

RECOMENDACIÓN UIT-R P.681-3*

DATOS DE PROPAGACIÓN NECESARIOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES MÓVILES TERRESTRES TIERRA-ESPACIO

(Cuestión UIT-R 207/3)

(1990-1994-1995-1997)

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, apantallamiento por obstáculos y bloqueo 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, el bloqueo y el apantallamiento por obstáculos. Los resultados presentados en este Anexo se basan en medidas realizadas en UHF a 1,5 GHz (banda L) y a 870 MHz.

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

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

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 aumentan 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 Apantallamiento por obstáculos

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 apantallamiento por obstáculos situados al borde del camino ampliado. La arboleda al borde del camino se representa por el porcentaje de apantallamiento óptico causado 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 Cálculo del desvanecimiento debido al apantallamiento por obstáculos de árboles situados al borde del camino

El procedimiento siguiente permite calcular el apantallamiento 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 el apantallamiento causado 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 inclinado

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:

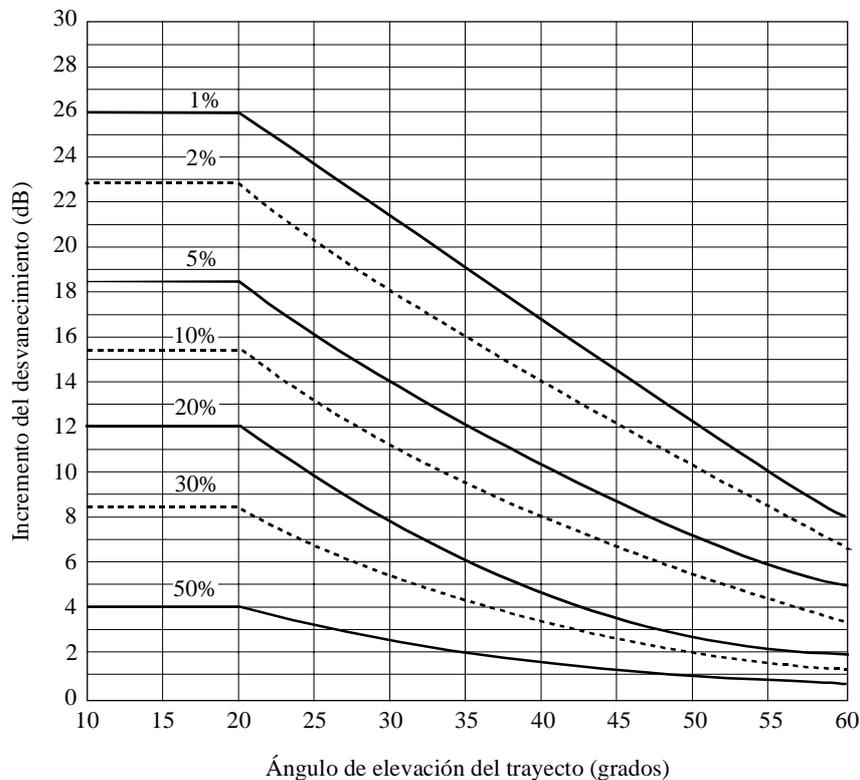
$$A(p, \theta, f) = A_{20}(20\%, \theta, f) \frac{1}{\ln 4} \ln \left(\frac{80}{p} \right) \quad \text{para} \quad 80\% \geq p > 20\% \quad (5)$$

$$= A_{20}(p, \theta, f) \quad \text{para} \quad 20\% \geq p > 1\%$$

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%.

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



0681-01

4.1.1 Ampliación a ángulos de elevación > 60°

El modelo de apantallamiento 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°.

CUADRO 1

Incremento del desvanecimiento (dB) para 80° de elevación

P (%)	Apantallamiento 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

4.1.2 Aplicación del modelo de apantallamiento por obstáculos situados al borde del camino a los sistemas no geostacionarios (no osg) del SMTS

El método de predicción anterior se obtuvo y se aplica a las geometrías de los sistemas móviles terrestres por satélite en las que el ángulo de elevación es constante. Para los sistemas no geostacionarios, 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;
- 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;
- 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 del § 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.

4.2 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.

