

RECOMENDACIÓN UIT-R P.1411-3

Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de los sistemas de radiocomunicaciones de exteriores de corto alcance y redes de radiocomunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz

(Cuestión UIT-R 211/3)

(1999-2001-2003-2005)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que se están desarrollando múltiples aplicaciones nuevas de comunicaciones móviles y personales de corto alcance (distancia operativa inferior a 1 km);
- b) que hay una gran demanda de redes radioeléctricas de área local (RLAN) y sistemas de bucle local inalámbrico;
- c) que los sistemas de corto alcance que utilizan una potencia muy reducida pueden ofrecer ventajas para la prestación de servicios móviles en el entorno del bucle local inalámbrico;
- d) que el conocimiento de las características de propagación y de la interferencia procedente de múltiples usuarios en la misma zona es crucial para el diseño eficaz de los sistemas;
- e) que es necesario conocer y aprender los modelos generales (es decir, independientes del emplazamiento) para la planificación inicial del sistema y la evaluación de la interferencia, así como de los modelos determinísticos (o específicos del emplazamiento) para ciertas evaluaciones detalladas,

observando

- a) que la Recomendación UIT-R P.1238 ofrece directrices sobre la propagación en interiores en la gama de frecuencias comprendida entre 900 MHz y 100 GHz y que dicha Recomendación debe consultarse en las situaciones en que se presentan condiciones de propagación en interiores y en exteriores;
- b) que la Recomendación UIT-R P.1546 ofrece directrices sobre la propagación para los sistemas que funcionan en distancias de 1 km y superiores y en la gama de frecuencias comprendida entre 30 MHz y 3 GHz,

recomienda

- 1** que se adopte la información y los métodos del Anexo 1 para calcular las características de propagación de los sistemas radioeléctricos de propagación en exteriores de corto alcance entre 300 MHz y 100 GHz, cuando sean aplicables.

Anexo 1

1 Introducción

La propagación por trayectos de longitud inferior a 1 km resulta principalmente afectada por las construcciones y los árboles, más que por las variaciones de la elevación del terreno. El efecto de los edificios predomina, pues la mayoría de los enlaces radioeléctricos de trayecto corto se da en las zonas urbanas y suburbanas. Lo más probable es que el terminal móvil vaya en manos de un peatón o esté situado en un vehículo.

Esta Recomendación define las categorías de los trayectos de propagación cortos y ofrece métodos para estimar las pérdidas en el trayecto y la dispersión del retardo a lo largo de éste.

2 Entornos de funcionamiento físico y definición de los tipos de célula

Los entornos que describe esta Recomendación se clasifican únicamente desde un punto de vista de la propagación radioeléctrica. La propagación de las ondas radioeléctricas resulta influida por el entorno, es decir las estructuras y la altura de las construcciones, la utilización del terminal móvil (peatón/vehículo) y la posición de las antenas. Se identifican cuatro entornos distintos que se consideran los más habituales. Por ejemplo, no se consideran las zonas con elevaciones, pues no son las habituales de las áreas metropolitanas. El Cuadro 1 enumera los cuatro entornos. Reconociendo que hay una amplia variedad de entornos en cada categoría, no se pretende establecer un modelo de cada caso posible, sino ofrecer modelos de propagación que sean representativos de los entornos más frecuentes.

CUADRO 1

Entornos de funcionamiento físico – Degradaciones de la propagación

Entorno	Descripción y degradaciones de la propagación significativas
Urbano de construcción alta	<ul style="list-style-type: none"> – Valle urbano, caracterizado por avenidas con edificios altos de varios pisos – La altura de los edificios reduce la probabilidad de una contribución significativa de la propagación que pasa por encima de los tejados – Las hileras de edificios altos hacen posible la existencia de largos retardos de trayecto – El gran número de vehículos en movimiento en la zona actúa como reflector, lo que añade una deriva Doppler a las ondas reflejadas
Urbano/suburbano de construcción baja	<ul style="list-style-type: none"> – Típicamente amplias avenidas – Las alturas de los edificios suelen ser inferiores a tres pisos, lo que hace probable la difracción por los tejados – Pueden producirse en ocasiones reflexiones y ensombrecimientos producidos por los vehículos en movimiento – Los efectos principales son: retardos grandes y pequeñas derivas Doppler
Zona residencial	<ul style="list-style-type: none"> – Construcciones de uno y dos pisos – Las calles suelen ser de doble dirección con vehículos estacionados a ambos lados – Es posible que haya vegetación densa a ligera – Tráfico motorizado generalmente ligero
Rural	<ul style="list-style-type: none"> – Pequeñas casas rodeadas de amplios jardines – Influencia de la altura del terreno (topografía) – Posibilidad de vegetación densa a ligera – Tráfico motorizado ocasionalmente elevado

Para cada uno de los cuatro entornos distintos se consideran dos escenarios posibles de los móviles. De esta manera, se dividen los usuarios según se trate de peatones o de vehículos. Para estas dos aplicaciones la velocidad del móvil es bastante distinta, dando lugar a derivas Doppler diferentes. El Cuadro 2 muestra velocidades típicas para estos escenarios.

CUADRO 2

Entornos de funcionamiento físico – Velocidad típica del móvil

Entorno	Velocidad de los usuarios peatonales (m/s)	Velocidad de los usuarios en vehículos
Urbano de construcción alta	1,5	Velocidades típicas del centro de la ciudad del orden de 50 km/h (14 m/s)
Urbano/suburbano de construcción baja	1,5	Unos 50 km/h (14 m/s) En autopistas hasta 100 km/h (28 m/s)
Residencial	1,5	Unos 40 km/h (11 m/s)
Rural	1,5	80-100 km/h (22-28 m/s)

El tipo de mecanismo de propagación predominante depende también de la altura de la antena de la estación de base con relación a los edificios circundantes. El Cuadro 3 enumera los tipos de células típicos en la propagación en exteriores de trayecto corto.

