

RECOMENDACIÓN UIT-R P.681-6*

Datos de propagación necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicaciones móviles terrestres Tierra-espacio

(Cuestión UIT-R 207/3)

(1990-1994-1995-1997-1999-2001-2003)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que para la planificación adecuada de los sistemas móviles terrestres Tierra-espacio es necesario disponer de datos de propagación y métodos de predicción adecuados;
- b) que se recomiendan los métodos de la Recomendación UIT-R P.618 para la planificación de los sistemas de telecomunicaciones Tierra-espacio;
- c) que es necesario desarrollar aún más los métodos de predicción para la aplicación específica a los sistemas móviles terrestres por satélite con el fin de ofrecer la precisión adecuada en todas las regiones del mundo y para todas las condiciones de explotación;
- d) que, sin embargo, se dispone de métodos que permiten obtener una precisión suficiente para muchas aplicaciones,

recomienda

1 que se adopten los métodos indicados en el Anexo 1 para la planificación de los sistemas de telecomunicaciones móviles terrestres Tierra-espacio, además de los métodos señalados en la Recomendación UIT-R P.618.

Anexo 1**1 Introducción**

Los efectos de propagación en el servicio móvil terrestre por satélite (SMTS) difieren de los del servicio fijo por satélite (SFS) debido, fundamentalmente, a la mayor importancia de las irregularidades del terreno. En el SFS normalmente es posible introducir una discriminación frente a los efectos de trayectos múltiples, sombra por obstáculos y ocultación haciendo uso de antenas muy directivas ubicadas en emplazamientos sin obstrucciones. Por consiguiente, en general el SMTS ofrece unos porcentajes de disponibilidad del enlace más reducidos que los del SFS. La gama de disponibilidad de interés fundamental para los diseñadores de sistemas normalmente oscila entre el 80% y el 99%.

El presente Anexo se refiere a los datos y modelos necesarios específicamente para predecir las degradaciones de la propagación en los enlaces del SMTS, incluyendo los efectos troposféricos e ionosféricos, la propagación por trayectos múltiples, la ocultación y la sombra por obstáculos. Los resultados presentados en este Anexo se basan en medidas realizadas en ondas decimétricas a 1,5 GHz (banda L) y a 870 MHz.

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de la Comisión de Estudio 8 de Radiocomunicaciones.

2 Efectos troposféricos

2.1 Atenuación

Las pérdidas de señal en la troposfera vienen causadas por los gases atmosféricos, la lluvia, la niebla y las nubes. Salvo para ángulos de elevación bajos, la atenuación troposférica es despreciable en frecuencias inferiores a 1 GHz y es generalmente baja hasta unos 10 GHz. Por encima de 10 GHz, la atenuación en algunos trayectos puede alcanzar valores importantes en periodos significativos. Existen varios métodos de predicción para estimar la atenuación debida a la absorción gaseosa (Recomendación UIT-R P.676) y a la lluvia (Recomendación UIT-R P.618). La atenuación causada por la niebla y las nubes generalmente es despreciable para frecuencias de hasta 10 GHz.

2.2 Centelleo

Las variaciones irregulares en el nivel de la señal recibida y en el ángulo de llegada están provocadas por la turbulencia troposférica y la propagación atmosférica por trayectos múltiples. La magnitud de estos efectos aumenta con la frecuencia y al disminuir el ángulo de elevación del trayecto, salvo en el caso de las fluctuaciones en el ángulo de llegada causadas por la inestabilidad, que son independientes de la frecuencia. La anchura de haz de la antena también afecta a la magnitud de estos centelleos. Estos efectos alcanzan su valor máximo durante el verano. En la Recomendación UIT-R P.618 aparece un método de predicción.

3 Efectos ionosféricos

En la Recomendación UIT-R P.531 se indican los efectos ionosféricos en los trayectos Tierra-espacio. En los Cuadros 1 y 2 de la Recomendación UIT-R P.680 figuran los valores de los efectos ionosféricos para frecuencias en la gama de 0,1 a 10 GHz.

4 Sombra por obstáculos

4.1 Modelo de sombra causada por árboles al borde del camino

Se han utilizado mediciones acumulativas de la distribución del desvanecimiento a 870 MHz, 1,6 GHz y 20 GHz para desarrollar el modelo empírico de sombra por obstáculos situados al borde del camino ampliado. La arboleda al borde del camino se representa por el porcentaje de sombra óptica causada por los árboles al borde del camino para un ángulo de elevación del trayecto de 45° en dirección de la fuente de la señal. El modelo es válido cuando este porcentaje está comprendido entre 55% y 75%.

4.1.1 Cálculo del desvanecimiento debido a la sombra por obstáculos de árboles situados al borde del camino

El procedimiento siguiente permite calcular la sombra por obstáculos (árboles) situados al borde del camino para frecuencias entre 800 MHz y 20 GHz, ángulos de elevación del trayecto de 7° a 60° y porcentajes de distancia recorrida de 1% a 80%. El modelo empírico corresponde a una condición de propagación media, siendo conducido el vehículo por ambos carriles de circulación de la carretera (incluidos los carriles más próximos y alejados de los árboles al borde del camino). Las distribuciones del desvanecimiento previstas se aplican a carreteras y a caminos rurales donde el aspecto general del trayecto de propagación es, la mayor parte del tiempo, ortogonal a las líneas de árboles al borde del camino y de los postes telefónicos y de energía eléctrica, y se supone que la causa predominante del desvanecimiento de la señal del SMTS es la sombra causada por la obstrucción de los árboles (véase la Recomendación UIT-R P.833).

Los parámetros requeridos son los siguientes:

f : frecuencia (GHz)

θ : ángulo de elevación (grados) del trayecto hacia el satélite

p : porcentaje de la distancia recorrida durante la cual se produce el desvanecimiento.

Paso 1: Calcular la distribución del desvanecimiento a 1,5 GHz, válido para los porcentajes de distancia recorrida de $20\% \geq p \geq 1\%$ y para el ángulo deseado de elevación del trayecto, $60^\circ \geq \theta \geq 20^\circ$:

$$A_L(p, \theta) = -M(\theta) \ln(p) + N(\theta) \quad (1)$$

donde:

$$M(\theta) = 3,44 + 0,0975 \theta - 0,002 \theta^2 \quad (2)$$

$$N(\theta) = -0,443 \theta + 34,76 \quad (3)$$

Paso 2: Convertir la distribución del desvanecimiento a 1,5 GHz, válido para $20\% \geq p \geq 1\%$, a la frecuencia deseada, f (GHz), donde $0,8 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz}$:

$$A_{20}(p, \theta, f) = A_L(p, \theta) \exp \left\{ 1,5 \left[\frac{1}{\sqrt{f_{1,5}}} - \frac{1}{\sqrt{f}} \right] \right\} \quad (4)$$

Paso 3: Calcular la distribución del desvanecimiento para los porcentajes de distancia recorrida de $80\% \geq p > 20\%$ y para la gama de frecuencias de $0,85 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz}$, como sigue:

$$\begin{aligned} A(p, \theta, f) &= A_{20}(20\%, \theta, f) \frac{1}{\ln 4} \ln \left(\frac{80}{p} \right) && \text{para } 80\% \geq p > 20\% \\ &= A_{20}(p, \theta, f) && \text{para } 20\% \geq p > 1\% \end{aligned} \quad (5)$$

Paso 4: Para ángulos de elevación del trayecto en la gama $20^\circ > \theta \geq 7^\circ$, se supone que la distribución del desvanecimiento tiene el mismo valor que con $\theta = 20^\circ$.

En la Fig. 1 se representa el incremento (rebasamiento) del desvanecimiento a 1,5 GHz en función de los ángulos de elevación entre 10° y 60° para una familia de curvas de igual porcentaje entre 1% y 50%.

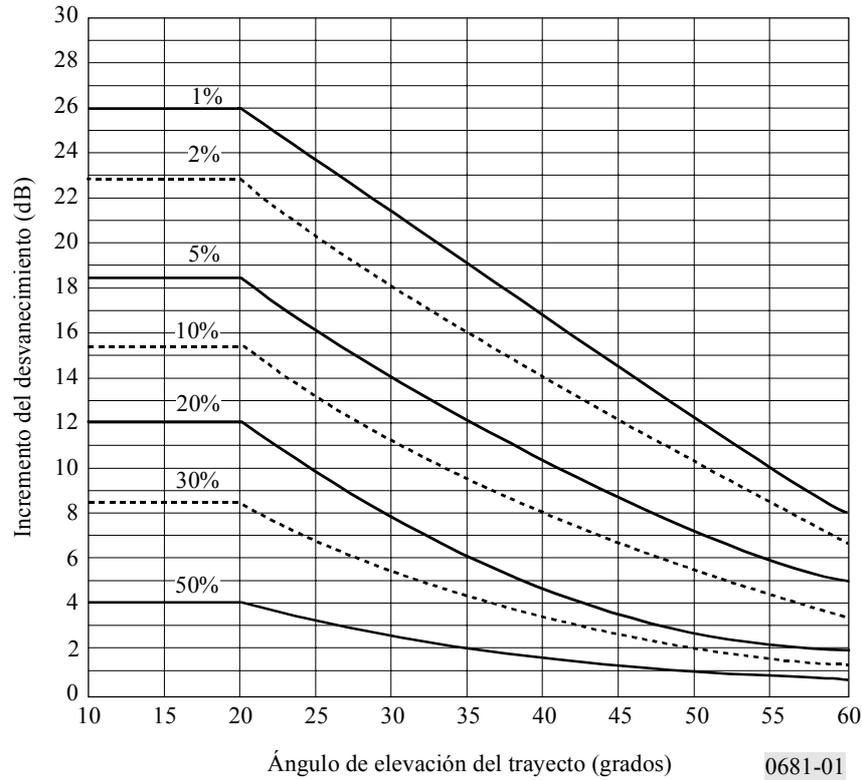
4.1.1.1 Ampliación a ángulos de elevación $> 60^\circ$

El modelo de sombra por obstáculos situados al borde del camino a las frecuencias de 1,6 GHz y 2,6 GHz puede ampliarse para ángulos de elevación superiores a 60° , con el procedimiento siguiente:

- se aplican las ecuaciones (1) a (5) para un ángulo de elevación de 60° a las frecuencias citadas;
- se efectúa la interpolación lineal entre el valor calculado para el ángulo de 60° y los valores de desvanecimiento para un ángulo de elevación de 80° que figuran en el Cuadro 1;
- se efectúa la interpolación lineal entre los valores del Cuadro 1 y un valor de 0° a 90° .

FIGURA 1

Desvanecimiento a 1,5 GHz debido a la sombra por obstáculos situados al borde del camino en función del ángulo de elevación del trayecto



CUADRO 1

Incremento del desvanecimiento (dB) para 80° de elevación

p (%)	Sombra por árboles	
	1,6 GHz	2,6 GHz
1	4,1	9,0
5	2,0	5,2
10	1,5	3,8
15	1,4	3,2
20	1,3	2,8
30	1,2	2,5

4.1.1.2 Aplicación del modelo de sombra por obstáculos situados al borde del camino a los sistemas móviles por satélite con satélites no geostacionarios (no OSG)

El método de predicción anterior se obtuvo y se aplica a las geometrías del SMTS en las que el ángulo de elevación es constante. Para los sistemas no OSG, en los que el ángulo de elevación varía, puede calcularse la disponibilidad del enlace de la siguiente manera:

- se calcula el porcentaje de tiempo, para cada ángulo de elevación (o gama de ángulos de elevación) durante el cual el terminal verá el vehículo espacial;
- para un margen de propagación determinado (la ordenada de la Fig. 1), se halla el porcentaje de indisponibilidad en cada ángulo de elevación;

- c) para cada ángulo de elevación, se multiplican los resultados de a) y b) y se divide por 100, con lo que se obtiene el porcentaje de indisponibilidad del sistema en esta elevación;
- d) se suman todos los valores de indisponibilidad obtenidos en c) para lograr la indisponibilidad total del sistema.

