

RECOMENDACIÓN UIT-R P.1410-4

Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha que funcionan en una gama de frecuencias de 3 a 60 GHz aproximadamente

(Cuestión UIT-R 203/3)

(1999-2001-2003-2005-2007)

Cometido

El acceso inalámbrico de banda ancha es un método importante de proporcionar servicios de banda ancha a hogares y pequeñas empresas. La presente Recomendación hace referencia a sistemas que funcionan en una gama de frecuencias de 3 a 60 GHz, dando una orientación sobre cobertura con visibilidad directa (LoS, *line-of-sight*) y mecanismos preponderantes de propagación sinLoS. Para los sistemas afectados, se proporcionan métodos de lluvia para estimar la mejora de diversidad seleccionando la mejor estación de base entre dos y la reducción de cobertura con lluvia. Se proporciona asimismo una orientación con respecto a la distorsión de banda amplia.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que para la planificación adecuada de los sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha es necesario disponer de información sobre propagación y de métodos de predicción apropiados;
- b) que las Recomendaciones en vigor para el diseño de enlaces individuales no cubre los aspectos de zona,

recomienda

1 que la información sobre propagación y los métodos de predicción expuestos en el Anexo 1 se utilicen a la hora de diseñar sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha que funcionan en una gama de frecuencias de 3 a 60 GHz aproximadamente.

Anexo 1**1 Introducción**

Existe un interés creciente en la prestación de servicios de banda ancha a través de la red local de acceso a los hogares y a las pequeñas empresas. Las soluciones radioeléctricas son cada vez más valoradas como sistemas de provisión, y ahora el mercado ya dispone de ellas. Se están examinando e introduciendo diversos sistemas, tales como el sistema multipunto de distribución local (LMDS), el sistema multipunto de comunicación local (LMCS) y el sistema punto a multipunto (P-MP). De una manera global, estos sistemas pueden llamarse de acceso inalámbrico de banda ancha (BWA, *broadband wireless access*). Se están desarrollando normas internacionales, como por ejemplo WiMAX basado en IEEE 802.16 e HiperMAN.

Se precisan, por parte de las comunidades de planificación de red, operadores, fabricantes, y reguladores, buenas directrices de diseño con respecto a los asuntos relativos a la propagación de ondas radioeléctricas.

2 Cobertura de zona

Cuando se planifica un sistema celular, el operador ha de elegir cuidadosamente la ubicación de la estación de base y su altura con respecto al suelo para poder prestar servicio al número de usuarios deseado dentro de una zona. El tamaño de las células puede variar en función de la topografía y del número de usuarios para el cual se ofrece un servicio de radiocomunicaciones. En este punto se expone un modelo estadístico de bloqueo por edificios basado en una descripción muy simple de los edificios de una zona, y se proporciona orientación fundamentada en cálculos detallados. Se presenta asimismo un modelo de atenuación debida a la vegetación y algunas normas sencillas de diseño.

2.1 Bloqueo producido por edificios

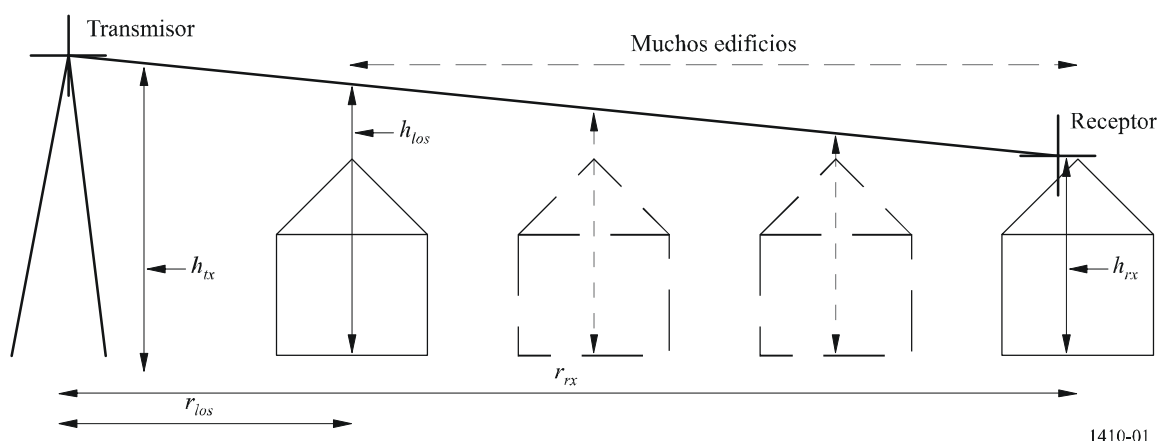
La mejor manera de estimar la probabilidad de bloqueo producido por edificios es la utilización de técnicas de trazado de rayos con datos reales extraídos de bases de datos exhaustivas sobre los edificios y el terreno. En el § 2.1.1 se describen brevemente los requisitos para las técnicas de trazado de rayos. Sin embargo, en muchas zonas no se dispone de bases de datos adecuadas, por lo que se recomienda el modelo estadístico esbozado en el § 2.1.2.

2.1.1 Requisitos de trazado de rayos

Se puede lograr una predicción de cobertura precisa mediante la utilización de técnicas de trazado de rayos en zonas en que se dispone de una base de datos sobre cobertura del terreno. Debido al elevado valor de la frecuencia y a las cortas longitudes de los trayectos que intervienen se pueden realizar aproximaciones ópticas geométricas en línea recta.

Para una aproximación de primer orden con objeto de estimar la cobertura, es suficiente una determinación óptica con visibilidad directa (LoS, *line-of-sight*) del 60% de la apertura de la primera zona de Fresnel para asegurar pérdidas adicionales despreciables (véase la Fig. 1). Las pérdidas por difracción en los casos en que no hay visibilidad directa son muy intensas. La precisión de la base de datos sobre los edificios limitará la precisión de la predicción de los rayos y dicha base de datos debe incluir una representación precisa del terreno y de los edificios a lo largo del trayecto. Para trayectos superiores a 2 km también debe considerarse la curvatura de la Tierra. Para este procedimiento deben considerarse opacos los edificios y la vegetación.

FIGURA 1
Cada edificio debe quedar por debajo del rayo con LoS que une el transmisor y el receptor



Las mediciones de las características de la señal al compararlas con los modelos de trazado de rayos han mostrado un buen ajuste a los valores estadísticos, pero las mediciones han demostrado una variabilidad importante de la señal con la posición y con el tiempo en trayectos donde no hay una clara LoS. Por lo tanto, debido a la precisión limitada de las bases de datos reales de los edificios, no será posible efectuar predicciones sobre la calidad del servicio para trayectos específicos casi con LoS.

La vegetación, en particular los árboles de gran altura y los arbustos, puede causar una importante degradación del servicio y lo ideal sería incluir en la base de datos los datos de la vegetación.

Las mediciones han indicado que, para una prestación del servicio en regiones urbanas/suburbanas típicas, los usuarios afectados por los efectos de la reflexión multirayos son mucho más escasos que los que están bloqueados por edificios o vegetación debido a una anchura de haz de la antena estrecha, por consiguiente no es necesario calcular las reflexiones (véase el § 4.2.1).

La base de datos utilizada para evaluar el trazado de rayos puede ser una base de datos detallada orientada al objeto, que incluya la altura del terreno, las características de los distintos edificios incluida la altura del techo y los datos sobre la forma del edificio, representando la vegetación mediante árboles aislados o grupos de árboles. Como alternativa para determinar la LoS, puede utilizarse una base de datos de exploración de las alturas puntuales, tales como la generada a partir de las mediciones efectuadas por los radares de apertura sintética (SAR, *synthetic aperture radar*) a bordo de aeronaves (véase el Cuadro 1).

CUADRO 1
Requisitos mínimos de la base de datos

Objeto	Formato	Definición horizontal (m)	Definición vertical (m)
Terreno	Cuadrícula de alturas puntuales	50	1
Edificios	Orientado al objeto o imágenes por puntos de alta definición	1	1
Vegetación			

2.1.2 Reflexiones y dispersión

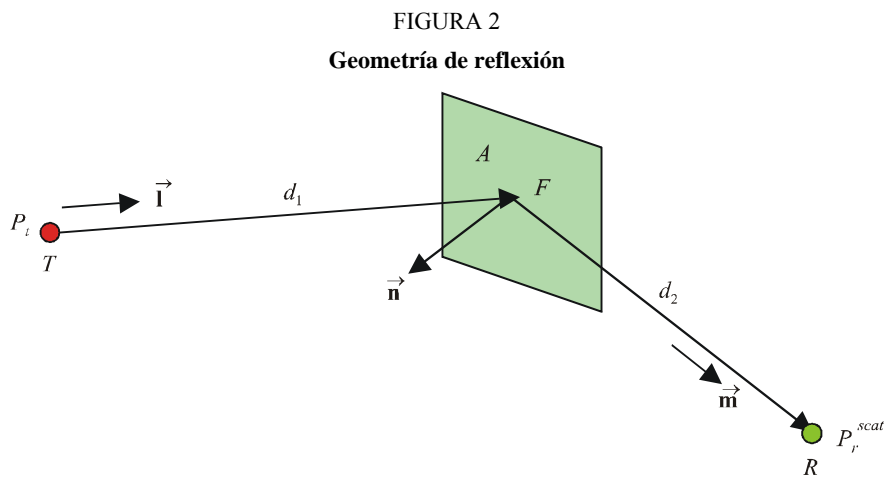
En un entorno urbano, las reflexiones en edificios cercanos pueden suponer el mecanismo de propagación dominante en condiciones sin LoS. Se ha investigado y escrito mucho sobre métodos eficientes de cálculo de reflexiones en grandes bases de datos. Al considerar reflexiones y difracciones múltiples el problema se vuelve espinoso para todos los casos, excepto el más trivial. Por esta razón, se recomienda un modelo de rebote único con cada trayecto al reflector y desde el mismo sujeto a sus propias pérdidas por difracción vertical y horizontal.

Modelo de dispersión en superficie rugosa

Se sugiere que se utilice el modelo simple aquí proporcionado con objeto de minimizar la tara de cálculo. Dicho modelo es de tipo escalar para la dispersión incoherente producida por una superficie rugosa. Es decir, únicamente considera potencia de dispersión e ignora los efectos de fase y polarización.

Geometría

Considérese el lado F de una superficie rugosa de área A , siendo T y R el transmisor y el receptor respectivamente. \vec{i} y \vec{m} son vectores unitarios en las direcciones TF y FR , y \vec{n} es la normal al citado lado (Fig. 2).



1410-02

P_t y P_r^{scat} son las potencias de dispersión transmitidas y recibidas respectivamente, y sin pérdida de generalidad, se suponen antenas omnidireccionales en T y R .

Propagación de T a F

Suponiendo propagación en espacio libre, la densidad de flujo de potencia (dfp) S (W/m^2) a la distancia d_1 de T es:

$$S = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left(\frac{\lambda}{4\pi d_1} \right)^2 P_t \quad (1)$$

donde λ , es la longitud de onda. La potencia P_{fr} incidente sobre F es, por tanto:

$$P_{fr} = SA |\vec{i} \cdot \vec{n}| \quad (2)$$

En este resultado se supone que cualquier dimensión de $A \ll d$, de modo que la dfp es constante a lo largo del lado. Ello no supone una limitación importante: en principio, el lado A puede escogerse tan pequeño como sea necesario para que ello se verifique. No obstante, en este modelo se supone que F es de hecho la superficie completa de un edificio (o al menos la parte iluminada de la superficie de un edificio), y se supone que esta limitación se satisface. El punto de referencia para la dispersión es el centro de la superficie.

Modelo de dispersión en superficie rugosa

El modelo es el utilizado para lograr dispersión difusa en gráficos de ordenador. Se supone que la potencia incoherente dispersada por la superficie rugosa F sigue el modelo de Lambert. Es decir, la potencia se vuelve a radiar en todas las direcciones (en medio plano) con una intensidad que varía como $\cos \theta$, donde θ es el ángulo de radiación con respecto a la normal. Dicha variación anula exactamente la dependencia como $1/\cos \theta$ de la dfp emitida (debido al término de proyección $|\vec{m} \cdot \vec{n}|$) proporcionando radiación omnidireccional de igual ganancia en todas las direcciones. Esto corresponde a lo que se observa en la práctica para la dispersión óptica. La potencia incoherente emitida por F se determina mediante:

$$P_{ft} = 2\rho_{nonspec}P_{fr} \quad (3)$$

El factor 2 tiene en cuenta el hecho de que toda la potencia se emite hacia un hemisferio. $\rho_{nonspec}$ da cuenta de la fracción de la potencia coherente incidente sobre F que se vuelve a emitir como dispersión no especular.

