una duración determinada, viene dada por:

$$N(A) = T(A)/D_m(A) \quad (42)$$

El tiempo total,  $T(A)$ , depende de la definición del suceso. Con frecuencia, el suceso que interesa en la aplicación es la atenuación,  $A$ , que dura 10 s o más. No obstante, sucesos de menor duración (por ejemplo, un intervalo de muestreo de 1 s utilizado en un experimento) también interesan para determinar el porcentaje del tiempo total de interrupción imputable a la no disponibilidad (es decir, el tiempo total de los sucesos que duran 10 s o más).

El número de sucesos de desvanecimiento en los que se sobrepasa el valor de la atenuación,  $A$ , durante 10 s o más puede representarse por:

$$N_{10\text{ s}}(A) = a A^b \quad (43)$$

siendo  $a$  y  $b$  coeficientes que dependerán en principio de la frecuencia, la longitud del trayecto y otras variables, por ejemplo el clima.

Sobre la base de un conjunto de mediciones efectuadas en un trayecto de 15 km a 18 GHz en la península escandinava, los valores de  $a$  y  $b$  calculados para un periodo de un año son:

$$a = 5,7 \times 10^5 \quad b = -3,4 \quad (44)$$

Una vez que se ha obtenido  $N_{10\text{ s}}(A)$  por medio de la ecuación (43), la duración media de los sucesos de desvanecimiento de 10 s o más puede calcularse invirtiendo la ecuación (42).

Según el mencionado conjunto de mediciones (en un trayecto de 15 km a 18 GHz en la península escandinava), el 95% a 100% de todos los sucesos de lluvia cuya atenuación fue superior a unos 15 dB puede atribuirse a la no disponibilidad. Conocida esa proporción, la disponibilidad se obtiene multiplicándola por el porcentaje total de tiempo durante el que se sobrepasa un determinado valor de la atenuación,  $A$ , obtenido con el método del § 2.4.1.

#### 2.4.5 Atenuación debida a la lluvia en redes de múltiples secciones

Hay varias configuraciones de múltiples secciones que interesan en las redes punto a punto en las que tiene relevancia la estructura no uniforme de los hidrómetros. Configuraciones de ese tipo son, por ejemplo, una serie de secciones en una red en tándem y más de una de esas series en una red con diversidad de encaminamientos.

##### 2.4.5.1 Longitud de las secciones individuales en una red en tándem

Las características de transmisión globales de una red en tándem se ven muy afectadas por las características de propagación de las secciones individuales. A veces es posible conseguir la misma conexión física global mediante combinaciones diferentes de longitudes de sección. Aumentando la longitud de las secciones individuales, se aumenta inevitablemente la probabilidad de interrupción durante las mismas. Por otra parte, esta medida puede hacer que se utilicen menos secciones, con lo que las características globales de la red en tándem pueden no degradarse.

##### 2.4.5.2 Desvanecimientos correlacionados en las secciones en tándem

Si la ocurrencia de la lluvia fuera estadísticamente independiente de su localización, la probabilidad general de desvanecimientos para una serie lineal de enlaces en tándem vendría dada con buena aproximación por:

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i \quad (45)$$

siendo  $P_i$  el  $i$ -ésimo enlace del total de  $n$  enlaces.

Por otra parte, si los sucesos de precipitación están correlacionados en una zona finita, la atenuación que se produzca en dos o más enlaces de un sistema de relevadores con múltiples secciones también estará correlacionada, en cuyo caso la probabilidad de desvanecimiento combinado puede expresarse de la siguiente manera:

$$P_T = K \sum_{i=1}^n P_i \quad (46)$$

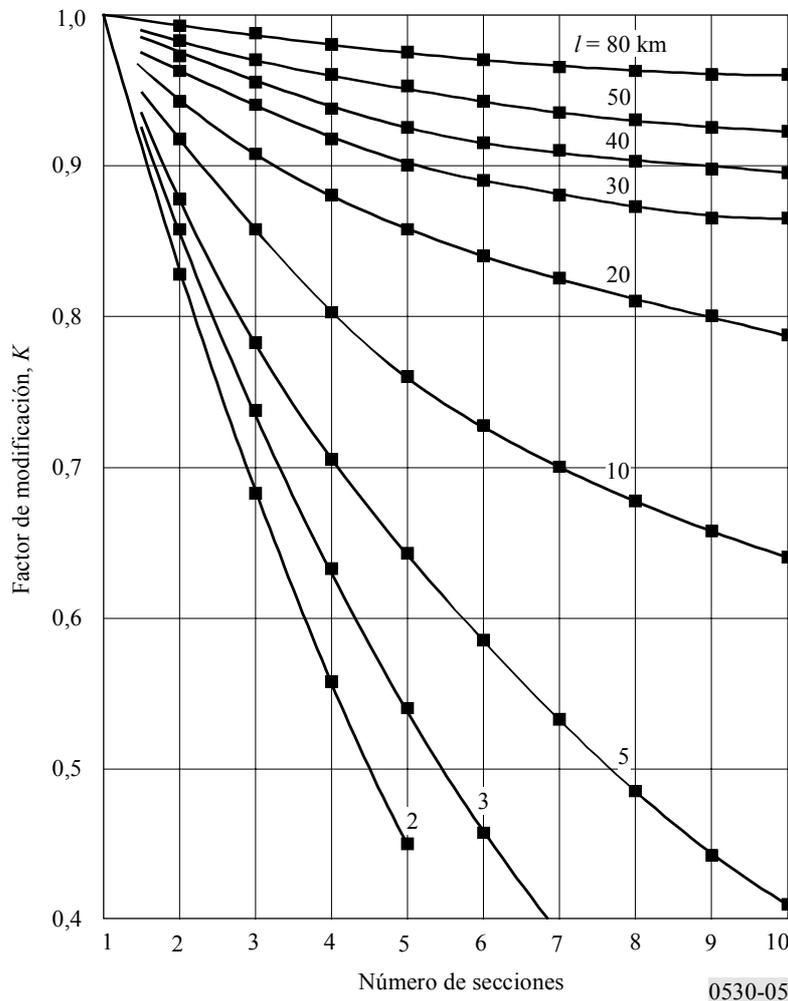
siendo  $K$  un factor de modificación que incluye el efecto total de la correlación correspondiente a la lluvia.

Se han realizado pocos estudios sobre esta cuestión. En uno de ellos se analizó la correlación instantánea de la lluvia en puntos localizados a lo largo de una ruta Este-Oeste, aproximadamente paralela a la dirección de desplazamiento de las tormentas. En otro estudio se examinó la atenuación en una serie de secciones cortas orientadas Norte-Sur, o más o menos perpendiculares a la dirección de las tormentas durante la estación de máxima pluviosidad.

En los enlaces paralelos a la dirección del movimiento de las tormentas, el efecto de la correlación en una serie de secciones, cuya longitud,  $l$ , era superior a 40 km, fue escaso. En ese caso, el factor de modificación  $K$  rebasó el valor 0,9 para 0,03% de interrupciones debidas a la lluvia, por lo que no hace falta tenerlo en cuenta (véase la Fig. 5). Pero en el caso de secciones más cortas los efectos son más importantes: la probabilidad total de interrupción simultánea para 10 enlaces, de 20, 10 y 5 km, cada uno de ellos es, aproximadamente, el 80%, el 65% y el 40% de la expectativa sin correlación, respectivamente (o sea, factores de modificación de 0,8, 0,65 y 0,4). Se estima que la influencia de la correlación de la lluvia es algo mayor para las primeras secciones, y que disminuye al aumentar la longitud total de la cadena.

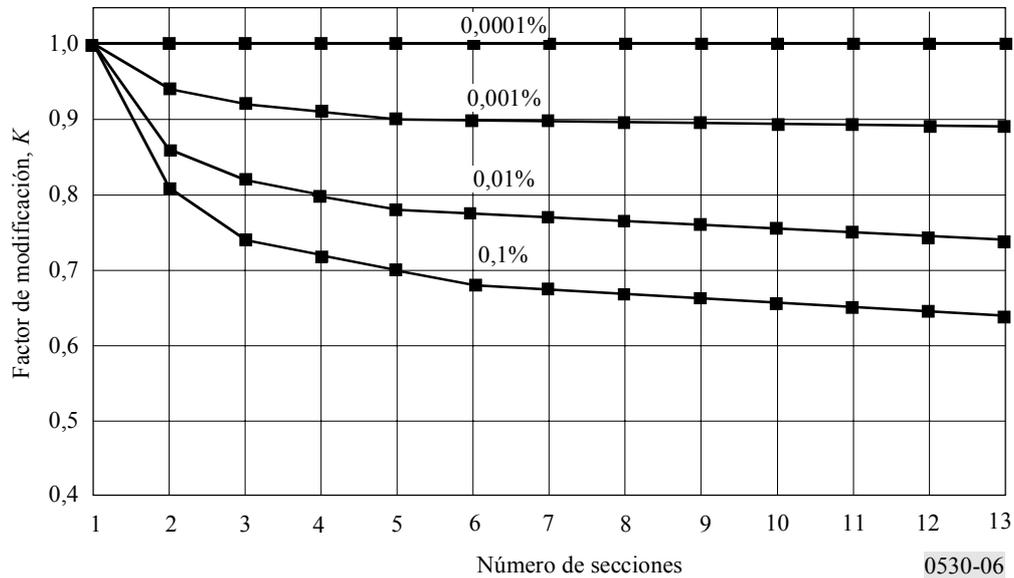
FIGURA 5

Factor de modificación de la atenuación total debida a la lluvia sobre una serie de secciones en tándem de igual longitud,  $l$ , para una probabilidad excedida de 0,03% en cada enlace



En la Fig. 6 se muestran los factores de modificación para el caso de la propagación en dirección perpendicular a la dirección de desplazamiento de las tormentas, aplicables a varios niveles de probabilidad. En esta situación, los factores de modificación disminuyen más rápidamente en algunas de las primeras secciones (lo que indica una correlación a corto plazo más fuerte que la que se produce en la propagación paralela al desplazamiento de las tormentas), y a partir de entonces sus valores se mantienen relativamente constantes (lo que indica una correlación más débil a largo plazo).

