

## RECOMENDACIÓN UIT-R P.1816

**Predicción de los perfiles de tiempo y de espacio para los servicios móviles terrestres de banda ancha que utilizan las bandas de ondas decimétricas y centimétricas**

(Cuestión UIT-R 211/3)

(2007)

**Cometido**

Esta Recomendación tiene como fin proporcionar directrices para la predicción de los perfiles de tiempo y de espacio en el caso de servicios móviles terrestres de banda ancha que utilizan frecuencias comprendidas entre 0,7 GHz y 9 GHz, para distancias de 0,5 km a 3 km y tanto en zonas urbanas como suburbanas.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

- a) que es necesario facilitar directrices a los ingenieros que planifican los servicios móviles terrestres de banda ancha en las bandas de ondas decimétricas y centimétricas;
- b) que los perfiles de tiempo y de espacio pueden ser importantes para evaluar la influencia de la propagación multitrayecto;
- c) que se pueden modelar más convenientemente los perfiles de tiempo y de espacio si se consideran las condiciones de propagación, tales como la altura del edificio, la altura de la antena, la distancia entre la estación de base y la estación móvil y la anchura de banda del receptor,

*observando*

- a) que se recomienda la utilización de los métodos de la Recomendación UIT-R P.1546 para la predicción de punto a zona de la intensidad de campo en los servicios de radiodifusión, móvil terrestre, marítimo y en ciertos servicios fijos, en la gama de frecuencias de 30 MHz a 3 000 MHz y para distancias de 1 km a 1 000 km;
- b) que se recomienda la utilización de los métodos de la Recomendación UIT-R P.1411 para evaluar las características de propagación de servicios en exteriores de corto alcance (hasta 1 km) entre 300 MHz y 100 GHz;
- c) que se recomienda la utilización de los métodos descritos en la Recomendación UIT-R P.1411 con objeto de estimar la forma media del perfil de retardo en el caso con visibilidad directa, en un entorno urbano de construcciones altas para macrocélulas y picocélulas;
- d) que se recomienda la utilización los métodos descritos en la Recomendación UIT-R P.1407 para especificar la terminología de multitrayecto y para calcular la dispersión de retardo y la dispersión angular de llegada, utilizando el perfil de retardo y el perfil angular de llegada, respectivamente;
- e) que se recomienda utilizar los métodos de la Recomendación UIT-R M.1225 para evaluar la calidad de funcionamiento de los sistemas IMT-2000 sujetos a la propagación multitrayecto,

*recomienda*

- 1 que se utilice el contenido del Anexo 1 a fin de calcular el perfil de retardo medio a largo plazo para los servicios móviles de banda ancha en zonas urbanas y suburbanas, que utilizan las bandas de ondas decimétricas y centimétricas;
- 2 que se utilice el contenido del Anexo 2 a fin de determinar el perfil de potencia angular a largo plazo para los servicios móviles de banda ancha en zonas urbanas y suburbanas, que utilizan las bandas de ondas decimétricas y centimétricas.

## Anexo 1

### 1 Introducción

Como se indica a continuación, en la Recomendación UIT-R P.1407 se hace énfasis en la importancia del perfil de retardo.

Las características de la propagación multitrayecto son un factor importante para controlar la calidad de las comunicaciones móviles digitales. Físicamente, las características de esta propagación incluyen el número de trayectos, las amplitudes, la diferencia de longitudes de trayecto (retardo) y el ángulo de llegada. Esto puede caracterizarse por la función transferencia del trayecto de propagación (características amplitud-frecuencia) y la anchura de banda de correlación.

Como se ha indicado, el perfil de retardo es un parámetro fundamental para evaluar las características de la propagación multitrayecto. Una vez se tenga el modelo del perfil, pueden deducirse del mismo los parámetros del trayecto múltiple tales como la dispersión de retardo y la anchura de banda de correlación.