Propagación de F a R

Suponiendo propagación en el espacio libre y una antena omnidireccional, la potencia de dispersión recibida en R será:

$$P_r^{scat} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_2} \right)^2 P_{ft} \quad (4)$$

Balance del enlace total

Tras combinar las ecuaciones (1) y (2) resulta:

$$P_r^{scat} = 2\rho_{nonspec} \frac{4\pi A |\vec{I} \cdot \vec{n}|}{\lambda^2} \left(\frac{\lambda}{4\pi d_1} \right)^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d_2} \right)^2 P_t \quad (5)$$

Los términos $(\lambda/4\pi d)^2$ son los correspondientes a la propagación en el espacio libre, pudiendo sustituirse en general por los correspondientes a la propagación real. Los diagramas de ganancia de antena en T y R también pueden incluirse. La única suposición requerida es la de la incidencia de la onda plana en F .

Pérdidas de dispersión

Puede resultar útil calcular las «pérdidas» de dispersión incoherentes en superficie rugosa. Se trata de las pérdidas de trayecto adicionales provocadas por la dispersión adicionales a las pérdidas de trayecto que se producirían si el lado fuese un espejo perfecto, es decir, una reflexión especular con

un coeficiente de reflexión de 1. Para ello es preciso suponer una propagación en espacio libre sobre los trayectos TF y FR . La potencia recibida en R procedente de un transmisor en T suponiendo reflexión perfecta, P_r^{LoS} es:

$$P_r^{LoS} = \left(\frac{\lambda}{4\pi(d_1 + d_2)} \right)^2 P_t \quad (6)$$

Las pérdidas de dispersión L_{scat} serán por tanto (definiéndose de modo que $L_{scat} > 1$ para una pérdida):

$$\frac{1}{L_{scat}} = \frac{P_r^{scat}}{P_r^{LoS}} = \frac{|\vec{i} \cdot \vec{n}|}{2\pi} \rho_{nonspec} \frac{(d_1 + d_2)^2 A}{d_1^2 d_2^2} \quad (7)$$

Todos los términos de esta expresión son estrictamente < 1 , a excepción del último, que puede ser > 1 si A es demasiado grande comparado con d_1 y d_2 . Sin embargo, como se ha observado anteriormente, el modelo sólo es válido si cualquier dimensión de $A \ll d_1$, de manera que una implementación de la ecuación (7) debe reforzar la condición:

$$\frac{(d_1 + d_2)^2 A}{d_1^2 d_2^2} \leq 1 \quad (8)$$

Esto deja de cumplirse sólo si el transmisor y el receptor se encuentran extremadamente próximos a F .

La ecuación (7) muestra que las pérdidas de dispersión no especular aumentan rápidamente a medida que el punto de recepción se aleja de la superficie de dispersión. Como $d_1 \rightarrow \infty$, la pérdida (en decibelios) $\rightarrow 10 \log(d_2^2 / A)$. Por consiguiente, para la superficie de un edificio de 100 m^2 la pérdida debida a dicho término únicamente es de 20 dB a 100 m y de 40 dB a 1 km de distancia del edificio.

Definición de $\rho_{nonspec}$

Al definir ρ_{spec} y ρ_{trans} como la fracción de la potencia coherente incidente sobre F que se refleja como reflexión especular (coherente) y se transmite a través de la superficie, respectivamente, puede esperarse que un modelo coherente del proceso completo de dispersión conserve la energía, obteniéndose:

$$\rho_{spec} + \rho_{trans} + \rho_{nonspec} = 1 \quad (9)$$

Desgraciadamente, nuestro modelo semiempírico no es coherente, y se hacen hipótesis diferentes para cada mecanismo:

- ρ_{spec} : el modelo más basado en la teoría es el de la dispersión especular. Para una superficie lisa, la potencia reflejada se determina mediante los coeficientes de la reflexión de Fresnel (que dependen del ángulo de reflexión especular, y de las propiedades eléctricas de las superficies). No obstante, no hay una extensión sencilla para la dispersión en superficie *rugosa*, y el modelo hace uso de un término semiempírico que modifica (reduce) el coeficiente de reflexión de Fresnel en la superficie lisa. Se propone que ρ_{spec} se defina como el factor de reducción de potencia debido al efecto de la superficie rugosa únicamente; es decir, no se tiene en cuenta la variación de potencia reflejada debida a la variación del coeficiente de Fresnel. Este último, y por ello también la potencia de dispersión no especular, depende del ángulo de reflexión y de la polarización; esto sería incompatible con la suposición de Lambert.

- ρ_{trans} : en principio, la componente transmitida también puede calcularse a partir de la teoría de Fresnel para una superficie lisa con interfaz única. No obstante, en la práctica, la situación es demasiado complicada para modelizarla (superficie rugosa, interfaces múltiples y reflexiones), debiéndose usar un valor empírico experimentalmente determinado para ρ_{trans} .

En principio, cada ρ debe satisfacer la condición $0 \leq \rho \leq 1$. No hay razón para creer que se satisfará la ecuación (9), y si se utiliza para obtener $\rho_{nonspec}$ a partir de ρ_{spec} y ρ_{trans} , es posible que el valor de $\rho_{nonspec}$ se vuelva negativo, lo que iría en contra de la física. Por consiguiente, se propone obtener la fracción no especular directamente de la fracción especular, ignorando la componente transmitida:

$$\rho_{nonspec} = 1 - \rho_{spec} \quad (10)$$

En la práctica ρ_{trans} es posible que sea bastante pequeño (por ejemplo, 10 dB de pérdidas de penetración en edificios implica un valor de $\rho_{trans} = 0,1$).

Cálculo de ρ_{spec}

ρ_{spec} es el factor de reducción de *potencia* aplicado al coeficiente de reflexión especular para tener en cuenta el efecto de la rugosidad de la superficie en la reflexión especular. Su valor es:

$$\rho_{spec} = \rho_s^2 \quad (11)$$

Al calcular el coeficiente de reflexión especular, el coeficiente de reflexión efectiva R se obtiene multiplicando el coeficiente de Fresnel R_F por ρ_s :

$$R = \rho_s R_F \quad (12)$$

ρ_s puede calcularse a partir de:

$$\rho_s = \max\left[\exp\left(-\frac{1}{2}g^2\right), 0,15\right] \quad (13)$$

donde:

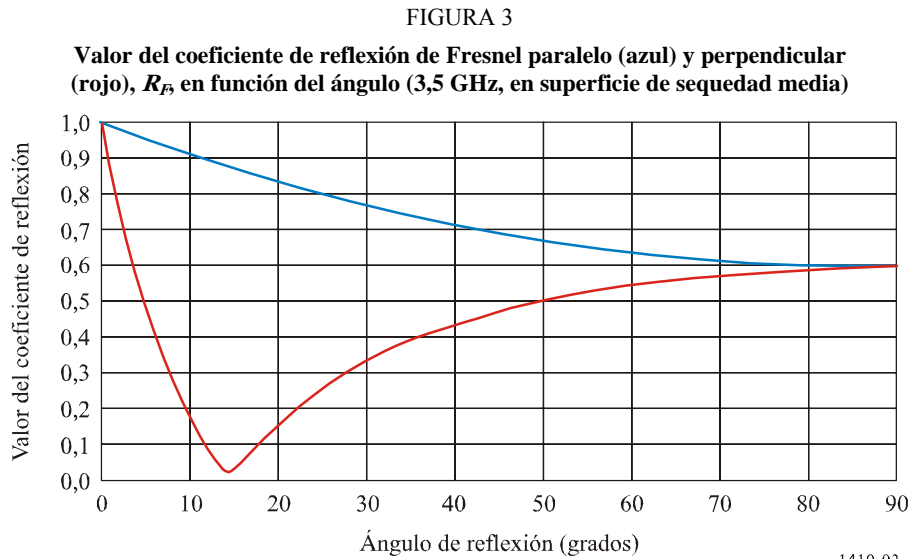
$$g = \frac{4\pi\sigma}{\lambda} \cos \varphi \quad (14)$$

σ es la desviación típica de la altura de la rugosidad de la superficie sobre la media local en la primera zona de Fresnel, y φ es el ángulo de incidencia con respecto a la normal de la superficie. El corte de 0,15 en la ecuación (13) tiene por objeto evitar que ρ_s se haga demasiado pequeño (el término exponencial tiende a subestimar la dispersión en los casos de superficies muy rugosas).

El cálculo del coeficiente de reflexión especular en la ecuación (13) resulta complicado. El coeficiente de Fresnel depende del ángulo, de las constantes eléctricas y de la *polarización*. La dependencia con respecto a la polarización significa que, en general, debe calcularse tanto los coeficientes de reflexión de Fresnel paralelos como los perpendiculares, y en la geometría del trayecto del rayo hay que tener en cuenta la rotación de polarización cuando se calcule la señal que llega al receptor.

Dado el carácter empírico del modelo, si en éste intervienen únicamente potencias de señal (pudiendo ignorarse la fase), puede simplificarse calculando todas las reflexiones especulares basándose únicamente en el coeficiente de Fresnel paralelo. La magnitud del coeficiente cuando el vector eléctrico se encuentra en el plano de los rayos incidente y reflejado (en azul, o curva superior de la Fig. 3), es siempre numéricamente mayor que el coeficiente cuando el vector eléctrico es normal al plano (en rojo, o curva inferior). En una base de datos tridimensional, generalmente

aparecerá una combinación de las dos componentes de polarización, y la componente paralela tenderá a enmascarar al «nulo» de la componente perpendicular.



Cálculo de ρ_{trans}

ρ_{trans} es la fracción de la potencia incidente transmitida a través de la pared. En esta aplicación, se supone que el valor de ρ_{trans} es una constante independiente del ángulo de transmisión con respecto a la superficie, y que ésta no varía el ángulo del rayo a medida que éste la atraviesa.

Puntos a observar

- 1 Las pérdidas de dispersión en superficie rugosa aparecen en la ecuación (10), con la fracción de potencia no especular definida por medio de las ecuaciones (11), (13) y (14).
- 2 L_{scat} no depende explícitamente de λ , la única dependencia de la frecuencia es por medio de ρ_{nonpec} . Se trata como cabía esperar, de un modelo de potencia escalar, siendo el modelo de fuente de Lambert independiente de la frecuencia.
- 3 Un modelo que representa correctamente la fase y la polarización sería mucho más complejo e incompatible con un modelo de dispersión incoherente. Lo que es más importante, requeriría un profundo conocimiento de la forma de la rugosidad de la superficie, algo de lo que posiblemente nunca se disponga (ello sería posible para una superficie «ligeramente» rugosa, desde un punto de vista de la perturbación, pero dicho modelo de dispersión coherente se analizaría mejor en el marco de un modelo de reflexión especular modificado).
- 4 Una consecuencia del punto 3 es que este modelo de dispersión sólo resulta útil en realidad de cara al modelo de *interferencias*, puesto que se supone que las potencias interferentes se suman de manera incoherente. En el caso de la señal deseada, este resultado puede utilizarse para estimar la dispersión del retardo. Para la adición necesaria a fin de obtener la potencia de señal total, es preciso considerar la fase (o de manera equivalente, longitudes de trayecto diferenciales) de forma más detallada.
- 5 El modelo de dispersión no especular no satisface la reciprocidad. De hecho, *casi* lo hace, pero la inclusión del término $|\vec{I} \cdot \vec{n}|$ sin su correspondiente término $|\vec{m} \cdot \vec{n}|$ destruye la simetría. Escogiendo un modelo de fuente de dispersión diferente al de Lambert sería

posible resolver esto. Sin embargo, el modelo es semiempírico en cualquier caso, no debiendo esperarse reciprocidad alguna con las sencillas suposiciones realizadas.