FIGURA 6  
**Factor de modificación de la atenuación total debida a la lluvia sobre una serie de secciones en tándem, cada uno de una longitud aproximada de 4,6 km, para varios niveles de probabilidad de excederse en cada enlace**  
 (Mayo de 1975-marzo de 1979)



**2.4.5.3 Redes con diversidad de encaminamientos**

Aprovechando el hecho de que la estructura horizontal de la precipitación puede cambiar mucho en el espacio de una fracción de kilómetro, las redes con diversidad de encaminamientos pueden integrar dos o más secciones en tándem en dos o más encaminamientos diferentes. Aunque no se dispone de información sobre la mejora por diversidad de redes completas con diversidad de encaminamientos, se poseen algunos datos sobre elementos de tales redes. Dichos elementos son dos trayectos que convergen en el nodo de la red, y trayectos más o menos paralelos separados horizontalmente.

**2.4.5.3.1 Elementos de trayectos convergentes**

En la Recomendación UIT-R P.1410 se puede encontrar información sobre el factor de mejora por diversidad para trayectos convergentes en la gama inferior de ondas milimétricas del espectro. Aunque ha sido elaborada para aplicaciones punto a zona, puede utilizarse como orientación general de la mejora que pueden aportar tales elementos de una red (o malla) punto a punto con diversidad de encaminamientos, de los que habría dos.

**2.4.5.3.2 Elementos de trayectos paralelos separados horizontalmente**

Los datos obtenidos experimentalmente en el Reino Unido en la gama de 20 a 40 GHz dan una indicación de la mejora de la fiabilidad del enlace que puede lograrse con el uso de los elementos de trayectos paralelos de las redes con diversidad de encaminamientos. La ganancia de diversidad (es decir, la diferencia entre la atenuación (dB) rebasada durante un determinado porcentaje del tiempo en un enlace único y la rebasada simultáneamente en dos enlaces en paralelo):

- tiende a disminuir a medida que aumenta la longitud del trayecto más allá de 12 km, para un determinado porcentaje de tiempo y una determinada separación lateral entre los trayectos;
- suele ser mayor para una separación de 8 km que para una separación de 4 km, pero aumentando esa separación a 12 km no se obtiene ninguna mejora adicional;

- no depende significativamente de la frecuencia en la gama de 20 a 40 GHz, para una geometría dada; y
- varía entre unos 2,8 dB, durante el 0,1% del tiempo, y 4,0 dB durante el 0,001% del tiempo, para una separación de 8 km y longitudes de trayecto aproximadamente iguales. La variación correspondiente para una separación de 4 km es de 1,8 a 2,0 dB aproximadamente.

#### 2.4.6 Predicción de la interrupción de las transmisiones debida a la lluvia

Para diseñar el enlace digital, calcúlese la probabilidad,  $P_{lluvia}$ , de exceder una atenuación ocasionada por la lluvia igual al margen del desvanecimiento plano,  $F$  (dB), (véase el § 2.3.5) para la BER especificada, a partir de:

$$P_{lluvia} = p/100 \quad (47)$$

donde  $p$  (%) es el porcentaje de tiempo en que la atenuación debida a la lluvia de  $F$  (dB) es excedida en el año promedio, resolviendo la ecuación (35) del § 2.4.1.

### 3 Variación de los ángulos de llegada y de salida

Gradientes anormales del índice de refracción con cielo despejado a lo largo de un trayecto pueden provocar variaciones considerables de los ángulos de salida y de llegada de las ondas transmitidas y recibidas, respectivamente. Esta variación es prácticamente independiente de la frecuencia y se produce principalmente en el plano vertical de las antenas. La gama de ángulos es superior en las regiones costeras húmedas que en las zonas secas del interior. En condiciones de precipitación no se han observado variaciones importantes.

El efecto puede ser importante en trayectos largos en los que se emplean antenas de elevada ganancia y haz estrecho. Si las anchuras de haz de las antenas son demasiado pequeñas, la onda directa de salida/llegada puede estar tan descentrada del eje del haz que dé lugar a un desvanecimiento importante (véase el § 2.3). Por otra parte si las antenas se han alineado durante periodos de ángulos de llegada muy anormales, la alineación puede no ser óptima. Por lo tanto, al alinear las antenas en trayectos críticos (por ejemplo, trayectos largos en zonas costeras), puede ser conveniente comprobar varias veces la alineación en un periodo de unos pocos días.

### 4 Reducción de la XPD

La XPD puede deteriorarse suficientemente como para causar interferencia cocanal y, en menor medida, interferencia de canal adyacente. Debe tenerse en cuenta la reducción de la XPD producida en condiciones de cielo despejado y de precipitaciones.

#### 4.1 Predicción de la interrupción XPD ocasionada por efecto de la situación de cielo despejado

El efecto combinado de la propagación por trayectos múltiples y los diagramas de polarización cruzada de las antenas determinan las reducciones en la XPD que se producen para pequeños

porcentajes de tiempo. Para calcular el efecto de estas reducciones de la calidad de funcionamiento del enlace debe seguirse el siguiente procedimiento paso a paso:

*Paso 1:* Calcúlese:

$$XPD_0 = \begin{cases} XPD_g + 5 & \text{para } XPD_g \leq 35 \\ 40 & \text{para } XPD_g > 35 \end{cases} \quad (48)$$

donde  $XPD_g$  es el XPD mínimo garantizado por el fabricante en el eje de puntería para las antenas de transmisión y recepción, esto es, el XPD mínimo en el eje de puntería para la antena de transmisión y recepción.

*Paso 2:* Evalúese el parámetro de actividad multitrayecto:

$$\eta = 1 - e^{-0,2(P_0)^{0,75}} \quad (49)$$

donde  $P_0 = p_w/100$  es el factor de ocurrencia del multitrayecto correspondiente al porcentaje de tiempo  $p_w$  (%) en que se excede  $A = 0$  dB en el mes más desfavorable medio, calculado a partir de la ecuación (7) o la (8), según el caso.

*Paso 3:* Determínese:

$$Q = -10 \log \left( \frac{k_{XP} \eta}{P_0} \right) \quad (50)$$

donde:

$$k_{XP} = \begin{cases} 0,7 & \text{para una antena transmisora} \\ 1 - 0,3 \exp \left[ -4 \times 10^{-6} \left( \frac{s_t}{\lambda} \right)^2 \right] & \text{para dos antena transmisora} \end{cases} \quad (51)$$

En el caso de dos transmisiones polarizadas ortogonalmente a partir de diferentes antenas, la separación vertical es  $s_t$  (m) y la anchura de banda de la portadora es  $\lambda$  (m).

*Paso 4:* Derívese el parámetro  $C$  a partir de:

$$C = XPD_0 + Q \quad (52)$$

*Paso 5:* Calcúlese la probabilidad de la interrupción de la transmisión  $P_{XP}$  debido a la polarización cruzada con cielo despejado a partir de:

$$P_{XP} = P_0 \times 10^{-\frac{M_{XPD}}{10}} \quad (53)$$

donde  $M_{XPD}$  (dB) es el margen XPD equivalente a una BER de referencia dada por:

$$M_{XPD} = \begin{cases} C - \frac{C_0}{I} & \text{sin XPIC} \\ C - \frac{C_0}{I} + XPIF & \text{con XPIC} \end{cases} \quad (54)$$

Donde  $C_0/I$  es la relación portadora/interferencia para una BER de referencia, que puede evaluarse basándose en simulaciones o mediciones.

XPIF es un factor de mejoramiento de la polarización cruzada (*cross-polarization improvement factor*) medido en laboratorio que permite obtener la variación del aislamiento polar cruzado (XPI, *cross-polar isolation*) con una relación portadora/ruido suficientemente amplia (típicamente de 35 dB) y una BER específica para sistemas con y sin supresor de interferencia polar cruzada (XPIC, *cross polar interference canceller*). Un valor típico de XPIF es 20 dB aproximadamente.

## 4.2 Predicción de la interrupción XPD debida a los efectos de la lluvia

### 4.2.1 Estadísticas de la XPD en condiciones de precipitación

La lluvia intensa determina las reducciones de la XPD que se observan en pequeños porcentajes de tiempo. Para trayectos de los que no se dispone de predicciones o mediciones detalladas puede obtenerse una estimación aproximada de la distribución incondicional de la XPD a partir de una distribución acumulativa de la atenuación de la componente copolar (CPA) debida a la lluvia, (véase el § 2.4) utilizando la relación de equiprobabilidad:

$$XPD = U - V(f) \log CPA \quad \text{dB} \quad (55)$$

Los coeficientes  $U$  y  $V(f)$  dependen, en general, de cierto número de variables y parámetros empíricos, incluida la frecuencia  $f$ . Para trayectos de visibilidad directa con pequeños ángulos de elevación y polarización horizontal o vertical, pueden darse a tales coeficientes los valores aproximados siguientes:

$$U = U_0 + 30 \log f \quad (56)$$

$$V(f) = 12,8 f^{0,19} \quad \text{para } 8 \leq f \leq 20 \text{ GHz} \quad (57)$$

$$V(f) = 22,6 \quad \text{para } 20 < f \leq 35 \text{ GHz}$$

Se ha obtenido un valor medio de  $U_0$  de unos 15 dB, con un límite inferior de 9 dB para todas las mediciones, en atenuaciones superiores a 15 dB.

La variabilidad de los valores de  $U$  y  $V(f)$  es tal que la diferencia entre los valores de la CPA para las polarizaciones vertical y horizontal no es significativa en la evaluación de la XPD. Se aconseja al usuario que utilice el valor de la CPA para la polarización circular al trabajar con la ecuación (55).