Si la antena utilizada en el terminal móvil no tiene un diagrama isótropo, ha de sustraerse la ganancia de antena, para cada ángulo de elevación, del margen de desvanecimiento de b) anterior.

En el caso de constelaciones de satélite con visibilidad múltiple, que emplean la diversidad de trayecto al satélite (donde se conmuta al trayecto menos degradado), puede efectuarse un cálculo aproximado suponiendo que se utiliza el vehículo espacial que ofrece el mayor ángulo de elevación.

4.1.2 Modelo de distribución de la duración del desvanecimiento

El diseño óptimo de los receptores del SMTS depende del conocimiento de las estadísticas asociadas a los tiempos de desvanecimiento, que pueden representarse en unidades de distancia recorridas (m) o (s). Las medidas del tiempo de desvanecimiento han dado como resultado el establecimiento del siguiente modelo empírico, válido para una duración del desvanecimiento en distancia $dd \geq 0,02$ m.

$$P(FD > dd | A > A_q) = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(dd) - \ln(\alpha)}{\sqrt{2} \sigma} \right] \right) \quad (6)$$

donde $P(FD > dd | A > A_q)$ representa la probabilidad de que el tiempo de desvanecimiento en distancia, FD , rebase la distancia, dd (m), con la condición de que la atenuación, A , rebase el valor A_q . El término «erf» se refiere a la función error, σ es la desviación típica de $\ln(dd)$, y $\ln(\alpha)$ es el valor medio de $\ln(dd)$. El primer miembro de la ecuación (6) se determinó calculando el porcentaje de «casos de duración» que rebasan dd respecto al número total de casos para los cuales $A > A_q$. Los datos se obtuvieron a partir de medidas efectuadas en Estados Unidos de América y Australia. El mejor ajuste de los valores de regresión obtenido de estas medidas corresponden a $\alpha = 0,22$ y $\sigma = 1,215$.

En la Fig. 2 se representa P , expresado en porcentaje, p , en función de dd para un valor umbral de 5 dB.

El modelo de la ecuación (6) se basa en mediciones efectuadas con un ángulo de elevación de 51° y es aplicable a sombras entre moderadas e intensas (porcentaje de sombra óptica entre 55% y 90%). Las pruebas efectuadas a 30° y 60° pusieron de manifiesto una dependencia moderada del ángulo de elevación: cuanto menor es éste, mayor es el tiempo de desvanecimiento para un porcentaje fijo. Por ejemplo, el tiempo de desvanecimiento con 30° resultó ser aproximadamente el doble que el tiempo de desvanecimiento con 60° , al mismo nivel de porcentaje.

4.1.3 Modelo de distribución del tiempo sin desvanecimiento

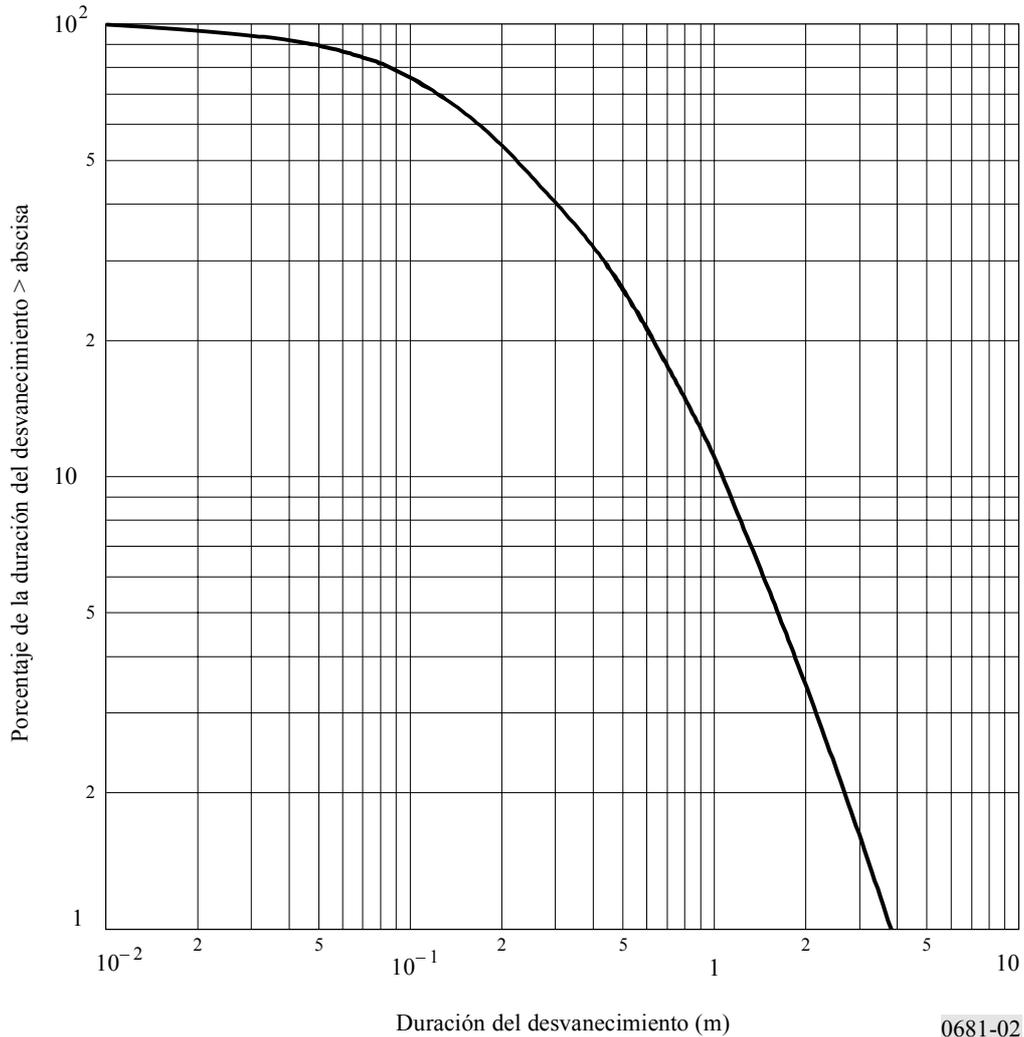
Un tiempo sin desvanecimiento en distancia, dd , se define como la distancia en la cual los niveles de desvanecimiento son inferiores a un valor umbral de desvanecimiento especificado. El modelo de duración del tiempo sin desvanecimiento viene dado por:

$$p(NFD > dd | A < A_q) = \beta (dd)^{-\gamma} \quad (7)$$

siendo $p(NFD > dd | A < A_q)$ la probabilidad en porcentaje de que una distancia continua sin desvanecimiento, NFD , rebase la distancia, dd , con la condición de que el desvanecimiento sea menor que el valor umbral, A_q . En el Cuadro 2 aparecen los valores de β y γ para trayectos con sombra moderada y extrema, es decir, con porcentajes de sombra óptica de 55%-75% y 75%-90%, respectivamente. Se ha utilizado un umbral de desvanecimiento de 5 dB para A_q .

FIGURA 2

Ajuste óptimo de la distribución acumulativa de los desvanecimientos para una sombra por árboles que bordean el camino, con un umbral de 5 dB



CUADRO 2

Valores de regresión del tiempo sin desvanecimiento para un umbral de desvanecimiento de 5 dB con un ángulo de elevación del trayecto de 51°

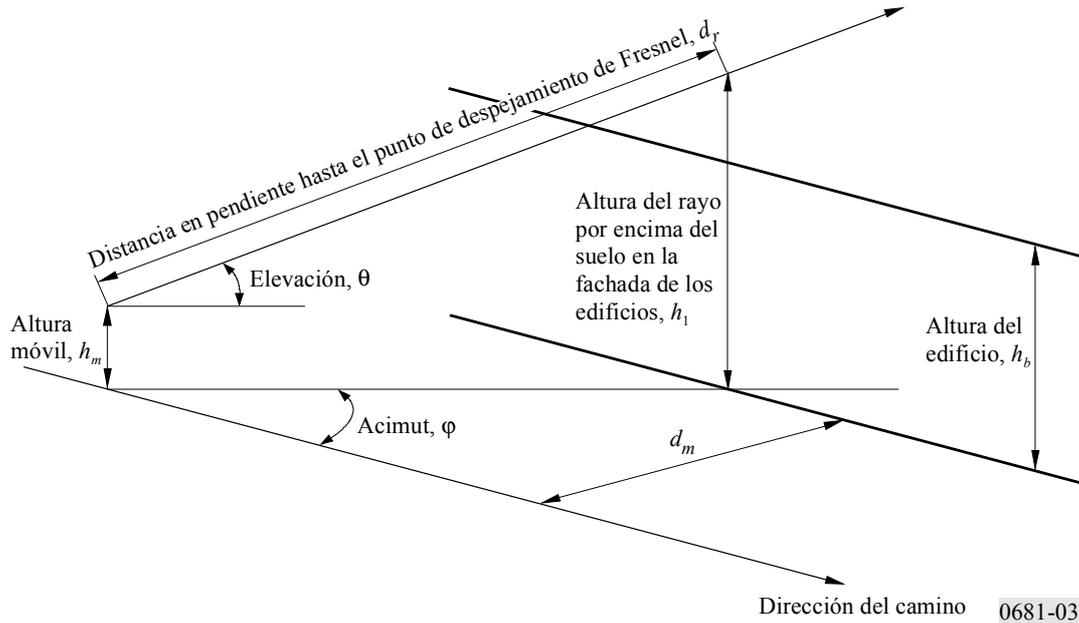
Nivel de sombra	β	γ
Moderado	20,54	0,58
Extremo	11,71	0,8371

4.2 Modelo de sombra causada por edificios situados al borde del camino

Se puede establecer un modelo de la sombra causada por los edificios situados al borde del camino en una zona urbana suponiendo una distribución Rayleigh de las alturas de esos edificios. En la Fig. 3 se muestra la representación geométrica.

FIGURA 3

Representación geométrica del modelo de sombra causada por edificios situados al borde del camino



El porcentaje de probabilidad de bloqueo debido a los edificios viene dado por:

$$p = 100 \exp \left[- (h_1 - h_2)^2 / 2h_b^2 \right] \quad \text{para } h_1 > h_2 \quad (8)$$

donde:

h_1 : altura del rayo por encima del suelo en la fachada de los edificios, dada por:

$$h_1 = h_m + (d_m \operatorname{tg} \theta / \operatorname{sen} \varphi) \quad (8a)$$

h_2 : distancia de despejamiento de Fresnel necesaria por encima de los edificios, dada por:

$$h_2 = C_f (\lambda d_r)^{0,5} \quad (8b)$$

h_b : altura más común de los edificios (modal)

h_m : altura del móvil por encima del suelo

θ : ángulo de elevación del rayo hacia el satélite por encima de la horizontal

φ : ángulo de acimut del rayo con respecto a la dirección de la calle

d_m : distancia del móvil a la fachada de los edificios

d_r : distancia en pendiente del móvil a la posición a lo largo del rayo que supera en sentido vertical la fachada de los edificios, dada por:

$$d_r = d_m / (\operatorname{sen} \varphi \cdot \operatorname{cos} \theta) \quad (8c)$$

C_f : despejamiento requerido como una fracción de la primera zona de Fresnel

λ : longitud de onda

y donde h_1 , h_2 , h_b , h_m , d_m , d_r y λ son unidades autocohérentes, y $h_1 > h_2$.

Se señala que las ecuaciones (8a), (8b) y (8c) son válidas para $0 < \theta < 90^\circ$ y para $0 < \varphi < 180^\circ$. No se deberán utilizar los valores límite reales.