CUADRO 3

Definición de tipos de célula

Tipo de célula	Radio de la célula	Posición típica de la antena de la estación de base
Pequeña macrocélula	0,5 a 3 km	Exteriores; montada por encima del nivel medio de los tejados; las alturas de algunos edificios circundantes pueden ser superiores a la de la antena de la estación de base
Microcélula	100 a 500 m	Exteriores; montada por debajo del nivel medio de los tejados
Picocélula	Hasta 100 m	Interiores o exteriores (montada por debajo del nivel máximo de los tejados)

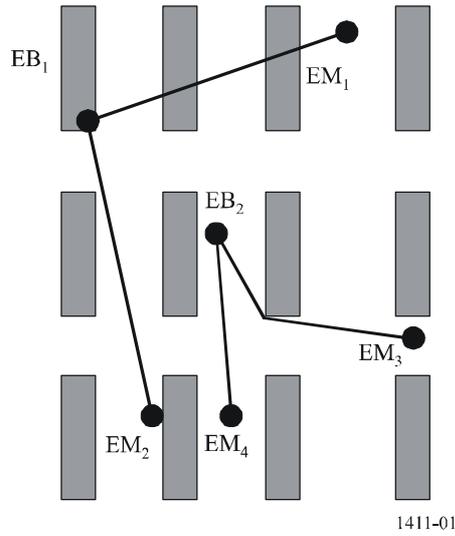
(Obsérvese que, aunque se da a la categoría «pequeña macrocélula» un límite superior de 3 km, esta Recomendación se aplica para distancias de hasta 1 km.)

3 Categorías de trayecto

3.1 Definición de situaciones de propagación

La Fig. 1 representa cuatro situaciones de geometrías de estación de base (EB) y de estación móvil (EM). La estación de base EB₁ va montada por encima del nivel de los tejados. La célula correspondiente es una pequeña macrocélula. La propagación desde esta estación de base se produce principalmente por encima de los tejados. La estación de base EB₂ va montada por debajo del nivel de los tejados y define un entorno de micro o picocélula. En estos tipos de célula, la propagación se produce principalmente en el interior de calles o cañones urbanos. Para los enlaces móvil-móvil, puede suponerse que ambos extremos del enlace se encuentran por debajo del nivel de los tejados y pueden utilizarse los modelos relativos a EB₂.

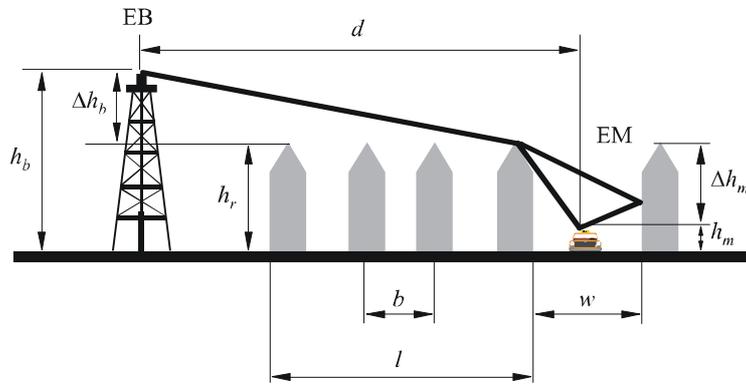
FIGURA 1
Situaciones típicas de propagación en zonas urbanas



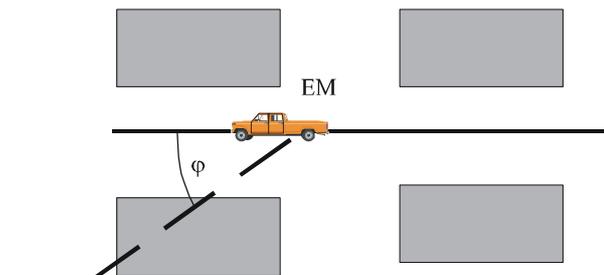
3.1.1 Propagación por encima de los tejados sin visibilidad directa (NLoS, *non-line-of-sight*)

La Fig. 2 describe el caso típico NLoS (el enlace EB₁-EM₁ de la Fig. 1). En adelante, este caso se denomina NLoS1.

FIGURA 2
Definición de los parámetros del caso NLoS1



a)



Onda incidente

b)

1411-02

Los parámetros pertinentes de esta situación son:

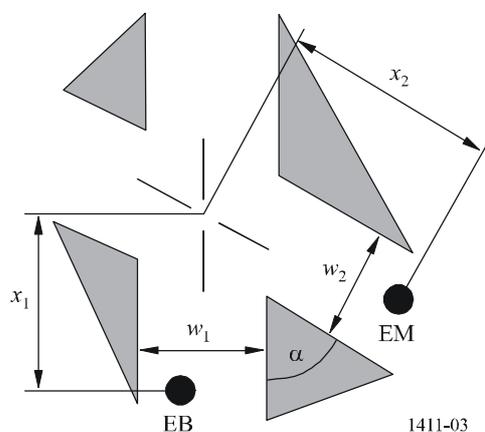
- h_r : altura media de los edificios (m)
- w : anchura de la calle (m)
- b : separación media entre edificios (m)
- φ : orientación de la calle respecto al trayecto directo (grados)
- h_b : altura de la antena de la EB (m)
- h_m : altura de la antena de la EM (m)
- l : longitud del trayecto cubierto por edificios (m)
- d : distancia desde la EB a la EM.

El caso NLoS1 se da frecuentemente en entornos residenciales/rurales para todos los tipos de célula y predomina para las pequeñas macrocélulas en entornos urbanos/suburbanos con edificios de construcción baja. Los parámetros h_r , b y l pueden obtenerse de los datos de los edificios situados a lo largo de la línea entre las antenas. No obstante, la determinación de w y φ exige un análisis bidimensional de la zona circundante del móvil. Obsérvese que l no es necesariamente perpendicular a la orientación del edificio.

3.1.2 Propagación por cañones urbanos, NLoS

La Fig. 3 representa la situación de un caso típico de microcélula NLoS (enlace EB₂-EM₃ de la Fig. 1). En adelante, este caso se denomina NLoS2.

FIGURA 3
Definición de los parámetros del caso NLoS2



Los parámetros pertinentes de esta situación son:

- w_1 : anchura de la calle en la posición de la EB (m)
- w_2 : anchura de la calle en la posición de la EM (m)
- x_1 : distancia entre la EB y el cruce de las calles (m)
- x_2 : distancia entre la EM y el cruce de las calles (m)
- α : ángulo de la esquina (rad).