Las estadísticas de XPD correspondientes a un largo periodo, obtenidas en una frecuencia, pueden extrapolarse a otra utilizando la fórmula semiempírica:

$$XPD_2 = XPD_1 - 20 \log (f_2 / f_1) \quad \text{para } 4 \leq f_1, f_2 \leq 30 \text{ GHz} \quad (58)$$

donde  $XPD_1$  y  $XPD_2$  son los valores de XPD no rebasados durante el mismo porcentaje de tiempo a las frecuencias  $f_1$  y  $f_2$ .

En la relación entre XPD y CPA influyen muchos factores, incluida la XPD residual de la antena, que no se ha tenido en cuenta. La ecuación (58) es menos precisa cuando existen grandes diferencias entre las respectivas frecuencias, y es sumamente precisa cuando  $XPD_1$  y  $XPD_2$  corresponden a la misma polarización (horizontal o vertical).

### 4.2.2 Procedimiento paso a paso para predecir la interrupción de la transmisión debida a efectos de la lluvia

*Paso 1:* Determínese la atenuación de trayecto,  $A_{0,01}$  (dB), excedida para el 0,01% del tiempo, a partir de la ecuación (34).

*Paso 2:* Determinése la atenuación de trayecto equivalente,  $A_p$  (dB):

$$A_p = 10^{((U - C_0/I + XPIF)/V)} \quad (59)$$

donde  $U$  se obtiene a partir de la ecuación (56) y  $V$  de la ecuación (57),  $C_0/I$  (dB) es la relación portadora/interferencia definida para la BER de referencia sin XPIC, y XPIF (dB) es el factor de mejoramiento de la polarización cruzada para la BER de referencia.

Si no se utiliza un dispositivo XPIC dar a XPIF un valor = 0.

*Paso 3:* Determinése los siguientes parámetros:

$$m = \begin{cases} 23,26 \log [A_p / 0,12 A_{0,01}] & \text{si } m \leq 40 \\ 40 & \text{para otros valores} \end{cases} \quad (60)$$

y

$$n = (-12,7 + \sqrt{161,23 - 4m})/2 \quad (61)$$

Los valores válidos para  $n$  deben estar comprendidos entre  $-3$  y  $0$ . Hay que observar que en ciertos casos, especialmente cuando se utiliza un dispositivo XPIC, pueden obtenerse valores de  $n$  inferiores a  $-3$ . En este caso, hay que indicar que los valores de  $p$  inferiores a  $-3$  arrojarán una BER de interrupción inferior a  $1 \times 10^{-5}$ .

*Paso 4:* Determinése la probabilidad de interrupción de la transmisión a partir de:

$$P_{XPR} = 10^{(n - 2)} \quad (62)$$

## 5 Distorsión debida a los efectos de la propagación

La causa principal de la distorsión en los enlaces con visibilidad directa en las bandas de ondas decimétricas y centimétricas es la dependencia de la amplitud con respecto a la frecuencia y el retardo de grupo en condiciones de propagación por trayectos múltiples y cielo despejado. En los sistemas analógicos un aumento de margen de desvanecimiento mejorará la calidad de funcionamiento, ya que se reducen los efectos del ruido térmico. Sin embargo, en los sistemas digitales la utilización de un margen de desvanecimiento mayor no será un factor de ayuda, si es el desvanecimiento selectivo de la frecuencia el que ocasiona la reducción en la calidad de funcionamiento.

El canal de propagación se modela la mayoría de las veces suponiendo que la señal sigue diferentes trayectos o rayos del transmisor al receptor. Esto presupone que el trayecto directo atraviesa la atmósfera y puede incluir uno o más trayectos reflejados por la superficie y/o refractados por la atmósfera adicionales. Si la señal directa y una reproducción significativamente retardada de aproximadamente la misma amplitud llega al receptor, se producirá una interferencia entre símbolos que puede redundar en un error en lo que concierne a detectar la información. En los métodos para predecir la calidad de funcionamiento se utiliza un modelo multirrayos de este tipo, integrando las diferentes variables, por ejemplo el retardo (diferencia temporal entre el rayo que llega primero y los demás) y distribuciones de amplitud, junto con un modelo adecuado de los elementos del equipo, tales como moduladores, ecualizador, dispositivos de corrección de errores en recepción sin canal de retorno (FEC), etc. Aunque existen muchos métodos, éstos pueden agruparse en tres

categorías generales, en torno a un rasgo característico del sistema; a la distorsión lineal de amplitud (LAD, *linear amplitude distortion*) o al margen de desvanecimiento neto. En el marco de enfoque de rasgo se suele utilizar un modelo de laboratorio con simulador de dos rayos y asociar este modelo a otra información como por ejemplo la ocurrencia de la propagación por trayectos múltiples y las características del enlace. Con el enfoque LAD se calcula la distribución de la distorsión en un trayecto determinado que se observaría en dos frecuencias de la banda radioeléctrica y se utilizan características del modulador y del ecualizador, etc. Asimismo, en el enfoque de margen de desvanecimiento neto se emplean distribuciones estadísticas de las estimaciones de amplitudes de los rayos, así como información sobre el equipo, como se hace cuando se aplica el enfoque LAD. En el § 5.1 el método recomendado para predecir la característica de error es un método de rasgo característico (banda característica).

Se considera que la distorsión resultante de la precipitación es desdeñable y, en todo caso, un problema mucho menos importante que la propia atenuación debida a la lluvia. Se sabe que la distorsión se produce en bandas de absorción de ondas milimétricas y submilimétricas, pero no se han aclarado aún sus efectos sobre los sistemas operacionales.

### 5.1 Predicción de la interrupción de las transmisiones en los sistemas digitales no protegidos

La probabilidad de interrupción de la transmisión se ha definido aquí como la probabilidad de que la BER sobrepase un determinado valor umbral.

*Paso 1:* Calcúlese el retardo temporal medio, como sigue:

$$\tau_m = 0,7 \left( \frac{d}{50} \right)^{1,3} \quad \text{ns} \quad (63)$$

donde  $d$  es la longitud del trayecto (km).

*Paso 2:* Calcúlese el parámetro de actividad del multitrayecto,  $\eta$ , como en el Paso 2 del § 4.1.

*Paso 3:* Calcúlese la probabilidad de interrupción selectiva de la transmisión como sigue:

$$P_s = 2,15\eta \left( W_M \times 10^{-B_M/20} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,M}|} + W_{NM} \times 10^{-B_{NM}/20} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,NM}|} \right) \quad (64)$$

donde:

$W_x$ : anchura de la banda característica (GHz)

$B_x$ : penetración en esta banda (dB)

$\tau_{r,x}$ : retardo de referencia (ns) utilizado para obtener esta banda, mientras que  $x$  indica cuál es el desvanecimiento de fase mínima ( $M$ ) o el de fase no mínima ( $NM$ ).

Las definiciones de los parámetros de esta banda y la forma de obtenerlos se consignan a la Recomendación UIT-R F.1093.

## **6 Técnicas para reducir los efectos de la propagación por trayectos múltiples**

Haciendo uso tanto de técnicas de no diversidad como de diversidad pueden reducirse los efectos del desvanecimiento lento relativamente no selectivo de frecuencia (es decir, el «desvanecimiento plano») debido a la dispersión del haz, así como los del desvanecimiento más rápido que es selectivo de frecuencia y es debido a la propagación por trayectos múltiples.

### **6.1 Técnicas de no diversidad**

Para reducir los efectos del desvanecimiento por propagación en trayectos múltiples sin diversidad hay varias alternativas que pueden emplearse tanto si el enlace une torres ya existentes como si se trata de torres nuevas que van a construirse. La información orientativa se ha dividido en tres partes: reducción de los niveles de reflexión en el suelo, aumento de la inclinación del trayecto y reducción del despejamiento del trayecto.

#### **6.1.1 Reducción de los niveles de reflexión en el suelo**

Los enlaces deben situarse en la medida de lo posible de tal forma que se reduzca el nivel de las reflexiones en la superficie, lo cual, a su vez, disminuye la aparición de distorsiones y el desvanecimiento por trayectos múltiples. Entre estas técnicas puede citarse la de establecer enlaces sobre una masa de agua de tal forma que las reflexiones en la superficie se produzcan en tierra y no en agua, así como sobre superficie de tierra y sobre agua de tal manera que se impida análogamente la formación de grandes superficies reflectantes planas sobre tierra. Otra técnica conocida para disminuir el nivel de las reflexiones en la superficie es la de inclinar las antenas ligeramente hacia arriba. Aún no se dispone de información detallada sobre los ángulos de inclinación adecuados. Debe llegarse a un compromiso entre la pérdida de directividad de la antena en condiciones de refracción normales resultante de aplicar esta técnica y la mejora que se logra en las condiciones de desvanecimiento por trayectos múltiples.

#### **6.1.2 Aumento de la inclinación del trayecto**

Los enlaces deberán estar situados de forma que se aprovechen las ventajas del terreno para aumentar la inclinación del trayecto, puesto que se sabe que aumentando dicha inclinación disminuyen los efectos de la dispersión del haz y del desvanecimiento por trayectos múltiples en la superficie y en la atmósfera. Las posiciones en la torre del enlace radioeléctrico deben elegirse de forma que se obtengan las inclinaciones más amplias posibles, en particular para los enlaces más largos.

#### **6.1.3 Reducción del despejamiento del trayecto**

Otra técnica menos comprendida es la de reducción del despejamiento del trayecto. También en este caso debe llegarse a una solución de compromiso entre la reducción de los efectos de la distorsión y del desvanecimiento por trayectos múltiples y el incremento del desvanecimiento causado por la subrefracción. No obstante, en el caso de la configuración con diversidad en el espacio (véase el § 6.2), una antena puede colocarse con un nivel bajo de despejamiento.

### **6.2 Técnicas de diversidad**

Las técnicas de diversidad incluyen la diversidad en el espacio, en ángulo y en frecuencia. En la medida de lo posible, debe evitarse utilizar diversidad en frecuencia, para ahorrar espectro. Cuando se utilice diversidad en el espacio, debe emplearse también diversidad en ángulo inclinando las antenas hacia arriba con distintos ángulos. La diversidad en ángulo puede utilizarse en situaciones en que no es posible emplear la diversidad adecuada en el espacio o para disminuir las alturas de los mástiles.