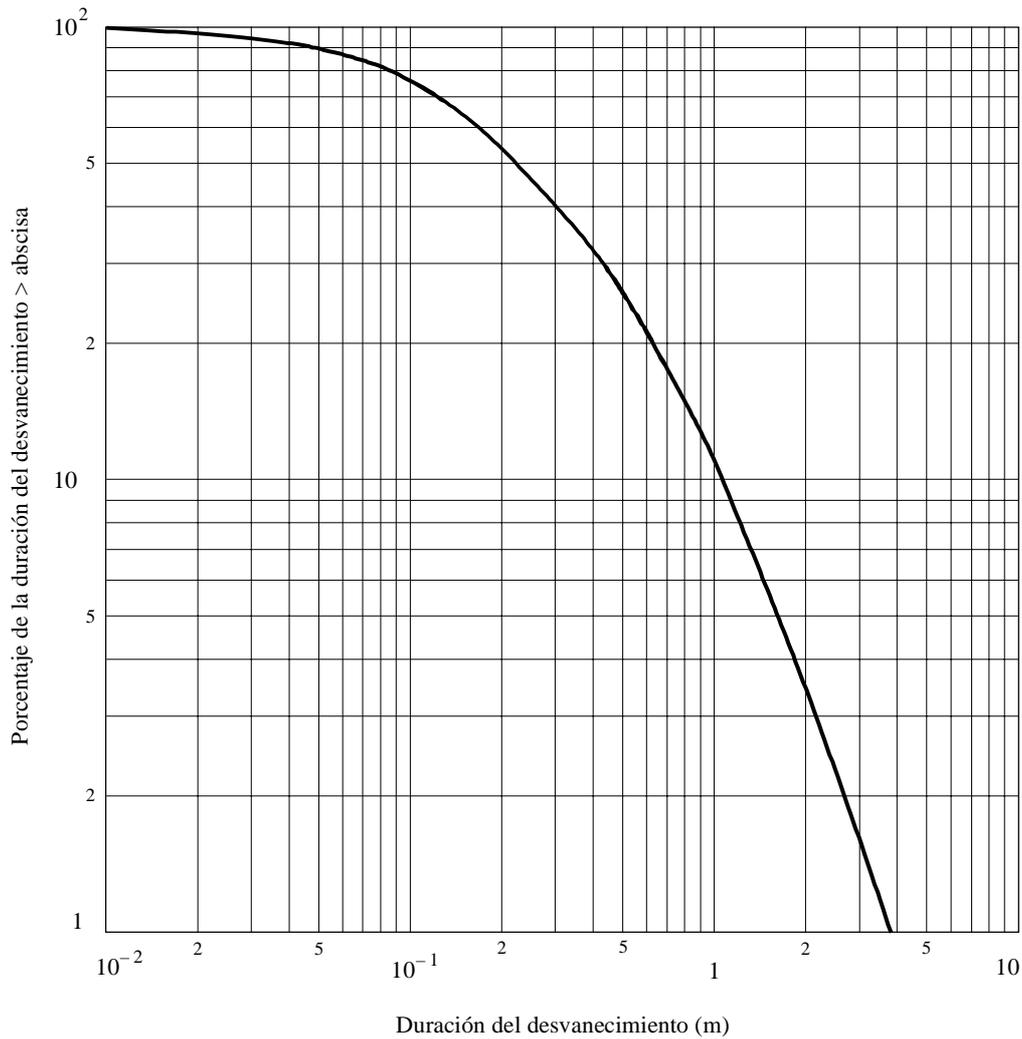
$$P(FD > dd \mid A > A_q) = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(dd) - \ln(\alpha)}{\sqrt{2} \sigma} \right] \right) \quad (6)$$

donde $P(FD > dd \mid A > A_q)$ representa la probabilidad de que el tiempo de desvanecimiento en distancia, FD , rebese la distancia, dd (m), con la condición de que la atenuación, A , rebese 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.

FIGURA 2

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



0681-02

El modelo de la ecuación (6) se basa en mediciones efectuadas con un ángulo de elevación de 51° y es aplicable a apantallamientos entre moderados e intensos (porcentaje de apantallamiento óptico 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.

4.3 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:

$$P(NFD > dd \mid A < A_q) = \beta (dd)^{-\gamma} \tag{7}$$

siendo $P(NFD > dd \mid A < A_q)$ la probabilidad en porcentaje de que una distancia continua sin desvanecimiento, NFD , rebese 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 apantallamiento «moderado» y «extremo», es decir, con porcentajes de apantallamiento óptico de 55%-75% y 75%-90%, respectivamente. Se ha utilizado un umbral de desvanecimiento de 5 dB para A_q .