2.1.3 Transmisión a través de edificios

Las mediciones (y referencias a mediciones) que figuran en la Recomendación UIT-R P.1411 muestran que la penetración de señal a través de edificios en el extremo más bajo de la gama de frecuencias podría convertirse en un mecanismo de propagación significativo (pérdidas adicionales de 20-40 dB) cuando las pérdidas de difracción alrededor o por encima del edificio son elevadas. De manera similar a los coeficientes de atenuación de reflexión, dichas pérdidas se relacionarán con los materiales de construcción, así como con las frecuencias radioeléctricas y la estructura interna de los edificios (muros internos). Las pérdidas podrían modelarse como una serie de pérdidas en los muros (si se dispone de datos suficientes), o bien como pérdidas por metro a través del edificio. Si más de un edificio bloquea el trayecto directo, podría ser mejor ignorar este mecanismo puesto que si no deberían tenerse en cuenta asimismo combinaciones de trayectos difractados, reflejados y a través de edificios.

2.1.4 Modelo estadístico

Para una determinada posición del transmisor (Tx) y del receptor (Rx), la probabilidad de que exista un rayo con LoS entre los dos viene dada por la combinación de las probabilidades de que cada edificio que se encuentre en el trayecto de propagación esté por debajo de la altura del rayo que une el transmisor y el receptor en el punto en que el rayo cruza por el edificio. En la Fig. 1 se muestra la geometría de la situación y se definen los términos utilizados en la ecuación (5). En este modelo se parte de la hipótesis de que el terreno es llano o tiene una pendiente uniforme en la zona de interés.

La altura del rayo en el punto de obstrucción, h_{LoS} , viene dada por:

$$h_{LoS} = h_{tx} - \frac{r_{LoS}(h_{tx} - h_{rx})}{r_{rx}} \quad (15)$$

siendo:

- h_{tx} : altura del transmisor con respecto al suelo
- h_{rx} : altura del receptor a la distancia, r_{rx}
- r_{LoS} : distancia entre el transmisor y el obstáculo.

Si se parte de que, por término medio, los edificios están espaciados de forma uniforme, puede calcularse el número de edificios que hay entre dos puntos. La probabilidad de que exista un rayo con LoS es:

$$P(LoS) = \prod_{b=1}^{b_r} P(\text{altura_edificio} < h_{LoS}) \quad (16)$$

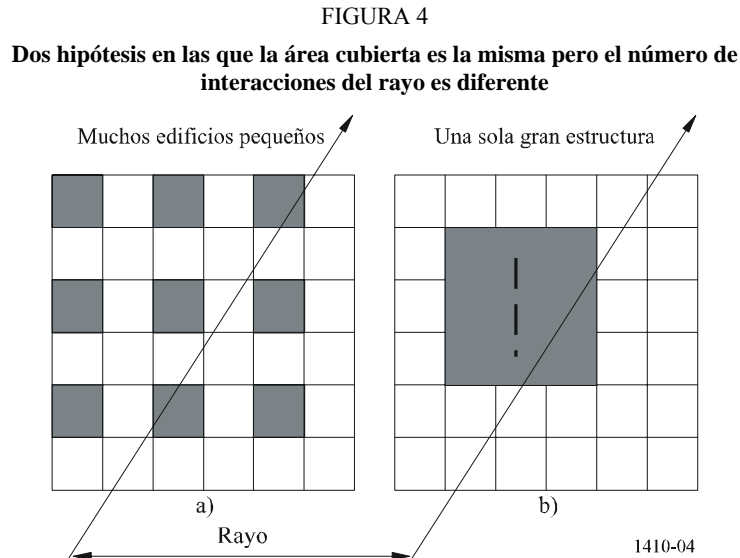
siendo b_r el número de edificios por los que pasa el rayo.

Para este modelo sencillo, se requieren tres parámetros:

- α : relación entre la superficie de tierra cubierta por edificios y la superficie total (adimensional);
- β : número medio de edificios por unidad de superficie (edificios/km²);
- γ : variable que determina la distribución de la altura de los edificios.

Para la distribución de Rayleigh propuesta, la variable γ es igual a la altura más probable de los edificios. El motivo de la distinción entre α y β se ilustra en la Fig. 4. Tanto la Fig. 4a) como la Fig. 4b) tienen la misma superficie de tierra cubierta y, por consiguiente, el mismo valor de α , pero

se prevén más interacciones de rayos en la Fig. 4a) que en la Fig. 4b). El parámetro α por sí solo no diferencia a los dos diagramas que se muestran en la Fig. 4. Si los edificios tienen una altura similar tanto en la Fig. 4a) como en la Fig. 4b), la probabilidad de despejamiento de un gran número de edificios pequeños será significativamente menor que si sólo hay un gran edificio.



Para emplazamientos que van de las zonas de edificaciones bajas a las de rascacielos, el valor de α irá de 0,1 a 0,8 y el de β de 750 a 100 respectivamente.

La distribución de probabilidad de Rayleigh, $P(h)$, de la altura, h , define el parámetro γ :

$$P(h) = \frac{h^2}{e^{2\gamma^2} \gamma^2} \quad (17)$$

2.1.5 Algoritmo y cálculo

Dados α , β y γ , la cobertura del rayo con LoS se calcula de la siguiente forma:

Un rayo de una longitud de 1 km pasará sobre $\sqrt{\beta}$ edificios si éstos están colocados formando una retícula uniforme. Como la zona cubierta es sólo una fracción de α , el número previsible de edificios sobre los que se pase por km viene dado por:

$$b_1 = \sqrt{\alpha \beta} \quad (18)$$

y para un trayecto de longitud r_{rx} (km), el número de edificios es:

$$b_r = \text{suelo}(r_{rx} b_1) \quad (19)$$

en donde se ha introducido la función de suelo para garantizar la inclusión en la ecuación (16) de un número entero de términos.

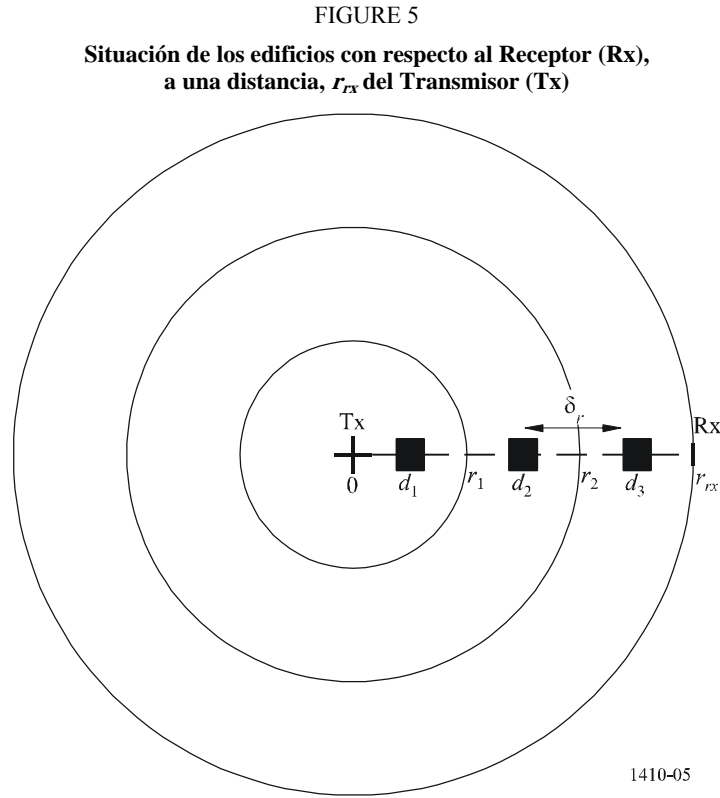
Para calcular la probabilidad de que exista un rayo con LoS en cada gama r_{rx} :

Paso 1: Calcular el número de edificios, b_r , entre los puntos Tx y Rx utilizando la ecuación (19).

Paso 2: Se supone que los edificios están espaciados de forma regular entre los puntos Tx y Rx, y las distancias entre los edificios vienen dadas por:

$$d_i = (i + 1/2) \delta_r \quad i \in \{0, 1, \dots, (b_r - 1)\} \quad (20)$$

siendo $\delta_r = r_{rx}/b_r$ la separación entre los edificios.



Paso 3: Para cada d_i , la altura, h_i , de un edificio que pudiera obstruir el rayo con LoS se obtiene sustituyendo d_i en la ecuación (15).

$$h_i = h_{tx} - \frac{d_i (h_{tx} - h_{rx})}{r_{rx}} \quad (21)$$

Paso 4: La probabilidad, P_i , de que un edificio sea más pequeño que la altura, h_i , viene dada por:

$$P_i = \int_0^{h_i} P(h) dh \quad (22)$$

$$= 1 - e^{-h_i^2 / 2\gamma^2}$$

Paso 5: La probabilidad, $P_{LoS,i}$, de que haya una línea de LoS en la posición d_i viene dada por:

$$P_{LoS,i} = \prod_{j=0}^i P_j \quad j \in \{0, \dots, i\} \quad (23)$$

Paso 6: La cobertura acumulada se obtiene ponderando cada valor de $P_{LoS,i}$ con los factores W_i , que dependen de la distancia desde el transmisor. Se tiene en cuenta el número de edificios en un anillo que es más amplio cuanto mayor es la distancia:

$$W_i = 2i + 1 \quad (24)$$

Paso 7: El sumatorio de las probabilidades ponderadas de edificios, normalizado por la zona del anillo acumulativo y multiplicado por la densidad de los edificios da la cobertura necesaria para una célula con radio r_{rx} :

$$CP_{r_{rx}} = \frac{\sum_{i=0}^{b_r-1} P_{LoS,i} W_i}{b_r^2} \quad (25)$$

Existen ciertas limitaciones a esta simulación, así como una serie de formas de ampliar el modelo:

- En el modelo no se ha tenido en cuenta ninguna variación del terreno. Es evidente que incluso la existencia de variaciones en algunos metros solamente pueden tener repercusiones significativas. La combinación de las propiedades estadísticas del modelo con unos datos aproximados sobre el terreno, añadiendo una desviación media de la altura del bloqueo en cada punto comprobado del modelo, ampliaría las capacidades de predicción del mismo.
- La densidad de edificios y la altura de los mismos varían enormemente de una región a otra, por lo que las predicciones en una determinada dirección deben ser diferentes de las de otra. Si se toman los valores medidos de las distribuciones de altura de los edificios, es evidente que éstos no se ajustan perfectamente al diagrama estadístico simple. Subdividir los datos en regiones más pequeñas y asignar a cada región un conjunto de parámetros propio ayudaría en gran medida a solucionar este problema.
- En realidad, los receptores están situados en los tejados de los edificios, por lo que la distribución de las alturas de los receptores es la misma que la de los puntos de altura de los edificios. En el modelo se supone que los receptores están a una altura constante con respecto al suelo. Una alternativa sería obtener las alturas de los receptores a partir de la distribución de los edificios; esto dependería también de las regiones.
- El método derivado del algoritmo utilizado proporciona buenas estimaciones de cobertura cuando ésta se compara con los resultados del trazado de rayos basado en bases de datos reales, véase el § 2.1.6. Se ha comprobado que la distribución de Rayleigh de la altura de los edificios ha proporcionado resultados precisos para algunas muestras de datos realizadas en una zona limitada, por ejemplo, una ciudad pequeña. Además, para obtener los resultados de cobertura que se muestran en el § 2.1.6, el método se ha utilizado conjuntamente con el modelo de ubicación de edificios y el modelo de despejamiento de trayecto tal como se describe en el procedimiento paso a paso.