La mejora que se logra con estas técnicas depende del grado de descorrelación de las señales que discurren por las ramas de diversidad del sistema. En el caso de sistemas analógicos de banda estrecha, basta con determinar la mejora en las estadísticas de profundidad del desvanecimiento para una sola frecuencia. Para los sistemas digitales de banda ancha, la mejora de diversidad depende también de las estadísticas de la distorsión dentro de banda.

El factor de mejora de la profundidad de desvanecimiento,  $A$ , por diversidad,  $I$ , viene dado por:

$$I = p(A) / p_d(A) \quad (65)$$

siendo  $p_d(A)$  el porcentaje de tiempo en el ramal de combinación de la diversidad de señal con una profundidad de desvanecimiento mayor que  $A$ , y  $p(A)$  el porcentaje para el trayecto no protegido. En el caso de sistemas digitales, se define el factor de mejora de diversidad mediante el cociente de los tiempos en que se rebasa una BER determinada, en ausencia y en presencia de diversidad.

### 6.2.1 Técnica de diversidad en sistemas analógicos

En trayectos sobre tierra, el factor de mejora por diversidad vertical en el espacio para señales de banda estrecha, puede estimarse mediante:

$$I = \left[ 1 - \exp\left(-0,04 \times S^{0,87} f^{-0,12} d^{0,48} p_0^{-1,04}\right) \right] 10^{(A - V)/10} \quad (66)$$

donde:

$$V = |G_1 - G_2| \quad (67)$$

siendo:

$A$ : profundidad de desvanecimiento (dB) del trayecto no protegido

$p_0$ : factor de aparición de multitrayecto (%), obtenido de la ecuación (10) o la (11)

$S$ : separación vertical de las antenas receptoras (m), de centro a centro

$f$ : frecuencia (GHz)

$d$ : longitud del trayecto (km)

$G_1, G_2$ : ganancias de las dos antenas (dBi).

La ecuación (66) se basa en los datos de los bancos de datos de la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones para las siguientes gamas de valores de las variables:  $43 \leq d \leq 240$  km,  $2 \leq f \leq 11$  GHz y  $3 \leq S \leq 23$  m. Existen razones para considerar que los datos seguirán siendo razonablemente válidos hasta longitudes de trayecto tan cortas como 25 km. El porcentaje de rebasamiento,  $p_w$ , puede calcularse a partir de la ecuación (7) o la (8), según el caso. La ecuación (66) es válida en la gama de desvanecimientos profundos en la que también lo es la ecuación (7) o la (8).

### 6.2.2 Técnicas de diversidad en los sistemas digitales

Se dispone de métodos para predecir la probabilidad de la interrupción de la transmisión y el mejoramiento de diversidad para sistemas de diversidad en el espacio, en frecuencia y en ángulo, así como para sistemas que utilizan una combinación de diversidad en el espacio y en frecuencia. Los procedimientos paso a paso son los siguientes.

#### 6.2.2.1 Predicción de la interrupción de la transmisión utilizando diversidad en el espacio

Hasta el momento se han utilizado muy extensamente en los sistemas de diversidad en el espacio los combinadores de potencia máxima. El procedimiento paso a paso indicado a continuación, se aplica a sistemas que emplean dichos combinadores. Otros combinadores, en que se aplica un

enfoque más avanzado, emplean distorsión mínima y potencia máxima, dependiendo de una evaluación del canal radioeléctrico tendente a conseguir una mejor calidad de funcionamiento.

*Paso 1:* Calcúlese el factor de actividad multitrayecto,  $\eta$ , como en el Paso 2 del § 4.1.

*Paso 2:* Calcúlese el cuadrado del coeficiente de correlación no selectiva,  $k_{ns}$ , como sigue:

$$k_{ns}^2 = 1 - \frac{I_{ns} \cdot P_{ns}}{\eta} \quad (68)$$

donde el factor de mejora,  $I_{ns}$ , puede evaluarse a partir de la ecuación (66) para una profundidad de desvanecimiento,  $A$  (dB), correspondiente al margen de desvanecimiento plano,  $F$  (dB) (véase el § 2.3.6) y  $P_{ns}$  a partir de la ecuación (29).

*Paso 3:* Calcúlese el cuadrado del coeficiente de correlación selectiva,  $k_s$ , como sigue:

$$k_s^2 = \begin{cases} 0,8238 & \text{para } r_w \leq 0,5 \\ 1 - 0,195 (1 - r_w)^{0,109 - 0,13 \log (1 - r_w)} & \text{para } 0,5 < r_w \leq 0,9628 \\ 1 - 0,3957 (1 - r_w)^{0,5136} & \text{para } r_w > 0,9628 \end{cases} \quad (69)$$

donde el coeficiente de correlación,  $r_w$ , de las amplitudes relativas viene dado por:

$$r_w = \begin{cases} 1 - 0,9746 (1 - k_{ns}^2)^{2,170} & \text{para } k_{ns}^2 \leq 0,26 \\ 1 - 0,6921 (1 - k_{ns}^2)^{1,034} & \text{para } k_{ns}^2 > 0,26 \end{cases} \quad (70)$$

*Paso 4:* Calcúlese la probabilidad de interrupción de la transmisión no selectiva,  $P_{dns}$ , como sigue:

$$P_{dns} = \frac{P_{ns}}{I_{ns}} \quad (71)$$

donde  $P_{ns}$  es la probabilidad de interrupción de la transmisión no protegida, dada por la ecuación (29).

*Paso 5:* Calcúlese la probabilidad de interrupción de la transmisión selectiva,  $P_{ds}$ , como sigue:

$$P_{ds} = \frac{P_s^2}{\eta (1 - k_s^2)} \quad (72)$$

donde  $P_s$  es la probabilidad de interrupción de la transmisión no protegida, dada por la ecuación (64).

*Paso 6:* Calcúlese la probabilidad total de interrupción de la transmisión,  $P_d$ , como sigue:

$$P_d = \left( P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75} \right)^{4/3} \quad (73)$$

### 6.2.2.2 Predicción de la interrupción de la transmisión utilizando diversidad en frecuencia

El método dado se aplica para un sistema 1 + 1. Se utiliza el mismo procedimiento que en el caso de diversidad en el espacio, pero en el Paso 2 se aplica aquí la siguiente fórmula:

$$I_{ns} = \frac{80}{fd} \left( \frac{\Delta f}{f} \right) 10^{F/10} \quad (74)$$

donde:

$\Delta f$ : separación en frecuencias (GHz). Si  $\Delta f > 0,5$  GHz, utilícese  $\Delta f = 0,5$

$f$ : frecuencia de la portadora (GHz)

$F$ : margen de desvanecimiento plano (dB).

Esta ecuación se aplica únicamente a las siguientes gamas de parámetros:

$$2 \leq f \leq 11 \text{ GHz}$$

$$30 \leq d \leq 70 \text{ km}$$

$$\Delta f / f \leq 5\%$$

### 6.2.2.3 Predicción de la interrupción de la transmisión utilizando diversidad en ángulo

*Paso 1:* Estímese el ángulo medio de llegada,  $\mu_\theta$ , como sigue:

$$\mu_\theta = 2,89 \times 10^{-5} G_m d \quad \text{grados} \quad (75)$$

donde  $G_m$  es el valor medio del gradiente de refractividad (unidades N/km). En presencia clara en una fuerte reflexión en superficie,  $\mu_\theta$  puede estimarse a partir del ángulo de llegada del rayo reflejado en condiciones normales de propagación.

*Paso 2:* Calcúlese el parámetro de reducción no selectiva,  $r$ , como sigue:

$$r = \begin{cases} 0,113 \operatorname{sen} \left[ 150 (\delta / \Omega) + 30 \right] + 0,963 & \text{para } q > 1 \\ q & \text{para } q \leq 1 \end{cases} \quad (76)$$

donde:

$$q = 2505 \times 0,0437^{(\delta / \Omega)} \times 0,593^{(\varepsilon / \delta)} \quad (77)$$

y

$\delta$ : separación angular entre los dos diagramas de radiación

$\varepsilon$ : ángulo de elevación de la antena superior (positivo con respecto al suelo)

$\Omega$ : anchura del haz de media potencia de los diagramas de radiación de antena.

*Paso 3:* Calcúlese el parámetro de correlación no selectiva,  $Q_0$ , como sigue:

$$Q_0 = r \left( 0,9399^{\mu_\theta} \times 10^{-24,58 \mu_\theta^2} \right) \left[ 2,469^{1,879(\delta / \Omega)} \times 3,615 [(\delta / \Omega)^{1,978} (\varepsilon / \delta)] \times 4,601 [(\delta / \Omega)^{2,152} (\varepsilon / \delta)^2] \right] \quad (78)$$

*Paso 4:* Calcúlese el parámetro de actividad multitrayecto,  $\eta$ , como en el Paso 2 del § 4.1.

*Paso 5:* Calcúlese la probabilidad de interrupción de la transmisión no selectiva a partir de:

$$P_{dns} = \eta Q_0 \times 10^{-F/6,6} \quad (79)$$

*Paso 6:* Calcúlese el cuadrado del coeficiente de correlación selectiva,  $k_s$ , como sigue:

$$k_s^2 = 1 - \left( 0,0763 \times 0,694^{\mu_\theta} \times 10^{23,3 \mu_\theta^2} \right) \delta \left( 0,211 - 0,188 \mu_\theta - 0,638 \mu_\theta^2 \right)^\Omega \quad (80)$$

*Paso 7:* Obténgase la probabilidad de interrupción de la transmisión selectiva,  $P_{ds}$  como sigue:

$$P_{ds} = \frac{P_s^2}{\eta (1 - k_s^2)} \quad (81)$$

donde  $P_s$  es la probabilidad de interrupción de la transmisión no protegida (véase el Paso 3 del § 5.1).