NLoS2 es el tipo de trayecto predominante en entornos urbanos con edificios de construcción alta para todos los tipos de células y se da frecuentemente en micro y picocélulas en entornos urbanos con edificios de construcción baja. La determinación de todos los parámetros del caso NLoS2 exige un análisis bidimensional de la zona circundante del móvil.

3.1.3 Trayectos con visibilidad directa (LoS, *line-of-sight*)

Los trayectos EB₁-EM₂ y EB₂-EM₄ de la Fig. 1 son ejemplos de situaciones de LoS. Pueden aplicarse los mismos modelos para ambos tipos de trayecto LoS.

3.2 Requisitos de datos

Para cálculos específicos del emplazamiento en zonas urbanas pueden utilizarse distintos tipos de datos. La información más precisa puede obtenerse a partir de datos de gran resolución cuando dicha información consiste en:

- estructuras de edificios;
- alturas relativas y absolutas de los edificios;
- información sobre la vegetación.

Los formatos de datos pueden ser escalares y vectoriales. La precisión del emplazamiento en los datos vectoriales debe ser del orden de 1 a 2 m. La resolución recomendada para los datos escalares es de 1 a 10 m. La precisión de la altura en ambos formatos de datos debe ser del orden de 1 a 2 m.

Si no se dispone de datos de gran resolución, se recomienda utilizar datos del terreno de baja resolución (50 m). Dependiendo de la definición de las clases del terreno (urbano denso, urbano, suburbano, etc.), pueden asignarse los parámetros requeridos a estas clases de terreno. Los datos pueden utilizarse junto con información vectorial de las calles a fin de obtener ángulos de orientación de éstas.

4 Modelos de pérdidas del trayecto

Para los escenarios típicos de las zonas urbanas pueden aplicarse algunos algoritmos de tipo cerrado. Estos modelos de propagación pueden utilizarse para los cálculos específicos del emplazamiento o para los generales. El § 3.1 define las situaciones correspondientes de propagación. El tipo de modelo depende también de la gama de frecuencias. Han de aplicarse modelos distintos para la propagación en ondas decimétricas y milimétricas. En la gama de frecuencias de ondas decimétricas, se consideran situaciones LoS y NLoS. En el caso de propagación en ondas milimétricas, sólo se considera la LoS. En esta última gama de frecuencias se ha de considerar también la atenuación por el oxígeno y los hidrometeoros.

4.1 Situaciones de LoS en el interior de cañones urbanos

Propagación en ondas decimétricas

En la gama de frecuencias de las ondas decimétricas, las pérdidas básicas de transmisión, tal como se definen en la Recomendación UIT-R P.341, pueden caracterizarse por dos pendientes y un único punto de inflexión. El tramo inferior viene dado aproximadamente por:

$$L_{LoS,l} = L_{bp} + \begin{cases} 20 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d \leq R_{bp} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d > R_{bp} \end{cases} \quad (1)$$

donde R_{bp} es la distancia al punto de inflexión que viene dada por:

$$R_{bp} \approx \frac{4 h_b h_m}{\lambda} \quad (2)$$

siendo λ la longitud de onda (m).

El tramo superior viene dado aproximadamente por:

$$L_{LoS,u} = L_{bp} + 20 + \begin{cases} 25 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d \leq R_{bp} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d > R_{bp} \end{cases} \quad (3)$$

L_{bp} es el valor de las pérdidas básicas de transmisión en el punto de inflexión que se define por:

$$L_{bp} = \left| 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{8 \pi h_b h_m} \right) \right| \quad (4)$$

Propagación en ondas centimétricas hasta 15 GHz

En ondas centimétricas, para longitudes del trayecto de hasta 1 km aproximadamente, el tráfico rodado influirá en la altura equivalente de la calle y de ahí en la distancia del punto de inflexión. Esta distancia, R_{bp} se estima mediante la fórmula:

$$R_{bp} = 4 \frac{(h_b - h_s)(h_m - h_s)}{\lambda} \quad (5)$$

donde h_s es la altura equivalente de la calle debida a objetos tales como los vehículos en ella y los peatones cercanos. Así pues, h_s depende del tráfico de la calle. Los valores de h_s de los Cuadros 4 y 5 se obtienen a partir de mediciones diurnas y nocturnas, correspondientes a condiciones de tráfico intenso y ligero, respectivamente. El tráfico intenso corresponde al 10%-20% de la calle cubierta con vehículos y al 0,2%-1% de la acera ocupada por peatones. El tráfico ligero ocupaba el 0,1%-0,5% de la calle y menos del 0,001% de la acera. La calle tenía 27 m de ancho, incluyendo 6 m de aceras a cada lado.

CUADRO 4

Altura equivalente de la calle, h_s (tráfico intenso)

Frecuencia (GHz)	h_b (m)	h_s (m)	
		$h_m = 2,7$	$h_m = 1,6$
3,35	4	1,3	(2)
	8	1,6	(2)
8,45	4	1,6	(2)
	8	1,6	(2)
15,75	4	1,4	(2)
	8	(1)	(2)

(1) El punto de inflexión está más allá de 1 km.

(2) No existe punto de inflexión.

CUADRO 5

Altura equivalente de la calle, h_s (tráfico ligero)

Frecuencia (GHz)	h_b (m)	h_s (m)	
		$h_m = 2,7$	$h_m = 1,6$
3,35	4	0,59	0,23
	8	(1)	(1)
8,45	4	(2)	0,43
	8	(2)	(1)
15,75	4	(2)	0,74
	8	(2)	(1)

(1) No se tomaron medidas.

(2) El punto de inflexión está más allá de 1 km.

