

RECOMENDACIÓN UIT-R P.679-3

**Datos de propagación necesarios para el diseño
de sistemas de radiodifusión por satélite**

(Cuestión UIT-R 206/3)

(1990-1992-1999-2001)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

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

recomienda

1 que se adopten los datos de propagación presentados en el Anexo 1 al proceder a la planificación de sistemas de radiodifusión por satélite, además de los métodos indicados en la Recomendación UIT-R P.618.

ANEXO 1

1 Introducción

La radiodifusión por satélite plantea consideraciones de propagación que no son totalmente comparables con las que se dan en el servicio fijo por satélite. Se necesitan datos sobre la atenuación en la dirección espacio-Tierra en forma de valores medios estadísticos y de mapas de contornos de atenuación y despolarización para zonas extensas. Pueden surgir problemas específicos en el límite de la zona de servicio entre sistemas de radiodifusión por satélite y servicios terrenales u otros servicios espaciales. En la Recomendación UIT-R P.618 se presentan métodos generales para la predicción de los efectos de la propagación en el trayecto Tierra-espacio. El presente Anexo incluye la información adicional específica para la planificación de sistemas de radiodifusión por satélite. Debe señalarse que los enlaces de conexión se consideran parte integrante de los servicios fijos por satélite y no de los servicios de radiodifusión.

En el caso de los trayectos espacio-Tierra de sistemas de radiodifusión, hay que contemplar varios efectos de propagación.

Entre tales efectos, cabe citar los siguientes:

- los efectos de la propagación troposférica, incluida la absorción por gases y la atenuación y despolarización debidas a la lluvia y a otros hidrometeoros;
- los efectos de la propagación ionosférica, como el centelleo y la rotación de Faraday (véase la Recomendación UIT-R P.531);
- los efectos ambientales locales, incluida la atenuación debida a edificios y a la vegetación.

En este Anexo se examinan esos efectos y se hace referencia a otras Recomendaciones que contienen información adicional. Se requieren más datos para definir las degradaciones causadas por la propagación en los sistemas de radiodifusión por satélite.

2 Efectos troposféricos

Las degradaciones de la señal causadas por la troposfera son despreciables en las frecuencias inferiores a 1 GHz aproximadamente y en los ángulos de elevación del trayecto superiores a 10°.

Cuando la elevación es menor o la frecuencia mayor, esa clase de degradación aumenta, y las fluctuaciones de la amplitud de la señal así como del ángulo de llegada pueden llegar a ser considerables (véase la Recomendación UIT-R P.618). De esos efectos, el último reviste particular importancia en el caso de las zonas de servicio de elevada latitud. El aumento de la temperatura de ruido del cielo causado por las precipitaciones (véase la Recomendación UIT-R P.618) reducirá aún más la relación *C/N* de la señal recibida. Además, la acumulación de hielo y nieve en la superficie de los reflectores de las antenas y en sus alimentadores puede degradar sustancialmente la orientación, la ganancia y las características de polarización cruzada de las antenas durante una parte considerable del año.

2.1 Atenuación de la señal en la troposfera

Las pérdidas de la señal en la troposfera se deben a la absorción por gases y a la atenuación debida a la lluvia y a otros hidrometeoros. Además, las variaciones a pequeña escala del índice de refracción de la atmósfera causan centelleos de la señal que contribuyen tanto al desvanecimiento como a la intensificación de la señal.

2.1.1 Atenuación debida a los gases atmosféricos

En la Recomendación UIT-R P.618 figura el método recomendado para predecir la atenuación debida a los gases en los trayectos Tierra-satélite. En la mayoría de las frecuencias, la atenuación producida por los gases es poco importante en comparación con la atenuación debida a la lluvia. Sin embargo, en la banda de 22 GHz atribuida al servicio de radiodifusión por satélite en determinadas regiones, la absorción por el vapor de agua puede ser considerable. Por ejemplo, en una ubicación donde la atenuación del trayecto en 22,75 GHz es superior a 9,5 dB durante el 1% del mes más desfavorable, aproximadamente 3 dB del total corresponden a la atenuación por gases.