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 apantallamiento	β	γ
Moderado	20,54	0,58
Extremo	11,71	0,8371

4.4 Consideración especial para el caso de terminales portátiles (bloqueo 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, HEO e ICO), se espera que el usuario del terminal portátil coopere, es decir, que se sitúe de forma que se evite el bloqueo provocado por la cabeza (o el cuerpo) y por el entorno. Para los sistemas de órbita 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 § 4.1.2. 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. 3a 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. 3b muestra la variación del nivel relativo de la señal en función del ángulo acimutal ϕ de la Fig. 3a. Puede verse en la Fig. 3b que la reducción máxima del nivel de la señal debida al bloqueo 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. 3b 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.

5 Modelos de trayectos múltiples para condiciones de visibilidad directa despejada

En muchos casos, el terminal móvil tiene una línea de visibilidad directa despejada (apantallamiento 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 azimut;
- 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 3a

Geometría de la cabeza humana y de una antena

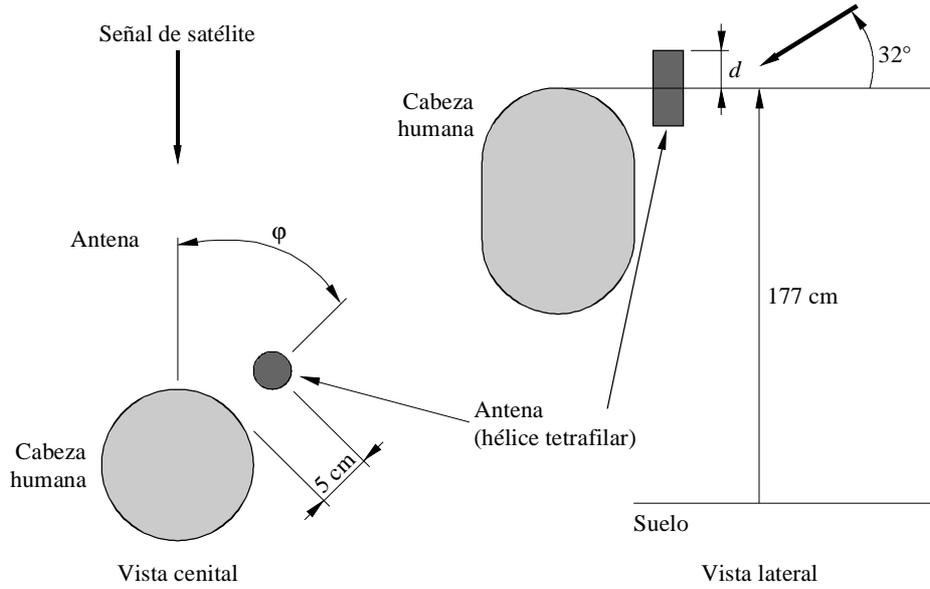
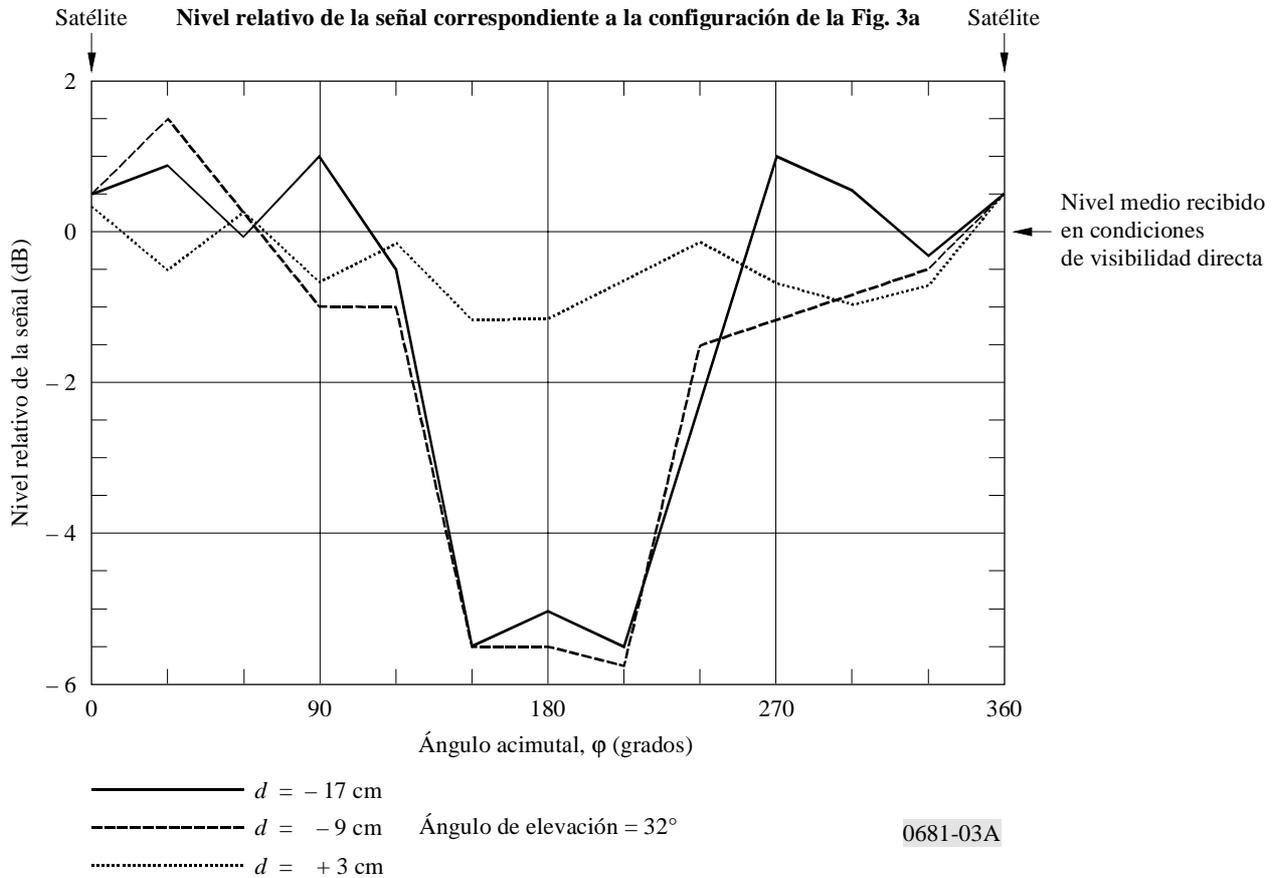