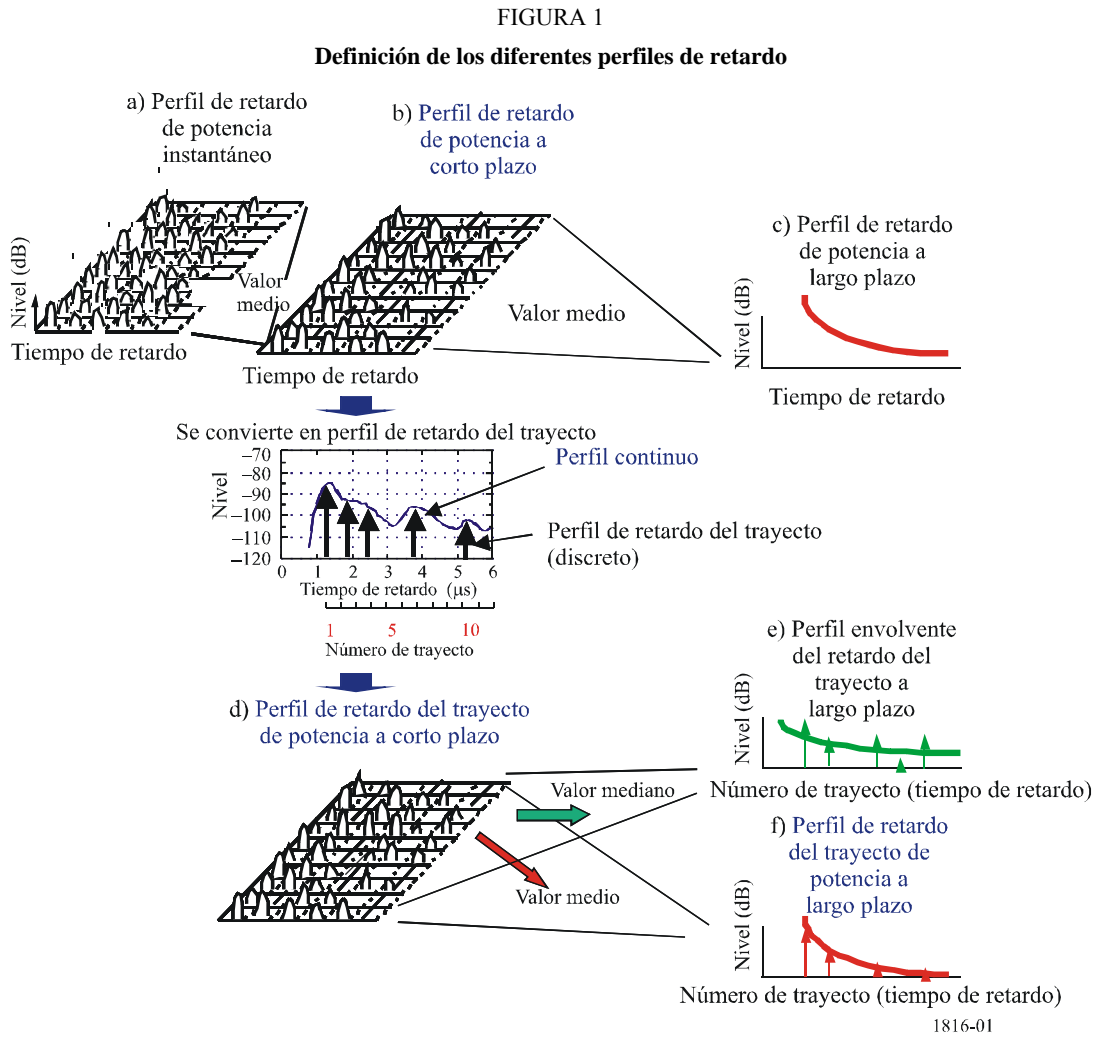
Los parámetros de propagación relacionados con el entorno del trayecto afectan la forma del perfil. Un perfil es el resultado de varias ondas con diferentes amplitudes y distintos tiempos de retardo. Se sabe que las ondas cuyo retardo es mayor tienen menores amplitudes debido al largo trayecto que han recorrido. Se puede aproximar el perfil medio de retardo (los perfiles de retardo a largo plazo) como una función exponencial en los trayectos con visibilidad directa de corto alcance. En la Recomendación UIT-R P.1411 se utiliza esta aproximación para el cálculo de las características multitrayecto en una microcélula en una calle. En el caso de los trayectos sin visibilidad directa, se pueden aproximar los perfiles de retardo promedio como una función exponencial (dB).

Tanto la cantidad como el periodo de las ondas que llegan en un perfil de retardo son función de la anchura de banda en recepción, debido a que la resolución temporal está limitada por la anchura de banda en frecuencia del receptor. Para calcular el perfil de retardo debe tenerse en cuenta la limitación de anchura de banda en frecuencia, que está estrechamente relacionada con la metodología que se emplea para dividir la potencia recibida en varias ondas.

A fin de tener en cuenta la anchura de banda en frecuencia o la resolución del trayecto, se define el perfil de retardo compuesto por varios trayectos como el perfil de retardo del trayecto.

En la Fig. 1 se representan diversos perfiles de retardo y sus métodos de procesamiento. Como puede verse en la figura, los perfiles de retardo de potencia a corto plazo se obtienen promediando en el espacio los perfiles instantáneos de retardo de potencia a lo largo de varias decenas de longitudes de onda, con objeto de suprimir la variación del desvanecimiento rápido; los perfiles de retardo de potencia a largo plazo se obtienen tras promediar en el espacio los perfiles de retardo de potencia a corto plazo a la misma distancia desde la estación de base, aproximadamente, con el fin de suprimir también la variación causada por el apantallamiento.

Además, en lo que respecta al perfil de retardo del trayecto de largo plazo es posible definir dos perfiles diferentes. El primero, el perfil envolvente del retardo del trayecto, se basa en el valor mediano de cada trayecto de retardo en los perfiles de retardo del trayecto; indica la forma del perfil en la zona que se está considerando, como se muestra en la Fig. 1. El segundo, es el perfil de retardo del trayecto de potencia que se basa en el valor medio de potencia de cada trayecto de retardo en los perfiles de retardo del trayecto.



## 2 Definición de los perfiles de retardo y de los parámetros

### 2.1 Perfil de retardo de potencia – se define como el perfil de retardo de potencia con un tiempo continuo de retardo en exceso

- a) *Perfil de retardo de potencia instantáneo*: Densidad de potencia de la respuesta al impulso en un instante y un punto determinados.
- b) *Perfil de retardo de potencia a corto plazo*: Perfil de retardo que se obtiene mediante el promedio espacial de los perfiles de retardo de potencia instantáneos en cada emplazamiento, dentro de una distancia en la que no varíen los componentes multitrayecto.
- c) *Perfil de retardo de potencia a largo plazo*: Perfil de retardo que se obtiene mediante el promedio espacial de los perfiles de retardo de potencia a corto plazo, en un radio aproximadamente igual a la distancia desde la estación de base.

**2.2 Perfil de retardo del trayecto – se define como el perfil de retardo con un tiempo de retardo en exceso discreto normalizado a una resolución temporal  $1/B$ . Incluye los perfiles de retardo del trayecto de potencia a corto y a largo plazo, y el perfil envolvente del retardo del trayecto a largo plazo**

- d) *Perfil de retardo del trayecto de potencia a corto plazo*: Perfil de retardo de potencia a corto plazo con un tiempo de retardo en exceso discreto normalizado a una resolución temporal  $1/B$ .
- e) *Perfil envolvente del retardo del trayecto a largo plazo*: El perfil de retardo es el valor mediano de los perfiles de retardo del trayecto de potencia a corto plazo, en un radio aproximadamente igual a la distancia desde la estación de base; indica la forma del perfil de retardo en la zona considerada.
- f) *Perfil de retardo del trayecto de potencia a largo plazo*: Perfil de retardo que se obtiene al promediar los perfiles de retardo del trayecto de potencia a corto plazo, en un radio aproximadamente igual a la distancia desde la estación de base; indica las características generales del perfil de retardo en la zona considerada.