2.1.2 Atenuación producida por las precipitaciones y nubes

En la Recomendación UIT-R P.618 se expone un procedimiento para la predicción de la atenuación producida por las precipitaciones y nubes, así como un método sencillo para determinar la variación con la frecuencia de las estadísticas de atenuación medidas. La atenuación debida a las nubes no será grave en las frecuencias inferiores a 30 GHz, pero, en todo caso, se la tiene en cuenta en el

método de predicción de la atenuación debida a la lluvia. Si se conoce el contenido de agua líquida se puede estimar la atenuación causada por la niebla y las nubes empleando el método que figura en la Recomendación UIT-R P.840.

2.1.3 Atenuación debida a la lluvia durante el mes más desfavorable

En la radiodifusión por satélite, la atenuación debida a la lluvia que se rebasa durante el 1% del mes más desfavorable es generalmente la degradación más importante. En la Recomendación UIT-R P.618 se describe un método que establece la relación entre los porcentajes de tiempo del mes más desfavorable y los porcentajes de tiempo anuales para la atenuación debida a la lluvia. El mes más desfavorable y su fundamento se tratan con detalle en la Recomendación UIT-R P.581.

Los datos disponibles referentes a la atenuación debida a la lluvia en el mes más desfavorable se encuentran compilados en el Cuadro II-2 de los bancos de datos de la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones (véase la Recomendación UIT-R P.311).

2.1.4 Variación diurna del desvanecimiento

La dependencia del desvanecimiento de la señal respecto de la hora del día es un factor que influye en la prestación de los servicios de radiodifusión por satélite. Los datos sobre desvanecimiento obtenidos en diversas regiones del mundo muestran una tendencia común a que los mayores desvanecimientos se produzcan por la tarde y a primeras horas de la noche. En climas caracterizados por tormentas, la mayor probabilidad de que se produzcan desvanecimientos profundos está relacionada con la hora de máxima actividad de tormentas locales. Las zonas tropicales, en particular, pueden presentar una fuerte asimetría diurna.

Por otra parte, el desvanecimiento de bajo nivel se distribuye de manera más uniforme, tanto entre las estaciones del año como de un día a otro.

2.1.5 Desvanecimiento por centelleo

Las irregularidades a pequeña escala del índice de refracción troposférico pueden producir fluctuaciones rápidas de la amplitud de la señal. Por lo general, los centelleos de la señal no influyen en gran medida en la calidad de funcionamiento del sistema en las frecuencias inferiores a unos 10 GHz y con ángulos de elevación del trayecto superiores a 10°, pero puede ser importante en ángulos de elevación bajos o en frecuencias más elevadas, en particular en los enlaces con pequeño margen. La estimación del desvanecimiento por centelleo se obtiene mediante el método descrito en la Recomendación UIT-R P.618.

2.2 Despolarización

Los hidrometeoros, principalmente las concentraciones de gotas de lluvia y cristales de hielo, pueden causar una despolarización estadísticamente importante de las señales en las frecuencias por encima de 2 GHz aproximadamente. En la Recomendación UIT-R P.618 figura el procedimiento recomendado para la predicción de estos efectos.

3 Efectos ionosféricos

En frecuencias inferiores a 3 GHz aproximadamente, los efectos ionosféricos son importantes en algunos trayectos y algunas ubicaciones. En el Cuadro 1 se resumen los valores máximos estimados de los efectos ionosféricos (según la Recomendación UIT-R P.531) en diversas frecuencias, para uso general en trabajos técnicos. Normalmente, las degradaciones más importantes son el centelleo de la señal y (sólo en el caso de las ondas con polarización lineal) la rotación de Faraday.

CUADRO 1

**Efectos estimados* de la ionosfera, para un trayecto unidireccional
con un ángulo de elevación de unos 30°**
(según la Recomendación UIT-R P.531)**

Efecto	Dependencia de la frecuencia	0,5 GHz	1 GHz	3 GHz	10 GHz
Rotación de Faraday	$1/f^2$	1,2 vueltas	108°	12°	1,1°
Retardo de propagación	$1/f^2$	1 μ s	0,25 μ s	0,028 μ s	0,0025 μ s
Refracción	$1/f^2$	< 2,4'	< 0,6'	< 4,2''	< 0,36''
Variación de la dirección de llegada (valor cuadrático medio)	$1/f^2$	48''	12''	1,32''	0,12''
Absorción (auroral y/o debida al casquete polar)	$\approx 1/f^2$	0,2 dB	0,05 dB	6×10^{-3} dB	5×10^{-4} dB
Absorción (en latitudes medias)	$1/f^2$	< 0,04 dB	< 0,01 dB	< 0,001 dB	< 1×10^{-4} dB
Dispersión	$1/f^3$	0,0032 ps/Hz	0,0004 ps/Hz	$1,5 \times 10^{-5}$ ps/Hz	4×10^{-7} ps/Hz
Centelleo ⁽¹⁾			> 20 dB cresta a cresta	≈ 10 dB cresta a cresta	≈ 4 dB cresta a cresta