*Paso 8:* Calcúlese, por último la probabilidad total de interrupción de la transmisión,  $P_d$  como sigue:

$$P_d = \left( P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75} \right)^{4/3} \quad (82)$$

#### 6.2.2.4 Predicción de la interrupción de la transmisión utilizando diversidad en el espacio y en frecuencia (dos receptores)

*Paso 1:* Obténgase el coeficiente de correlación no selectiva,  $k_{ns}$ , como sigue:

$$k_{ns} = k_{ns,s} k_{ns,f} \quad (83)$$

donde  $k_{ns,s}$  y  $k_{ns,f}$  son los coeficientes de correlación no selectiva calculados para la diversidad en el espacio (véase el § 6.2.2.1) y la diversidad en frecuencia (véase el § 6.2.2.2), respectivamente.

Los pasos siguientes son los mismos que los aplicados para diversidad en el espacio.

#### 6.2.2.5 Predicción de la interrupción de la transmisión utilizando diversidad en el espacio y en frecuencia (cuatro receptores)

*Paso 1:* Calcúlese  $\eta$  como en el Paso 2 del § 4.1.

*Paso 2:* Calcúlese el parámetro de diversidad,  $m_{ns}$ , como sigue:

$$m_{ns} = \eta^3 \left( 1 - k_{ns,s}^2 \right) \left( 1 - k_{ns,f}^2 \right) \quad (84)$$

donde  $k_{ns,s}$  y  $k_{ns,f}$  se obtienen del mismo modo que en el § 6.2.2.4.

*Paso 3:* Calcúlese la probabilidad de interrupción de la transmisión no selectiva,  $P_{dns}$  como sigue:

$$P_{dns} = \frac{P_{ns}^4}{m_{ns}} \quad (85)$$

donde  $P_{ns}$  se obtiene de la ecuación (29).

*Paso 4:* Calcúlese el cuadrado del coeficiente de correlación no selectiva equivalente,  $k_{ns}$ , como sigue:

$$k_{ns}^2 = 1 - \sqrt{\eta} \left( 1 - k_{ns,s}^2 \right) \left( 1 - k_{ns,f}^2 \right) \quad (86)$$

*Paso 5:* Calcúlese el coeficiente de correlación selectiva equivalente,  $k_s$ , utilizando el mismo procedimiento que para la diversidad en el espacio (Paso 3).

*Paso 6:* Se obtiene la probabilidad de interrupción de la transmisión selectiva,  $P_{ds}$  mediante la siguiente expresión:

$$P_{ds} = \left[ \frac{P_s^2}{\eta \left( 1 - k_s^2 \right)} \right]^2 \quad (87)$$

donde  $P_s$  es la probabilidad de interrupción de la transmisión no protegida dada por la ecuación (64).

*Paso 7:* Obténgase, a continuación, la probabilidad total de interrupción de la transmisión,  $P_d$  utilizando la ecuación (73).

## 7 Predicción de la interrupción total de la transmisión

Calcúlese la probabilidad total de interrupción de la transmisión debida a los efectos de situación de cielo despejado mediante la siguiente expresión:

$$P_t = \begin{cases} P_{ns} + P_s + P_{XP} \\ P_d + P_{XP} \end{cases} \quad \text{si se utiliza diversidad} \quad (88)$$

obtenida aplicando los métodos indicados en los § 2.3.6, 4.1, 5.1 y 6.2.2.

La probabilidad total de interrupción de la transmisión debida a la lluvia se calcula formando el mayor de los valores  $P_{lluvia}$  y  $P_{XPR}$  obtenida aplicando los métodos indicados en los § 2.4.6 y 4.2.2.

Los métodos de predicción de la interrupción dados para los sistemas radioeléctricos digitales se han elaborado definiendo la interrupción de la transmisión como una BER superior a un determinado valor (por ejemplo,  $1 \times 10^{-3}$ ), para cumplir los requisitos establecidos en la Recomendación UIT-T G.821. La interrupción de la transmisión se atribuye a característica de error y disponibilidad (véanse las Recomendaciones UIT-R F.594, UIT-R F.634, UIT-R F.695, UIT-R F.696, UIT-R F.697, UIT-R F.1092, UIT-R F.1189 y UIT-R F.557). La interrupción de la transmisión ocasionada por una situación de cielo despejado se atribuye en su mayor parte a la calidad de funcionamiento (característica de error) mientras que la interrupción debida a la lluvia se atribuye sobre todo a la disponibilidad. No obstante, es probable que los efectos con cielo despejado también contribuyan a la disponibilidad y las precipitaciones contribuyan a la característica de error.

Si se han de cumplir los requisitos de la Recomendación UIT-T G.826, es necesario contar con métodos de predicción que se basen en la estimación de errores de bloque, en lugar de bits erróneos. Para satisfacer dichos requisitos se debe diseñar el enlace utilizando los métodos descritos en el Anexo 2.

## 8 Aspectos de la propagación relativos a la puesta en servicio

Al efectuar pruebas cuando se pone en servicio un sistema conforme a la Recomendación UIT-R F.1330, conviene evitar las épocas del año y las horas del día en que es más probable la aparición de la propagación multitrayecto.

Los estudios efectuados en climas templados indican que la probabilidad mínima de aparición de los efectos de la propagación multitrayecto se da en el invierno y en los dos meses que le preceden. Para las pruebas que deban efectuarse en verano, el periodo del día en el que se ha observado la probabilidad mínima de dichos efectos era entre las 1000 y las 1400 h locales. Es razonable suponer que ocurra lo mismo en otras estaciones.

### APÉNDICE 1

#### AL ANEXO 1

#### **Método de determinación del factor geoclimático, $K$ , a partir de datos de desvanecimiento medidos sobre trayectos terrenales en tierra**

*Paso 1:* Obténgase la distribución del desvanecimiento de la envolvente durante el mes civil más desfavorable de cada año de funcionamiento, utilizando como referencia el valor mediano a largo plazo. Promédiense esos valores para obtener la distribución acumulativa del desvanecimiento durante el mes medio más desfavorable, y representéense en un gráfico semilogarítmico.

*Paso 2:* En el gráfico, anótese la profundidad de desvanecimiento,  $A_1$ , a partir de la cual la distribución acumulativa es aproximadamente lineal y obténgase el correspondiente porcentaje de tiempo,  $p_1$ . Esta porción lineal constituye la ancha cola de la profundidad de desvanecimiento, cuya pendiente puede variar hasta 3 ó 4 dB/década con respecto al valor «Rayleigh» promediado de 10 dB/década, dependiendo la amplitud de esa variación del número de años de datos contenidos en la distribución media.

*Paso 3:* Calcúlese la inclinación del trayecto,  $|\varepsilon_p|$ , mediante la ecuación (6).

*Paso 4:* Inclúyanse las coordenadas  $(p_1, A_1)$  del «primer punto de la cola» en la ecuación (7) o la (8) según el caso, junto con los valores de  $d, f, |\varepsilon_p|$  y calcúlese el factor geoclimático,  $K$ .

*Paso 5:* Si se dispone de datos para varios trayectos procedentes de una región de clima y terrenos similares, o para varias frecuencias, etc., en un trayecto único, deberá obtenerse un factor geoclimático medio promediando los valores de  $\log K$ .

### ANEXO 2

#### **Predicción de la característica de error y de la disponibilidad de los enlaces radioeléctricos de jerarquía digital síncrona con visibilidad directa**

##### 1 Introducción

Las redes de jerarquía digital síncrona (SDH), o las redes ópticas síncronas (SONET, *synchronous optical networks*) admiten actualmente sistemas de enlaces radioeléctricos con capacidades en modo de transferencia síncrono de 51 Mbit/s (STM-0) a 622 Mbit/s (STM-4). En las

Recomendaciones y Normas Internacionales se definen los objetivos de característica de error y disponibilidad para las redes SDH. Estos objetivos son independientes de los medios y deben alcanzarse igualmente cuando las radiocomunicaciones están integradas en la red.

Los métodos de predicción que se proporcionan en el presente Anexo están basados en una relación en términos teóricos entre la BER y los nuevos parámetros SDH basados en los bloques con errores. Los métodos tienen en cuenta las características del sistema, tales como las ráfagas de errores, y también los parámetros necesarios para predecir el tiempo de interrupción sobre la base de la BER.

## 2 Objetivos de la característica de error y de la disponibilidad

En las Recomendaciones UIT-T G.826 y UIT-T G.827 se indican los valores exigidos de la característica de error y de disponibilidad respectivamente. Puesto que en dichas Recomendaciones se dan los objetivos de calidad de extremo a extremo, se necesitan otras Recomendaciones relativas a los enlaces radioeléctricos reales. Para repartir los márgenes de tolerancia entre cada uno de los trayectos, con longitudes de sección y radiofrecuencias de explotación reales, deben publicarse, por tanto, otras Recomendaciones que aborden las radiocomunicaciones como elementos de la red SDH.

### 2.1 Parámetros de la característica de error y de la disponibilidad

En la Recomendación UIT-T G.826 se define un conjunto de sucesos y parámetros de la característica de error basados en bloques para la supervisión de la característica de error en servicio de un trayecto SDH (véase la Nota 1). Un bloque con errores es aquel que tiene uno o más bits erróneos. Un segundo con errores (ES, *errored second*) se produce si hay uno o más bloques con errores o al menos un defecto tal como la pérdida de puntero (LoP, *loss of pointer*). Un segundo con muchos errores (SES, *severely errored second*) se produce si hay un 30% o más de bloques con errores, o un defecto. Un bloque con errores de fondo (BBE) es un bloque con errores que no forma parte de un SES. Los parámetros definidos son la tasa de segundos con muchos errores (SESR, *severely errored second ratio*), la tasa de bloques con errores de fondo (BBER, *background block error ratio*) y la tasa de segundos con errores (ESR, *errored second ratio*).

NOTA 1 – Un trayecto SDH es un camino por el que se transporta la cabida útil SDH y la tara asociada a través de la red de transporte por capas hasta el equipo de terminación del trayecto. Un trayecto digital puede ser bidireccional o unidireccional y puede comprender tramos pertenecientes al cliente y al operador de la red (para obtener más información, véanse las Recomendaciones UIT-T G.803, UIT-T G.805 y UIT-T G.828).