2.1.6 Ejemplos de predicciones de cobertura

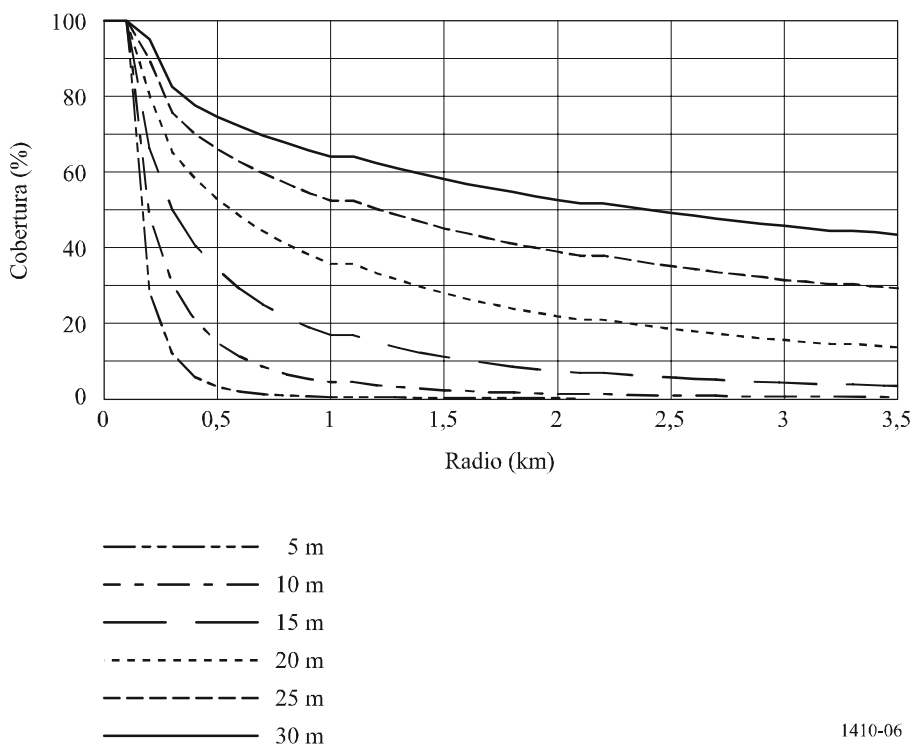
El modelo de Rayleigh se aplicó a la distribución acumulativa de alturas de tejados de una zona de edificaciones bajas del Reino Unido (Malvern). Para este conjunto de datos, los parámetros medios del modelo respecto al centro de la ciudad eran:

$$\alpha = 0,11; \quad \beta = 750; \quad \gamma = 7,63$$

En las Figs. 6 y 7 se muestran los resultados obtenidos a partir del modelo. La Fig. 6 muestra la cobertura en función de la altura del transmisor, y la Fig. 7 en función de la altura del receptor.

FIGURA 6

Simulación de cobertura acumulativa para un receptor a una altura de 7,5 m y un transmisor a alturas de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 m

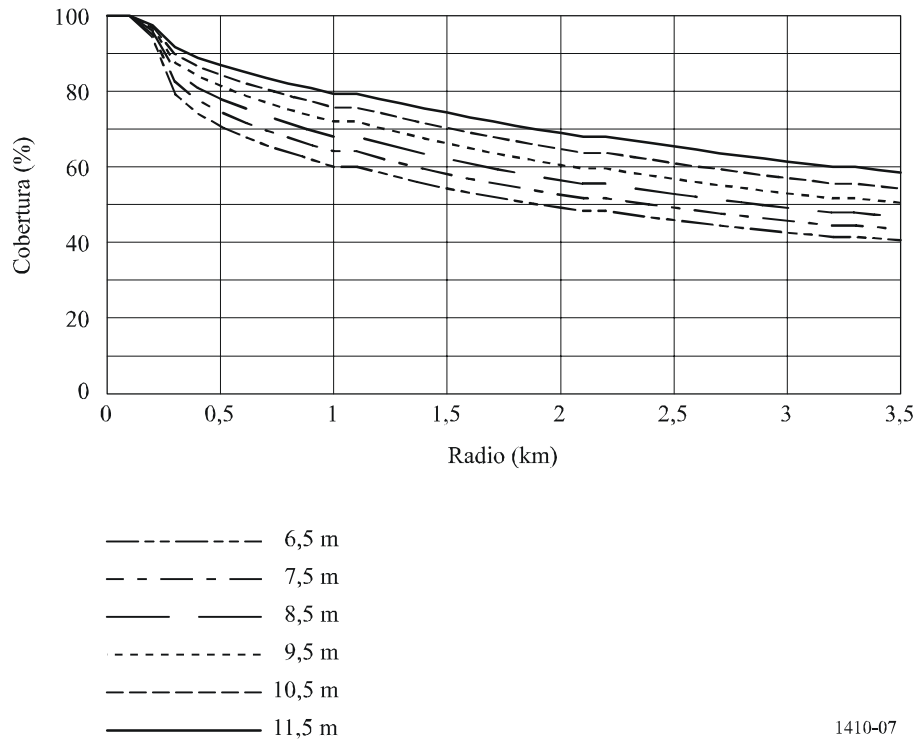


1410-06

Con el modelo se obtienen predicciones con la misma configuración básica y el mismo nivel de cobertura global que los resultados de las simulaciones detalladas de trazado de rayos. La utilidad del modelo consiste en que permite generar predicciones de cobertura basadas en tres parámetros únicamente, los cuales pueden calcularse para cualquier emplazamiento urbano con muy poca información sobre la zona. A medida que se disponga de más datos tridimensionales deberá ser posible generar cuadros de parámetros para diferentes ciudades/zonas urbanas que puedan utilizarse como referencia para la estimación de la cobertura en un lugar desconocido. El modelo no sólo puede utilizarse para calcular la cobertura de una única célula, sino que pueden combinarse los resultados de un gran número de células para calcular la cobertura de redes extensas teniendo en cuenta los efectos de la diversidad.

FIGURA 7

Simulación de cobertura acumulativa para un transmisor a una altura de 30 m y un receptor a alturas de 6,5, 7,5, 8,5, 9,5, 10,5 y 11,5 m



1410-07

2.1.7 Ampliación de la cobertura utilizando dos o más estaciones base

Una arquitectura de células que permita a los receptores elegir entre varias estaciones de base amplía significativamente la cobertura. Por ejemplo, los cálculos de trazado de rayos mostraron que en el caso de antenas transmisoras de 30 m de altura, la cobertura de una célula de 2 km pasaba de ser del 44% con una única estación de base al 80% con dos estaciones y a un 90% con cuatro estaciones, aun cuando las estaciones de base no se habían elegido especialmente por tener una buena visibilidad.

Asumiendo que las probabilidades de trayectos LoS hasta las distintas estaciones de base de interés son estadísticamente independientes, puede calcularse la probabilidad de que exista al menos un trayecto. En primer lugar, debe calcularse cada $P_{LoS,i}$ a partir de la ecuación (23). La probabilidad de que haya al menos un trayecto visible cuando hay m posibles estaciones de base, viene dada por:

$$P_{LoS,i} = 1 - \prod_{k=1}^m (1 - P_{LoS,i,k}) \quad (26)$$

La cobertura obtenida cuando se utilizan dos o más estaciones de base puede estimarse sustituyendo $P_{LoS,i}$ en la ecuación (23) del procedimiento del § 2.1.5 por la ecuación (26). Obsérvese que para cada k deben seguirse los Pasos 1 a 5, en los que r_{rx} es la distancia a cada estación de base.

2.2 Atenuación debida a la vegetación

La existencia de árboles que bloqueen puede limitar drásticamente el número de hogares a los que pueda proporcionarse un servicio. Por consiguiente, es muy importante disponer de un modelo fiable para simular los efectos y el grado de atenuación debida a la vegetación, ya que si los receptores se encuentran cerca del transmisor, el margen del sistema puede ser tan pequeño que la

intensidad de la señal que se propague a través de un solo árbol sea insuficiente para prestar un servicio.

Los estudios de trazado de rayos realizados en seis ciudades del Reino Unido utilizando las bases de datos que contienen todos los edificios y árboles existentes mostraron que hasta el 5% de los edificios en un radio de 1 000 m desde una estación de base central estaban obstruidos por la vegetación. La estación de base estaba ubicada encima del edificio más alto de la zona, generalmente a 30-40 m por encima del nivel del suelo y se consideraba que un edificio no estaba bloqueado si era posible establecer un trayecto de visibilidad directa hacia cualquier punto de prueba de dicho edificio. Los puntos de prueba del edificio se situaron siguiendo una cuadrícula regular de 1 m en el punto más alto de la huella de cada edificio. En un radio superior a unos 1 200 m, el porcentaje de bloqueo debido a la vegetación no varió, siempre y cuando se mantuviese la altura de la estación de base. En radios más amplios, debido a la curvatura de la Tierra, las causas dominantes del bloqueo eran otros edificios y la orografía del terreno. En zonas suburbanas, el bloqueo debido a la vegetación fue del 25% aproximadamente.

Las mediciones se realizaron a 42 GHz para determinar la importancia de la atenuación debida a «vegetación local». La atenuación media fue la esperada de acuerdo con la Recomendación UIT-R P.833, pero se constató la existencia de efectos de trayectos múltiples importantes, que causaban nulos profundos de la señal; dichos efectos variaban en el tiempo y según el movimiento de la vegetación con el viento. Se comprobó que podía realizarse una descorrelación adecuada de estos nulos por trayectos múltiples utilizando dos antenas con una separación aproximada de 60 cm o más. Las separaciones inferiores mostraron una mayor correlación y las separaciones más grandes una pequeña mejora de la descorrelación de la atenuación, lo que sugiere que con una configuración con diversidad en el espacio de dos antenas se puede lograr el funcionamiento de los servicios en estas situaciones. Un experimento a 42 GHz utilizando dos antenas separadas de 62 cm demostró una importante variabilidad entre ellas, así como una posible mejora por diversidad. Una medición a largo plazo de la propagación a través de árboles con hojas demostró que puede obtenerse normalmente una ganancia por diversidad de 10 dB.

La atenuación causada por árboles es importante en el caso de longitudes de onda milimétricas. La tasa de atenuación depende del tipo de árboles, las condiciones de humedad y la geometría del trayecto, pero, a título orientativo, puede tomarse una tasa de 4 a 5 dB/m (aunque la atenuación alcanza un máximo valor determinado, normalmente 20-40 dB). Se recomienda la utilización del modelo que figura en la Recomendación UIT-R P.833 para determinar la importancia de la atenuación debida a la vegetación.

2.3 Estudio del caso de mecanismos de propagación

En este punto, los resultados de simulación proceden de un estudio de caso en el que se utiliza una base de datos de terreno urbano real. Se presentan los resultados correspondientes a los mecanismos de propagación predominantes para determinar la cobertura, así como la distribución estadística de la relación entre la potencia de portadora y la potencia interferente (CIR) para un caso con interferencias.

2.3.1 Descripción de terreno

El terreno seleccionado abarca una superficie urbana de Manchester, Reino Unido, de 2 por 1 km. Dicha superficie contiene tres edificios significativamente más altos que los de alrededor. Se han evaluado las estadísticas de cobertura mediante un transmisor situado 15 m por encima de la parte superior del edificio más alto, y las estadísticas de interferencia mediante un transmisor interferente situado sobre otra de las torres altas. Se han estimado las pérdidas de trayecto en una malla uniforme situada 2 m por encima del terreno. Se han subdividido los puntos en dos conjuntos: puntos a nivel del tejado y puntos a nivel de calle.

2.3.2 Mecanismos de propagación modelados

El cálculo de propagación hace uso de:

- La Recomendación UIT-R P.526 con difracción de 1 punto en pequeña escala.
- Difracción alrededor
- Transmisión del edificio
 - Permitividad de la superficie = 5
 - Pérdidas internas del edificio = 2,1 dBm
- Reflexiones y dispersión.
 - Rebote único y doble. Trayectos sin LoS con difracción y transmisión inclusive
 - Permitividad de la superficie = 5
 - Desviación típica de la rugosidad de la superficie = 0,001 m.

2.3.3 Cobertura con varios mecanismos de propagación

El Cuadro 2 muestra en qué medida al aumentar el número de mecanismos de propagación modelados cambian las predicciones de cobertura a 2,4 GHz. Se ilustran las diferencias de pérdidas de trayecto con respecto a las predicciones de 1 punto de la Recomendación UIT-R P.526.

CUADRO 2

Resumen de las diferencias de pérdidas de trayecto entre la Recomendación UIT-R P.452 de 1 punto con varios mecanismos de propagación

	1 punto UIT-R P.452			3 puntos UIT-R P.452			Penetración en edificios + Difracción horizontal				
	% LoS clara	% 1ª zona de Fresnel	% por encima	% LoS clara	% 1ª zona de Fresnel	% por encima	% LoS clara	% 1ª zona de Fresnel	% por encima	% a través	% alrededor
Todos los puntos	45,57	9,03	45,40	45,57	9,03	45,40	45,57	9,03	24,85	6,86	13,70
				Dif. media	-3,56 dB		Dif. media	2,18 dB			
				Desv. típica	8,42 dB		Desv. típica	5,47 dB			
					4753 puntos			4753 puntos			
Sólo los puntos con diferencial				Dif. media	-11,62 dB		Dif. media	10,60 dB			
				Desv. típica	11,74 dB		Desv. típica	7,51 dB			
					1455 puntos			976 Puntos			

Reflexiones especulares + Dispersión + Penetración en edificios + Difracción horizontal							
	% LoS clara	% 1ª zona de Fresnel	% por encima	% a través	% alrededor	% reflexiones especulares	% dispersión
Todos los puntos	45,57	8,21	17,99	3,85	8,46	15,93	0,00
	Dif. media	5,05 dB					
	Desv. típica	10,45 dB					
		4753 puntos					
Sólo los puntos con diferencial	Dif. media	17,93 dB					
	Desv. típica	12,54 dB					
		1338 puntos					

La inclusión de mecanismos de propagación adicionales pueden influenciar enormemente las predicciones de pérdidas de trayecto, en promedio casi 18 dB. Si bien puede que esto no sea crítico para la predicción de cobertura, tendría un efecto significativo sobre el comportamiento de un sistema interferido, de ahí que un modelado correcto resulte tan importante.