* Esta estimación se basa en un contenido total de electrones (TEC) de 10^{18} electrones/m², que es un valor elevado de TEC encontrado a bajas latitudes durante el día con alta actividad solar.

** Los efectos ionosféricos por encima de 10 GHz son despreciables.

(1) Valores observados cerca del ecuador geomagnético durante las primeras horas de la noche (hora local) en el equinoccio en condiciones de gran número de manchas solares.

4 Efectos del medio ambiente local

En determinadas ubicaciones de recepción, los efectos de las estructuras y la vegetación pueden ser importantes. Los resultados de mediciones recientes en 5 GHz muestran que las pérdidas de entrada en los edificios dependen fuertemente de los ángulos de elevación y del azimut. Estos resultados complementan a los obtenidos de mediciones en las bandas por debajo de 3 GHz. Lamentablemente, los datos aplicables a los sistemas de radiodifusión por satélite son insuficientes para caracterizar plenamente a dichos efectos.

4.1 Pérdidas por entrada en edificios

En el Cuadro 2 se resume la atenuación representativa de las señales de satélite en ondas decimétricas observadas en las habitaciones cercanas a una pared exterior de las casas con estructura de madera. En las habitaciones interiores se debe agregar 0,6 dB a los valores tabulados. La atenuación de la señal causada por edificios con estructura de madera presenta pocas variaciones con las condiciones climáticas o con el ángulo de elevación del trayecto pero, como se indica en dicho Cuadro, acusa una variación sistemática en función de la frecuencia, la polarización, los materiales de construcción, y el aislamiento y la posición del receptor dentro de la estructura. Ciertos aislantes con revestimiento de aluminio y materiales de construcción producen una pérdida de hasta 20 dB.

CUADRO 2

Atenuación (dB) sufrida por las señales de ondas decimétricas a través de edificios con estructura de madera*

Tipo de construcción		Frecuencia (MHz) y polarización (horizontal: H, vertical: V)			
Exterior	Aislamiento (tipo no metálico)	860 H	860 V	1 550 V	2 569 V
Toda de madera	Cielo raso únicamente	4,7	2,9	5,0	5,8
	Cielo raso y paredes	6,3	4,5	6,6	7,4
Revestimiento de ladrillos	Cielo raso únicamente	5,9	4,1	6,2	7,0
	Cielo raso y paredes	7,5	5,7	7,8	8,6

* Este Cuadro se aplica a las habitaciones situadas cerca de la pared exterior; para las habitaciones interiores deben agregarse 0,6 dB.

Se efectuaron mediciones en edificios utilizando torres de 18 a 20 m para simular un transmisor de satélite en bandas de 700 MHz a 1,8 GHz y de 500 MHz a 3 GHz para determinar la pérdida media y la variabilidad espacial en diversos tipos de edificios. Los datos son insuficientes para hacer predicciones precisas, pero los Cuadros 3 a 5 contienen datos indicativos.

CUADRO 3

Distribuciones de la señal en la posición media y en la mejor posición dentro de los edificios (por encima de la gama de frecuencias de 700 a 1 800 MHz)

Número del edificio	Construcción	Ángulo de elevación	Posición media		Mejor posición	
			Pérdida media (dB)	Desviación típica (dB)	Pérdida media (dB)	Desviación típica (dB)
1	Oficina de esquina, ventanas grandes, edificio de una sola planta. Bloques de hormigón, placas de yeso, cristales dobles. Techo de hormigón sobre vigas de acero	27,5° (visibilidad directa a través de la ventana, ángulo acimut de 50° entre la pared y la visibilidad directa)	7,9	5,5	4,2	4,2
2	Habitación pequeña con ventanas que representan 5/8 de la pared exterior	18° (visibilidad directa por la ventana, ángulo acimut de 50° entre la ventana y la visibilidad directa)	9,1	4,4	5,4	3,7
3	Vestíbulo de esquina, puerta de cristal reflectante grande en la mitad de una pared exterior. Paredes externas de hormigón, paredes internas de placas de yeso montadas sobre marco de metal	16° (línea de visibilidad directa a través de la ventana, ángulo acimut de 45° entre una de las paredes y la visibilidad directa, las dos paredes exteriores iluminadas por el transmisor)	15,4	8,4	9,7	6,7