En la Fig. 4 se muestran ejemplos de sombra causada por edificios situados al borde del camino calculados utilizando las expresiones anteriores para:

$$h_b = 15 \text{ m}$$

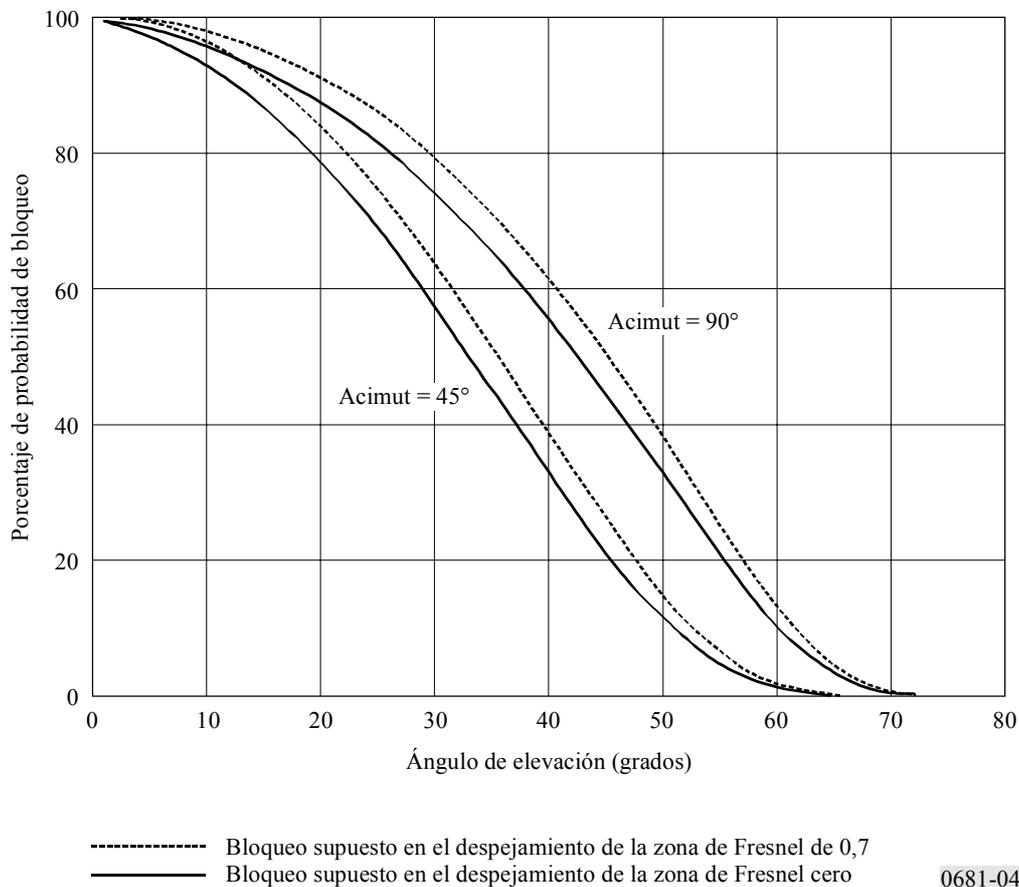
$$h_m = 1,5 \text{ m}$$

$$d_m = 17,5 \text{ m}$$

Frecuencia = 1,6 GHz.

FIGURA 4

Ejemplos de sombra causada por edificios situados al borde del camino
(véanse en el texto los valores de los parámetros)



En la Fig. 4, son aplicables las líneas de puntos cuando se considera que existe bloqueo si el rayo tiene un despejamiento inferior a 0,7 de la primera zona de Fresnel en sentido vertical por encima del frente del edificio. Son aplicables las líneas de trazo continuo cuando se considera que sólo existe bloqueo en el caso de falta de visibilidad directa.

Aunque el modelo indica que no existe bloqueo en los ángulos de elevación más altos del trayecto, los usuarios deberán tener presente que puede producirse un bloqueo y sombra ocasional debida a pasos elevados, objetos que sobresalen, ramas de árboles, etc.

4.3 Consideración especial para el caso de terminales portátiles (ocultación del usuario)

Cuando se utilizan terminales portátiles, la cabeza o el cuerpo del operador en el campo próximo de la antena hace que cambie el diagrama de ésta. En el caso de los sistemas de satélite que no son de órbita baja (OSG, de órbita terrestre alta (HEO) e ICO), se espera que el usuario del terminal portátil coopere, es decir, que se sitúe de forma que se evite la ocultación provocada por la cabeza (o el cuerpo) y por el entorno. Para los sistemas de órbita terrestre baja (LEO) no puede adoptarse esta hipótesis. La influencia de la cabeza (o del cuerpo) puede evaluarse incluyendo el diagrama de antena modificado (que hay que medir) en el cálculo de la disponibilidad del enlace tal como se presentó en el § 4.1.1.2. Suponiendo que los ángulos acimutales para los que se ve el satélite están distribuidos uniformemente, puede aplicarse un diagrama de elevación con promedios de acimut. También pueden promediarse los pequeños movimientos de la cabeza o de la mano que dan lugar a pequeñas variaciones del ángulo de elevación aparente.

En relación con este efecto, se efectuó en Japón un experimento en condiciones reales. La Fig. 5a muestra la geometría de la cabeza humana y una antena utilizada en el experimento. El ángulo de elevación del satélite es de 32° y la frecuencia de la señal de éste es de 1,5 GHz. La ganancia de la antena es de 1 dBi y su longitud es de 10 cm. La Fig. 5b muestra la variación del nivel relativo de la señal en función del ángulo acimutal ϕ de la Fig. 5a. Puede verse en la Fig. 5b que la reducción máxima del nivel de la señal debida a la ocultación del usuario es de unos 6 dB cuando el equipo se encuentra en la región apantallada por la cabeza humana.

Los resultados de la Fig. 5b sólo tienen un fin ilustrativo, pues los datos corresponden a un solo ángulo de elevación y a un solo diagrama de antena, y no se tienen en cuenta los posibles efectos de reflexión especular que pueden desempeñar un papel significativo en un entorno de equipo portátil en el que hay poca directividad.

En la Recomendación UIT-R P.679 pueden hallarse datos de propagación relacionados con la pérdida de entrada de señal para recepción dentro de edificios y vehículos, de interés particular en el caso de terminales portátiles.

4.4 Modelización de los efectos de obstrucción causada por los edificios utilizando funciones de enmascaramiento de calles

Los efectos de bloqueo causado por los edificios también se pueden cuantificar utilizando funciones de enmascaramiento (MKF, *masking functions*) de calles que indiquen los acimuts y los ángulos de elevación para los cuales el enlace se puede o no completar. Las funciones de este tipo se han obtenido frecuentemente de estudios fotogramétricos o por medio de técnicas de trazado de rayos. El concepto de MKF puede aplicarse a casos simplificados para producir una serie limitada de funciones de enmascaramiento y, por tanto, poder realizar evaluaciones aproximadas y rápidas de la disponibilidad combinada en diferentes configuraciones de múltiples satélites.

Una determinada zona urbana podría describirse, en primera aproximación, por un ángulo de enmascaramiento, (MKA, *masking angle*) (grados).

El MKA se define como el ángulo de elevación del satélite para incidencia rasante con los tejados de los edificios cuando el enlace es perpendicular a la calle o, en términos matemáticos:

$$MKA = \arctg\left(\frac{h}{w/2}\right) \quad \text{grados} \quad (9)$$

donde:

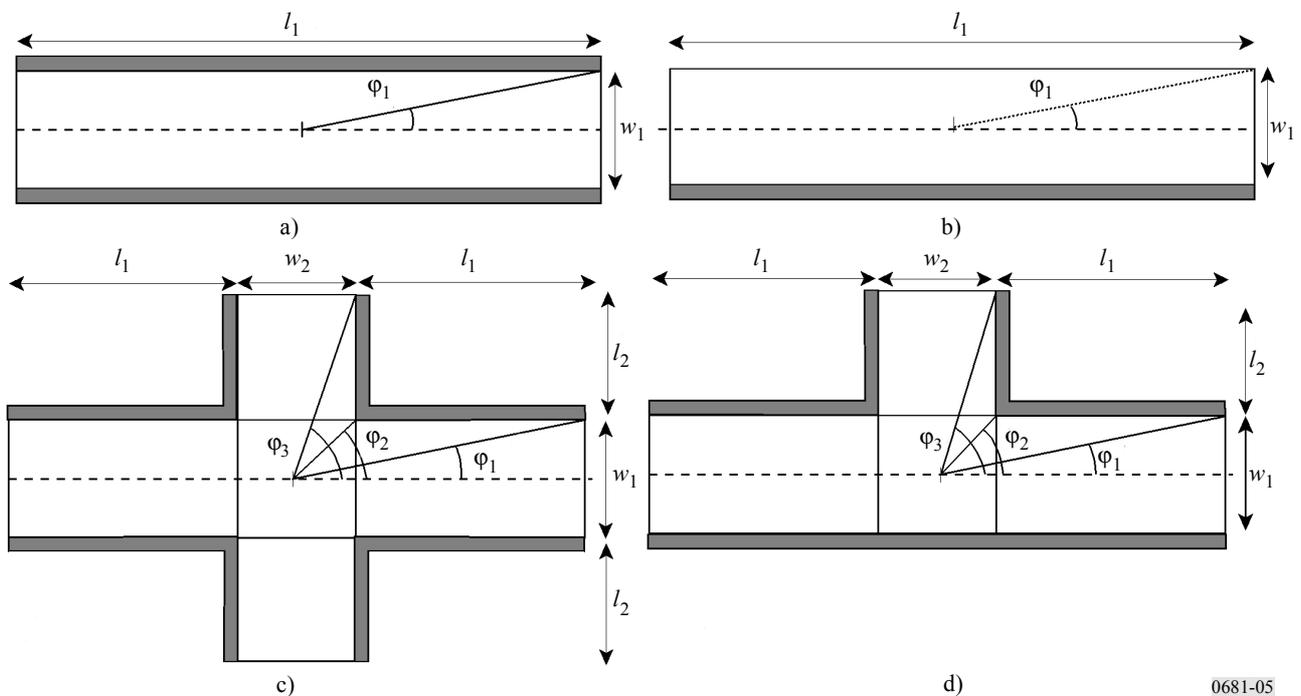
h : altura media del edificio

w : anchura media de la calle.

Además, puede suponerse que una zona urbana con un determinado MKA está formada por una combinación de unas pocas configuraciones típicas (escenarios básicos o constitutivos) a saber, una calle o cañón urbano (scy), un cruce (scr), una bocacalle (T-j) y una calle con edificios a un solo lado (sw), cada una con una determinada probabilidad de aparición (véase la Fig. 5). De manera similar podría definirse un vector de trayecto mixto \vec{M} , que indique para una determinada zona urbana, las probabilidades de que se encuentre con cada uno de los escenarios básicos \vec{M} (w_{scy} , w_{scr} , w_{T-j} , w_{sw}), con $\sum w_i = 1$. Los datos necesarios para este modelo, es decir, el MKA, se pueden obtener de la observación del entorno o de planos de la ciudad.