**2.3 Parámetros**

- $i$ : tiempo de retardo en exceso normalizado a una resolución temporal  $1/B$ , que corresponde a una anchura de banda  $B$  e  $i = 0, 1, 2, \dots$   
(donde  $i = 0$  indica el primer trayecto de llegada sin tiempo de retardo en exceso, e  $i = k$  indica el tiempo de retardo en exceso medio de  $k/B$  ( $\mu\text{s}$ ))
- $\langle H \rangle$ : altura media del edificio (m), 5-50 m: altura sobre el nivel del suelo de la estación móvil
- $h_b$ : altura de la antena de la estación de base (m), 20-150 m: altura sobre el nivel del suelo de la estación móvil
- $d$ : distancia desde la estación de base (km), 0,5-3 km
- $B$ : anchura de banda o velocidad de segmentos (MHz), 0,5-50 MHz
- $f$ : frecuencia de portadora (GHz), 0,7-9 GHz
- $P_{\text{érridas}}(d)$ : fórmula general de las pérdidas de propagación, por ejemplo conforme a la Recomendación UIT-R P.1546 (dB)
- $\Delta L$ : diferencia de nivel entre la potencia de cresta del trayecto y la potencia de corte (dB). En la Recomendación UIT-R P.1407 se describe la potencia de corte como  $L_0$ .
- $N_{\text{trayecto}}(d, \Delta L)$ : número de trayectos observables teniendo en cuenta  $\Delta L$ .

**3 Perfil envolvente del retardo del trayecto**

**3.1 Perfil envolvente del retardo del trayecto normalizado mediante la primera potencia de trayecto de llegada en zonas urbanas y suburbanas**

El perfil envolvente del retardo del trayecto  $E(i, d)$  normalizado mediante la primera potencia de trayecto de llegada a una distancia  $d$ , viene dado por:

$$E(i, d) = \alpha(d) \log(1+i) \quad \text{dB} \quad (1)$$

siendo:

$$\alpha(d) = -\{19,1 + 9,68 \log(h_b / \langle H \rangle)\} B^{\{-0,36 + 0,12 \log(h_b / \langle H \rangle)\}} d^{\{-0,38 + 0,21 \log(B)\}} \quad (2)$$

### 3.2 Perfil envolvente del retardo del trayecto normalizado mediante las potencias de todos los trayectos de retardo en zonas urbanas y suburbanas

El perfil envolvente del retardo del trayecto  $E_N(i, d)$  que se normaliza mediante la suma de la potencia de todos los trayectos de retardo,  $A_E(d)$ , a una distancia  $d$ , viene dado por:

$$E_N(i, d) = E(i, d) - A_E(d) \quad \text{dB} \quad (3)$$

donde:

$$A_E(d) = 10 \log \left( \sum_{i=0}^{\infty} 10^{E(i, d)/10} \right) \approx 10 \log \left( \sum_{i=0}^{N_{\text{trayecto}}-1} 10^{E(i, d)/10} \right) \quad \text{dB} \quad (4)$$

$A_E(d)$  se puede aproximar mediante la siguiente función, con  $N_{\text{trayecto}}$  como un parámetro.

$$A_E(d) \approx 10^{\{10,3+10,93 \log(\log N_{\text{trayecto}}) + (3,57+5,17 \log(\log N_{\text{trayecto}}))(\alpha(d)/10)\}} \quad (5)$$

Por otra parte, el número de trayectos observables teniendo en cuenta  $\Delta L$ , viene dado por:

$$N_{\text{trayecto}}(d, \Delta L) = 10^{-\Delta L/\alpha(d)} \quad (6)$$

## 4 Perfil de retardo del trayecto de potencia

El factor de conversión  $c(i)$  que permite obtener la potencia a partir de la relación entre el contorno del perfil de retardo del trayecto y el perfil de retardo del trayecto de potencia se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$c(i) = \begin{cases} 1 & (i=0) \\ \min\left(0,63, \left\{0,59 e^{-0,0172B} + (0,0172 + 0,0004B) < H >\right\} e^{-\{0,077-0,00096B\}-(0,0014-0,000018B) < H >\}i}\right) & (i \geq 1) \end{cases} \quad (7)$$

donde  $\min(x, y)$  escoge el valor mínimo entre  $x$  e  $y$ .

### 4.1 Perfil de retardo del trayecto de potencia normalizado mediante la potencia del primer trayecto

El perfil de retardo de trayecto de potencia normalizado por la primera potencia de trayecto,  $P(i, d)$ , se puede calcular utilizando la forma del perfil de retardo del trayecto y el factor de conversión,  $c(i)$ , de la siguiente manera:

$$P(i, d) = E(i, d) + 10 \log(c(i)) \quad \text{dB} \quad (8)$$

### 4.2 Perfil de retardo del trayecto de potencia normalizado mediante la suma de las potencias de todos los trayectos de retardo

El perfil de retardo del trayecto de potencia  $P_N(i, d)$  normalizado mediante la suma de las potencias de todos los trayectos de retardo,  $A_P(d)$  a una distancia  $d$ , es:

$$P_N(i, d) = P(i, d) - A_P(d) \quad \text{dB} \quad (9)$$

donde:

$$A_P(d) = 10 \log \left( \sum_{i=0}^{\infty} 10^{P(i, d)/10} \right) \approx 10 \log \left( \sum_{i=0}^{N_{\text{trayecto}}-1} 10^{P(i, d)/10} \right) \quad \text{dB} \quad (10)$$