2.3.4 Cobertura con frecuencia variable

La cobertura a 2,4 GHz, 5,8 GHz y 28,0 GHz se calculó con todos los mecanismos de propagación modelados. La Fig. 8 muestra la cobertura calculada para las tres frecuencias. El principal punto de interés es observar que las pérdidas para los trayectos difractados son mucho mayores a 28 GHz. Esta frecuencia, no obstante, sufre pérdidas de trayecto mucho menores para numerosas

ubicaciones. Ello se debe al mecanismo de dispersión, puesto que la rugosidad de la superficie de los edificios introduce mucha más dispersión a frecuencias altas.

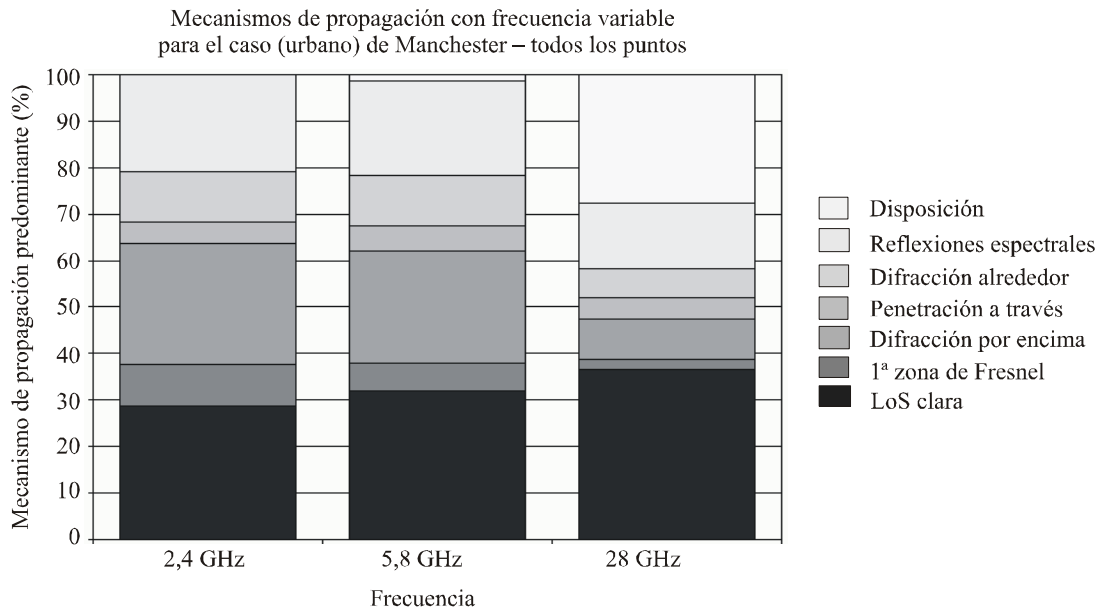
En la Fig. 8a) se ilustra la distribución de porcentajes de los mecanismos de propagación dominantes a cada frecuencia. Las reflexiones espectrales son especialmente relevantes a bajas frecuencias. La dispersión sólo es significativa a 28 GHz. En las Figs. 8b) y 8c) se desglosan los resultados de la Fig. 8(a) entre ubicaciones a nivel de tejado y ubicaciones a nivel de calle, respectivamente.

Resulta útil analizar más en detalle la importancia del mecanismo de propagación en función de las pérdidas de trayecto en exceso, dado que, aunque un mecanismo en concreto podría resultar predominante, al menos a efectos de cobertura, si las pérdidas de trayecto en exceso son grandes podrían no ser relevantes. En la Fig. 9 se muestra el mecanismo de propagación predominante para cada punto en el tejado y para cada frecuencia. Esto muestra la influencia de la dispersión a altas frecuencias de manera más clara.

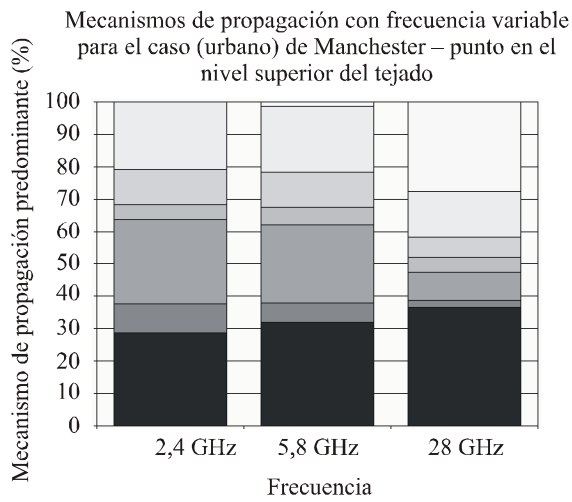
Los principales puntos a observar en las representaciones son que las reflexiones espectrales y la difracción de alrededor pueden proporcionar cobertura suplementaria importante (pérdidas de trayecto en exceso < 10 dB) a todas las frecuencias. Otros mecanismos (transmisión por edificios, difracción, dispersión) son mucho menos significativas de cara al cálculo de la cobertura. Sin embargo, al considerar la interferencia, incluso los trayectos atenuados significativamente pasan a ser importantes especialmente cuando deben utilizarse esquemas de modulación de orden superior.

FIGURA 8

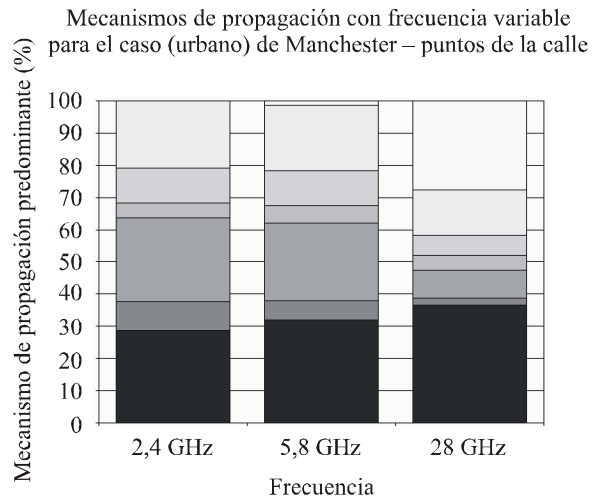
Mecanismo de propagación predominantes con respecto a la cobertura



a) Todos los puntos



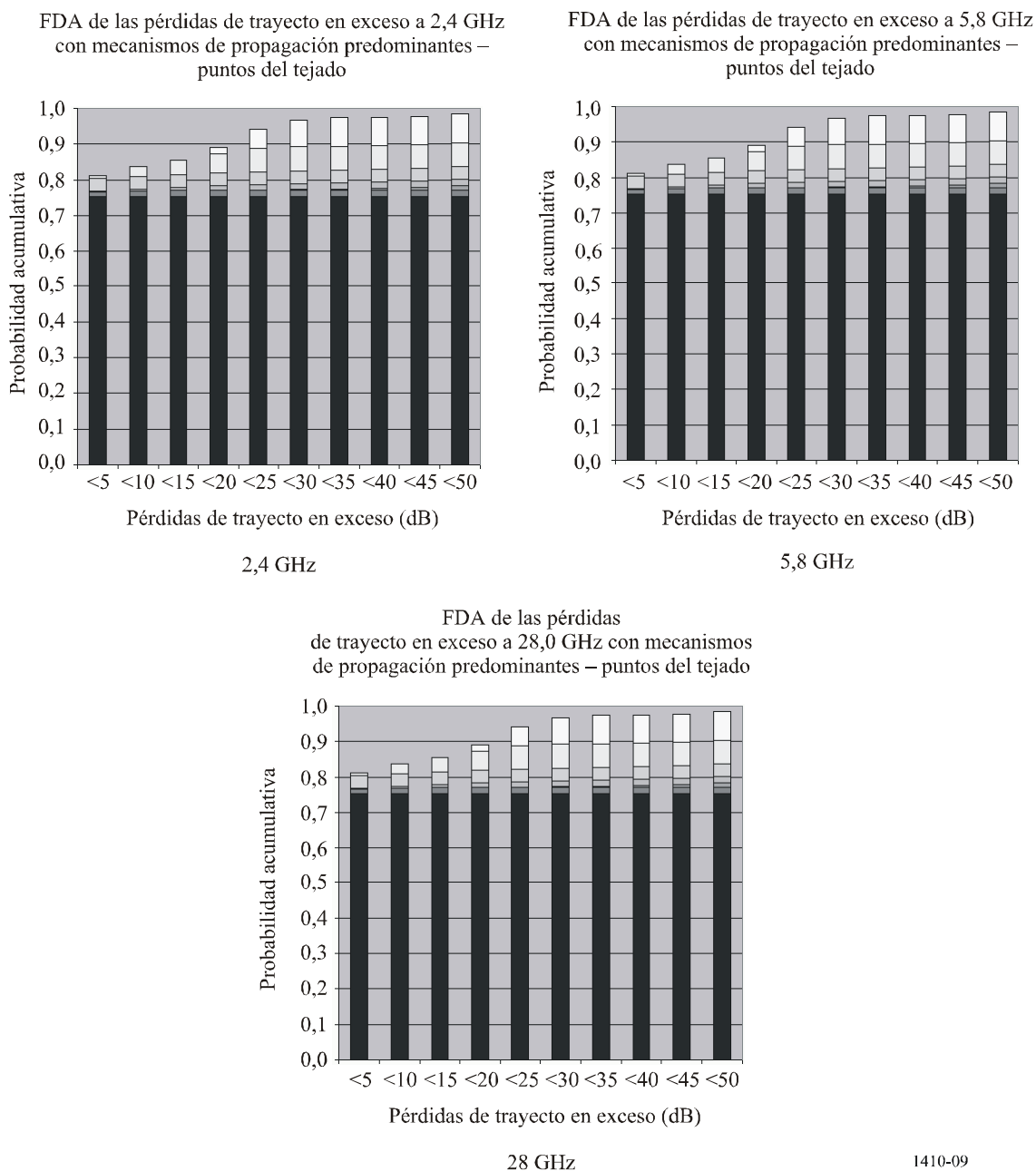
b) Sólo los puntos del tejado



c) Sólo puntos a nivel de calle

FIGURA 9

Pérdidas de trayecto en exceso frente a los mecanismos de propagación predominantes en los puntos de la parte superior del tejado



1410-09

2.3.5 Resumen de los resultados del estudio de caso

El estudio de caso reveló varios resultados interesantes en relación al efecto de los diferentes mecanismos de propagación en los cálculos de la cobertura y la interferencia.

- A bajas frecuencias, la reflexión especular y la difracción alrededor de los objetos puede tener un efecto considerable sobre la cobertura.
- La dispersión sólo resultó relevante a 28 GHz. Las pérdidas de trayecto en exceso (generalmente > 25 dB) atribuidas a dicho mecanismo hace que sea menos importante a la hora de considerar la cobertura, aunque debe tenerse en cuenta en la evaluación de las interferencias.

- La inclusión de reflexiones especulares en la modelización de interferencias tiene una influencia importante en el nivel de interferencia prevista, especialmente cuando se utilizan antenas directivas. Para una red fija con antenas directivas en un caso urbano, deben modelarse las reflexiones para lograr una predicción de interferencias precisa.