Cuando $h_m > h_s$, los valores aproximados de los límites superior e inferior de la pérdida básica de transmisión para la banda de ondas centimétricas pueden calcularse utilizando las ecuaciones (1) y (3), viniendo dado L_{bp} por:

$$L_{bp} = \left| 20 \log_{10} \left\{ \frac{\lambda^2}{8\pi(h_b - h_s)(h_m - h_s)} \right\} \right| \quad (6)$$

Por otro lado, cuando $h_m \leq h_s$ no hay punto de inflexión. La zona próxima a la EB ($d < R_s$) tiene una pérdida básica de propagación similar a la de la gama de ondas decimétricas, pero la zona distante de la EB presenta características de propagación en las que el coeficiente de atenuación se eleva al cubo. Por tanto, el límite inferior aproximado para $d \geq R_s$ viene dado por:

$$L_{LoS,l} = L_s + 30 \log_{10} \left(\frac{d}{R_s} \right) \quad (7)$$

El límite superior aproximado para $d \geq R_s$ viene dado por:

$$L_{LoS,u} = L_s + 20 + 30 \log_{10} \left(\frac{d}{R_s} \right) \quad (8)$$

La pérdida básica de propagación, L_s se define por:

$$L_s = \left| 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{2\pi R_s} \right) \right| \quad (9)$$

Se ha determinado experimentalmente que el valor de R_s de las ecuaciones (7) a (9) es de 20 m.

Propagación en ondas milimétricas

En frecuencias superiores a unos 10 GHz, la distancia al punto de inflexión R_{bp} en la ecuación (2) es muy superior al radio máximo previsto de la célula (500 m). Esto significa que no cabe esperar una ley de cuarta potencia en esta banda de frecuencias. Así pues, la tasa de disminución de la potencia con la distancia sigue de cerca la regla de las pérdidas en el espacio libre, con un exponente de pérdidas del trayecto aproximado de 2,2. También debe considerarse la atenuación debida a los gases atmosféricos y la debida a la lluvia.

La atenuación gaseosa puede calcularse a partir de la Recomendación UIT-R P.676 y la atenuación debida a la lluvia a partir de la Recomendación UIT-R P.530.

4.2 Modelos para las situaciones NLoS

Las señales NLoS pueden llegar a la EB o a la EM por mecanismos de difracción o por trayectos múltiples que pueden ser el resultado de una combinación de mecanismos de difracción y de reflexión. En este punto se desarrollan modelos relativos a los mecanismos de difracción.

Propagación en ondas decimétricas y centimétricas

Se definen modelos para las dos situaciones descritas en el § 3.1. Los modelos son válidos para:

h_b : 4 a 50 m

h_m : 1 a 3 m

f : 800 a 2 000 MHz para $h_b \leq h_r$

800 a 5 000 MHz para $h_b > h_r$

d : 20 a 5 000 m.

(Véase que aunque el modelo es válido hasta para 5 km, esta Recomendación se aplica a distancias de hasta sólo 1 km.)

Propagación en ondas milimétricas

La cobertura de la señal en ondas milimétricas se considera únicamente para situaciones de LoS debido a las grandes pérdidas de difracción que se producen cuando los obstáculos hacen que el trayecto de propagación pase a NLoS. Para las situaciones NLoS, las reflexiones multitrayecto y la dispersión serán el método más probable de propagación de la señal.

4.2.1 Propagación por encima de los tejados

El modelo de difracción multipantalla que se indica a continuación es válido si los tejados tienen aproximadamente la misma altura. Suponiendo que las alturas de los tejados difieren únicamente en una cantidad inferior al radio de la primera zona de Fresnel sobre el trayecto de longitud, l (véase la Fig. 2), la altura de la azotea que se utiliza en el modelo es la altura media. Si las alturas de los tejados varían mucho más que el radio de la primera zona de Fresnel, el método que se prefiere consiste en utilizar los edificios más altos a lo largo del trayecto en un cálculo de difracción de filo de cuchillo, como se describe en la Recomendación UIT-R P.526 para sustituir el modelo de multipantalla.

En el modelo de las pérdidas de transmisión del caso NLoS1 (véase la Fig. 2) para los tejados de altura similar, las pérdidas de las antenas isotropas se expresan en forma de la suma de las pérdidas en el espacio libre, L_{bf} , las pérdidas de difracción entre el tejado y la calle, L_{rts} , y la reducción debida a la difracción de pantalla múltiple al pasar por líneas de edificios, L_{msd} .

En este modelo L_{bf} y L_{rts} son independientes de la altura de la antena de la EB, mientras que L_{msd} depende de si la antena de la EB está por debajo o por encima de las alturas de los edificios.

$$L_{NLoS1} = \begin{cases} L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} & \text{para } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{bf} & \text{para } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

Las pérdidas en el espacio libre vienen dadas por:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log_{10} (d / 1000) + 20 \log_{10} (f) \quad (11)$$

donde:

d : longitud del trayecto (m)

f : frecuencia (MHz).

El término L_{rts} describe el acoplamiento de la onda que se propaga a lo largo del trayecto multipantalla en la calle en las que está situada la estación móvil. Tiene en cuenta la anchura de la calle y su orientación.

$$L_{rts} = -8,2 - 10 \log_{10}(w) + 10 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(\Delta h_m) + L_{ori} \quad (12)$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi & \text{para } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35) & \text{para } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4,0 - 0,114(\varphi - 55) & \text{para } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (13)$$

donde:

$$\Delta h_m = h_r - h_m \quad (14)$$

L_{ori} es el factor de corrección de la orientación de la calle que tiene en cuenta el efecto de la difracción entre el tejado y la calle en aquellas que no son perpendiculares a la dirección de propagación (véase la Fig. 2b)).

Las pérdidas de difracción de pantalla múltiple desde la EB debidas a la propagación que pasa por filas de edificios depende de la altura de la antena de la EB con relación a las alturas de los edificios y del ángulo de incidencia. Un criterio de incidencia rasante es el de la «distancia del campo establecido», d_s :

$$d_s = \frac{\lambda d^2}{\Delta h_b^2} \quad (15)$$

donde (véase la Fig. 2a)):

$$\Delta h_b = h_b - h_r \quad (16)$$

Para el cálculo de L_{msd} , d_s se compara con la distancia, l , a lo largo de la que se extienden los edificios.

Cálculo de L_{msd} para $l > d_s$

(Véase que este cálculo es más preciso cuando $l \gg d_s$.)