## 5 Perfil de retardo del trayecto para representar las pérdidas en zonas urbanas y suburbanas

### 5.1 Perfil envolvente del retardo del trayecto para representar las pérdidas en zonas urbanas y suburbanas

La forma del perfil de retardo del trayecto,  $L(i, d)$ , para la representación de las pérdidas se obtiene a través de un método general de pérdidas de trayecto,  $Loss(d)$ , como:

$$L(i, d) = Loss(d) - E_N(i, d) \quad \text{dB} \quad (11)$$

### 5.2 Perfil de retardo del trayecto de potencia para representar las pérdidas en zonas urbanas y suburbanas

El perfil de retardo del trayecto de potencia,  $L_p(i, d)$ , para la representación de las pérdidas se obtiene a través de un método general de pérdidas de trayecto,  $Loss(d)$ , de la siguiente manera:

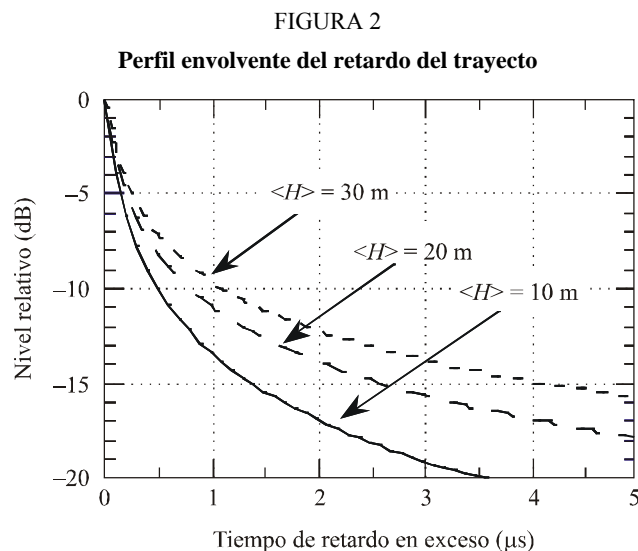
$$L_p(i, d) = Loss(d) - P_N(i, d) \quad \text{dB} \quad (12)$$

## 6 Ejemplos

### 6.1 Perfil envolvente del retardo del trayecto en zonas urbanas y suburbanas

#### 6.1.1 Perfil envolvente del retardo del trayecto normalizado mediante la potencia del primer trayecto de llegada

Cuando la altura de la antena de la estación de base,  $h_b$ , la distancia desde dicha estación,  $d$ , y la anchura de banda (velocidad de segmentos),  $B$ , son 50 m, 1,5 km y 10 Mchip/s, respectivamente, el perfil envolvente del retardo del trayecto  $E(i, d)$  corresponde al mostrado en la Fig. 2, donde el parámetro es la altura media del edificio  $\langle H \rangle$ .



$B$ : 10 MHz  
 $h_b$ : 50 m  
 $d$ : 1,5 km

1816-02

### 6.1.2 Perfil envolvente del retardo del trayecto normalizado mediante las potencias de todos los trayectos de retardo

Cuando la altura de la antena de la estación de base,  $h_b$ , la distancia desde dicha estación,  $d$ , y  $N_{trayecto}$  son 50 m, 1,5 km y 20, respectivamente, el valor de  $A(d)$  dado en las ecuaciones (4) y (5) es el de la Fig. 3, donde el parámetro es la anchura de banda,  $B$ .

Cuando la altura de la antena de la estación de base,  $h_b$ , la distancia desde dicha estación,  $d$ , y la anchura de banda (velocidad de segmentos),  $B$ , son 50 m, 1,5 km y 10 Mchip/s, respectivamente, el perfil envolvente del retardo del trayecto normalizado  $E_N(i, d)$  de la ecuación (3) se muestra en la Fig. 4, donde el parámetro es la altura media del edificio  $\langle H \rangle$ .

FIGURA 3  
Valores de  $A(\alpha)$

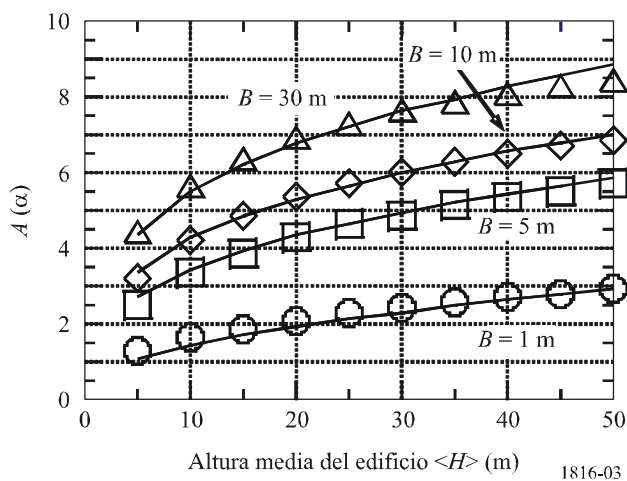
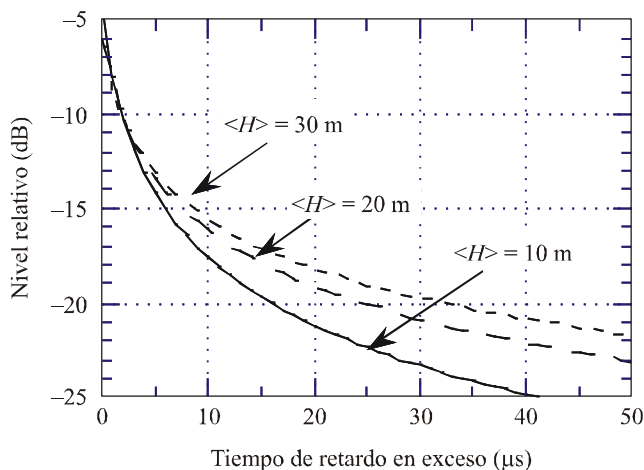