CUADRO 3 (Fin)

Número del edificio	Construcción	Ángulo de elevación	Posición media		Mejor posición	
			Pérdida media (dB)	Desviación típica (dB)	Pérdida media (dB)	Desviación típica (dB)
4	Casilla de planchas de metal con interior de madera contrachapada. Una ventana pequeña sin postigos en cada una de las paredes laterales, puerta recubierta de metal	25° (ángulo acimut de 60° entre la pared y la visibilidad directa)	9,7	6,3	5,2	4,9
5	Casa de dos plantas de madera, con aislamiento de lana mineral (paredes y altillos); plancha de yeso, pantalla térmica no metálica. Persianas no metálicas en las ventanas. Tejado de madera	25° (ángulo acimut de 45° entre la pared y la visibilidad directa)	9,0	4,5	5,4	3,7
6	Casa rodante de plancha de metal vacía, ventanas con marco de metal y persianas de metal	25° (ángulo acimut de 45° entre la pared y la visibilidad directa)	24,9	3,8	19,8	3,4

CUADRO 4

Mediana de la pérdida en la posición corriente y en la mejor posición dentro de los edificios en función de la frecuencia

(Los detalles de la construcción y el ángulo de elevación figuran en el Cuadro 3)

Número del edificio	Posición corriente	Mejor posición
(Como en el Cuadro 3)	750-1 750 MHz	750-1 750 MHz
1	5-11 dB	2-6 dB
2	5-14 dB	2-5 dB
3	17-18 dB	12-13 dB
4	9-11 dB	5-6 dB
5	5-11 dB	3-5 dB
6	20 a > 24 dB	16-22 dB

CUADRO 5

**Distribución de las señales en la posición corriente dentro de los edificios
(estimado para la gama de frecuencias de 500 a 3000 MHz)**

Número del edificio	Construcción	Ángulo de elevación (grados)	Posición corriente	
			Pérdida media (dB)	Desviación típica (dB)
1	Vestíbulo de entrada de un edificio de una sola planta – pared inclinada de hormigón, techo de alquitrán	18	13	10
2	Oficina en edificio de una sola planta – bloque de hormigón, techo de alquitrán	38	9	7
3	Granja de dos plantas de madera, techo de metal, pantalla térmica no de aluminio	33	5	4
4	Vestíbulo y salón de casa de dos plantas con estructura de madera, techo de metal, pantalla térmica de aluminio	41	19,5	12
5	Habitación de motel en edificio de dos plantas de ladrillo con techo compuesto	37	13	6
6	Vestíbulo de entrada de edificio de dos plantas, vidrio y hormigón, techo de alquitrán	26	12	5

Los tres primeros edificios en que se hicieron las mediciones tenían ángulos de elevación tales que la habitación recibía luz a través de una ventana con visibilidad directa desde el transmisor. Los ángulos de elevación eran inferiores a 30° para permitir la iluminación lateral de los edificios.

En el caso del edificio número 3 que figura en los Cuadros, las pérdidas sufridas cuando la señal atravesó una puerta de vidrio reflectante fueron superiores en unos 15 dB a las pérdidas sufridas con la puerta abierta.

Los resultados de otro estudio son análogos: la atenuación media (en la gama de frecuencias de 500 a 3000 MHz) varió entre 5 dB en una casa con estructura de madera, techo de metal y pantalla térmica de un material distinto del aluminio y 20 dB en una casa igual pero con pantalla térmica de aluminio. El Cuadro 5 contiene los valores de la atenuación media que se midieron.

Obsérvese que para algunas de las mediciones, se incluyen en el promedio los valores obtenidos cerca de una ventana o una puerta abierta. En el motel (edificio 6), la atenuación cuando el trayecto directo penetró una pared de ladrillos fue de 15 a 30 dB con respecto a la visibilidad directa. Los niveles dentro del edificio 4 fueron de 25 a 45 dB inferiores a los niveles correspondientes a la visibilidad directa, debido al techo de metal y a la pantalla térmica de aluminio.