La definición del tamaño de los bloques y de los sucesos de la característica de error para la sección de multiplexación (MS, *multiplex section*) y la sección de regeneración (RS, *regenerator section*) SDH se indica en la Recomendación UIT-T G.829. Los parámetros y objetivos de la característica de error para la MS y la RS de SDH en secciones digitales de radioenlaces figuran en las Recomendaciones UIT-R de la Serie F.

Cada sentido de un trayecto puede estar en uno de estos dos estados, tiempo de disponibilidad o tiempo de no disponibilidad. Los criterios que determinan la transición entre los dos estados son los siguientes: un periodo de tiempo de no disponibilidad comienza con el inicio de sucesos de 10 SES consecutivos. Estos 10 s se consideran parte del tiempo de no disponibilidad. Un nuevo periodo de tiempo de disponibilidad comienza con el inicio de sucesos de 10 s consecutivos que no sean SES. Estos 10 s se consideran parte del tiempo de disponibilidad. Un trayecto está disponible única y exclusivamente si ambos sentidos están disponibles.

Los parámetros de disponibilidad definidos son: la tasa de disponibilidad ( $AR$ , *availability ratio*) y el tiempo medio entre interrupciones de trayecto digital,  $Mo$ . Lo contrario de  $AR$  es la tasa de no disponibilidad ( $UR$ , *unavailability ratio*). Por consiguiente,  $AR + UR = 1$ . El inverso del  $Mo$  se define como la intensidad de la interrupción ( $OI$ , *outage intensity*). Por consiguiente,  $OI = 1/Mo$ .  $OI$  se considera el número de periodos de no disponibilidad por año.

NOTA 2 – El umbral del 30% de bloques con errores para trayectos SDH se define en la Recomendación UIT-T G.826, mientras que para MS y RS de SDH, el valor umbral se define en la Recomendación UIT-T G.829.

## 2.2 Objetivos para los trayectos digitales de relevadores radioeléctricos

Los objetivos de la característica de error para los trayectos digitales que funcionan a la velocidad primaria o por encima de ella (2,048 ó 1,544 Mbit/s) son diferentes para los tramos nacionales e internacionales. Los objetivos especificados deben alcanzarse cada mes. El UIT-R ha adoptado objetivos tanto para trayectos nacionales (véase la Recomendación UIT-R F.1189) como para trayectos internacionales (véase la Recomendación UIT-R F.1092). Para el tramo nacional se ha hecho una subdivisión en tres secciones, que son las secciones de la red de larga distancia, de corta distancia y de acceso. La atribución de objetivos de la característica de error a las secciones de corta distancia y de acceso se establecerá en una cantidad fija de bloques que represente entre el 7,5% y el 8,5% de los objetivos de extremo a extremo. La atribución de objetivos a la sección de larga distancia se establecerá en base a una distancia por cada 500 km y una cantidad fija de bloques que represente entre el 1% y el 2% de los objetivos de extremo a extremo. Para repartir estos objetivos entre los radioenlaces digitales reales compuestos de uno o más saltos, deben utilizarse las Recomendaciones UIT-R F.1397 y UIT-R F.1491 en los tramos internacional y nacional, respectivamente.

Los objetivos de disponibilidad se definen en la Recomendación UIT-T G.827. Sin embargo, el UIT-R ha utilizado el objetivo del 99,7% de tiempo de disponibilidad en un año para un trayecto de referencia de 2500 km (véase la Recomendación UIT-R F.557). El 0,3% de tiempo de no disponibilidad se divide linealmente (por km) en enlaces individuales de alta calidad (véase la Recomendación UIT-R F.695) que cubren de 280 a 2500 km, con 0,033% para los 280 km restantes. Para los enlaces que forman parte de trayectos SDH y que funcionan a la velocidad primaria o por encima de ella. En relación con los radioenlaces digitales reales compuestos de uno o más saltos, los objetivos se definen en las Recomendaciones UIT-R F.1492 y UIT-R F.1493 según se trate del tramo internacional o nacional, respectivamente.

## 3 Predicción de la característica de error y de la disponibilidad

La relación entre los parámetros de característica de error y la BER se calcula empleando tanto distribuciones aleatorias (Poisson) como distribuciones de ráfagas de errores (Neyman-A). Los sistemas modernos de transmisión radioeléctrica, que funcionan con esquemas de modulación complejos, códigos de corrección de errores, ecualizadores, etc. tienden a producir cúmulos o ráfagas de errores (véase la Nota 1). Los valores típicos de modulación de alto nivel (por ejemplo, 128-TCM (modulación de código reticular, *trellis code modulation*)) son 10 a 20 errores por ráfaga.

NOTA 1 – Una ráfaga de errores se define como una secuencia de errores que comienza y termina con un bit erróneo siendo el tiempo entre dos errores inferior a la memoria del sistema (por ejemplo, longitud de limitación del código convolucional, tamaño del código de bloque, etc.).

Los nuevos métodos de predicción SDH están basados en hipótesis teóricas que ponen en relación la BER, que es el parámetro fundamental de los métodos de predicción existentes, con los eventos de característica de error ES, SES y BBE. Puesto que los métodos están basados en la BER, abarcan

automáticamente la propagación por trayectos múltiples y la atenuación debida a la lluvia. A continuación se da información de referencia seguida de los procedimientos de cálculo paso a paso.

Los métodos de predicción para la SDH pueden también utilizarse para la jerarquía digital pliesiocróna (PDH) con las alternativas siguientes:

- utilización de la  $BER_{SES}$  más próxima a la velocidad de transmisión (Mbit/s), por ejemplo, un VC-12 para un enlace radioeléctrico PDH a 2 Mbit/s;
- utilización de la  $BER_{SES}$  que figura en el Cuadro 2 (la  $BER_{SES}$  se está estudiando para la PDH, pero sólo se prevén diferencias menores).

### 3.1 Predicción de la SESR

El procedimiento de predicción de la SESR se basa en la relación entre la SES y la BER, y los métodos para predecir la interrupción definida por una BER especificada se dan en el Anexo 1. En general, la predicción de la SESR se realiza aplicando la siguiente fórmula:

$$SESR = \int_{BER_A}^{BER_B} f_{SES}(x) g_{BER}(x) dx \quad (89)$$

donde:

$f_{SES}(x)$ : relación entre SES y la BER

$g_{BER}(x)$ : función de densidad de probabilidad (PDF, *probability density function*) de la BER

$BER_A$  y  $BER_B$ : límites de integración (cuyos valores típicos son  $1 \times 10^{-9}$  and  $1 \times 10^{-3}$ ).

#### 3.1.1 Predicción de la SESR debida a los efectos de la propagación por trayectos múltiples

El parámetro SESR viene dado por la ecuación (89), cuyo segundo término es la PDF de la BER. En el caso de la propagación por trayectos múltiples, la BER está estrechamente relacionada con la probabilidad de interrupción,  $P_t$ , evaluada con los métodos del Anexo 1. Utilizando los procedimientos apropiados al sistema de transmisión considerado, puede obtenerse la probabilidad de interrupción,  $P_t$ , en función de la BER (véase la Fig. 7). La función  $g_{BER}$  se obtiene a partir de la Fig. 7, esto es,  $g_{BER} = dP_t/dBER$ .

En general, los valores de probabilidad de interrupción se calculan sólo para algunos valores de la BER cuando se conocen las características y el umbral del equipo. Si se dispone de un conjunto amplio de valores de BER, puede obtenerse una curva más precisa.

La evaluación de la SESR se realiza en dos pasos, uno que consiste en determinar la cantidad de SES debidos a bloques con errores y otro que consiste en obtener la parte, con frecuencia insignificante, correspondiente a LoP.

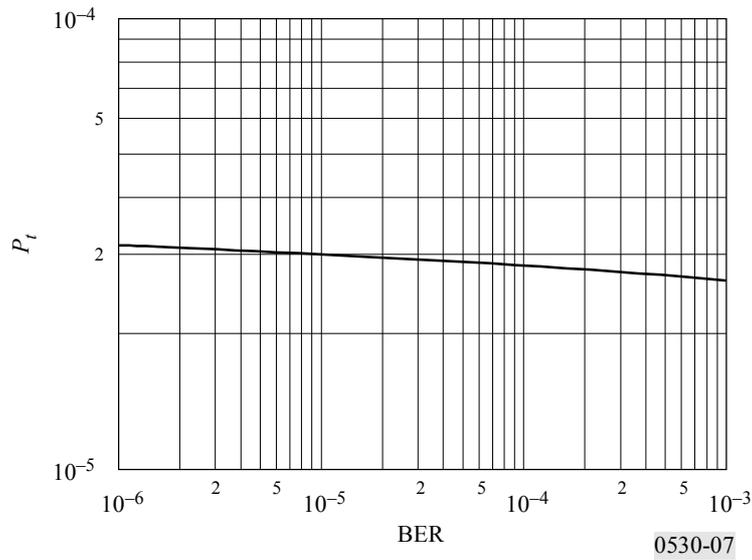
Puede obtenerse una aproximación de la curva de SES debida a los bloques con errores por medio de una función escalón. El valor de la BER cuando la probabilidad de SES cambia de 0 a 1 se indica con  $BER_{SES}$ .

$$f_{SES}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } BER < BER_{SES} \\ 1 & \text{para } BER \geq BER_{SES} \end{cases} \quad (90)$$

El valor de la  $BER_{SES}$  normalizada con el número medio de errores por ráfaga,  $m$  ( $m = 1$  para la distribución de Poisson) se indica en el Cuadro 2.