FIGURA 4  
Perfil envolvente del retardo del trayecto normalizado

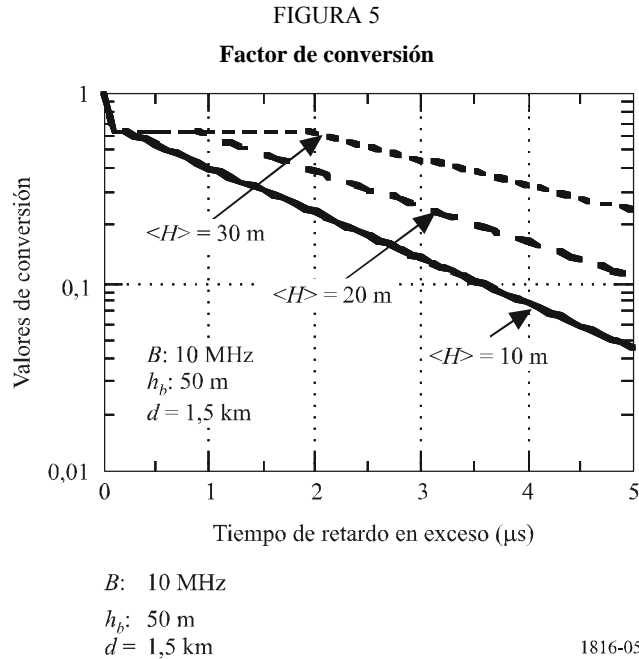


$B$ : 10 MHz  
 $h_b$ : 50 m  
 $d$ : 1,5 km  
 $N_{trayecto}$ : 20

1816-04

## 6.2 Perfil de retardo del trayecto de potencia en zonas urbanas y suburbanas

Cuando la altura de la antena de la estación de base,  $h_b$ , la distancia desde dicha estación,  $d$ , y la anchura de banda (velocidad de segmentos),  $B$ , son 50 m, 1,5 km y 10 Mchip/s, respectivamente, el factor de conversión,  $c(k)$ , entre el contorno del perfil de retardo del trayecto y el perfil de retardo del trayecto de potencia es el de la Fig. 5, donde el parámetro es la altura media del edificio  $\langle H \rangle$ .



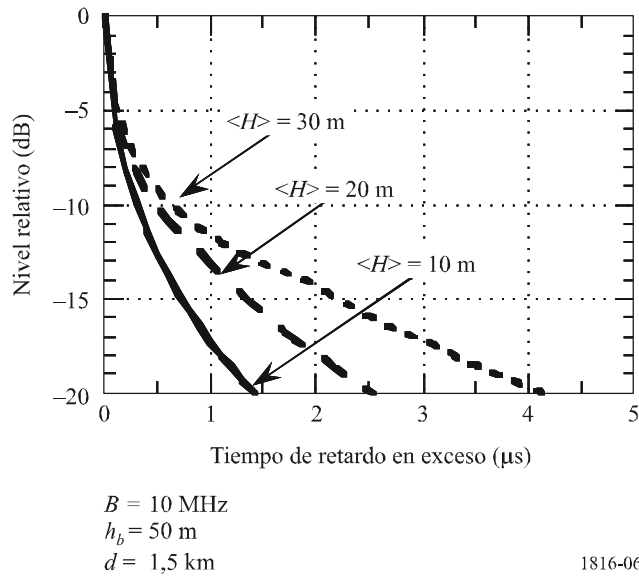
### 6.2.1 Perfil de retardo del trayecto de potencia normalizado mediante la potencia del primer trayecto

Cuando la altura de la antena de la estación de base,  $h_b$ , la distancia desde dicha estación,  $d$ , y la anchura de banda (velocidad de segmentos),  $B$ , son 50 m, 1,5 km y 10 Mchip/s, respectivamente, el perfil de retardo del trayecto de potencia normalizado mediante la potencia del primer trayecto,  $P(i, d)$ , es el que se indica en la Fig. 6, donde el parámetro es la altura media del edificio  $\langle H \rangle$ .



FIGURA 6

Perfil de retardo del trayecto de potencia

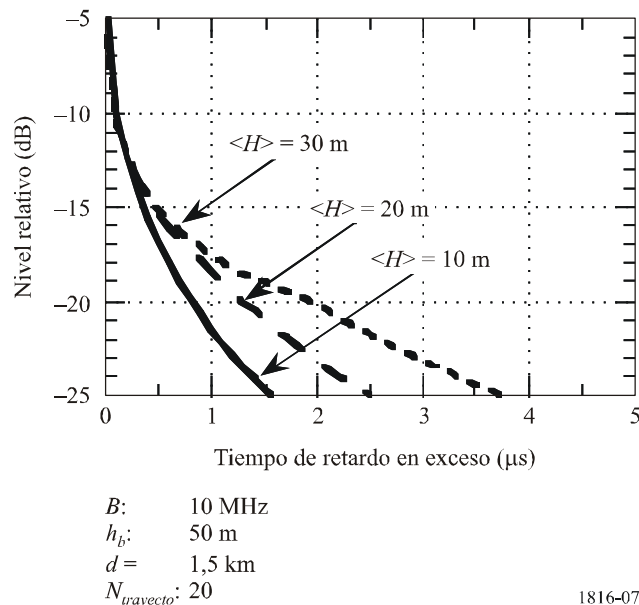


**6.2.2 Perfil de retardo del trayecto de potencia normalizado mediante la suma de las potencias de todos los trayectos de retardo**

Cuando la altura de la antena de la estación de base,  $h_b$ , la distancia desde dicha estación,  $d$ , la anchura de banda (velocidad de segmentos),  $B$  y  $N_{trayecto}$  son 50 m, 1,5 km, 10 Mchip/s y 20, respectivamente, el perfil de retardo del trayecto de potencia normalizado mediante la suma de las potencias de todos los trayectos de retardo,  $P_N(i, d)$ , es el de la Fig. 7, donde el parámetro es la altura media del edificio  $\langle H \rangle$ .