Obsérvese también que las mediciones se hicieron en trayectos estacionarios. Hay pruebas de que los efectos de proximidad de trayectos múltiples producirán fluctuaciones en el nivel de las señales

recibidas si el transmisor o el receptor se desplazan. Esto tiene consecuencias especialmente para los sistemas de órbita terrestre baja (LEO), en los que el transmisor se mueve rápidamente con respecto al receptor.

Las mediciones indican que en los edificios 1, 2, 4 y 6 la atenuación aumenta con la frecuencia de 1 a 3 dB/GHz aproximadamente y en los edificios menos atenuantes (edificio 3) 6 dB/GHz, y que prácticamente no cambia con la frecuencia en el edificio 5, que tiene paredes de cristal. Dado que los valores indicados más arriba son promedios de la gama de frecuencias de 500 MHz a 3 GHz, se espera que sean ligeramente optimistas para la gama de 1 a 3 GHz.

Para los seis edificios identificados en el Cuadro 5, se realizaron mediciones a 1,6 GHz y 2,5 GHz analizándose los resultados para determinar el valor mediano, del 5% y el 95% de la pérdida de señal relativa cuando las antenas se desplazaban horizontalmente en intervalos múltiples de 80 cm. Los edificios estaban iluminados desde el lateral y las señales se recibían dentro de la pared externa (entrada por una pared). Se utilizaron antenas omnidireccionales en acimut para recibir las señales transmitidas. En la Fig. 1 se resumen los valores estadísticos obtenidos de las mediciones. Estos datos indican la magnitud y las variaciones del desvanecimiento que puede aparecer en la transmisión de la señal a través de las paredes del edificio. Obsérvese que, a veces, la condición multitrayecto da lugar a unos niveles de señal relativos superiores a 0 dB.

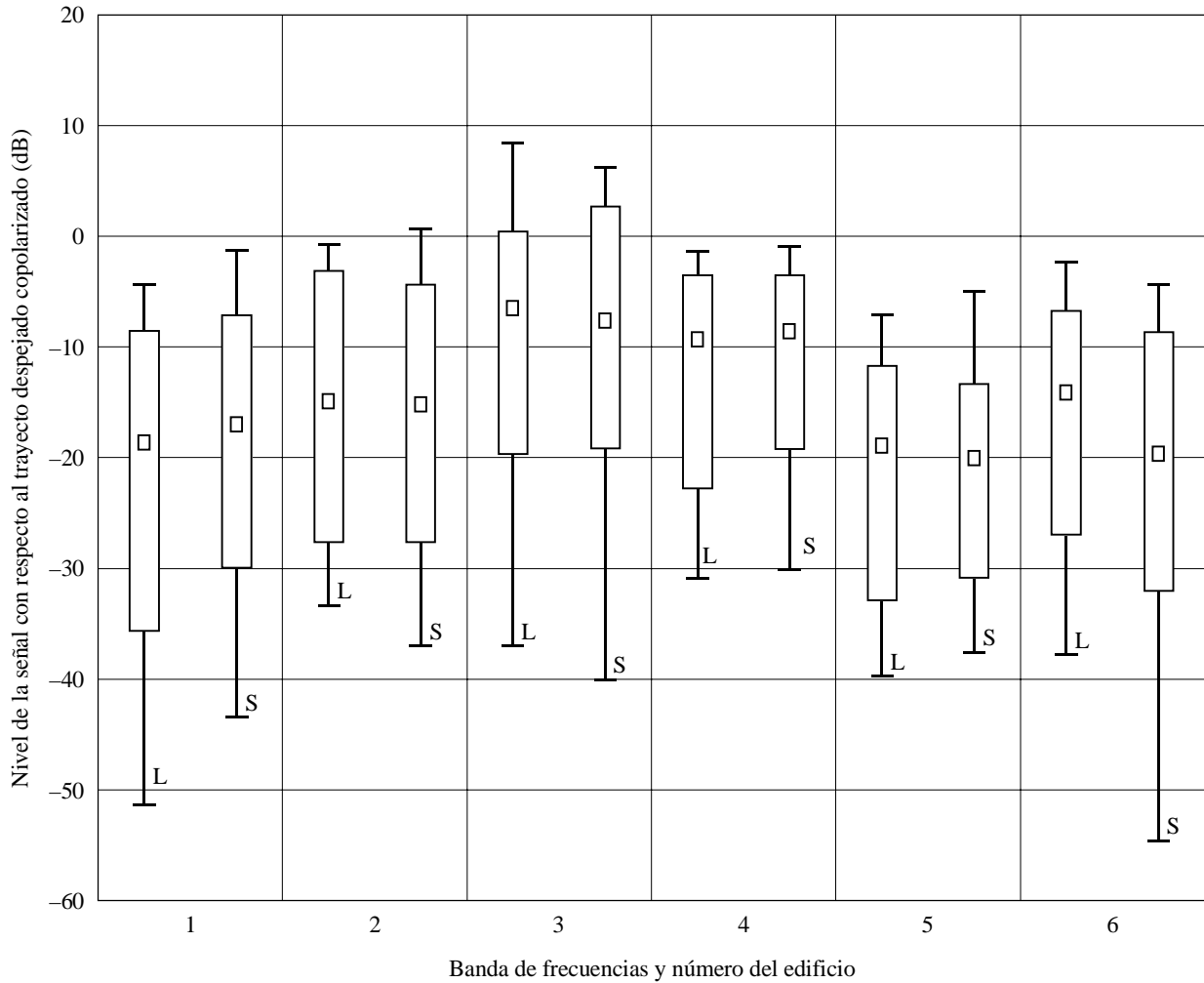
Ninguna de las mediciones en las bandas por debajo de 3 GHz proporciona información para los ángulos de elevación superiores a 41°. Sin embargo, las grandes pérdidas sufridas al atravesar las estructuras de metal (edificio 6 en los Cuadros 3 y 4; edificio 4 en el Cuadro 5) sugieren que la atenuación para un trayecto directo a través de un techo de metal será del orden de los 20 dB. Las pérdidas de 15 a 30 dB sufridas al atravesar una pared de ladrillos en el edificio 4 del Cuadro 5 también son pertinentes para ángulos de elevación superiores.