FIGURA 3b



5.1 Trayectos múltiples en un ambiente montañoso

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

$$p = a A^{-b} \quad (8)$$

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 de 870 MHz. Obsérvese que este modelo es válido cuando el efecto de apantallamiento 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. 4 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°-60°. Se ha elaborado el siguiente modelo a partir de los datos medidos:

$$p = u \exp(-vA) \quad (9)$$

para:

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

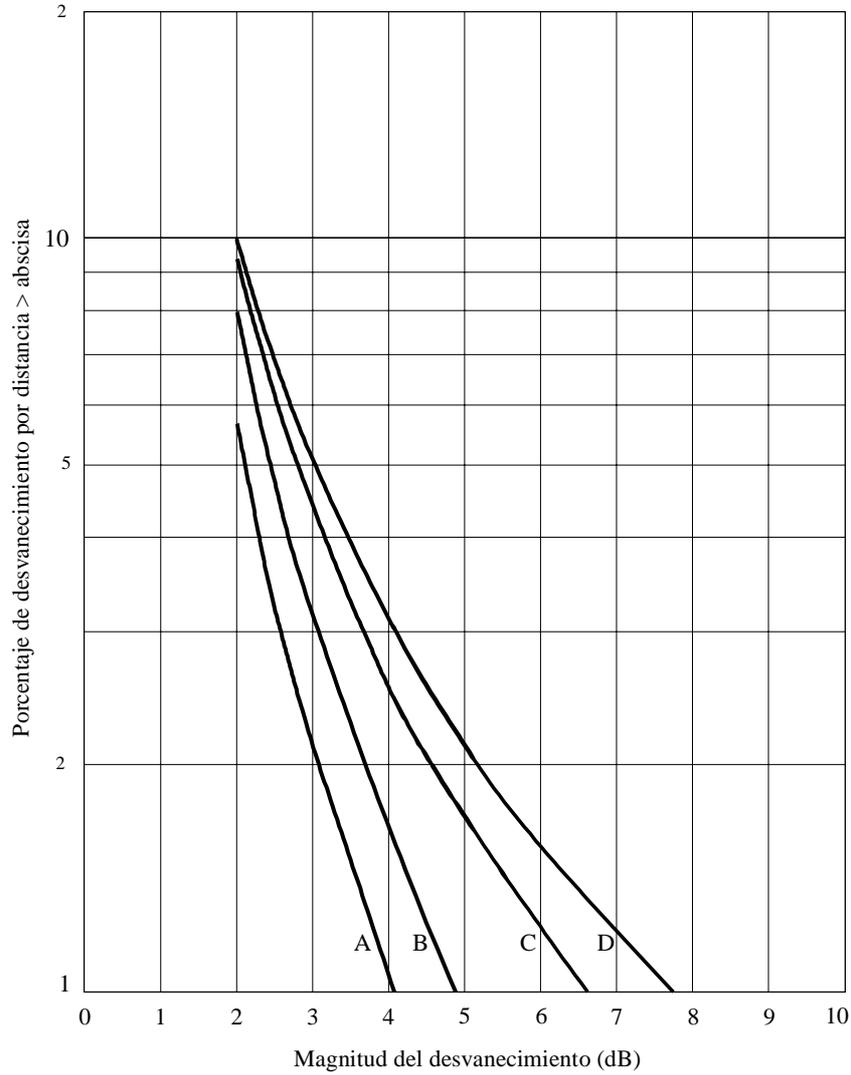
siendo:

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.

FIGURA 4

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°

0681-04

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

CUADRO 4

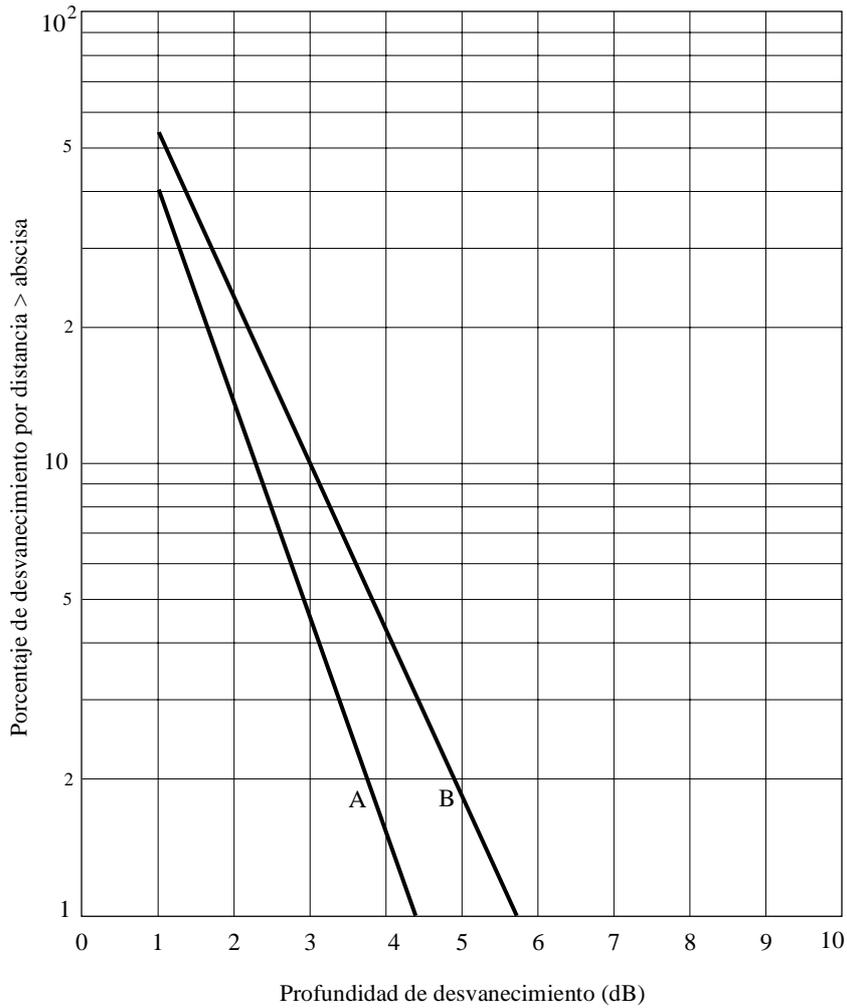
Parámetros de ajuste exponencial óptimo de las distribuciones del desvanecimiento acumulado para el caso de trayectos múltiples en caminos bordeados de árboles

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

En la Fig. 5 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).

FIGURA 5

Ajuste óptimo de las distribuciones del desvanecimiento acumulativo para desvanecimientos debidos a la propagación por trayectos múltiples en caminos bordeados de árboles



Curvas A: 870 MHz
 B: 1,5 GHz

0681-05