FIGURA 5

Escenarios básicos o constitutivos que describen una determinada zona urbana



0681-05

Si se determinan las probabilidades de disponibilidad para estos cuatro escenarios constitutivos, la disponibilidad general podría calcularse aproximadamente como la suma ponderada de las disponibilidades en cada caso:

$$a_T = w_{scy} a_{scy} + w_{scr} a_{scr} + w_{T-j} a_{T-j} + w_{sw} a_{sw} \quad (10)$$

Las MKF para estos cuatro escenarios básicos se han construido mediante una geometría sencilla y suponiendo que el usuario está en el centro (véase la Fig. 5). Considérese un modelo de propagación sencillo, del tipo todo o nada, o visibilidad directa-sin visibilidad directa (como en el § 4.2 para el caso de despejamiento nulo de la zona de Fresnel), las MKF de los cuatro escenarios urbanos

constitutivos se representan en la Fig. 6, donde en ordenadas se representan los ángulos de elevación y en abscisas los ángulos acimutales o, más bien, las orientaciones de las calles, ξ , con respecto al enlace. El plano medio superior indica acimut positivo y el inferior corresponde a acimut negativo. Una MKF indica las regiones en el hemisferio celeste en las que se puede completar el enlace (sin sombra) o no (con sombra). Los contornos que delimitan las zonas «prohibidas» en las MKF se definen mediante segmentos y puntos. Los casos más significativos se ilustran en la Fig. 6 y pueden expresarse mediante las siguientes ecuaciones:

$$S_A: \theta = \text{tg}^{-1} \left(h / \sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{\text{tg}^2 \varphi} + 1\right)} \right) \quad (11a)$$

$$P_A: \left(\varphi_A = 90^\circ; \theta_A = \text{tg}^{-1} \left(\frac{h}{w/2} \right) \right) \quad (11b)$$

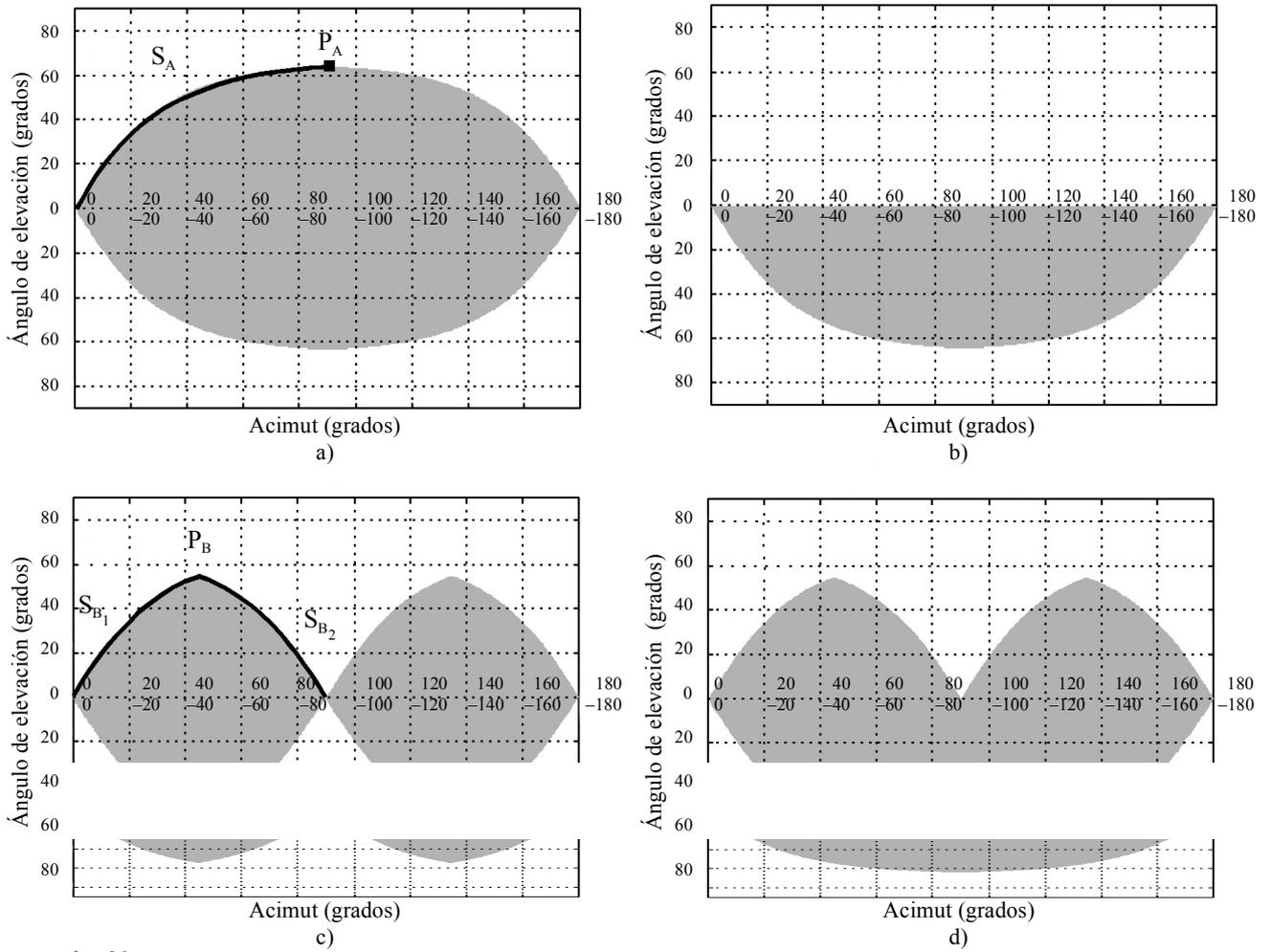
$$S_{B_1}: \theta = \text{tg}^{-1} \left(h / \sqrt{\left(\frac{w_1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{\text{tg}^2 \varphi} + 1\right)} \right) \quad (11c)$$

$$S_{B_2}: \theta = \text{tg}^{-1} \left(h / \sqrt{\left(\frac{w_1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{\text{tg}^2(90^\circ - \varphi)} + 1\right)} \right) \quad (11d)$$

$$P_B: \left(\varphi_B = \text{tg}^{-1} \left(\frac{w_1}{w_2} \right); \theta_2 = \text{tg}^{-1} \left(h / \sqrt{\left(\frac{w_1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{\text{tg}^2 \varphi_B} + 1\right)} \right) \right) \quad (11e)$$

La disponibilidad correspondiente a un determinado escenario básico y a un determinado satélite OSG se puede calcular teniendo en cuenta todas las posibles orientaciones de calle, ξ , con respecto al enlace usuario-satélite. En la Fig. 7 se muestra la posición de un satélite OSG con respecto a una bocacalle. En ese caso concreto todas las orientaciones posibles se pueden describir barriendo todos los puntos en la línea A-B correspondientes a un ángulo de elevación constante y todas las posibles orientaciones de la calle. La disponibilidad viene dada por la fracción de la línea recta A-B en la parte sin sombra de la MKF. De manera similar, se puede dibujar sobre una MKF una trayectoria de órbita de satélite no OSG. La disponibilidad total se puede calcular en este caso teniendo en cuenta todas las orientaciones de calle posibles con respecto a todas las direcciones de los posibles enlaces usuario-satélite.

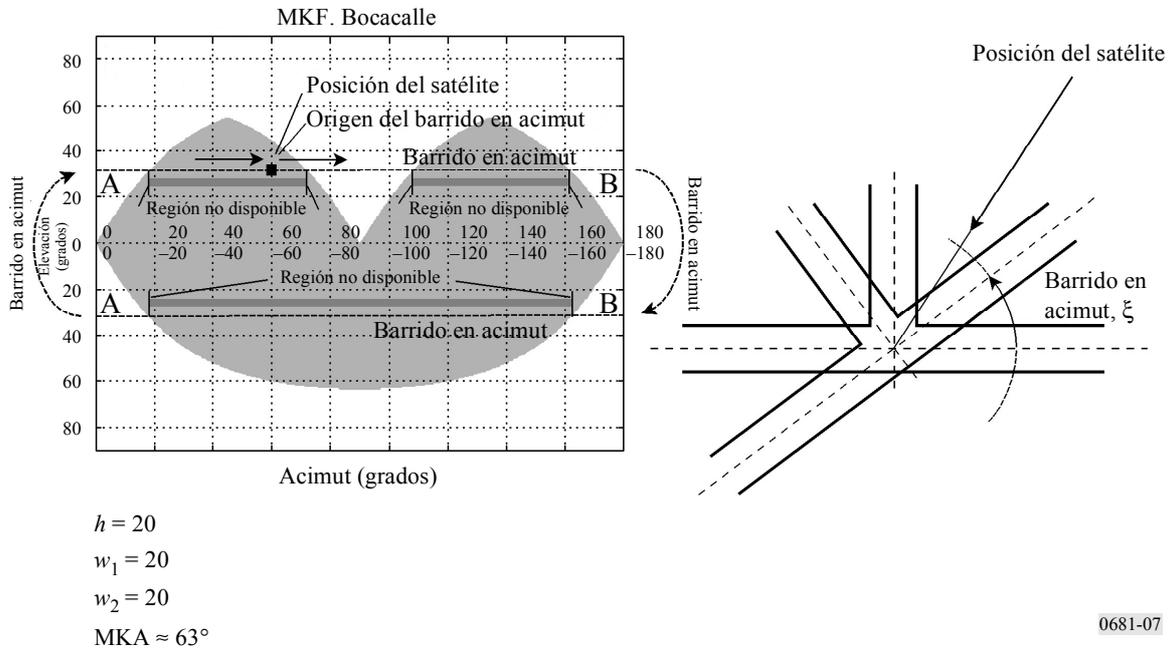
FIGURA 6
 MKF de a) una calle, b) una calle con edificios en un solo lado,
 c) un cruce y d) una bocacalle



$h = 20$
 $w_1 = 20$
 $w_2 = 20$
 $MKA \approx 63^\circ$

FIGURA 7

Cálculo de la disponibilidad para una bocacalle y un satélite OSG



5 Modelos de trayectos múltiples para condiciones de visibilidad directa en medios despejados

En muchos casos, el terminal móvil tiene una línea de visibilidad directa en medios despejados (sombra despreciable) hasta el satélite de servicio móvil. Aun en esas circunstancias, la señal puede sufrir degradaciones debidas a la propagación por trayectos múltiples causada por el terreno. El terminal móvil recibe una suma vectorial de la señal de visibilidad directa y de varias señales de trayectos múltiples. Estas últimas pueden sumarse de manera constructiva o destructiva dando lugar, respectivamente, a un incremento de la señal o a un desvanecimiento. Las características de la señal propagada por trayectos múltiples dependen de las secciones transversales de dispersión de los reflectores multitrayecto, de su número, de las distancias a la antena de recepción, de las polarizaciones del campo y del diagrama de ganancia de la antena de recepción.

Los modelos de degradación por trayectos múltiples presentados en los puntos siguientes se basan en medidas efectuadas con una antena de las siguientes características:

- omnidireccional en acimut;
- variación de la ganancia inferior a 3 dB entre 15° y 75° de elevación;
- por debajo del horizonte, la ganancia de antena se reduce por lo menos 10 dB (ángulos de elevación negativos).