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10}(d / 1000) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b) \quad (17)$$

donde:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log_{10}(1 + \Delta h_b) & \text{para } h_b > h_r \\ 0 & \text{para } h_b \leq h_r \end{cases} \quad (18)$$

es un término de pérdidas que depende de la altura de la EB,

$$k_a = \begin{cases} 71,4 & \text{para } h_b > h_r \text{ y } f > 2\,000 \text{ MHz} \\ 54 & \text{para } h_b > h_r \text{ y } f \leq 2\,000 \text{ MHz} \\ 54 - 0,8\Delta h_b & \text{para } h_b \leq h_r \text{ y } d \geq 500 \text{ m} \\ 54 - 1,6\Delta h_b \text{ } d / 1\,000 & \text{para } h_b \leq h_r \text{ y } d < 500 \text{ m} \end{cases} \quad (19)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_b > h_r \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_b}{h_r} & \text{para } h_b \leq h_r \end{cases} \quad (20)$$

$$k_f = \begin{cases} -8 & \text{para } f > 2\,000 \text{ MHz} \\ -4 + 0,7(f/925 - 1) & \text{para ciudades de tamaño medio y centros suburbanos} \\ & \text{con una densidad de arbolado media y } f \leq 2\,000 \text{ MHz} \\ -4 + 1,5(f/925 - 1) & \text{para centros metropolitanos y } f \leq 2\,000 \text{ MHz} \end{cases} \quad (21)$$

Cálculo de L_{msd} para $l < d_s$

En este caso, se ha de hacer una nueva distinción, según las alturas relativas de la EB y los tejados.

$$L_{msd} = -10 \log_{10} (Q_M^2) \quad (22)$$

donde:

$$Q_M = \begin{cases} 2,35 \left(\frac{\Delta h_b}{d} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{0,9} & \text{para } h_b > h_r \\ \frac{b}{d} & \text{para } h_b \approx h_r \\ \frac{b}{2\pi d} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right) & \text{para } h_b < h_r \end{cases} \quad (23)$$

y

$$\theta = \arctg \left(\frac{\Delta h_b}{b} \right) \quad (24)$$

$$\rho = \sqrt{\Delta h_b^2 + b^2} \quad (25)$$

4.2.2 Propagación en cañones urbanos

En las situaciones NLoS2 en las que ambas antenas están por debajo del nivel de los tejados, se ha de considerar las ondas de difracción y reflejadas en las esquinas de las calles (véase la Fig. 3).

$$L_{NLoS2} = -10 \log_{10} (10^{-L_r/10} + 10^{-L_d/10}) \quad \text{dB} \quad (26)$$

donde:

L_r : pérdidas de reflexión en el trayecto, definidas por:

$$L_r = 20 \log_{10} (x_1 + x_2) + x_1 x_2 \frac{f(\alpha)}{w_1 w_2} + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \quad \text{dB} \quad (27)$$

donde:

$$f(\alpha) = \frac{3,86}{\alpha^{3,5}} \quad \text{dB} \quad (28)$$

donde $0,6 < \alpha \text{ [rad]} < \pi$.

L_d : pérdidas de difracción en el trayecto, definidas por:

$$L_d = 10 \log_{10} [x_1 x_2 (x_1 + x_2)] + 2D_a - 0,1 \left(90 - \alpha \frac{180}{\pi} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \quad \text{dB} \quad (29)$$

$$D_a = \left(\frac{40}{2\pi}\right) \left[\arctg\left(\frac{x_2}{w_2}\right) + \arctg\left(\frac{x_1}{w_1}\right) - \frac{\pi}{2} \right] \quad \text{dB} \quad (30)$$

4.3 Parámetros por defecto para los cálculos de un emplazamiento general

Si no se conocen los datos sobre la estructura de los edificios y las avenidas (situaciones de emplazamiento general), se recomiendan los valores por defecto siguientes:

$$h_r = 3 \times (\text{número de pisos}) + \text{altura de la azotea (m)}$$

$$\begin{aligned} \text{altura de la azotea} &= 3 \text{ m para tejados con inclinación} \\ &= 0 \text{ m para azoteas planas} \end{aligned}$$

$$w = b/2$$

$$b = 20 \text{ a } 50 \text{ m}$$

$$\varphi = 90^\circ.$$

4.4 Influencia de la vegetación

Los efectos de la vegetación (principalmente los árboles) en la propagación son importantes para las predicciones de los trayectos cortos en exteriores. Pueden identificarse dos mecanismos principales de propagación:

- propagación a través de los árboles (no alrededor ni por encima);
- propagación sobre los árboles.

El primer mecanismo predomina para las geometrías en las que ambas antenas están por debajo de la copa de los árboles y la distancia a través de ellas es pequeña, mientras que el segundo predomina para aquellas geometrías en las que una antena está por encima de las copas de los árboles. La atenuación resulta muy afectada por la dispersión multitrayecto debida a la difracción de la energía de la señal sobre las estructuras de los árboles y a través de éstas. Para la propagación a través de los árboles, la Recomendación UIT-R P.833 indica la atenuación específica en la vegetación. Para las situaciones en que la propagación se efectúa sobre los árboles, la difracción es el modo principal de propagación sobre los flancos de los árboles que están más próximos a la antena baja. Puede establecerse en forma sencilla un modelo de este modo de propagación utilizando un modelo de propagación ideal en filo de cuchillo (véase la Recomendación UIT-R P.526), aunque con este modelo se puede subestimar la intensidad de campo, porque no tiene en cuenta la dispersión múltiple que producen las copas de los árboles, mecanismo del que puede establecerse un modelo mediante la teoría de transferencia de radiación.

5 Pérdidas de entrada a los edificios

Las pérdidas de entrada a los edificios corresponden al exceso de pérdidas debido a la presencia de un muro de edificio (incluyendo ventanas y otros elementos). Se definen por la diferencia entre los niveles de la señal en el exterior y en el interior del edificio a la misma altura. También ha de tenerse en cuenta el ángulo de incidencia. (Cuando la longitud del trayecto es inferior a unos 10 m, debe tenerse en cuenta la diferencia en las pérdidas en el espacio libre debidas al cambio de la longitud del trayecto para las dos mediciones, al determinar las pérdidas de entrada en el edificio. Para los emplazamientos de antena próximos al muro, también puede ser necesario considerar los efectos del campo cercano.) Se producen pérdidas adicionales por penetración en el edificio y la Recomendación UIT-R P.1238 da indicaciones al respecto. Se cree que, en el caso general, el modo de propagación dominante es aquel en el que la señal entra a un edificio de manera

aproximadamente horizontal a través de la superficie de aquél (incluyendo las ventanas) y que para un edificio de construcción uniforme, las pérdidas de entrada en el edificio son independientes de la altura.