Es importante entender las limitaciones del caso. En primer lugar, los resultados son aplicables a una zona urbana con ubicaciones del transmisor altas que poseen grandes ángulos de elevación con respecto a los cortos alcances analizados. Ubicaciones del transmisor más bajas podrían modificar las conclusiones extraídas. Cabe esperar que en los casos rural y suburbano se produzcan resultados significativamente diferentes en relación al desglose de los mecanismos de propagación predominantes. La ausencia de grandes objetivos reflectantes reduciría la influencia de la reflexión especular, aunque la dispersión todavía puede ser importante. Para los casos suburbanos y rurales, es también fundamental incluir y modelar correctamente los datos sobre la vegetación.

2.4 Consideraciones de carácter general

Se han observado algunas tendencias generales considerando varias bases de datos de Europa del Norte. El trazado de rayos se ha utilizado para calcular la cobertura (en base al nivel de bloqueo producido por los edificios y la vegetación entre la estación de base y las instalaciones del usuario) en función de la altura de las antenas transmisora y receptora, la ventaja de contar con varios servidores y la magnitud del bloqueo por vegetación. Las observaciones más importantes son como sigue:

- La cobertura puede depender en gran medida del lugar, especialmente si se dan determinadas características topográficas o se produce un bloqueo por edificios excepcional en la zona del transmisor. Sin embargo, investigaciones efectuadas en diferentes lugares urbanos/suburbanos dieron unas cifras de cobertura del 40-60% para una célula de 2 km a partir de un transmisor con un mástil de 30 m.
- La cobertura aumenta del 1 al 2% por cada metro de altura del mástil de la estación de base.
- La cobertura aumenta del 3 al 4% por cada metro de altura del mástil de las instalaciones del usuario.
- Una arquitectura de células que permita a los receptores elegir entre varias estaciones de base aumenta significativamente la cobertura. Por ejemplo, en el caso de una antena transmisora de 30 m de alto, la cobertura en una célula de 2 km aumenta del 44% con una sola estación de base al 80% con dos estaciones y al 90% con cuatro estaciones, aun cuando las estaciones de base no se hayan elegido especialmente por tener una buena visibilidad.

3 Efectos de las precipitaciones en el nivel de disponibilidad del servicio

Una vez que se ha visto que un determinado usuario tiene una línea de LoS hasta la estación de base con un margen adecuado de sistema de espacio abierto, es necesario calcular el porcentaje de tiempo en que el servicio podrá prestarse teniendo en cuenta los efectos de las precipitaciones.

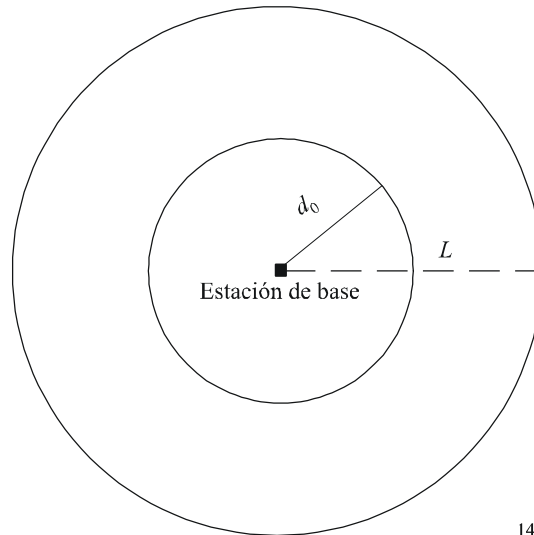
Para cualquier enlace en la zona de servicio de las estaciones de base, la disponibilidad en condiciones de precipitación puede calcularse utilizando los métodos de la Recomendación UIT-R P.530.

3.1 Cobertura de zona simultánea

Dado que la lluvia no es uniforme en las dos dimensiones horizontales, el modelo unidimensional de la Recomendación UIT-R P.530 para lluvia no uniforme en el caso de enlaces punto a punto no puede aplicarse a situaciones punto a zona. Esta disimilitud bidimensional puede tenerse en cuenta aplicando una distribución media de la intensidad de lluvia en la célula que se investiga. Con una

célula de alimentación central y radio L , la ilustración de la Fig. 10 indica la zona equivalente, determinada por el radio d_0 , cubierta durante el porcentaje de tiempo elegido.

FIGURA 10
 Diagrama de la célula de alimentación central en el que se muestra el radio de la zona de cobertura equivalente en condiciones de lluvia



1410-10

Se ha elaborado un procedimiento para predecir la cobertura de zona basado en mediciones con radar de la intensidad de lluvia del Reino Unido en un periodo de dos años.

Para una célula de alimentación central con radio L (km) y un margen de desvanecimiento del sistema F (dB) en el borde:

Paso 1: Obtener la intensidad de lluvia media de la zona, $R_a(p)$, superado durante el $p\%$ del tiempo. donde R es la intensidad de lluvia en un punto para la zona.

$$R_a = (0,317L^{0,06} + 1)R^{1-0,15L^{0,2}} \quad (27)$$

En el Cuadro 3 se da un ejemplo de ese parámetro para datos obtenidos mediante radar en el Reino Unido. Con respecto a la intensidad de lluvia en un punto, se puede observar que la intensidad de lluvia media de la zona se reduce muy poco con un nivel de superación del 0,1%, en torno a un tercio con un nivel del 0,01% y en torno a la mitad con un nivel del 0,001% en una zona circular de 2,5 km de radio.

Paso 2: Encontrar la distancia de corte, d_0 , durante el $p\%$ de un año medio resolviendo la ecuación (27) para d numéricamente.

$$k R_a^\alpha(p) d \left(1,5 + (1,1 (2d^{-0,04} - 2,25)) \log(R_a(p)) \right) + 20 \log(d / L) = F \quad (28)$$

siendo k y α parámetros que determinan la atenuación específica debida a la lluvia a la que se refiere la Recomendación UIT-R P.838. La fórmula $(1,5 + (1,1 (2d^{-0,04} - 2,25)) \log(R_a(p)))$ representa el factor de reducción de trayecto aplicable para los cálculos de la zona.

Paso 3: Para la distancia de corte, $d_0 \propto (L, p, F)$, la cobertura de zona de esta célula es:

$$C(L, p, F) = 100 \left(\frac{d_0}{L} \right)^2 \quad \% \quad (29)$$

En la Fig. 11 se muestran los resultados del procedimiento proporcionados por las ecuaciones (27), (28) y (29) para dos células con alimentación central y radio de 2,5 y 5 km y para dos sistemas utilizando polarización vertical a 42 GHz, con margen de atenuación debida a la lluvia de 10 y 15 dB en el borde de la célula. Aquí se supone también que la ganancia de la antena transmisora es igual para todos los usuarios. En los cálculos se ha tenido en cuenta la pérdida en espacio libre (ecuación (28)).

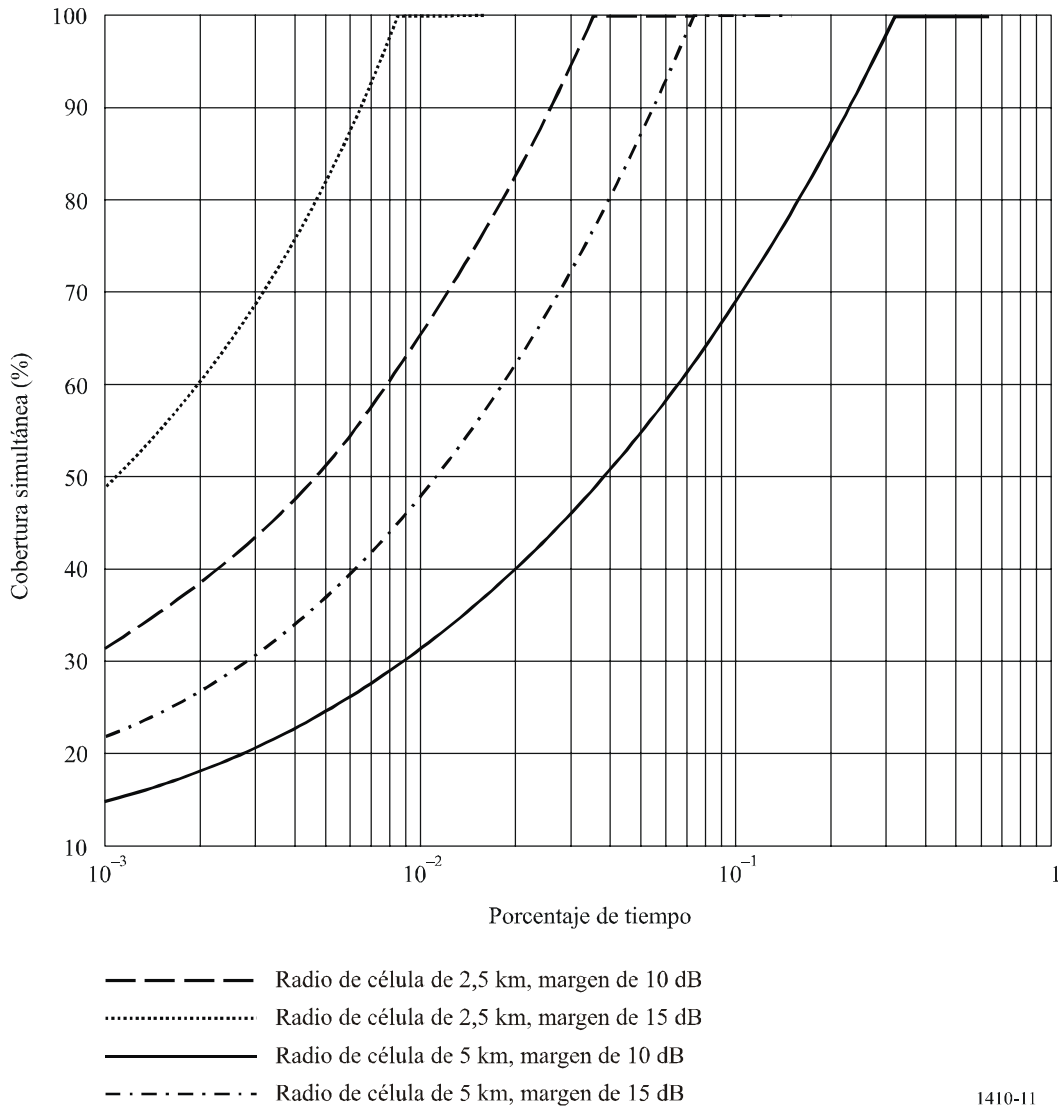
CUADRO 3

Intensidad de lluvia media en un punto y en una zona, obtenidas a partir de datos de radar correspondientes a dos años en el Reino Unido

Porcentaje de tiempo	Intensidad de lluvia en un punto, R (mm/h)	Intensidad de lluvia media, R (mm/h)	
		Radio = 2,5 km	Radio = 5 km
0,001	65,6	36,0	33,0
0,003	46,2	29,0	23,4
0,01	29,9	19,4	17,1
0,03	18,1	16,3	12,6
0,1	9,8	9,5	8,5
0,3	5,0	4,9	4,8
1	2,0	2,1	2,1

FIGURA 11

Aplicación del procedimiento en la ubicación, -1,5° Oeste, 51° Norte



1410-11

3.2 Mejora por diversidad de rutas

La precipitación varía considerablemente en el tiempo y en el espacio tanto vertical como horizontalmente. En la presente simulación se ha reflejado esta variabilidad para un único enlace entre dos terminales, por ejemplo, utilizando una longitud de trayecto adecuada. Supóngase que un usuario puede conectarse a dos o más estaciones de base en cualquier momento. Lo que sigue describe hasta qué punto puede ampliarse la disponibilidad del servicio si se instala un sistema semejante.

Se parte de una red en estrella de nodo común formada por dos transmisores y un receptor con longitudes de trayecto iguales, y cuya separación angular va de 0° a 360° .