FIGURA 8a
Geometría de la cabeza humana y de una antena

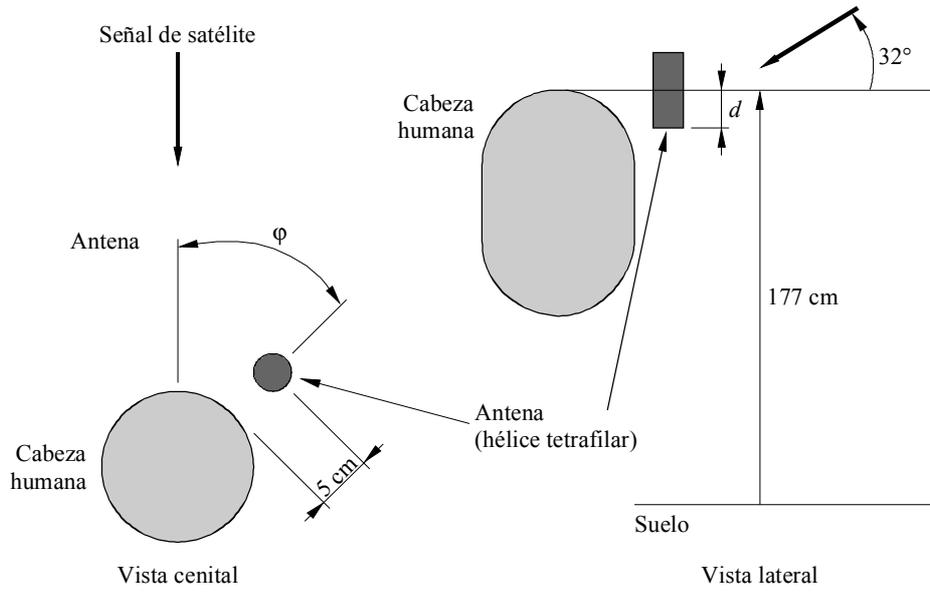
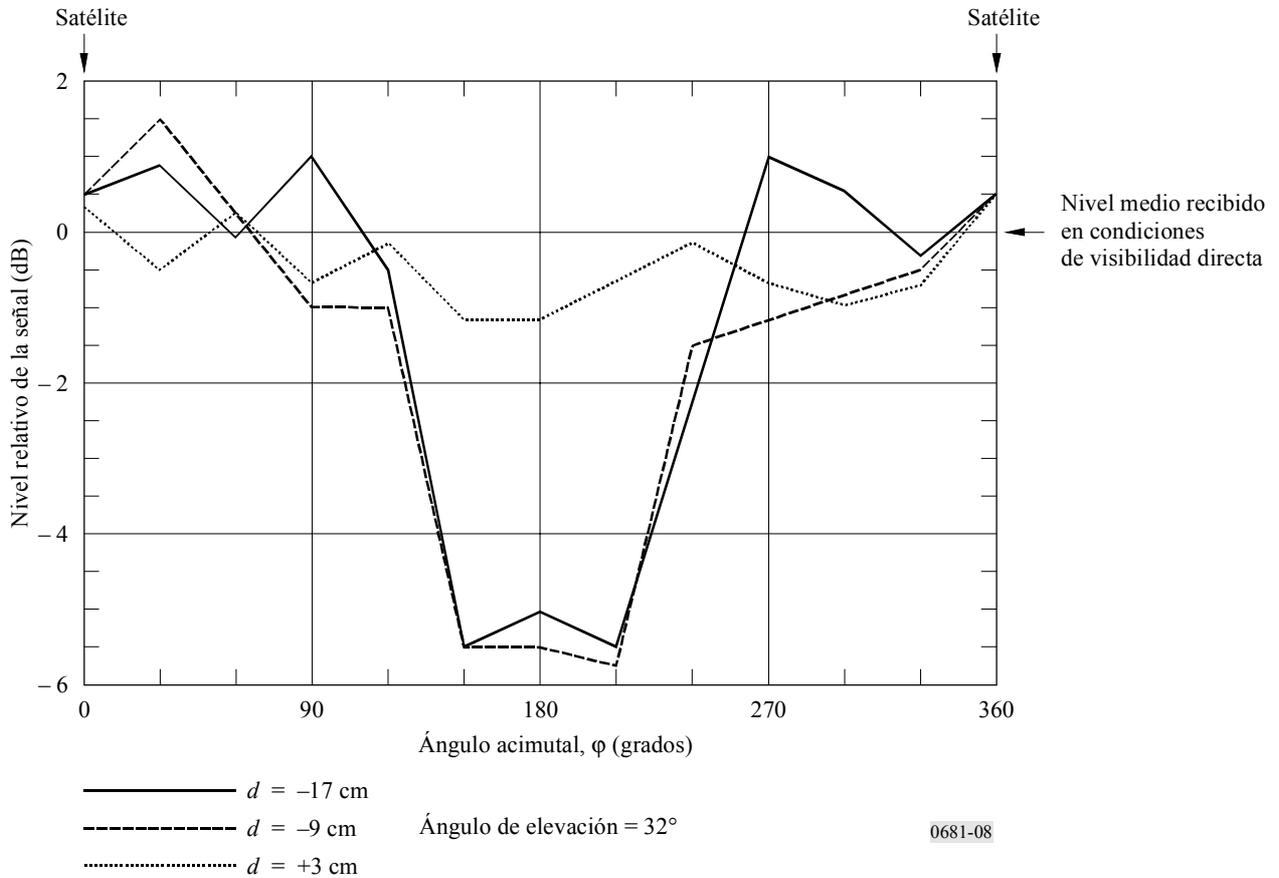


FIGURA 8b
Nivel relativo de la señal correspondiente a la configuración de la Fig. 8a



5.1 Trayectos múltiples en entorno montañoso

La distribución de los valores del desvanecimiento debidos a trayectos múltiples, en terreno montañoso, puede expresarse por la siguiente ecuación:

$$p = a A^{-b} \tag{12}$$

para:

$$1\% < p < 10\%$$

siendo:

- p : porcentaje de la distancia en la que se incrementa el desvanecimiento
- A : incremento del desvanecimiento (dB).

Los parámetros de ajuste de la curva, a y b , aparecen en el Cuadro 3 para 1,5 GHz y 870 MHz. Obsérvese que este modelo es válido cuando el efecto de sombra es despreciable.

CUADRO 3

Parámetros de ajuste óptimo de la distribución del desvanecimiento acumulado debido a trayectos múltiples en terreno montañoso

Frecuencia (GHz)	Elevación = 30°			Elevación = 45°		
	a	b	Gama (dB)	a	b	Gama (dB)
0,87	34,52	1,855	2-7	31,64	2,464	2-4
1,5	33,19	1,710	2-8	39,95	2,321	2-5

En la Fig. 9 aparecen las curvas de distribución del desvanecimiento acumulado para ángulos de elevación del trayecto de 30° y 45° a 1,5 GHz y a 870 MHz.

5.2 Trayectos múltiples en un ambiente de árboles que bordean el camino

Diversos experimentos llevados a cabo a lo largo de caminos bordeados de árboles en Estados Unidos de América han demostrado que el desvanecimiento por trayectos múltiples es relativamente insensible a la elevación del trayecto en la gama de 30° a 60°. Se ha elaborado el siguiente modelo a partir de los datos medidos:

$$p = u \exp(-vA) \tag{13}$$

para:

$$1\% < p < 50\%$$

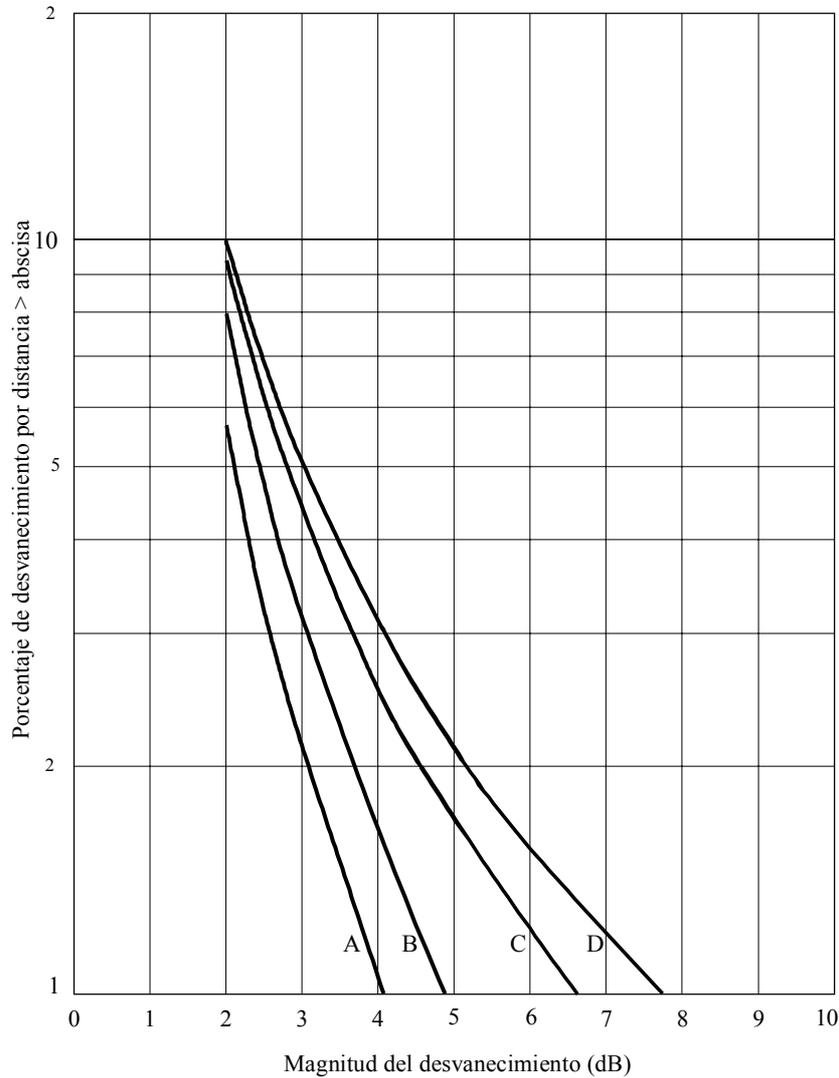
siendo:

- p : porcentaje de la distancia por encima de la cual se rebasa el desvanecimiento (se incrementa el desvanecimiento)
- A : valor (dB) del incremento del desvanecimiento.

Cabe observar que este modelo supone una sombra despreciable. Los parámetros de ajuste de la curva, u y v , aparecen en el Cuadro 4.

FIGURA 9

Ajuste óptimo de las distribuciones del desvanecimiento acumulado para desvanecimientos debidos a la propagación por trayectos múltiples en terreno montañoso



Curvas A: 870 MHz, 45°
 B: 1,5 GHz, 45°
 C: 870 MHz, 30°
 D: 1,5 GHz, 30°

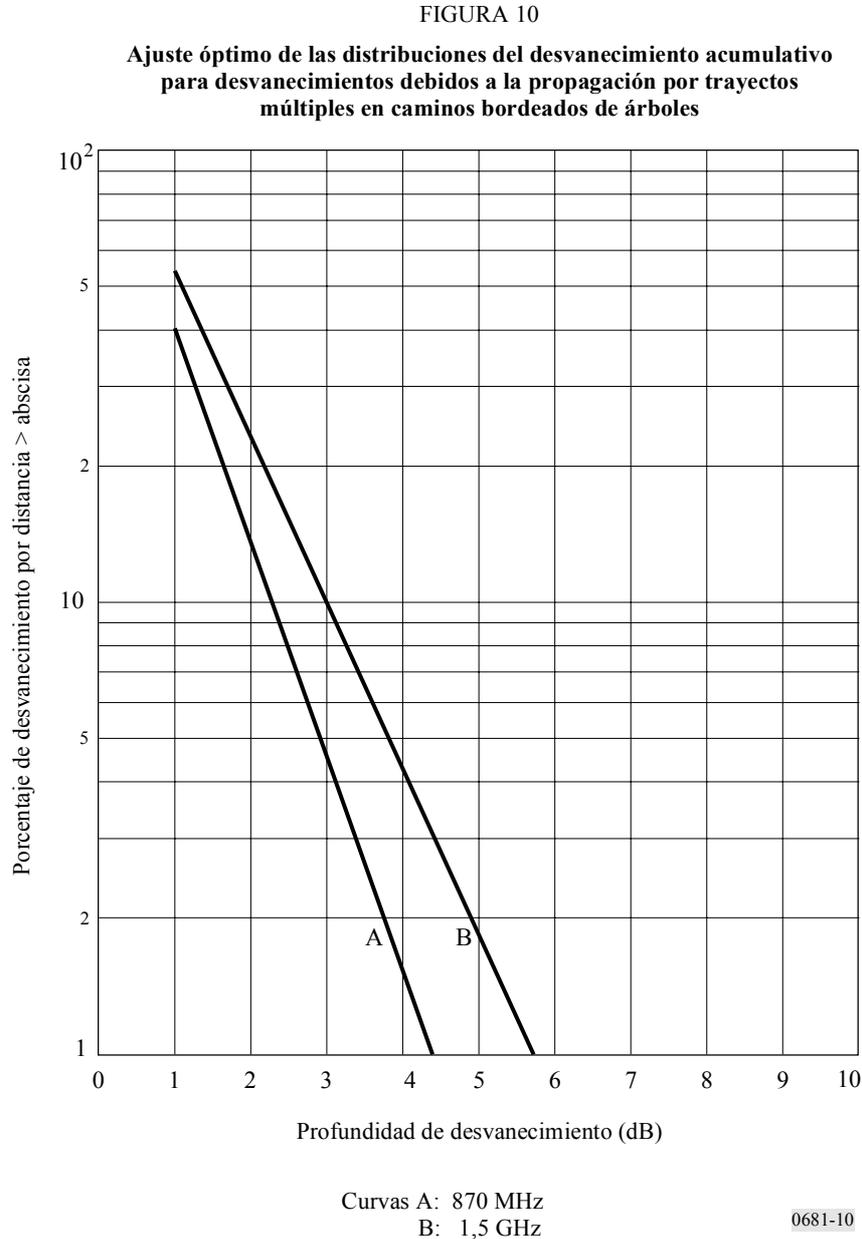
0681-09

CUADRO 4

Parámetros de ajuste exponencial óptimo de las distribuciones del desvanecimiento acumulado para el caso de trayectos múltiples en caminos bordeados de árboles

Frecuencia (GHz)	<i>u</i>	<i>v</i>	Gama de desvanecimiento (dB)
0,870	125,6	1,116	1-4,5
1,5	127,7	0,8573	1-6

En la Fig. 10 se representan las curvas de las distribuciones del desvanecimiento acumulado para 1,5 GHz y para 870 MHz. Para ángulos de elevación más pequeños (5° a 30°) puede producirse un aumento en el desvanecimiento debido a los trayectos múltiples, ya que para estos ángulos pueden recibirse efectos de dispersión desde lugares situados a mayor distancia (en terrenos relativamente llanos).