Deben considerarse las pérdidas de entrada en el edificio al evaluar la cobertura radioeléctrica entre un sistema exterior y un terminal interior. También es importante la consideración de los problemas de interferencia entre los sistemas exteriores y los interiores.

Los resultados experimentales que representa el Cuadro 6 se obtuvieron en 5,2 GHz y a través del muro externo de un edificio de ladrillo y hormigón con ventanas de vidrio. El espesor del muro era de 60 cm y la relación ventana/muro era de 2:1, aproximadamente.

CUADRO 6

Ejemplo de pérdidas de entrada a un edificio

Frecuencia	Edificio residencial		Edificio de oficinas		Edificio comercial	
	Media	Desviación típica	Media	Desviación típica	Media	Desviación típica
5,2 GHz			12 dB	5 dB		

El Cuadro 7 muestra los resultados de las mediciones efectuadas en 5,2 GHz a través de un muro externo de bloques de piedra, con ángulos de incidencia comprendidos entre 0° y 75°. El muro tenía un espesor de 400 mm, con dos capas de bloques de 100 mm de espesor y un relleno blando entre ellas. Especialmente con ángulos de incidencia mayores, las pérdidas debidas al muro eran extremadamente sensibles a la posición del receptor, tal como muestra la gran desviación típica.

CUADRO 7

Pérdidas debidas a un muro de bloques de piedra con diversos ángulos de incidencia

Ángulo de incidencia (grados)	0	15	30	45	60	75
Pérdidas debidas al muro (dB)	28	32	32	38	45	50
Desviación típica (dB)	4	3	3	5	6	5

En la Recomendación UIT-R P.679 figura información adicional sobre pérdidas de entrada en edificios, principalmente para sistemas de satélite, que pueden ser adecuadas para la evaluación de la entrada en los edificios en relación con los sistemas terrenales.

6 Modelos multirayecto

La Recomendación UIT-R P.1407 ofrece una descripción de la propagación multirayecto y la definición de términos.

6.1 Modelos multirayecto para la propagación entre calles

Se han obtenido las características de la dispersión del retardo multirayecto para el caso de LoS en un entorno urbano de construcciones altas para microcélulas y picocélulas (como se definen en el

Cuadro 3), sobre la base de datos medidos a frecuencias comprendidas entre 2,5 y 15,75 GHz a distancias comprendidas entre 50 y 400 m. El valor eficaz de la dispersión del retardo, S , a una distancia de d m sigue una distribución normal con un valor medio dado por:

$$a_s = C_a d^{\gamma_a} \quad \text{ns} \quad (31)$$

y una desviación típica que viene dada por:

$$\sigma_s = C_\sigma d^{\gamma_\sigma} \quad \text{ns} \quad (32)$$

donde C_a , γ_a , C_σ y γ_σ dependen de la altura de la antena y del entorno de propagación. El Cuadro 8 enumera algunos valores típicos de los coeficientes para distancias comprendidas entre 50 y 400 m basados en mediciones efectuadas en zonas urbanas y residenciales.

CUADRO 8

Coefficientes típicos para las características de distancia del valor eficaz de la dispersión del retardo

Condiciones de medición				a_s		σ_s	
Zona	f (GHz)	h_b (m)	h_m (m)	C_a	γ_a	C_σ	γ_σ
Urbana	2,5	6,0	3,0	55	0,27	12	0,32
	3,35-15,75	4,0	2,7	23	0,26	5,5	0,35
			1,6	10	0,51	6,1	0,39
			0,5				
Residencial	3,35	4,0	2,7	2,1	0,53	0,54	0,77
	3,35-15,75		1,6	5,9	0,32	2,0	0,48

De los datos medidos a 2,5 GHz, se vio que la forma media del perfil de retardo era:

$$P(t) = P_0 + 50(e^{-t/\tau} - 1) \quad \text{dB} \quad (33)$$

donde:

P_0 : potencia de cresta (dB)

τ : factor de disminución

y t se expresa en ns.

De los datos medidos, puede estimarse τ para un valor eficaz de la dispersión del retardo, S :

$$\tau = 4 S + 266 \quad \text{ns} \quad (34)$$

Una relación lineal entre τ y S sólo es válida para el caso de LoS.

A partir del mismo conjunto de mediciones se han podido caracterizar también las propiedades instantáneas del perfil de retardo. La energía que llega en los primeros 40 ns tiene una distribución de Rice con un factor K de 6 a 9 dB, aproximadamente, mientras que la energía que llega más tarde tiene una distribución de Rayleigh o de Rice con un factor K de hasta unos 3 dB. (Véase la Recomendación UIT-R P.1057 para las definiciones de distribuciones de probabilidad.)

6.2 Modelos multitrayecto para la propagación por encima de los tejados

Se han obtenido las características de la dispersión del retardo multitrayecto para los casos LoS y NLoS en un entorno urbano de construcciones altas para macrocélulas pequeñas (como se definen en el Cuadro 3), sobre la base de datos medidos a frecuencias comprendidas entre 1 920-1 980 MHz y 2 110-2 170 MHz, utilizando antenas omnidireccionales. El valor eficaz mediano de la dispersión del retardo S en este entorno, está dado por:

$$S_u = \exp(A \cdot L + B) \quad \text{ns} \quad (35)$$

donde $A = 0,038$, $B = 2,3$, y L son las pérdidas en el trayecto (dB).

Con el mismo conjunto de mediciones se compararon, para cada emplazamiento, los valores eficaces de las dispersiones del retardo para diferentes bandas de frecuencias (aparte de la frecuencia de 190 MHz). Se comprobó que para más del 10% de los emplazamientos existían diferencias superiores a 300 ns en el valor eficaz de la dispersión del retardo con umbrales de 25 dB, y diferencias superiores a 2 μ s del intervalo de retardo para umbrales de 15 dB.

Las distribuciones de las características del retardo multitrayecto para la banda de 5,2 GHz se obtuvieron mediante mediciones en un entorno suburbano con una antena de EB de 20 m de altura, y una antena de EM de 2,8 m de altura. En el Cuadro 9 se enumeran los valores medidos de la dispersión eficaz de retardo para la banda 5,2 GHz en los casos donde la probabilidad acumulativa es 50% y 95%.