Dado que la lluvia no es uniforme horizontalmente, las estadísticas de atenuación para un único trayecto y para los dos trayectos de diversidad son diferentes. En la Fig. 12 se muestran estadísticas típicas de atenuación en un trayecto no protegido y en los trayectos de combinación de la diversidad. La mejora debida a la separación angular, que puede expresarse como la mejora por diversidad, $I(A)$, o ganancia de diversidad, $G(A)$, se define de la siguiente manera:

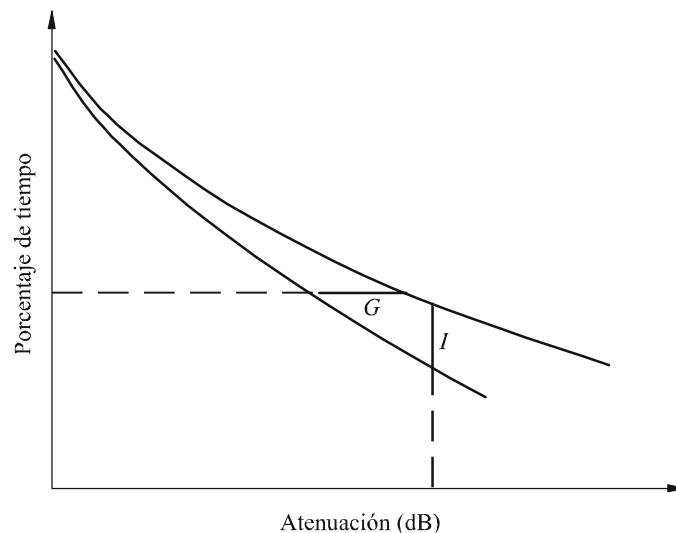
$$I(A) = \frac{P(A)}{P_d(A)} \quad (30)$$

$$G(A) = A(t) - A_d(t) \quad (31)$$

siendo $P_d(A)$ el porcentaje de tiempo en el trayecto de combinación de la diversidad con una profundidad de desvanecimiento superior a A , y $P(A)$ el porcentaje de tiempo en el trayecto no protegido. De igual forma, $A_d(t)$ es la profundidad del desvanecimiento en el trayecto de combinación de la diversidad que se produce durante el porcentaje de tiempo t , y $A(t)$, en el trayecto no protegido.

FIGURA 12

Ejemplo de estadísticas de atenuación con diversidad de ángulos de trayecto



1410-12

La ganancia por diversidad, G , se calcula de la siguiente manera:

Paso 1: Se establece el ángulo θ entre dos trayectos de longitudes $d_{m\acute{a}x}$ y $d_{m\acute{i}n}$.

Paso 2: Se calcula G_{sym} :

$$G_{sym} = a_g d_{m\acute{a}x}^{b_g}$$

como función de $d_{m\acute{a}x}$ y utilizando los coeficientes a_g y b_g del Cuadro 4 para los distintos porcentajes de disponibilidad del enlace.

CUADRO 4

Valores de los coeficientes para distintas disponibilidades del enlace

Disponibilidad (%)	a_g	b_g
99	0,123	1,366
99,5	0,218	1,308
99,7	0,342	1,259
99,9	0,648	1,173
99,95	0,810	1,165
99,97	1,132	1,169
99,99	2,041	1,077

Paso 3: Se determina el factor a de simetría del trayecto a partir de:

$$a = c \left(\frac{d_{m\acute{a}x}}{d_{m\acute{i}n}} \right)^{-d} \tag{32}$$

cuyos coeficientes c y d se muestran en el Cuadro 5.

CUADRO 5

Valores de los coeficientes c y d para distintas disponibilidades del enlace

Disponibilidad (%)	c	d
99	0,907	2,852
99,5	0,946	2,976
99,7	0,969	2,761
99,9	0,971	2,821
99,95	0,930	2,347
99,97	0,905	2,316
99,99	1,000	2,270

Para trayectos de igual longitud, $a = 1$.

Paso 4: La ganancia por diversidad, G , a la disponibilidad deseada es:

$$G = G_{sym} \text{asen} \left(\frac{\theta}{2} \right)^x \quad \text{dB}$$

donde x se obtiene mediante la ecuación:

$$x = 0,87 \ln \left(\frac{d_{m\acute{a}x}}{d_{m\acute{i}n}} \right) + 0,55 \quad \text{para } 1 \leq (d_{m\acute{a}x}/d_{m\acute{i}n}) \leq 2$$

La mejora por diversidad, I , se calcula aplicando los siguientes pasos:

Paso 1: Se establece el ángulo θ entre dos trayectos $d_{m\acute{a}x}$ y $d_{m\acute{i}n}$.

Paso 2: Se calcula I_{sym} mediante:

$$I_{sym} = 10^{(a_i L^{b_i})} - 1$$

a_i y b_i pueden obtenerse del Cuadro 6 donde aparece la atenuación rebasada para distintos porcentajes de tiempo.

CUADRO 6

Valores de los coeficientes para distintas profundidades de exceso de desvanecimiento en función del porcentaje de tiempo A

Tiempo (%)	a_i	b_i
1	0,082	0,491
0,5	0,114	0,431
0,3	0,106	0,535
0,1	0,155	0,559
0,05	0,196	0,566
0,03	0,324	0,406

Paso 3: Se determina el factor a de asimetría del trayecto a partir de:

$$a = c \left(\frac{d_{m\acute{a}x}}{d_{m\acute{i}n}} \right)^{-d} \quad (33)$$

los coeficientes c y d son los que se enumeran en el Cuadro 7.

CUADRO 7

Valores de los coeficientes c y d para distintas profundidades de exceso de desvanecimiento en un porcentaje de tiempo especificado

Tiempo (%)	c	d
1	0,851	2,355
0,5	0,961	2,493
0,3	0,882	2,288
0,1	0,768	2,631
0,05	0,762	2,198
0,03	0,858	2,427

Para trayectos iguales, $a = 1$.

Paso 4: La mejora por diversidad, I , con la atenuación deseada es:

$$I = 1 + I_{sym} \operatorname{asen}\left(\frac{\theta}{2}\right)^x$$

donde x se obtiene de la siguiente ecuación:

$$x = 0,61 \ln\left(\frac{d_{m\acute{a}x}}{d_{m\acute{i}n}}\right) + 0,84 \text{ para } 1 \leq (d_{m\acute{a}x}/d_{m\acute{i}n}) \leq 2$$

Cabe señalar que estos métodos se han elaborado a partir de las intensidades de lluvia observadas por radar en el Reino Unido.

4 Distorsión en el canal de propagación

En este punto se analizan los efectos instantáneos de la dinámica de la vegetación y del multitrayecto causado por los edificios y por el terreno en el canal de propagación. Dada la actual escasez de datos, se proporcionan los resultados de las mediciones de que se dispone para que sirvan de orientación. En la Recomendación UIT-R P.833 aparece información sobre la variabilidad de la señal, la desviación típica y la propagación a través de vegetación en movimiento.

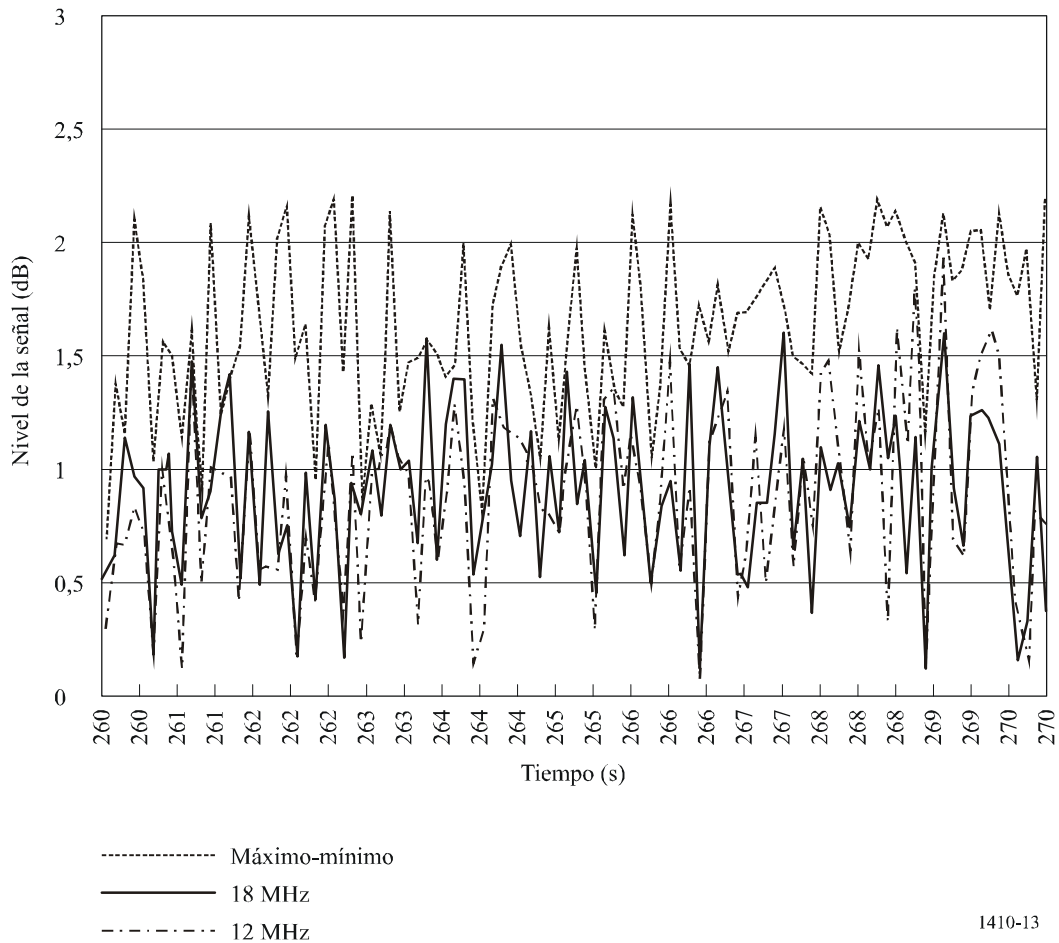
4.1 Atenuación causada por la vegetación a determinadas frecuencias

Se han realizado mediciones con un banco de filtros en una transmisión de anchura de banda de 34 MHz para investigar la posibilidad de que se produzcan desvanecimientos en el canal en función de la frecuencia. El banco de filtros consistió en ocho canales de una anchura de banda de 1,6 MHz (−3 dB) separados por 3 MHz situados en medio del canal.

La medición se realizó detrás de un abedul a una distancia de 15 m. El intervalo de muestreo fue de 100 ms. Como durante el periodo de medición no hubo viento, se simuló atando cuerdas al árbol. En la Fig. 13 se muestra una comparación del nivel de la señal de los canales en condiciones muy ventosas. El pequeño nivel de variación que se observa entre los canales sugiere que el desvanecimiento en función de la frecuencia no es un fenómeno importante. La variación en el tiempo del nivel de la señal podría deberse por consiguiente a una variación de la obstrucción, o de la densidad de ramas y hojas entre el receptor y el transmisor, o, deberse al multitrayecto cuando las diferencias en el tiempo de propagación son muy pequeñas.

FIGURA 13

Comparación del nivel de la señal de los canales en condiciones muy ventosas



Para seguir corroborando las observaciones, se llevó a cabo un experimento utilizando un combinador de máxima potencia (MPC, *maximum power combiner*) y dos antenas individuales con una separación de 72 cm. Un Grupo de Expertos de imágenes en movimiento (MPEG-2) realizó una transmisión de prueba de televisión a 42 GHz, utilizando el formato radiodifusión de vídeo digital por satélite (DVB-S, *satellite digital video broadcasting*), de modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (MPD-4), velocidad 1/2 (FEC). Las señales de cada antena, así como las señales combinadas a través del combinador de máxima potencia se introdujeron en tres adaptadores multimedios DVB-S y monitores de vídeo. La geometría se configuró de manera que ambas antenas recibían señales a través de ramas en movimiento. Los dos sistemas DVB-S con una sola antena sufrieron una pérdida periódica de paquetes. La tasa de pérdida de paquetes era excesiva para que el decodificador pudiese corregirla, lo que causó una frecuente pérdida de vídeo. Inversamente, la señal con combinación de máxima potencia sufrió una pérdida de paquetes mucho menor, por lo que el decodificador MPEG-2 fue capaz de compensar esta pérdida y el vídeo permaneció estable.

4.2 Multitrayecto producido por reflexión

4.2.1 Resultados del trazado de rayos

Las simulaciones de trazado de rayos han mostrado que el problema del multitrayecto parece ser leve en las condiciones en las que el sistema deberá funcionar. La pequeñísima anchura del haz de la antena receptora provoca una fuerte atenuación de la mayoría de las señales de multitrayecto. Únicamente los rayos rasantes muy superficiales procedentes de los tejados cercanos y del suelo

llegan al receptor con una magnitud apreciable. Consecuencia de ello es que los valores de dispersión de los tiempos de propagación que se dan en las simulaciones son muy bajos.

Los rayos difractados no se han tenido en cuenta en las simulaciones de trazado de rayos, pero en trabajos anteriores se vio que había muy pocas posiciones desde las que se podía hacer uso de rayos difractados, y en consecuencia, hay pocos lugares en los que los rayos difractados puedan ser una fuente importante de interferencia.