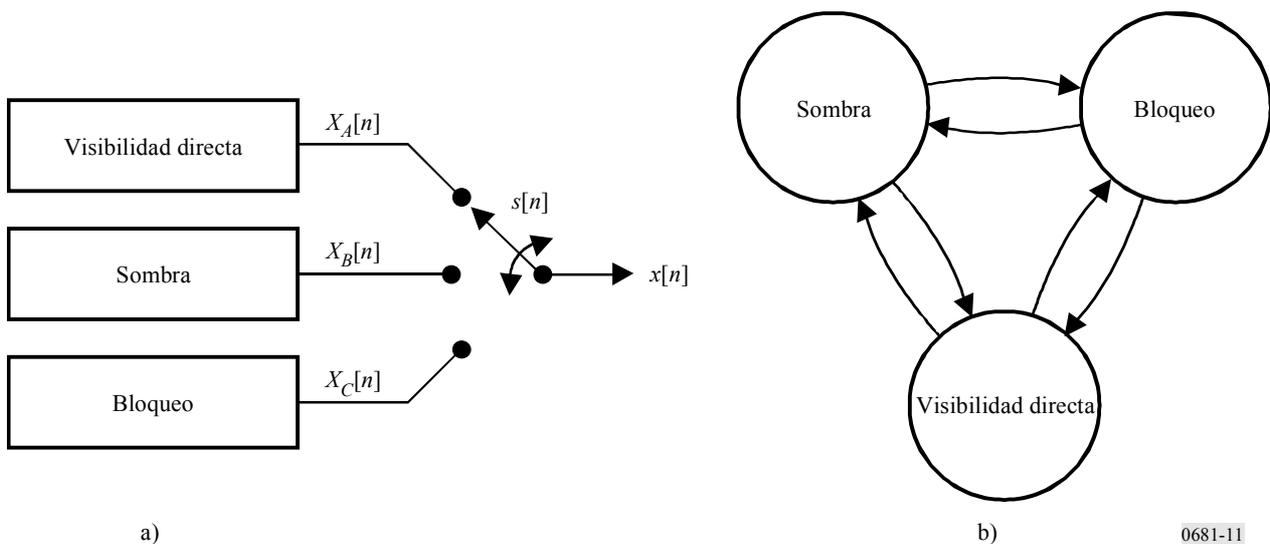
6 Modelo estadístico para condiciones de propagación mixtas

En los § 4.1 y 5 figuran modelos aplicables a condiciones específicas, a saber, condiciones de sombra causado por obstáculos situados al borde del camino y condiciones de visibilidad directa en medios despejados en regiones montañosas y en entornos con árboles situados al borde del camino. En entornos de propagación reales del SMTS, tales como zonas urbanas y suburbanas, puede producirse una combinación de condiciones de propagación diferente. La función de distribución acumulativa (FDA) de niveles de señal en esas condiciones mixtas se puede calcular en base al modelo en los tres estados siguientes, compuesto por una condición de visibilidad directa en medios despejados, una condición de sombra leve y una condición de bloqueo total.

Las variaciones de larga duración en la señal recibida se pueden describir por una cadena de diferentes estados. La idea fundamental de cadenas ocultas se muestra en la Fig. 11a). La posición del conmutador determina qué proceso estocástico $x_i[n]$ se observa a la salida, donde cada proceso representa un determinado escenario de propagación. Las variaciones de duración más corta en cada estado se pueden representar mediante una modelización analógica del canal. Se utilizan tres estados para representar la visibilidad directa, la sombra y la obstrucción. El proceso aleatorio $s[n]$ representa la posición del conmutador, cuyo estado viene caracterizado por una semicadena de Markov y cuyo diagrama de transición de estados se muestra en la Fig. 11b).

FIGURA 11

Generación de la secuencia observada a) y diagrama de transición de estados de una semicadena de Markov b)



0681-11

6.1 Predicción de las estadísticas de desvanecimientos para un solo enlace de satélites

El procedimiento que figura a continuación permite la estimación de estadísticas de desvanecimiento totales de un enlace de propagación del SMTS para frecuencias superiores a 30 GHz con ángulos de elevación de 10° a 90° . No obstante, los valores de los parámetros propuestos que aquí se indican limitan la gama de frecuencias aplicables de 1,5 a 2,5 GHz en zonas urbanas y suburbanas. Se supone que la ganancia de la antena de recepción es inferior a unos 10 dBi.

La definición de los estados de propagación es como sigue:

Estado A: Condición de visibilidad directa en medios despejados

Estado B: Condición de sombra leve (causada por árboles y/o pequeños obstáculos, tales como los postes de las compañías de servicios públicos)

Estado C: Condición de bloqueo total (debida a obstáculos importantes, tales como montañas y edificios).

Se requieren los siguientes parámetros:

P_A, P_B y P_C : probabilidad de aparición de los estados A, B y C

$M_{r,A}, M_{r,B}$ y $M_{r,C}$: potencia multitrayecto media en los estados A, B y C

m y σ : Valor medio y desviación típica del desvanecimiento de la señal (dB) de la componente de onda directa en el estado B

θ : ángulo de elevación (grados).

A continuación figuran valores recomendados de los parámetros anteriores como función de θ (grados):

$$P_A = 1 - a (90 - \theta)^2 \quad \text{para } 10^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \quad (14a)$$

donde:

$$\begin{aligned} a &= 1,43 \times 10^{-4} && \text{para zonas urbanas} \\ &= 6,0 \times 10^{-5} && \text{para zonas suburbanas} \end{aligned}$$

$$P_B = b P_C \quad (14b)$$

donde:

$$\begin{aligned} b &= 1/4 && \text{para zonas urbanas} \\ &= 4 && \text{para zonas suburbanas} \end{aligned}$$

y donde:

$$P_C = (1 - P_A) / (1 + b) \quad (14c)$$

y

$$m = -10 \text{ dB} \quad \sigma = 3 \text{ dB}$$

$$M_{r,B} = 0,03162 (= -15 \text{ dB}) \quad M_{r,C} = 0,01 (= -20 \text{ dB})$$

El valor de $M_{r,A}$ propuesto depende de los tipos de zona indicados a continuación. Para ángulos de elevación entre 10° y 45° , se puede obtener el valor mediante interpolación lineal o extrapolación de los valores (dB) cuando $\theta = 30^\circ$ y $\theta = 45^\circ$.

Para zona urbana:

$$\begin{aligned} M_{r,A} &= 0,158 (= -8 \text{ dB}) && \text{para } \theta = 30^\circ \\ &= 0,100 (= -10 \text{ dB}) && \text{para } \theta \geq 45^\circ \end{aligned}$$

y para zona suburbana:

$$\begin{aligned} M_{r,A} &= 0,0631 (= -12 \text{ dB}) && \text{para } \theta = 30^\circ \\ &= 0,0398 (= -14 \text{ dB}) && \text{para } \theta \geq 45^\circ \end{aligned}$$

El procedimiento de cálculo paso a paso es como sigue:

Paso 1: Calcular la distribución acumulativa del nivel de señal x en el estado A ($x = 1$ para la componente de onda directa):

$$f_A(x \leq x_0) = \int_0^{x_0} \frac{2x}{M_{r,A}} \exp\left(-\frac{1+x^2}{M_{r,A}}\right) I_0\left(\frac{2x}{M_{r,A}}\right) dx \quad (15)$$

donde I_0 es una función Bessel modificada de primera clase y orden cero.

NOTA 1 – Esta distribución es la de Nakagami-Rice con $a = 1$ y $2\sigma^2 = M_{r,A}$ descrita en la Recomendación UIT-R P.1057.

Paso 2: Calcular la distribución acumulativa del nivel de señal x en el estado B:

$$f_B(x \leq x_0) \frac{6,930}{\sigma M_{r,B}} \int_0^{x_0} x \int_{\epsilon}^{\infty} \frac{1}{z} \exp\left[-\frac{[20 \log(z) - m]^2}{2\sigma^2} - \frac{x^2 + z^2}{M_{r,B}}\right] I_0\left(\frac{2xz}{M_{r,B}}\right) dz dx \quad (16)$$

donde ϵ es un valor muy pequeño pero distinto de cero (se propone $\epsilon = 0,001$).

NOTA 1 – Esta distribución se conoce con el nombre de distribución de Loo.

Paso 3: Calcular la distribución acumulativa del nivel de señal x en el estado C:

$$f_C(x \leq x_0) = 1 - \exp\left(-\frac{x_0^2}{M_{r,C}}\right) \quad (17)$$

NOTA 1 – Esta distribución es la distribución de Rayleigh con $2q^2 = M_{r,C}$ descrita en la Recomendación UIT-R P.1057.

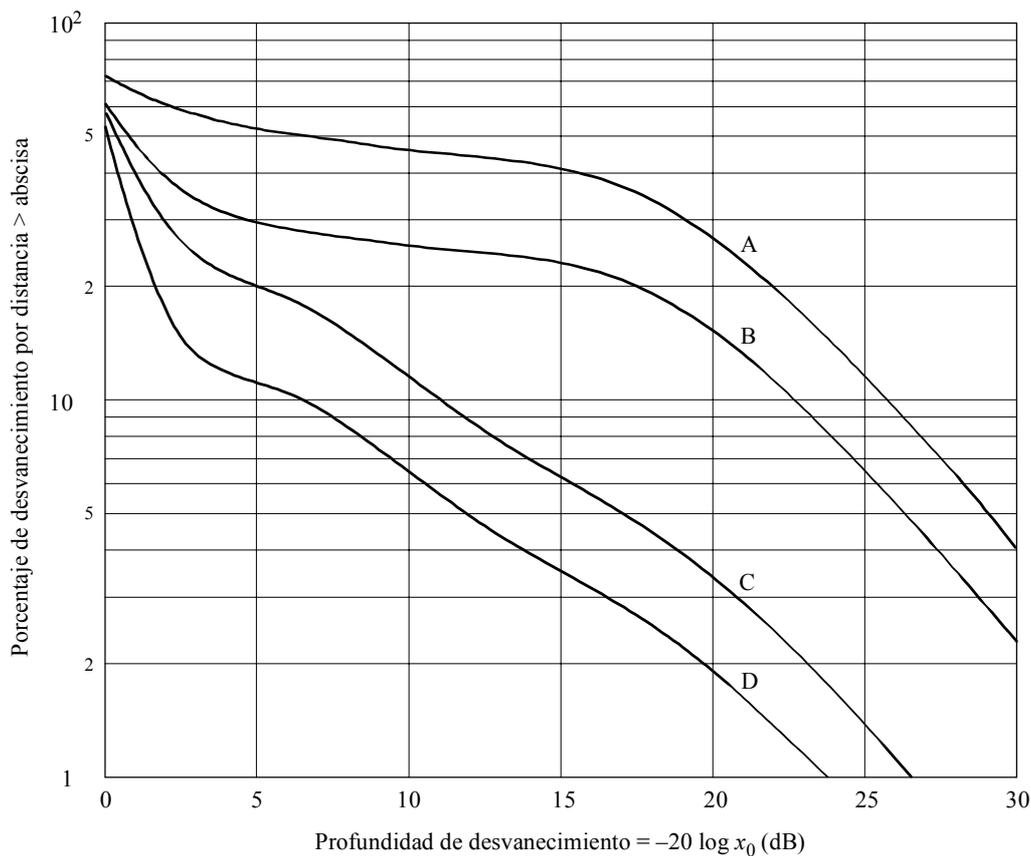
Paso 4: La FDA, cuando el nivel de señal x es inferior al nivel umbral x_0 con una probabilidad P , en condiciones de propagación mixta, viene dada por la expresión:

$$P(x \leq x_0) = P_A f_A + P_B f_B + P_C f_C \quad (18)$$

En la Fig. 12 se muestran ejemplos de FDA calculadas para los valores de parámetros dados más arriba, con conversión de las probabilidades en porcentaje de tiempo.