CUADRO 9

Típicos valores eficaces de la dispersión del retardo*

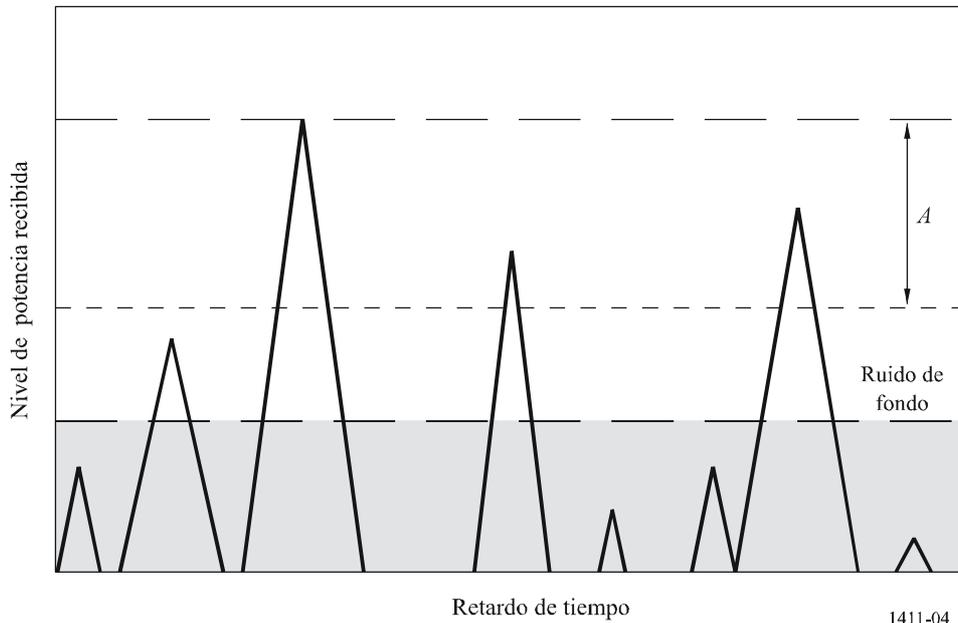
Condiciones de medición					Valor eficaz de la dispersión del retardo (ns)	
Zona	Frecuencia (GHz)	Altura de la antena		Alcance (m)	50%	95%
		h_{BS} (m)	h_r (m)			
Suburbana	5,2	20	2,8	100-1 000	189	577

* Para calcular el valor eficaz de la dispersión del retardo se utilizó un umbral de 30 dB.

7 Número de componentes de la señal

Para el diseño de los sistemas de gran velocidad binaria con separación multitrayecto y técnicas de síntesis, es importante estimar el número de componentes de la señal (es decir, un componente predominante más los componentes multitrayecto) que llegan al receptor. El número de componentes de la señal puede representarse partiendo del perfil de retardo, como el número de crestas cuyas amplitudes están dentro de A dB de la cresta más alta y por encima del nivel mínimo de ruido, tal como se presenta en la Fig. 4.

FIGURA 4
Definición para la determinación del número de crestas



Los Cuadros 10 a 12 muestran los resultados de las mediciones para tres casos distintos (una antena baja de EB en una zona urbana; una antena alta de EB en una zona urbana; una antena baja de EB en una zona residencial). La resolución temporal en las mediciones era de 20 ns. El Cuadro 13 muestra los resultados de las mediciones para una antena alta de EB en un entorno suburbano. La resolución temporal para esta medición era de 50 ns. Estos Cuadros enumeran el número máximo de componentes de la señal que se han observado en el 80% y en el 95% de los emplazamientos en cada sección de medición.

CUADRO 10

Número máximo de componentes de la señal (para mediciones en las que se utiliza una antena baja de EB de base en una zona urbana)

Frecuencia (GHz)	Altura de la antena (m)		Distancia (m)	Número máximo de componentes de la señal					
	h_b	h_m		$A = 3$ dB		$A = 5$ dB		$A = 10$ dB	
				80%	95%	80%	95%	80%	95%
3,35	4	1,6	0-200	2	3	2	4	5	6
			0-1 000	2	3	2	4	5	9
8,45	4	1,6	0-200	1	3	2	3	4	6
			0-1 000	1	2	2	4	4	8
15,75	4	1,6	0-200	1	3	2	3	4	5
			0-1 000	2	3	2	4	6	10

CUADRO 11

Número máximo de componentes de la señal (para mediciones en las que se utiliza una antena alta de EB en una zona urbana)

Frecuencia (GHz)	Altura de la antena (m)		Distancia (m)	Número máximo de componentes de la señal					
	h_b	h_m		$A = 3$ dB		$A = 5$ dB		$A = 10$ dB	
				80%	95%	80%	95%	80%	95%
3,35	55	2,7	150-590	2	2	2	3	3	13
8,45	55	2,7	150-590	2	2	2	3	3	12

CUADRO 12

Número máximo de componentes de la señal (para mediciones en las que se utiliza una antena baja de EB en una zona residencial)

Frecuencia (GHz)	Altura de la antena (m)		Distancia (m)	Número máximo de componentes de la señal					
	h_b	h_m		$A = 3$ dB		$A = 5$ dB		$A = 10$ dB	
				80%	95%	80%	95%	80%	95%
3,35	4	2,7	0-480	2	2	2	2	2	3

CUADRO 13

Número máximo de componentes de la señal (para mediciones en las que se utiliza una antena alta de EB en zona suburbana)

Frecuencia (GHz)	Altura de la antena (m)		Distancia (m)	Número máximo de componentes de la señal					
	h_b	h_m		$A = 3$ dB		$A = 5$ dB		$A = 10$ dB	
				80%	95%	80%	95%	80%	95%
3,67	40	2,7	0-5 000	1	2	1	3	3	5

8 Características de la polarización

La discriminación por polarización cruzada (XPD), tal como se define en la Recomendación UIT-R P.310, establece una diferencia entre zonas LoS y NLoS en un entorno microcelular de ondas centimétricas. Las mediciones indican un valor mediano de discriminación por polarización cruzada de 13 dB para los trayectos LoS y de 8 dB para los trayectos NLoS, y una desviación típica de 3 dB para los trayectos LoS y de 2 dB para los trayectos NLoS en ondas centimétricas. De conformidad con la Recomendación UIT-R P.1406, esos valores medianos son compatibles con los valores en ondas decimétricas para zonas abiertas y urbanas respectivamente.