Los estudios de la propagación terrenal dentro de los edificios indican que a 2 GHz en un edificio de oficinas, la pérdida (dB) sufrida al atravesar los pisos viene dada por $15 + 4(n - 1)$, donde n es el número de pisos atravesados. Para un edificio residencial, la pérdida es típicamente 4 dB por piso; este valor permite estimar la pérdida adicional que sufre una señal de satélite cuyo punto de entrada tiene un ángulo de elevación alto y que desciende a través del edificio.

Se midieron en distintas posiciones las dependencias con el ángulo de elevación y de acimut de las pérdidas de entrada en los edificios en la banda de 5 GHz, sobre tres pisos distintos en un edificio de ocho plantas. Se utilizó un helicóptero para simular un transmisor de satélite. La señal recibida se registró de forma continua, así como la posición del helicóptero, por medio de un receptor sistema mundial de determinación de posición (GPS) diferencial. En el Cuadro 6 se resumen las condiciones experimentales y los resultados medios de la medición. El comportamiento de las pérdidas de entrada en el edificio respecto al ángulo de elevación del trayecto se representa en la Fig. 2, y el comportamiento respecto al acimut en la Fig. 3, para ángulos de elevación de 15° y 30°.

También se midió en 5 GHz la dependencia con el ángulo de elevación, a dos ángulos de elevación diferentes, utilizando edificios elevados para simular la recepción de señales de satélite. En una sala de tipo oficina las medianas medidas del rebasamiento de las pérdidas de entrada en el edificio fueron de 20 dB y de 35 dB para ángulos de elevación de 15° y 55°, respectivamente.