FIGURA 12

Ejemplos de profundidad del desvanecimiento calculado en zonas urbanas y suburbanas con ángulos de elevación de 30° y 45° (1,5-2,5 GHz; ganancia de antena ≤ 10 dBi)



Curvas A: zona urbana, 30°
 B: zona urbana, 45°
 C: zona suburbana, 30°
 D: zona suburbana, 45°

6.2 Predicción de las estadísticas de duración del estado para un solo enlace

Para simular y calcular la calidad de funcionamiento de los receptores del SMTS es necesario conocer la duración, o lo que es lo mismo la distancia, que ha permanecido en cada uno de los tres estados clasificados como abierto, en sombra y bloqueado. Además de las probabilidades de transición de estados, las distribuciones de duración de estado en un modelo de estados de semicadena de Markov se pueden utilizar a fin de simular el canal del SMTS para un solo satélite OSG.

La distribución de las duraciones de estado D (m) en que permanecen cada uno de los estados A, B y C se han obtenido a partir de un conjunto de medidas realizadas en carreteras del Reino Unido durante los meses de invierno a unos 1,5 GHz con satélites OSG. Las medidas se tomaron en los alrededores de Londres en dos lugares distintos: un entorno suburbano con zonas abiertas, carreteras con algunos árboles y casas de dos pisos de altura; y otro entorno de bosque. El ángulo de elevación hacia el satélite era de 29° para un conjunto de mediciones en zonas suburbanas y en el bosque (suburbanas (I) y bosque) y de 13° para el segundo conjunto de mediciones en zonas suburbanas (suburbanas (II)). La antena era omnidireccional y estaba situada sobre una furgoneta. Se aplicaron valores umbral de 5 y 10 dB al nivel medio de potencia para clasificar las mediciones según los tres estados (véase el Cuadro 5).

Basándose en las comparaciones con las duraciones de desvanecimientos y de intervalos entre desvanecimientos dadas en el § 4.1, se obtuvieron las siguientes distribuciones de duración de estado:

La distribución de ley potencial para la duración del estado A es:

$$P_A(D \leq d) = 1 - \beta d^{-\gamma} \tag{19}$$

donde los parámetros β y γ dependen del grado de sombra óptica y $d > \beta^{1/\gamma}$.

La distribución de duración para los estados B y C es un modelo log-normal válido para $d \geq 0,1$ m:

$$P_{B,C}(D \leq d) = (1 + \text{erf}[(\ln(d) - \ln(\alpha)) / \sqrt{2\sigma}]) / 2 \tag{20}$$

donde σ es la desviación típica de $\ln(d)$, $\ln(\alpha)$ es el valor medio de $\ln(d)$ y la función de error es la definida en la Recomendación UIT-R P.1057.

El valor de los parámetros obtenidos para las 3 distribuciones de duración de estado y las correspondientes probabilidades de transición de estado se presentan en el Cuadro 5.

CUADRO 5
Parámetros para las distribuciones de duración de estado
y probabilidades de transición de estado

Entorno	Estado A		Estado B		Estado C		Probabilidades de transición					
	β	γ	α	σ	α	σ	$P_{A \rightarrow B}$	$P_{A \rightarrow C}$	$P_{B \rightarrow A}$	$P_{B \rightarrow C}$	$P_{C \rightarrow A}$	$P_{C \rightarrow B}$
Suburbano (I)	0,88	0,61	1,73	1,11	2,62	0,98	1	0	0,65	0,35	0	1
Suburbano (II)	0,83	0,66	1,89	0,93	3,28	1,04	1	0	0,65	0,35	0	1
Bosque	0,60	0,84	2,05	1,05	1,55	1,02	1	0	0,42	0,58	0	1

7 Diversidad de satélites

En los puntos anteriores se han examinado los enlaces por satélite individual. A fin de mejorar la disponibilidad, los sistemas de satélites múltiples pueden utilizar una diversidad de enlaces. Este punto trata la combinación/conmutación de señales a partir de varios satélites. Se examinan dos casos, a saber, el caso sin correlación en el que se supone que los efectos de sombra que afectan a las señales recibidas de los satélites visibles no están correlacionados, y el caso con correlación en el que existe un grado de correlación dado. En ambas situaciones se supone que las variaciones de la señal originadas por múltiples trayectos no están correlacionadas.

7.1 Caso sin correlación

Con el modelo del § 6 se pueden evaluar los efectos de la diversidad de satélites en el caso de constelaciones de satélites con visibilidad múltiple (es decir, con conmutación al trayecto con menos perturbaciones). Para sistemas OSG, las probabilidades de aparición de cada estado en cada enlace por satélite, es decir, P_{An} , P_{Bn} y P_{Cn} (siendo $n = 1, 2, \dots, N$, donde N es el número de satélites visibles) depende de la elevación de cada satélite θ_n . Las probabilidades de que aparezcan esos estados tras la diversidad con selección de estado, $P_{A:div}$, $P_{B:div}$ y $P_{C:div:div}$ vienen dadas por:

$$P_{A:div} = 1 - \prod_{n=1}^N [1 - P_{An}(\theta_n)] \quad (21a)$$

$$P_{B:div} = 1 - P_{A:div} - P_{C:div} \quad (21b)$$

$$P_{C:div} = \prod_{n=1}^N [P_{Cn}(\theta_n)] \quad (21c)$$

En el caso de no OSG tales como las LEO y las órbitas terrestres medias (MEO), las probabilidades de aparición de los diversos estados en cada enlace por satélite varían con el tiempo, ya que dependen de la elevación del satélite que a su vez varía con el tiempo. Las probabilidades medias de aparición de los estados, es decir, $\langle P_{A:div} \rangle$, $\langle P_{B:div} \rangle$ y $\langle P_{C:div} \rangle$, una vez que ha actuado la diversidad de satélites del instante t_1 al instante t_2 son las siguientes:

$$\langle P_{i:div} \rangle = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P_{i:div}(t) dt \quad (i = A, B \text{ o } C) \quad (22)$$

Sustituyendo P_A , P_B y P_C en la ecuación (11) por $P_{A:div}$, $P_{B:div}$ y $P_{C:div}$ (en el caso de OSG) o $\langle P_{A:div} \rangle$, $\langle P_{B:div} \rangle$ y $\langle P_{C:div} \rangle$, (en el caso de no OSG), la FDA tras la diversidad de satélites con selección de estado se puede calcular de la misma forma. En este caso, deben mantenerse constantes otros valores de parámetros con $\theta = 30^\circ$ a efectos de una utilización provisional.

7.2 Caso con correlación

En muchos casos, las sombras que afectan a dos enlaces que cuentan con un ángulo de separación dado presentan cierto grado de correlación que debe cuantificarse para realizar estimaciones más precisas sobre la disponibilidad general que cabe esperar de un sistema de satélites múltiples. Para ello se emplea el coeficiente de sombra de correlación cruzada. Este parámetro puede tomar valores que oscilan entre ± 1 de tendencia positiva, cercanos al +1, en el caso de ángulo de separación pequeño a incluso valores negativos para separaciones mayores.

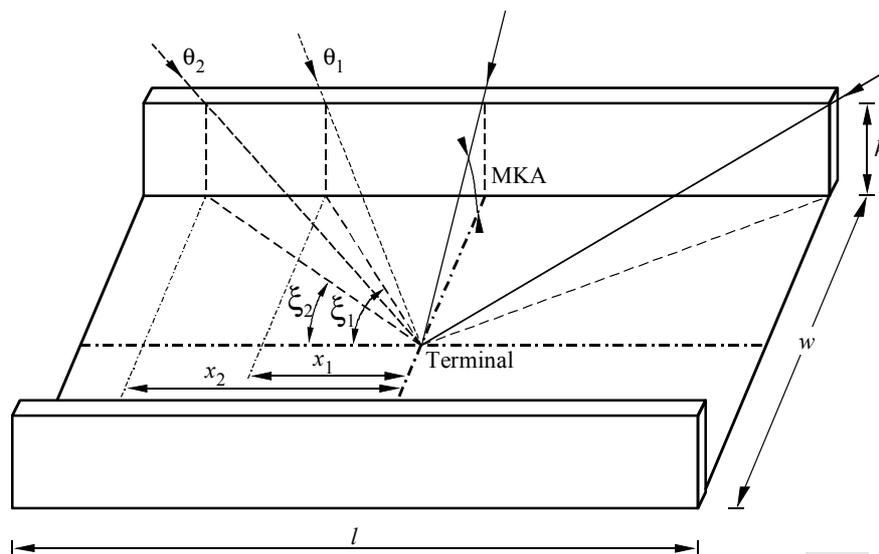
7.2.1 Cuantificación del coeficiente de sombra de correlación cruzada en zonas urbanas

A continuación se describe un modelo sencillo de tres segmentos utilizado para cuantificar el coeficiente de correlación cruzada entre los casos de sombra de zonas urbanas. Se emplea la geometría de la zona urbana canónica, a saber el «cañón urbano». El objetivo es determinar el coeficiente de correlación cruzada ρ (γ), siendo γ la separación angular entre dos enlaces satélite a móvil separados en las calles, que se describen en términos MKA.

La representación geométrica viene indicada en la Fig. 13, donde:

- θ_1 y θ_2 : ángulos de elevación del satélite
- w : anchura media de las calles
- h : altura media de los edificios
- l : longitud de la calle considerada.

FIGURA 13
Geometría de cañón urbano



0681-13

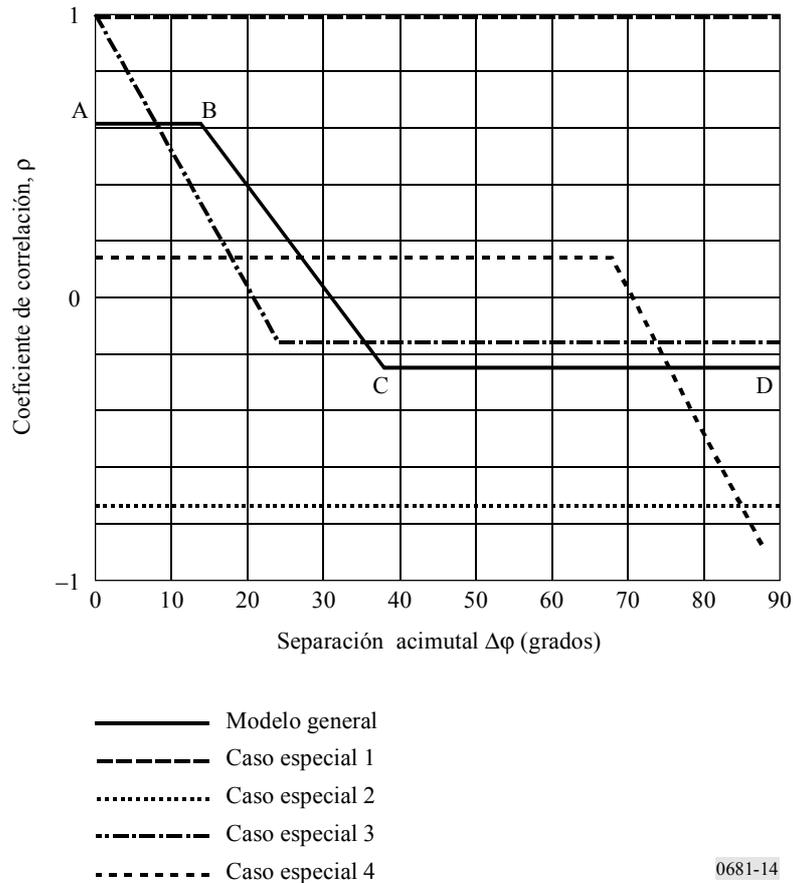
La separación angular entre dos enlaces, γ , puede definirse en términos de ángulos más convenientes: las elevaciones de los dos satélites, θ_i y θ_j , y su separación acimutal, $\Delta\phi$; es decir, el coeficiente de correlación cruzada de la sombra puede expresarse mediante $\rho(\theta_i, \theta_j, \Delta\phi)$.