FIGURA 7

Perfil de retardo del trayecto de potencia normalizado



### 6.3 Perfil de retardo del trayecto para representar las pérdidas en zonas urbanas y suburbanas

Se utiliza como fórmula de predicción de las pérdidas de propagación,  $Loss(d)$ , la relación de Okumura-Hata para grandes ciudades:

$$Loss(d) = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_b + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log d - a(h_m) \quad \text{dB} \quad (13)$$

donde:

$$a(h_m) = 3,2 \{ \log \{ 11,75 h_m \} \}^2 - 4,97$$

$d$ : distancia desde la estación de base (km)

$h_m$ : altura de la antena de la estación móvil (m)

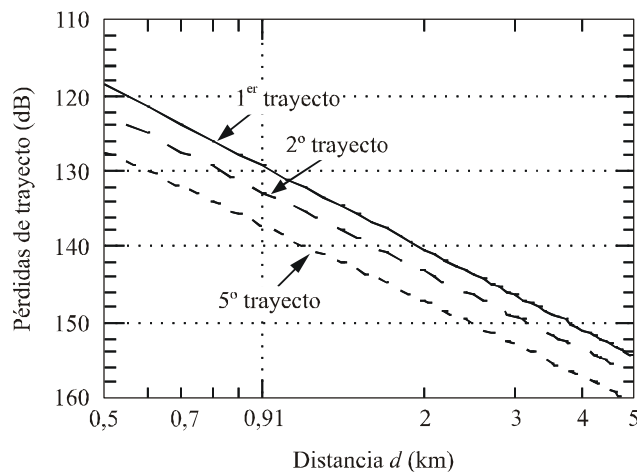
$f$ : frecuencia de portadora (MHz).

#### 6.3.1 Perfil envolvente del retardo del trayecto para representar las pérdidas

Cuando la altura de la antena de la estación de base,  $h_b$ , la altura promedio del inmueble  $\langle H \rangle$ , la anchura de banda,  $B$ , la frecuencia de portadora,  $f$ , la altura de la antena de la estación móvil,  $h_m$ , y  $N_{trayecto}$  son 50 m, 20 m, 10 Mchip/s, 1 000 MHz, 1,5 m y 20, respectivamente, las pérdidas de trayecto del perfil envolvente del retardo del trayecto,  $L(i, d)$ , en la ecuación (11), son las que se indican en la Fig. 8, para los casos de  $i = 0, 1$  y 4, que corresponden al primero, segundo y quinto trayecto, respectivamente.

FIGURA 8

Pérdidas de propagación de cada trayecto, conforme al perfil envolvente del retardo del trayecto y utilizando la fórmula de Okumura-Hata



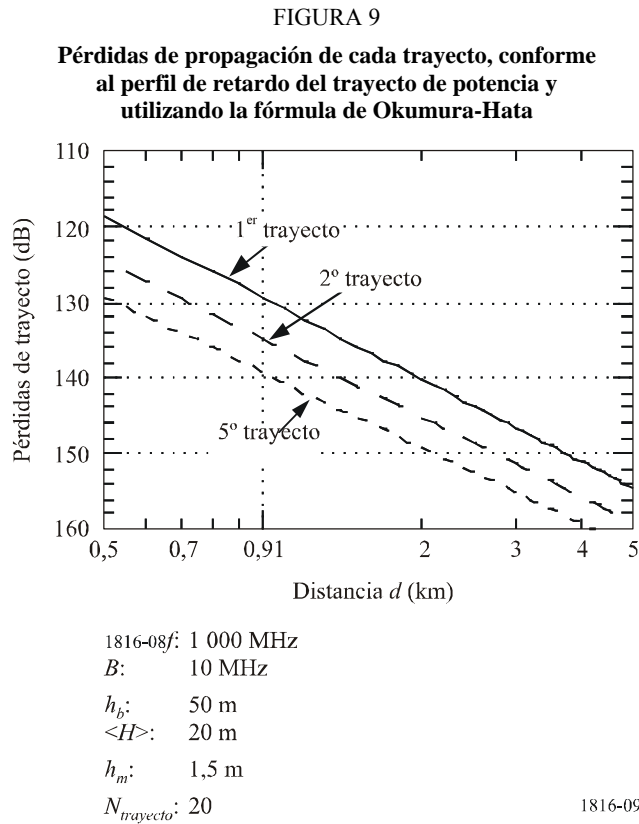
$f$ : 1 000 MHz  
 $B$ : 10 MHz  
 $h_b$ : 50 m  
 $\langle H \rangle$ : 20 m  
 $h_m$ : 1,5 m  
 $N_{trayecto}$ : 20

1816-08

#### 6.3.2 Perfil de retardo del trayecto de potencia para representar las pérdidas

Cuando la altura de la antena de la estación de base,  $h_b$ , la altura media del edificio  $\langle H \rangle$ , la anchura de banda,  $B$ , la frecuencia de portadora,  $f$ , la altura de la antena de la estación móvil,  $h_m$ , y  $N_{trayecto}$  son 50 m, 20 m, 10 Mchip/s, 1 000 MHz, y 1,5 m, respectivamente, las pérdidas de trayecto del perfil de retardo del trayecto de potencia,  $L_p(i, d)$ , en la ecuación (12), son las que se muestran en la

Fig. 9, para los casos de  $i = 0, 1$  y  $4$ , que corresponden al primero, segundo y quinto trayecto, respectivamente.