FIGURA 7

Probabilidad de interrupción,  $P_i$ , en función de la BER debida a la propagación por trayectos múltiples



CUADRO 2

$BER_{SES}$  para diferentes trayectos SDH y secciones MS

Tipo de trayecto	Velocidad binaria sustentada (Mbit/s)	$BER_{SES}^{(1), (2)}$	Bloques/s, $n^{(2)}$	Bits/bloque, $N_B^{(2)}$
VC-11	1.5	$5,4 \times 10^{-4} \alpha$	2 000	832
VC-12	2	$4,0 \times 10^{-4} \alpha$	2 000	1 120
VC-2	6	$1,3 \times 10^{-4} \alpha$	2 000	3 424
VC-3	34	$6,5 \times 10^{-5} \alpha$	8 000	6 120
VC-4	140	$2,1 \times 10^{-5} \alpha$	8 000	18 792
STM-1	155	$2,3 \times 10^{-5} \alpha$ $1,3 \times 10^{-5} \alpha + 2,2 \times 10^{-4}$	8 000 192 000	19 940 801

(1)  $\alpha = 1$  indica una distribución de errores de Poisson.

(2) Los bloques por segundo se definen en la Recomendación UIT-T G.826 para los trayectos SDH y en la Recomendación UIT-T G.829 para las secciones SDH. Algunos equipos STM-1 pueden diseñarse con 8 000 bloques/s. (19 940 bits/bloque), pero la Recomendación UIT-T G.829 define la velocidad de bloques y el tamaño del bloque como 192 000 bloques/s y 801 bits/bloque, respectivamente.

Teniendo en cuenta la ecuación (90), en el caso de SES debidos a bloques con errores, la ecuación (89) se convierte en la siguiente:

$$SESR = \int_{BER_A}^{BER_B} f_{SES}(x) g_{BER}(x) dx = P_t(BER_{SES}) \quad (91)$$

*Límite superior de los SES debidos a la LoP*

Para evaluar el límite superior,  $SESR_{LoPu}$ , se supone que la probabilidad de SES para valores de BER inferiores a  $BER_{SES}$  es una constante. Con ello:

$$SESR_{LoPu} = P(SES | BER = BER_{SES}) (1 - P_t(BER_{SES})) \quad (92)$$

NOTA 1 – Se ha comprobado que la contribución de la LoP es irrelevante y, por consiguiente, puede ignorarse.

### 3.1.1.1 Procedimiento paso a paso para el cálculo de los SESR debidos a la propagación por trayectos múltiples

*Paso 1:* Calcular la probabilidad de interrupción,  $P_{tSES}$  para  $BER = BER_{SES}$  en el sistema adecuado utilizando los métodos de predicción de la interrupción descritos en el Anexo 1.

$$SESR = P_{tSES} = P_t(BER_{SES}) \quad (93)$$

$BER_{SES}$  se indica en el Cuadro 2.

### 3.1.2 Predicción de la SESR debida a la atenuación por la lluvia

La lluvia puede producir una atenuación grave. En la mayor parte del tiempo,  $X\%$ , en que la atenuación causada por la lluvia sobrepase el umbral,  $A_{SES}$ , se producirá una situación de no disponibilidad. El resto del tiempo,  $100 - X\% = Y\%$ , se considera tiempo de disponibilidad que eleva el número de SES. La división entre tiempo de disponibilidad y de no disponibilidad para cada región climática debe obtenerse a partir de mediciones experimentales.

El proceso de obtención de la SESR debida a la lluvia exige encontrar el margen de atenuación,  $A_{SES}$ , del enlace radioeléctrico para una BER,  $BER_{SES}$ , cuando todos los segundos son SES. Entonces es posible evaluar el porcentaje de tiempo del mes más desfavorable durante el cual la atenuación causada por lluvia sobrepasa dicho margen, y finalmente calcular el correspondiente porcentaje de tiempo anual. El valor de la SESR debida a la lluvia será el  $Y\%$  de esa probabilidad.

#### 3.1.2.1 Procedimiento paso a paso para el cálculo de la SESR debida a la atenuación por la lluvia

A continuación se proporciona un procedimiento paso a paso para evaluar la SESR debida a la lluvia. Los parámetros de entrada son: frecuencia, longitud de la sección, polarización, zona hidrometeorológica, potencia de transmisión, ganancia de la antena transmisora, ganancia de la antena receptora, relación entre la potencia de recepción y la BER, tipo de trayecto SDH y duración de la ráfaga de errores.

*Paso 1:* Calcular la atenuación debida a la lluvia excedida durante el 0,01% del tiempo,  $A_{0,01}$ , utilizando el método del § 2.4.1 del Anexo 1.

*Paso 2:* Calcular la potencia de recepción nominal sin atenuación causada por la lluvia,  $P_{RXnominal}$ .

*Paso 3:* Utilizar la relación entre la potencia de recepción y la BER (normalmente proporcionada por los fabricantes de equipo) para obtener el valor de  $A_{SES}$ , siendo  $A_{SES}$  el margen de atenuación del enlace radioeléctrico para  $BER = BER_{SES}$  (véase el Cuadro 2).

*Paso 4:* Calcular el porcentaje de tiempo anual,  $p_{aSES}$ , durante el cual la atenuación debida a la lluvia es superior a  $A_{SES}$ , utilizando el método del § 2.4.1 del Anexo 1.

*Paso 5:* Convertir el porcentaje de tiempo anual,  $p_{aSES}$ , en porcentaje del mes más desfavorable,  $p_{wSES}$ , utilizando el método de la Recomendación UIT-R P.841.

*Paso 6:* Calcular la SESR con la siguiente ecuación:

$$SESR = Y(\%) P_{wSES} \quad (94)$$

siendo  $P_{wSES}$  la probabilidad del mes más desfavorable ( $P_{wSES} = p_{wSES} / 100$ ).

NOTA 1 – El valor de  $X$  está siendo objeto de estudio; por el momento, se propone  $Y = 0\%$ .

### 3.2 Predicción de la BBER

La BBER se evalúa para situaciones de propagación por trayectos múltiples y condiciones de lluvia a partir de:

$$BBER = \int_{BER_A}^{BER_B} f_{BBER}(x) g_{BER}(x) dx \quad (95)$$

donde:

$f_{BBER}(x)$ : relación entre BBER y BER

$g_{BER}(x)$ : PDF de BER

$BER_A$  y  $BER_B$ : límites de integración (cuyos valores típicos son  $1 \times 10^{-12}$  et  $1 \times 10^{-3}$ ).

#### 3.2.1 Predicción de la BBER debida a la propagación por trayectos múltiples

Pueden utilizarse dos métodos alternativos: uno de ellos, completo, se basa en la solución analítica de la integral de la ecuación (95), derivándose  $g_{BER}(x)$  del modelo de predicción de la interrupción (véase la Fig. 7) siendo  $f_{BBER}(x)$  la relación teórica BBE debida a la BER. El otro es un método simplificado basado en la aproximación de  $f_{BBER}(x)$  y  $g_{BER}(x)$ .

##### 3.2.1.1 Procedimiento paso a paso para calcular la BBER debida a la propagación por trayectos múltiples

En este punto se presenta un procedimiento paso a paso basado en el modelo de predicción simplificado.

*Paso 1:* Calcular la probabilidad de interrupción,  $P_{tR}$ , para la BER residual (BER-R, en inglés: RBER) (normalmente en la gama de  $1 \times 10^{-10}$  et  $1 \times 10^{-13}$  para velocidades binarias de 2 Mbit/s a 155 Mbit/s respectivamente), utilizando los métodos de predicción de la interrupción descritos en el Anexo 1 para el sistema adecuado:

$$P_{tR} = P_t(RBER) \quad (96)$$

*Paso 2:* Calcular la probabilidad de interrupción con  $BER = BER_{SES}$  como en el Paso 1:

$$P_{tSES} = P_t(BER_{SES}) \quad (97)$$

$BER_{SES}$  se indica en el Cuadro 2.

*Paso 3:* Calcular la SESR como en el Paso 1 para la propagación por trayectos múltiples (véase el § 3.1.1.1):

$$SESR = P_{tSES} = P_t(BER_{SES}) \quad (98)$$

*Paso 4:* Calcular la BBER a partir de:

$$BBER = SESR \frac{\alpha_1}{2,8 \alpha_2 (m - 1)} + \frac{N_B RBER}{\alpha_3} \quad (99)$$

donde:

$\alpha_1 =$  10 a 30, número de errores por ráfaga para una BER entre  $1 \times 10^{-3}$  y  $BER_{SES}$

$\alpha_2 =$  1 a 10, número de errores por ráfaga para una BER entre  $BER_{SES}$  y RBER

$\alpha_3 =$  1, es el número de errores por ráfaga para una BER inferior a la RBER

$N_B$ : número de bits/bloque (véase el Cuadro 2)

$m$ : pendiente de la curva de distribución de la BER en una escala logarítmica doble para una BER entre  $BER_{SES}$  y RBER, y viene dada por:

$$m = \left| \frac{\log_{10}(RBER) - \log_{10}(BER_{SES})}{\log_{10}(P_{IR}) - \log_{10}(P_{ISES})} \right| \quad (100)$$

### 3.2.2 Predicción de la BBER debida a la atenuación por la lluvia

El modelo de predicción de la BBER debida a la lluvia se basa en la relación entre el modelo de atenuación debida a la lluvia del UIT-R y la BER en función de la relación  $C/N$  del sistema de transmisión que se esté analizando.

#### 3.2.2.1 Procedimiento paso a paso para el cálculo de la BBER debida a la atenuación por la lluvia

Los parámetros de entrada son: frecuencia, longitud de la sección, polarización, zona hidrometeorológica, potencia de transmisión, ganancia de la antena transmisora, ganancia de la antena receptora, relación entre la potencia de recepción y la BER, tipo de trayecto SDH y duración de la ráfaga de errores.

*Paso 1:* Calcular la atenuación debida a la lluvia excedida durante el 0,01% del tiempo,  $A_{0,01}$ , utilizando el método del § 2.4.1 del Anexo 1.

*Paso 2:* Calcular la potencia de recepción nominal sin atenuación debida a la lluvia,  $P_{RXnominal}$ .

*Paso 3:* Utilizar la relación entre la potencia de recepción y la BER (normalmente proporcionada por los fabricantes de equipo) para obtener el valor de  $A_{SES}$ , siendo  $A_{SES}$  el margen de atenuación del enlace radioeléctrico para  $BER = BER_{SES}$  (véase el Cuadro 2).