Los ejemplos de cálculos por trazado de rayos de la dispersión de los tiempos de propagación en los emplazamientos del receptor, realizados a partir de una amplia base de datos (de Oxford, en el Reino Unido) muestran valores extremadamente pequeños, debido a los ínfimos niveles de multitrayecto. El valor eficaz de la dispersión de los tiempos de propagación estaba en torno a 0,01 ns, lo que corresponde aproximadamente a una anchura de banda de coherencia de 15 GHz. Ello no debería causar problemas a un sistema de acceso radioeléctrico de banda ancha. Es improbable que el verdadero valor eficaz de la dispersión de los tiempos de propagación tenga un valor tan bajo como éste en la realidad, debido a los rayos difractados mencionados más arriba, pero tomar una anchura de banda de coherencia de hasta 5 GHz puede todavía considerarse realista. La desviación típica del valor eficaz de la dispersión de los tiempos de propagación está en torno a 0,01 ns.

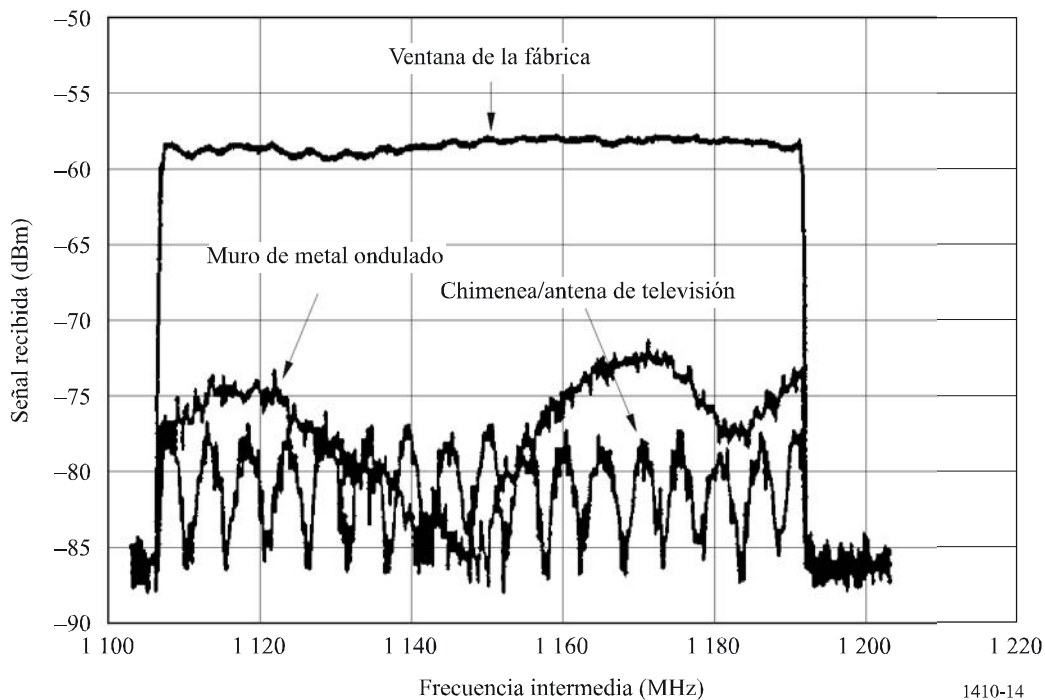
4.2.2 Resultados de las mediciones

La reflexión causada por edificios puede considerarse tanto una posibilidad de rellenar una zona de sombra como un multitrayecto perjudicial. Algunas observaciones utilizando un barrido de frecuencias de 80 MHz mostraron que puede obtenerse un aumento del 9% del número de lugares que reciben una señal adecuada incluyendo señales reflejadas. Sin embargo, debe señalarse que existen varios problemas cuando se utilizan señales reflejadas para proporcionar un servicio. En primer lugar, la señal debe ser estable, lo que significa que la incidencia de la señal en el objeto de reflexión debe ser un trayecto con LoS. Si una parte del trayecto pasa a través de vegetación o de un trayecto y hay probabilidades de que se bloquee por movimiento de tráfico, la señal resultante será variable en el tiempo. En segundo lugar, el propio objeto reflectante debe ser permanente y estable.

La extensión y la desigualdad de la superficie del edificio reflectante influyen en gran medida en la respuesta en función de la frecuencia del canal. En la Fig. 14 se muestra la respuesta del canal medida ante tres señales reflejadas diferentes: una procedente de la ventana de una fábrica, la otra de la chimenea de una casa en una hilera (con una antena de televisión Yagi) y otra del muro de metal ondulado de un gran edificio comercial. Se señala que en el caso de este último edificio, el muro ondulado producía una reflexión extendida en ángulo más que una simple reflexión especular. La distancia de los lugares hasta el transmisor era de 1,34 km, 1,57 km y 616 m respectivamente.

FIGURA 14

Respuesta en función de la frecuencia en casos de reflexión medida en tres ubicaciones diferentes



Puede verse que la ventana de la fábrica provocaba una respuesta en función de la frecuencia razonablemente uniforme, ya que se comporta como un espejo uniforme con un solo elemento reflectante. Sin embargo, el muro de metal y la chimenea muestran una ondulación clara, correspondiente a las diferencias en la longitud del trayecto (en el supuesto de un modelo de dos rayos) de 6 m y 60 m respectivamente. En el caso de la reflexión por la chimenea, esta gran longitud del trayecto puede deberse a la combinación de la reflexión en otro objeto situado a unos 30 m o detrás de la chimenea. En el caso del muro ondulado, la diferencia de 6 m de la longitud del trayecto se produce a partir de diferentes partes del propio muro, ya que las señales las puede reflejar todo el edificio, no sólo la pequeña zona reflectante.

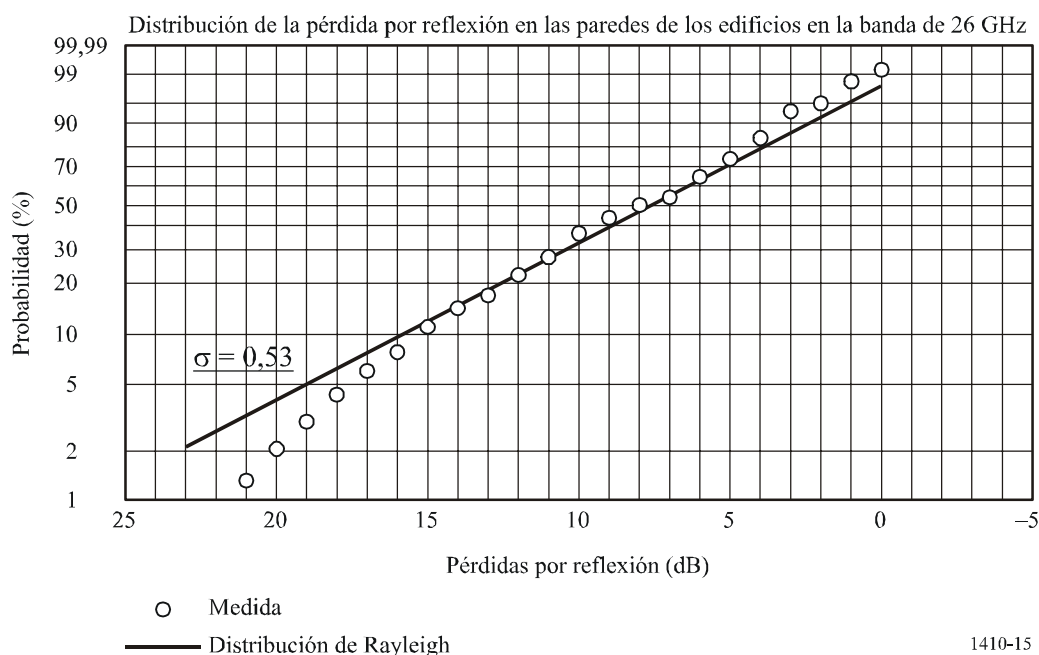
Las mediciones de espectro de banda ancha se llevaron a cabo en una zona suburbana tanto en la banda de 5 GHz como en la de 25 GHz. La banda de frecuencias ocupada en el espectro de transmisión es de 26 MHz, y la gama de 10 MHz de la parte central del espectro es casi plana. En cada espectro, la máxima dispersión de amplitud dentro de banda puede calcularse a partir de los niveles máximo y mínimo en la gama de 10 MHz de la parte central del espectro. Suponiendo un modelo de interferencia de dos ondas, la relación (D/U) de la onda en D como una onda directa y la onda en U como una onda reflejada, es un factor importante para evaluar la dispersión de amplitud dentro de banda. En un terminal, dicha dispersión se ve afectada por el ensombrecimiento provocado por obstáculos tales como las casas y los árboles de los alrededores. Suponiendo que el nivel de la onda en U es constante, puede afirmarse que el valor D/U del trayecto de propagación está entre 20 y 30 dB. Esto indica que si se emplea una antena de terminal con una ganancia de antena de aproximadamente 15 dBi y se obtiene un ensombrecimiento superior a 20 dB, la variación de amplitud dentro de banda presenta una dispersión perjudicial. La ganancia de la antena directiva influye en el nivel de supresión de las ondas interferentes. La relación D/U puede suponerse de 50 dB para una antena con ganancia de 32 dBi y 30 dB para una antena con ganancia de 12 dBi. La diferencia de ganancias de las dos antenas corresponde a la diferencia entre los valores D/U anteriores.

Medidas de barrido de frecuencias utilizando una señal en 26 GHz con polarización vertical y ángulos de reflexión entre $87,5^\circ$ y 89° (es decir, casi normales a la superficie de la pared) mostraron

una atenuación media de 7,5 dB. El transmisor y el receptor estaban colocados. La distancia a las paredes oscilaba entre 37 m y 402 m. Se utilizaron cuatro edificios en los que las paredes eran de cristal, azulejos y metal, con irregularidades que oscilaban entre 3 cm y 75 cm. Nótese que el vector de campo eléctrico era paralelo a las paredes. En la Fig. 15 se muestra la distribución acumulativa de las pérdidas por reflexión. La desviación típica de la discrepancia de las mediciones relativas a las distribuciones de Rayleigh resultó ser, $\sigma = 0,53$ dB.

FIGURA 15

**Distribución acumulativa de la pérdida por reflexión
en la pared de los edificios medida a 26 GHz**



5 Interferencia

Los sistemas radioeléctricos celulares están diseñados de forma que exista un equilibrio entre el patrón de reutilización de frecuencias y la relación portadora/interferencia, C/I . Sería necesario una relación C/I mínima para que un determinado sistema funcione de forma satisfactoria, es decir, de acuerdo con un nivel de rendimiento especificado.

Dada la C/I mínima requerida, resulta fácil elaborar un patrón de reutilización de frecuencias regular que satisfaga los requisitos. Sin embargo, deben tenerse en cuenta las características del terreno y además se ha de elegir con cuidado un emplazamiento verdaderamente adecuado de la estación de base para lograr la calidad de funcionamiento deseada del sistema de acceso radioeléctrico.

En la mayoría de los casos sólo resultarán afectados algunos usuarios debido a la estrechez del haz de sus antenas de terminal. La anchura de los haces es del orden de 2° a 3° . En el caso de los usuarios que puedan resultar afectados, cabe aplicar los modelos de las Recomendaciones UIT-R P.452 y UIT-R P.530 para calcular el porcentaje de tiempo en el que las señales perjudiciales mejoradas sin LoS y con LoS, respectivamente, se produce a partir de la estación de base interferente. Sin embargo, no se dispone de datos por encima de 37 GHz para sustentar los valores predichos.

Se realizó una estimación del problema de la interferencia utilizando los datos de 111 emplazamientos analizados en una campaña de medición de cobertura de zona del Reino Unido. Se consideró un segundo transmisor como una fuente potencial de interferencia. En todo el conjunto de datos, sólo una posición mostraba una señal procedente del transmisor no deseado por encima del umbral de ruido dentro de la anchura del haz de la antena que apuntaba al transmisor deseado, e incluso en ese caso, la relación entre la señal deseada y la no deseada era de 15 dB. Ello parecería confirmar el hecho de que la interferencia intercelular probablemente tenga poca importancia debido a la estrechez de la anchura del haz de las antenas de recepción.