## Anexo 2

### 1 Introducción

En la Recomendación UIT-R P.1407 se señala la importancia del perfil angular de llegada, como se indica a continuación.

Las características de propagación por trayectos múltiples son un factor importante para controlar la calidad de las comunicaciones móviles digitales. Físicamente, las características de propagación por trayectos múltiples incluyen el número de trayectos, las amplitudes, la diferencia de longitudes de trayecto (retardo), y el ángulo de llegada. Esto puede caracterizarse por la función transferencia del trayecto de propagación (características amplitud-frecuencia) y la anchura de banda de correlación.

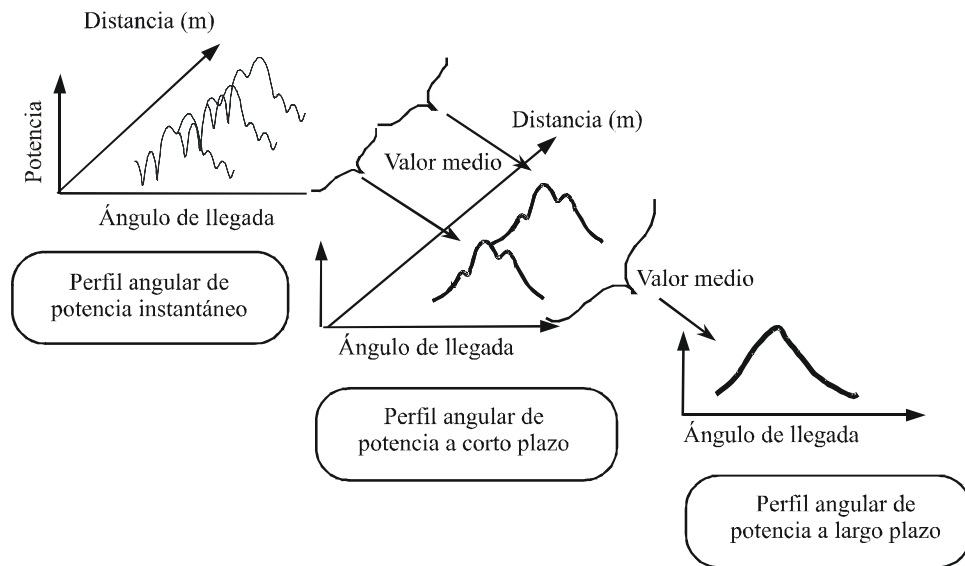
Como ya se dijo, el perfil angular de llegada es un parámetro fundamental para la evaluación de las características multitrayecto. Una vez establecido un modelo para dicho perfil, es posible calcular a partir de él los parámetros multitrayecto, tales como la dispersión angular de llegada y la distancia de correlación espacial.

Los parámetros de propagación relacionados con el entorno del trayecto influyen sobre la forma del perfil. Un perfil es el resultado de varias ondas con diferentes amplitudes y distintos ángulos de llegada. Se sabe que las ondas cuyos ángulos de llegada son grandes tienen bajas amplitudes, pues han recorrido trayectos largos. En el pasado se ha aproximado el perfil angular de llegada utilizando funciones Gaussianas o Laplacianas (ambos lados exponenciales).

En la Recomendación UIT-R P.1407 se definen varios perfiles angulares de llegada, como se muestra en la Fig. 10. El resultado final consiste en que el perfil angular de potencia de llegada se reduce al perfil angular de potencia. Como se indica en la Fig. 10, se obtienen los perfiles angulares de potencia a corto plazo promediando en el espacio los perfiles angulares de potencia instantáneos de varias decenas de longitudes de onda con el fin de suprimir la variación de desvanecimiento rápido; los perfiles angulares de potencia a largo plazo se obtienen promediando en el espacio los perfiles angulares de potencia a corto plazo a una distancia aproximadamente igual a la de la estación de base para suprimir la variación causada por el apantallamiento.

FIGURA 10

### Definición de varios perfiles angulares de potencia



1816-10

## 2 Definición de los perfiles angulares de potencia y de los parámetros

### 2.1 Perfil angular de potencia – se define como el perfil angular de potencia con un ángulo de llegada continuo

- *Perfil angular de potencia instantáneo*: Densidad de potencia de la respuesta al impulso en un instante y un punto determinados.
- *Perfil angular de potencia a corto plazo*: Perfil angular que se obtiene al promediar en el espacio los perfiles angulares de potencia instantáneos en cada emplazamiento dentro de una distancia en la que los componentes multitrayectos son constantes.
- *Perfil angular de potencia a largo plazo*: Perfil angular que se obtiene al promediar en el espacio los perfiles angulares de potencia a largo plazo a una distancia aproximadamente igual a la de la estación de base.

## 2.2 Parámetros

- $h_b$ : altura de la antena de la estación de base (m) (20-150 m: altura sobre el nivel del suelo de la estación móvil)
- $\langle H \rangle$ : altura media del edificio (m) (5-50 m: altura sobre el nivel del suelo de la estación móvil)
- $d$ : distancia desde la estación de base (km) (0,5-3 km)
- $f$ : frecuencia de portadora (GHz) (0,7-9 GHz)
- $\Delta L$ : diferencia de nivel entre la potencia de cresta y la potencia de corte (dB).