*Paso 4:* Calcular el porcentaje de tiempo anual,  $p_{aSES}$ , durante el cual la atenuación debida a la lluvia es superior a  $A_{SES}$ , utilizando el método del § 2.4.1 del Anexo 1.

*Paso 5:* Convertir el porcentaje de tiempo anual,  $p_{aSES}$  en porcentaje del mes más desfavorable,  $p_{wSES}$ , utilizando el método de la Recomendación UIT-R P.841.

*Paso 6:* Utilizar la relación entre la potencia de recepción y la BER (normalmente proporcionada por los fabricantes de equipo) para obtener el valor de  $A_R$ , siendo  $A_R$  el margen de atenuación del enlace radioeléctrico para RBER).

*Paso 7:* Calcular el porcentaje de tiempo anual,  $p_{aR}$ , durante el cual la atenuación debida a la lluvia es superior a  $A_R$ , utilizando el método del § 2.4.1 del Anexo 1.

*Paso 8:* Convertir el porcentaje de tiempo anual,  $p_{aR}$ , en porcentaje del mes más desfavorable,  $p_{wR}$ , utilizando el método de la Recomendación UIT-R P.841.

*Paso 9:* Transformar los porcentajes del mes más desfavorables,  $p_{wSES}$  y  $p_{wR}$ , en las probabilidades correspondientes,  $P_{wSES}$  y  $P_{wR}$ , donde: ( $P_{wSES} = p_{wSES} / 100$  y  $P_{wR} = p_{wR} / 100$ ).

*Paso 10:* Calcular la BBER a partir de:

$$BBER = SESR \frac{\alpha_1}{2,8 \alpha_2 (m - 1)} + \frac{N_B RBER}{\alpha_3} \quad (101)$$

donde:

SESR se obtiene de la ecuación (94)

y

$\alpha_1 =$  1 a 30, número de errores por ráfaga para una BER entre  $1 \times 10^{-3}$  y  $BER_{SES}$

$\alpha_2 =$  1 a 20, número de errores por ráfaga para una BER entre  $BER_{SES}$  y RBER, donde  $\alpha_1/\alpha_2 \leq 2$

$\alpha_3 =$  1, número de errores por ráfaga para una BER igual a o inferior a la RBER

$N_B$ : número de bits/bloque (véase el Cuadro 2)

$m$ : pendiente de la curva de distribución de la BER en una escala logarítmica doble para una BER entre  $BER_{SES}$  y RBER, y viene dada por:

$$m = \left| \frac{\log_{10} (RBER) - \log_{10} (BER_{SES})}{\log_{10} (P_{wR}) - \log_{10} (P_{wSES})} \right| \quad (102)$$

### 3.3 Predicción de la ESR

La ESR se evalúa para condiciones de propagación por trayectos múltiples y de lluvia a partir de:

$$ESR = \int_{BER_A}^{BER_B} f_{ESR}(x) g_{BER}(x) dx \quad (103)$$

donde:

$f_{ESR}(x)$ : relación entre la ES y la BER

$g_{BER}(x)$ : PDF de la BER

$BER_A$  y  $BER_B$ : límites de integración (cuyos valores típicos son  $1 \times 10^{-12}$  y  $1 \times 10^{-3}$ ).

#### 3.3.1 Predicción de ESR debida a la propagación por trayectos múltiples

El método de predicción de ESR está basado en una aproximación de la integral (ecuación (103)).

##### 3.3.1.1 Procedimiento paso a paso para calcular la ESR debida a la propagación multitrayecto

A continuación se ofrece un procedimiento paso a paso para evaluar la ESR debida a la propagación multitrayecto.

*Paso 1:* Calcular la probabilidad de interrupción,  $P_{tR}$ , para la RBER, utilizando los métodos de predicción de interrupción descritos en el Anexo 1 para el sistema adecuado:

$$P_{tR} = P_t(RBER) \quad (104)$$

*Paso 2:* Calcular la probabilidad de interrupción cuando  $BER = BER_{SES}$ , como en el Paso 1:

$$P_{tSES} = P_t(BER_{SES}) \quad (105)$$

$BER_{SES}$  se indica en el Cuadro 2.

*Paso 3:* Calcular la SESR a partir de:

$$SESR = P_{tSES} = P_t(BER_{SES}) \quad (106)$$

*Paso 4:* Calcular la ESR a partir de:

$$ESR = SESR \sqrt[m]{n} + \frac{n N_B RBER}{\alpha_3} \quad (107)$$

siendo:

$\alpha_3 = 1$ , número de errores por ráfaga para una BER inferior a RBER

$N_B$ : número de bits/bloque (véase el Cuadro 2)

$n$ : número de bloques/s (véase el Cuadro 2)

$m$ : pendiente de la curva de distribución de la BER en una escala logarítmica doble para una BER entre  $BER_{SES}$  y RBER, y viene dada por:

$$m = \left| \frac{\log_{10}(RBER) - \log_{10}(BER_{SES})}{\log_{10}(P_{tR}) - \log_{10}(P_{tSES})} \right| \quad (108)$$

### 3.3.2 Predicción de ESR debida a la atenuación causada por la lluvia

El modelo de predicción de la ESR debida a la lluvia se basa en la relación entre el modelo de atenuación debida a la lluvia del UIT-R y la BER en función de la relación  $C/N$  del sistema de transmisión que se esté analizando.

#### 3.3.2.1 Procedimiento paso a paso para el cálculo de la ESR debida a la lluvia

Los parámetros de entrada son: frecuencia, longitud de la sección, polarización, zona hidrometeorológica, potencia de transmisión, ganancia de la antena transmisora, ganancia de la antena receptora, relación entre la potencia de recepción y la BER, tipo de trayecto SDH y duración de la ráfaga de errores.

*Paso 1:* Calcular la atenuación debida a la lluvia excedida durante el 0,01% del tiempo,  $A_{0,01}$ , utilizando el método del Anexo 1.

*Paso 2:* Calcular la potencia de recepción nominal sin atenuación debida a la lluvia,  $P_{RXnominal}$ .

*Paso 3:* Utilizar la relación entre la potencia de recepción y la BER (normalmente proporcionada por los fabricantes de equipo) para obtener el valor de  $A_{SES}$ , siendo  $A_{SES}$  el margen de atenuación del enlace radioeléctrico para  $BER = BER_{SES}$  (véase el Cuadro 2).

*Paso 4:* Calcular el porcentaje de tiempo anual,  $p_{aSES}$ , durante el cual la atenuación debida a la lluvia es superior a  $A_{SES}$ , utilizando el método del Anexo 1.

*Paso 5:* Convertir el porcentaje de tiempo anual,  $p_{aSES}$ , en porcentaje del mes más desfavorable,  $p_{wSES}$ , utilizando el método de la Recomendación UIT-R P.841.

*Paso 6:* Utilizar la relación entre la potencia de recepción y la BER (normalmente proporcionada por los fabricantes de equipo) para obtener el valor de  $A_R$ , siendo  $A_R$  el margen de atenuación del enlace radioeléctrico para RBER.

*Paso 7:* Calcular el porcentaje de tiempo anual,  $p_{aR}$ , durante el cual la atenuación debida a la lluvia es superior a  $A_R$ , utilizando el método del Anexo 1.

*Paso 8:* Convertir el porcentaje de tiempo anual,  $p_{aR}$ , en porcentaje del mes más desfavorable,  $p_{wR}$ , utilizando el método de la Recomendación UIT-R P.841.

*Paso 9:* Transformar los porcentajes del mes más desfavorable,  $p_{wSES}$  y  $p_{wR}$ , en las probabilidades correspondientes,  $P_{wSES}$  y  $P_{wR}$ , de forma que:

$$P_{wSES} = p_{wSES} / 100 \text{ y } P_{wR} = p_{wR} / 100$$

*Paso 10:* Calcular la ESR a partir de:

$$ESR = SESR \sqrt[m]{n} + \frac{n N_B RBER}{\alpha_3} \quad (109)$$

donde:

SESR se obtiene de la ecuación (94), y

$\alpha_3 = 1$ , número de errores por ráfaga para una BER inferior a la RBER

$N_B$ : número de bits/bloque (véase el Cuadro 2)

$n$ : número de bloques/s (véase el Cuadro 2)

$m$ : pendiente de la curva de distribución de la BER en una escala logarítmica doble cuando la BER está entre  $BER_{SES}$  y RBER, y viene dada por:

$$m = \left| \frac{\log_{10}(RBER) - \log_{10}(BER_{SES})}{\log_{10}(P_{wR}) - \log_{10}(P_{wSES})} \right| \quad (110)$$

### 3.4 Predicción de la no disponibilidad debida a efectos de propagación

De acuerdo con la actual definición, la no disponibilidad se produce a causa de largos periodos de SES. Un sistema radioeléctrico puede estar en estado disponible o en estado no disponible. Si el sistema está en estado disponible y el periodo de SES es superior a 10 s consecutivos, el sistema cambiará al estado no disponible y el periodo de SES se convertirá en tiempo de no disponibilidad. Si el sistema está en estado no disponible, el requisito para cambiar a estado disponible es un periodo de 10 s consecutivos sin SES. Por ahora se supone que sólo los desvanecimientos debidos a la lluvia producen un tiempo de no disponibilidad. Por consiguiente, es sencillo calcular la no disponibilidad debida a la atenuación por la lluvia utilizando el método para la SESR debida a la lluvia (véanse los § 3.1.2 y 3.1.2.1).

Si  $Y = 0\%$  (véase la Nota 1 del § 3.1.2.1), la relación de no disponibilidad,  $UR = P_{aSES}$  para la atenuación debida a la lluvia, donde  $P_{aSES} = p_{aSES} / 100$  (véase el Paso 4 del § 3.1.2.1).

Es un hecho bien conocido que también el desvanecimiento debido a la propagación multitrayecto puede contribuir a los sucesos de no disponibilidad. No obstante, por el momento no hay un método aceptado de predicción de la no disponibilidad debida a la propagación multitrayecto u otros efectos en cielo despejado.