9 Características de la dirección de llegada

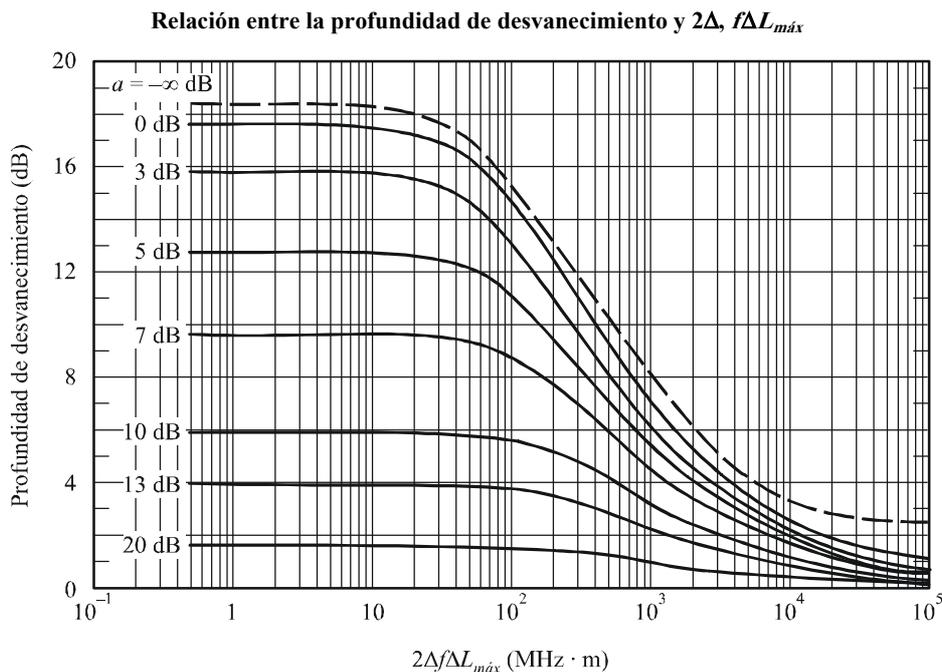
El valor eficaz de la dispersión angular, tal como se define en la Recomendación UIT-R P.1407 en la dirección de acimut en un entorno de microcélula o de picocélula en una zona urbana, se obtuvo mediante mediciones efectuadas a la frecuencia de 8,45 GHz. La estación de base receptora tenía una antena parabólica con una anchura de haz de potencia mitad de 4° . Las alturas de antena de la estación móvil transmisora y de la estación de base receptora eran de 2,7 m y 4,4 m, respectivamente.

En la situación LoS, el valor eficaz medio de la dispersión angular es de 30° (desviación típica de 11°). En la situación NLoS, el valor eficaz medio de la dispersión angular es de 41° (desviación típica de 18°).

10 Características de desvanecimiento

La profundidad de desvanecimiento, que se define como la diferencia entre el valor del 50% y el valor del 1% de la probabilidad acumulativa de los niveles de la señal recibidos, se expresa como una función del producto ($2\Delta f\Delta L_{m\acute{a}x}$ MHz·m) de la anchura de banda recibida $2\Delta f$ MHz y la máxima diferencia en las longitudes del trayecto de propagación $\Delta L_{m\acute{a}x}$ m, tal y como se muestra en la Fig. 5. $\Delta L_{m\acute{a}x}$ es la máxima diferencia en las longitudes del trayecto de propagación entre los componentes cuyo nivel es mayor que el umbral, siendo éste 20 dB menor que el nivel más alto de las ondas indirectas, como se indica en la Fig. 6. En esta Figura, a se expresa en dB y es la relación de potencias entre la suma de ondas directas y la suma de ondas indirectas; $a = -\infty$ dB representa un caso NLoS. Cuando $2\Delta f\Delta L_{m\acute{a}x}$ es menor que 10 MHz·m, los niveles de la señal recibida, en situaciones con LoS o NLoS, obedecen a las distribuciones de Rayleigh y Nakagami-Rice, lo que corresponde a una región de desvanecimiento de banda estrecha. Cuando es mayor que 10 MHz·m, corresponde a una región de desvanecimiento de banda ancha, en la que la profundidad de desvanecimiento disminuye y los niveles de la señal recibida no obedecen a las distribuciones de Rayleigh ni de Nakagami-Rice.

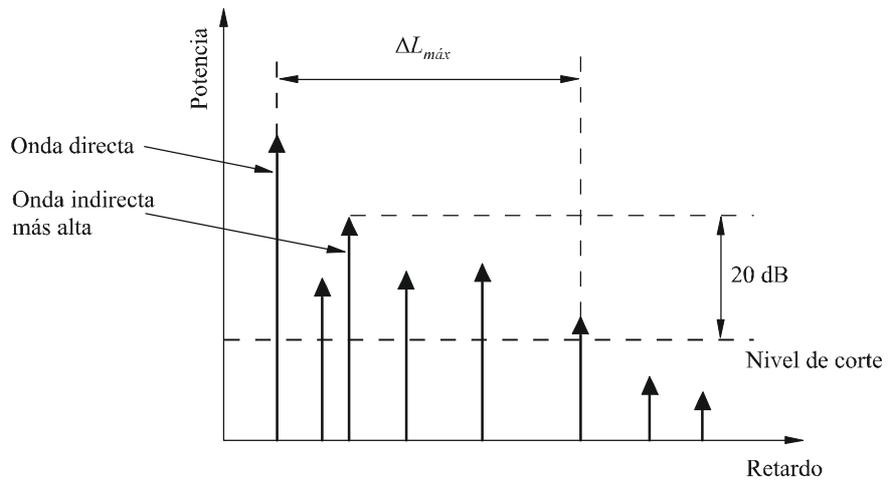
FIGURA 5



a : Rel. de potencias

1411-05

FIGURA 6
Modelo para calcular $\Delta L_{m\acute{a}x}$



1411-06