Los resultados típicos obtenidos con este modelo se representan esquemáticamente en la Fig. 14 que muestra un comportamiento general con un modelo de tres segmentos definidos por los puntos A, B, C y D. Además de este modelo general, existen diversos casos especiales en los que coinciden dos o más de los cuatro puntos.

La Fig. 14 muestra que, en general, suele existir un lóbulo principal de valores positivos y decrecientes de correlación cruzada para una separación acimutal pequeña (típicamente $\Delta\phi < 30^\circ$) mientras que, para valores más elevados de $\Delta\phi$, el coeficiente tiende a estabilizarse a un valor negativo constante. El lóbulo presentará los máximos de mayor valor cuando los dos satélites se encuentren en elevaciones similares. A medida que la diferencia de las elevaciones aumenta ($\theta_i \gg \theta_j$), el lóbulo mostrará un máximo muy inferior.

FIGURA 14

Modelo de coeficiente de correlación cruzada de tres segmentos



0681-14

También se han identificado los casos especiales de este modelo de tres segmentos: el caso especial 1 se da cuando ambos satélites se encuentran por encima del MKA para toda separación acimutal. En este caso, el coeficiente de correlación toma un valor positivo constante de +1 para todo $\Delta\phi$. No es un caso relevante ya que en esta situación no es necesaria la diversidad de satélites. El caso especial 2 aparece cuando un satélite siempre se encuentra por encima del MKA y el otro siempre está por debajo (excepto en ambos extremos del conducto). En este caso, el coeficiente de correlación adopta un valor negativo constante. El caso especial 3 ocurre cuando los dos satélites se encuentran en la misma elevación. En esta situación, el lóbulo de correlación empieza a disminuir a partir de un valor máximo +1 (es decir, satélites coubicados). Este caso especial se aplica a sistemas basados en satélites OSG, muy separados en acimut, pero con elevaciones muy similares. Por último, el caso especial 4 se da con satélites cuyas elevaciones son muy distintas ($\theta_i \gg \theta_j$). En este caso, el lóbulo de correlación se extiende a lo largo de una gama de separaciones acimutales mucho más amplia pero muestra valores de correlación positivos pequeños.

Cabe destacar que, habida cuenta de la geometría de la situación (conducto callejero) y de que se supone que el usuario se encuentra en medio de la calle, los valores de correlación son simétricos para los cuatro cuadrantes $\Delta\phi$: por este motivo sólo se muestra un cuadrante en la Fig. 14.

En el modelo (véase la Fig. 13) se utilizan los siguientes datos de entrada: elevaciones del satélite, θ_1 y θ_2 (grados), altura media del edificio, h (m), anchura media de la calle, w (m), y longitud de la calle que se considera, l (m). Se aconseja utilizar un valor elevado para este último parámetro, por ejemplo $l \geq 200$ m. Además, se supone que $\theta_2 \geq \theta_1$. La resolución de la separación acimutal del modelo, $\Delta\phi$, es 1° y es válida para todas las bandas de frecuencia, si bien es más precisa en las bandas por encima de unos 10 GHz.

Para calcular los valores del coeficiente de correlación cruzada y las separaciones acimutales correspondientes a los puntos del modelo A, B, C y D deberán seguirse los siguientes pasos:

Paso 1: Calcular los valores auxiliares x_1 , x_2 , M_1 y M_2 y los ángulos ξ_1 y ξ_2 (véase la Fig. 13):

$$x_1 = \sqrt{\left(\frac{h}{\operatorname{tg} \theta_1}\right)^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2} \quad \text{y} \quad x_2 = \sqrt{\left(\frac{h}{\operatorname{tg} \theta_2}\right)^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2} \quad (23)$$

- Si $(x_{1,2})^2 < 0$ se va al Paso 6. Esta situación surge cuando el satélite 1 y/o 2 siempre se encuentra en condiciones de visibilidad directa para toda separación acimutal.
- Si $x_{1,2} > l/2$, se obtiene $x_{1,2} = l/2$. Esta situación se da cuando existe visibilidad para el satélite 1 y/o 2 solamente a ambos extremos de la calle.

$$\xi_1 = \text{redondeado} \left(\operatorname{arctg} \frac{w/2}{x_1} \right) \quad \text{y} \quad \xi_2 = \text{redondeado} \left(\operatorname{arctg} \frac{w/2}{x_2} \right) \quad (24)$$

$$M_1 = \frac{\xi_1 + 0,5}{90} \quad \text{y} \quad M_2 = \frac{\xi_2 + 0,5}{90} \quad (25)$$

donde «redondeado» significa redondeado al valor entero más próximo (grados).

Paso 2: Cálculo de la información auxiliar relacionada con los puntos del modelo A y D.

Para el punto A:

$$N_{11} = 4\xi_1 + 2 \quad N_{00} = 360 - 4\xi_2 - 2 \quad N_{01} = 4(\xi_2 - \xi_1) \quad N_{10} = 0 \quad (26)$$

Para el punto D:

- Si $\xi_1 + \xi_2 \leq 90$,

$$N_{11} = 0 \quad N_{00} = 360 - 4\xi_1 - 4\xi_2 - 4 \quad N_{01} = 4\xi_2 + 2 \quad N_{10} = 4\xi_1 + 2 \quad (27a)$$

- Si $\xi_1 + \xi_2 > 90$,

$$N_{11} = 4\xi_1 + 4\xi_2 + 4 - 360 \quad N_{00} = 0 \quad N_{01} = 360 - 4\xi_1 - 2 \quad N_{10} = 360 - 4\xi_2 - 2 \quad (27b)$$

Paso 3: Cálculo del coeficiente de correlación cruzada en los puntos A y D:

$$\rho_{A,D} = \frac{1}{359} \frac{N_{11}(1-M_1)(1-M_2) + N_{00}(0-M_1)(0-M_2) + N_{10}(1-M_1)(0-M_2) + N_{01}(0-M_1)(1-M_2)}{\sigma(\theta_1) \sigma(\theta_2)} \quad (28)$$

$$\sigma^2(\theta_1) = \frac{(4\xi_1 + 2)(1-M_1)^2 + (360 - 4\xi_1 - 2)(0-M_1)^2}{359} \quad (29a)$$

$$\sigma^2(\theta_2) = \frac{(4\xi_2 + 2)(1-M_2)^2 + (360 - 4\xi_2 - 2)(0-M_2)^2}{359} \quad (29b)$$

Paso 4: En el punto B el coeficiente de correlación es el mismo que en el punto A y su separación acimutal, $\Delta\phi$, viene dada por:

$$\text{Acimut}_{\text{punto B}} = \xi_2 - \xi_1 \quad \text{grados} \quad (30)$$

Paso 5: En el punto C el coeficiente de correlación es el mismo que en el punto D y su separación acimutal, $\Delta\phi$, viene dada por:

$$- \quad \text{Si } \xi_1 + \xi_2 \leq 90, \quad \text{Acimut}_{\text{punto C}} = \xi_1 - \xi_2 \quad \text{grados} \quad (31a)$$

$$- \quad \text{Si } \xi_1 + \xi_2 > 90, \quad \text{Acimut}_{\text{punto C}} = 180 - \xi_1 - \xi_2 \quad \text{grados} \quad (31b)$$

Paso 6: En este caso, para una o ambas elevaciones, siempre existen condiciones de visibilidad directa. El coeficiente de correlación se calcula de forma ligeramente distinta a la del Paso 3:

- Si ambos satélites son siempre visibles, el coeficiente de correlación cruzada es constante e igual a +1 para todo $\Delta\phi$.
- Si uno de los satélites siempre es visible, el coeficiente de correlación cruzada también es constante y viene dado por:

$$\rho = \left(\frac{N_{11}}{180} - 1 \right) \quad (32)$$

donde $N_{11} = 4\xi_1 + 2$, y ξ_1 se calcula como en el Paso 1.

7.2.2 Cálculos de la disponibilidad

Una vez determinado el coeficiente de correlación cruzada, es posible calcular la mejora de disponibilidad introducida por el uso de la diversidad de satélites. Aquí se indican las expresiones para calcular la disponibilidad del sistema en el caso de diversidad de dos satélites. Habida cuenta de los márgenes normalmente pequeños (o de las gamas de control de potencia) empleados en los sistemas de satélites del servicio móvil terrestre, solamente es necesario examinar los efectos de sombra. Se trata de una hipótesis de trabajo razonable ya que los sucesos de disponibilidad corresponderán a los enlaces en condiciones de visibilidad directa en las que las variaciones creadas por múltiples trayectos son de tipo Rice y, por consiguiente, bastante pequeñas. En el caso de condiciones de sombra (fuerte o ligero), los enlaces se encontrarán en un estado de interrupción incluso si los múltiples trayectos dan lugar a una mejora significativa de la señal.

Dados dos enlaces con una cierta separación angular y probabilidades de indisponibilidad p_1 y p_2 , y un coeficiente de correlación cruzada de sombra ρ , la improbabilidad de disponibilidad general después de la diversidad de satélites viene dada por:

$$p_0 = \rho \sqrt{p_1(1-p_1)} \sqrt{p_2(1-p_2)} + p_1 p_2 \quad (33)$$

y la probabilidad de la disponibilidad será de $1 - p_0$. Los valores válidos de ρ en la ecuación (33) se limitan a aquellos que dan valores no negativos para p_0 . Las probabilidades p_1 y p_2 , para zonas urbanas pueden calcularse mediante el modelo dado en el § 4.2.

Los cálculos generales para un intervalo de tiempo dado o para un periodo de constelación entero requieren el cálculo de las medias ponderadas en todas las posiciones (acimutal y elevaciones) de los dos satélites con respecto al terminal de usuario.

7.3 Modelización de los efectos producidos por diversos satélites utilizando MKF

Las MKF definidas en el § 4.4 pueden utilizarse para calcular las disponibilidades de múltiples satélites. La posible correlación parcial de los efectos de obstrucción entre los diversos enlaces ya se tienen en cuenta en la propia geometría de las máscaras. En la Fig. 15 se muestra un ejemplo de cálculo de la disponibilidad de un sistema formado por dos satélites OSG. Las líneas A-B y C-D indican los trayectos de barrido que se han de seguir para calcular la disponibilidad combinada. La línea A-B indica el barrido para un acimut de 360° y un ángulo de elevación θ_1 correspondiente al satélite-1 y la línea C-D indica un barrido para un acimut de 360° y un ángulo de elevación θ_2 correspondiente al satélite-2. A fin de tener en cuenta las posibles correlaciones cruzadas de obstrucción, el barrido de 360° se debe realizar manteniendo una separación acimutal $\Delta\phi$, entre los dos satélites.

La utilización de las MKF de calles también se puede aplicar a múltiples satélites OSG y al caso de constelaciones de satélites no OSG. En este último caso, el estudio consistiría en la iteración del cálculo de los barridos de orientación de calle de 360° durante un número suficientemente elevado de configuraciones instantáneas de la constelación de satélites. En este contexto, por configuración instantánea se entiende cada una de las posiciones instantáneas (ángulos acimutales y de elevación) de los distintos satélites por encima de un mínimo ángulo de elevación de funcionamiento, θ_{min} . Si se define un intervalo adecuado, ΔT , y un periodo de observación, T_{obs} , se puede calcular la disponibilidad como la media temporal, ponderada según la orientación de calle, de los resultados obtenidos para cada configuración instantánea. Unos valores de $\Delta T = 1$ min y $T_{obs} =$ periodo de constelación proporcionan los resultados adecuados.

FIGURA 15
Cálculo de la disponibilidad total del sistema para una constelación de dos satélites OSG con respecto a una bocacalle