## 3 Perfil angular de potencia a largo plazo

### 3.1 Perfil angular de potencia a largo plazo

El perfil angular de potencia a largo plazo,  $p_a(\theta)$ , normalizado utilizando el trayecto de llegada a  $0^\circ$ , viene dado por:

$$p_a(\theta) = (|\theta| + a)^{-\beta} / a^{-\beta} = (|\theta| / a + 1)^{-\beta} \quad (14)$$

donde  $\alpha$ ,  $\beta$  son constantes y se representan en función de la distancia,  $d$ , de la altura de la antena de la estación de base,  $h_b$ , y de la altura media del edificio,  $\langle H \rangle$ :

$$a = -0,2d + 2,1 \left\{ \left( \frac{\langle H \rangle}{h_b} \right)^{0,23} \right\} \quad (15)$$

$$\beta = (-0,015 \langle H \rangle + 0,63)d - 0,16 + 0,76 \log(h_b)$$

El máximo ángulo de llegada,  $a_M$  (grados), viene dado por:

$$a_M = -\gamma \cdot d + \eta \quad (16)$$

$\gamma$  y  $\eta$  son constantes y se representan en función de la altura de la antena de la estación de base,  $h_b$ , de la altura media del edificio,  $\langle H \rangle$ , y del nivel de umbral  $\Delta L$  (dB):

$$\gamma = \begin{cases} (-7,67 + 0,98\Delta L) \cdot \exp\left(\frac{\langle H \rangle}{h_b} \cdot (2,66 - 0,18\Delta L)\right) & (\Delta L \leq 15) \\ 7 & (\Delta L > 15) \end{cases} \quad (17)$$

$$\eta = (-35,8 + 41,1 \log(\Delta L)) \cdot \exp\left(\frac{\langle H \rangle}{h_b} \cdot (1,76 - 0,034\Delta L)\right)$$

### 3.2 Función de correlación espacial

La función de correlación espacial,  $R_f(\Delta l)$ , y el coeficiente de correlación espacial,  $R(\Delta l)$ , para una distancia de antena  $\Delta l$ , se expresan como sigue:

$$R_f(\Delta l) = \int_{-a_M \frac{\pi}{180}}^{+a_M \frac{\pi}{180}} p_a\left(\theta_r \cdot \frac{180}{\pi}\right) \exp\left(j \frac{2\pi\Delta l \sin\theta_r}{\lambda}\right) \cdot \frac{180}{\pi} d\theta_r \quad (18)$$

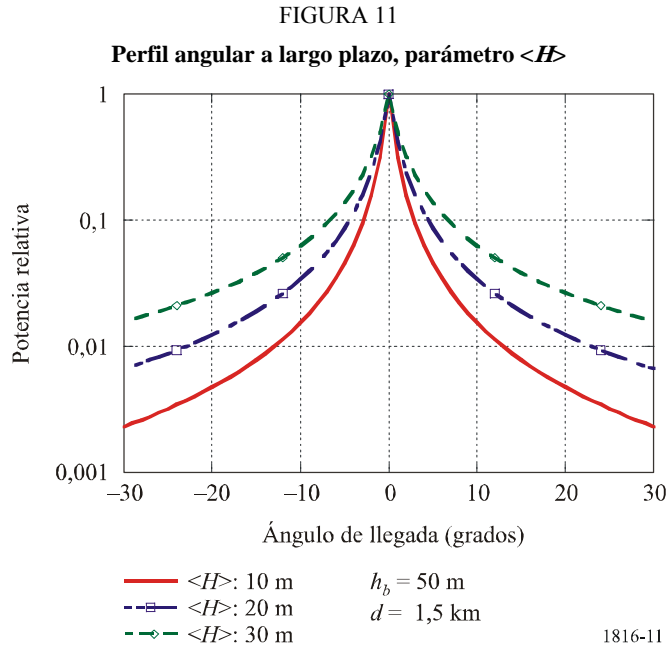
$$R(\Delta l) = R_f(\Delta l) / R_f(0)$$

donde  $\lambda$ , es la longitud de onda, y  $\theta_r$  es el ángulo (grados).

Como resultado de trabajos empíricos, se aplican las ecuaciones (14) y (16) para frecuencias de portadora entre 0,7 GHz y 9 GHz.

4 Ejemplo

Cuando la altura de la antena de la estación de base,  $h_b$ , y la distancia desde dicha estación,  $d$ , son 50 m y 1,5 km respectivamente, el perfil angular de potencia a largo plazo,  $p_a(\theta)$ , corresponde al de la Fig. 11, donde el parámetro es la altura media del edificio  $\langle H \rangle$ .



Del mismo modo, cuando se aplica la ecuación (16) con  $\Delta L$  igual a 15 dB, el perfil angular de potencia a largo plazo es el de la Fig. 12 y en la Fig. 13 se muestra el coeficiente de correlación espacial que se calcula basándose en la Fig. 12.

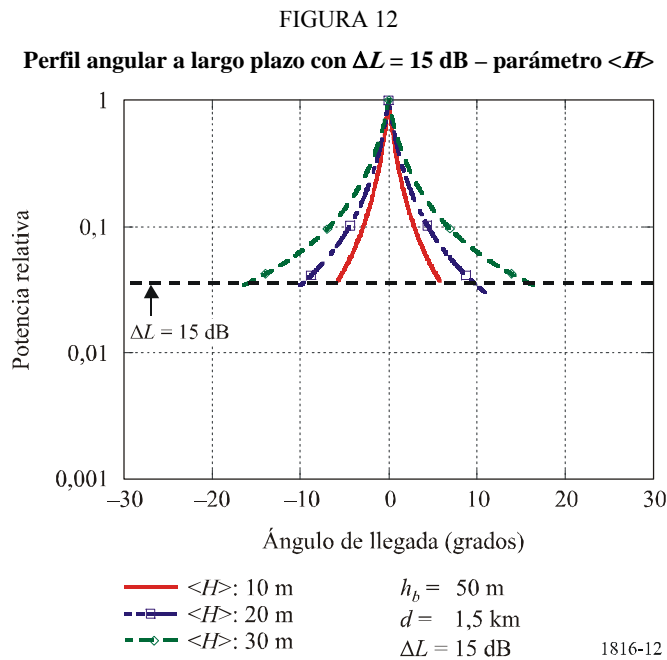


FIGURA 13

Función de correlación espacial – parámetro  $\langle H \rangle$