FIGURA 1

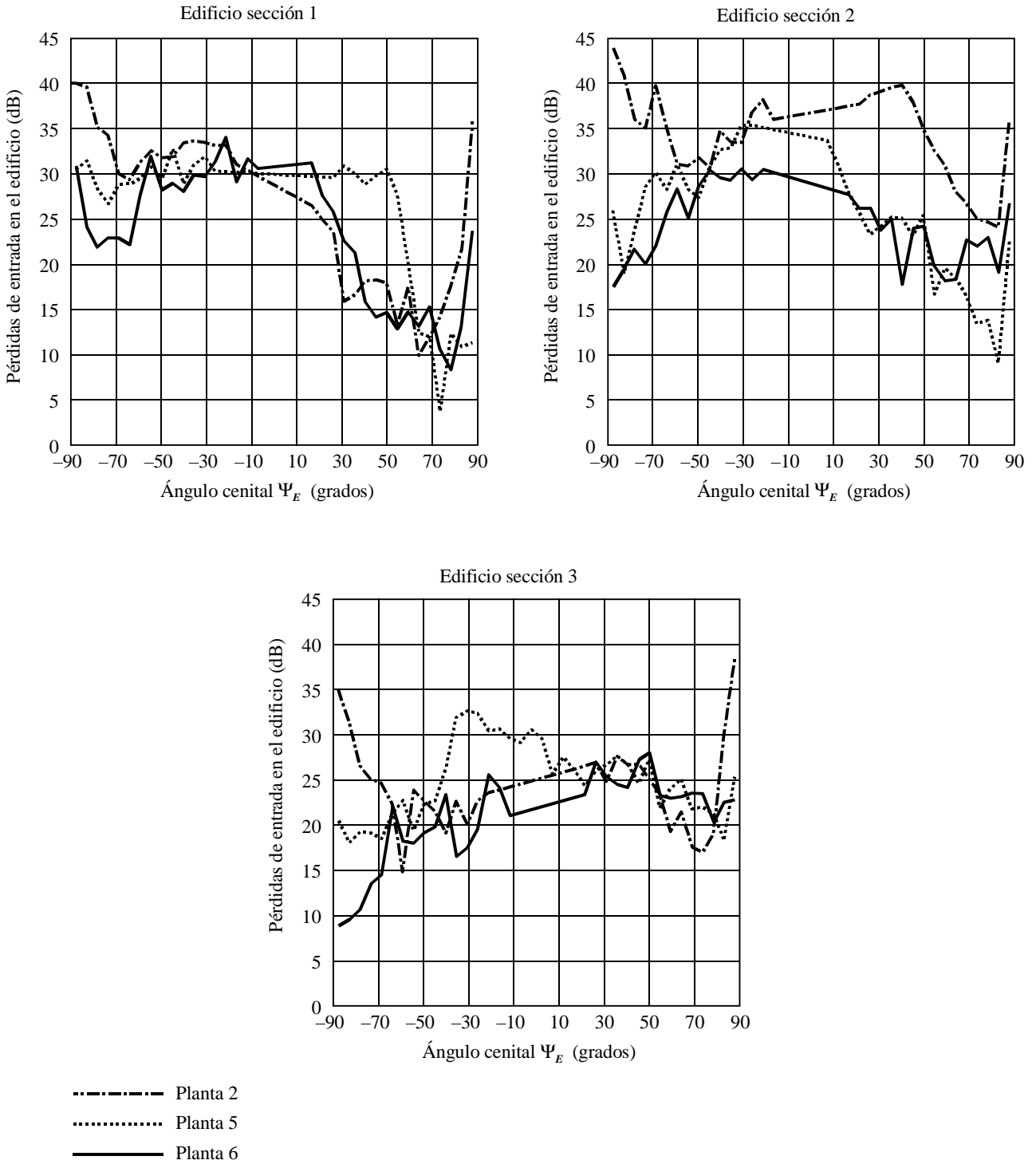


 Escala nominal de los valores medidos
 95% a 5%
 Valor mediano

Valor mediano, del 5% y del 95% de la pérdida de potencia por entrada en el edificio con respecto al caso de visibilidad directa sin obstrucciones a 1,6 GHz y 2,5 GHz para los seis edificios identificados en el Cuadro 5 (designados por los números 1 a 6 en la Figura). Para cada edificio se muestran por separado los valores estadísticos en el caso de 1,6 GHz (L) y 2,5 GHz (S).

FIGURA 2

**Pérdidas de entrada en el edificio en 5,1 GHz, en las secciones 1, 2 y 3 de las plantas 2^a, 5^a y 6^a.
El ángulo Ψ_E es por definición positivo cuando se mira al Norte y negativo cuando se mira al Sur
 $|\Psi_E| = 90^\circ - \epsilon$, siendo ϵ el ángulo de elevación**



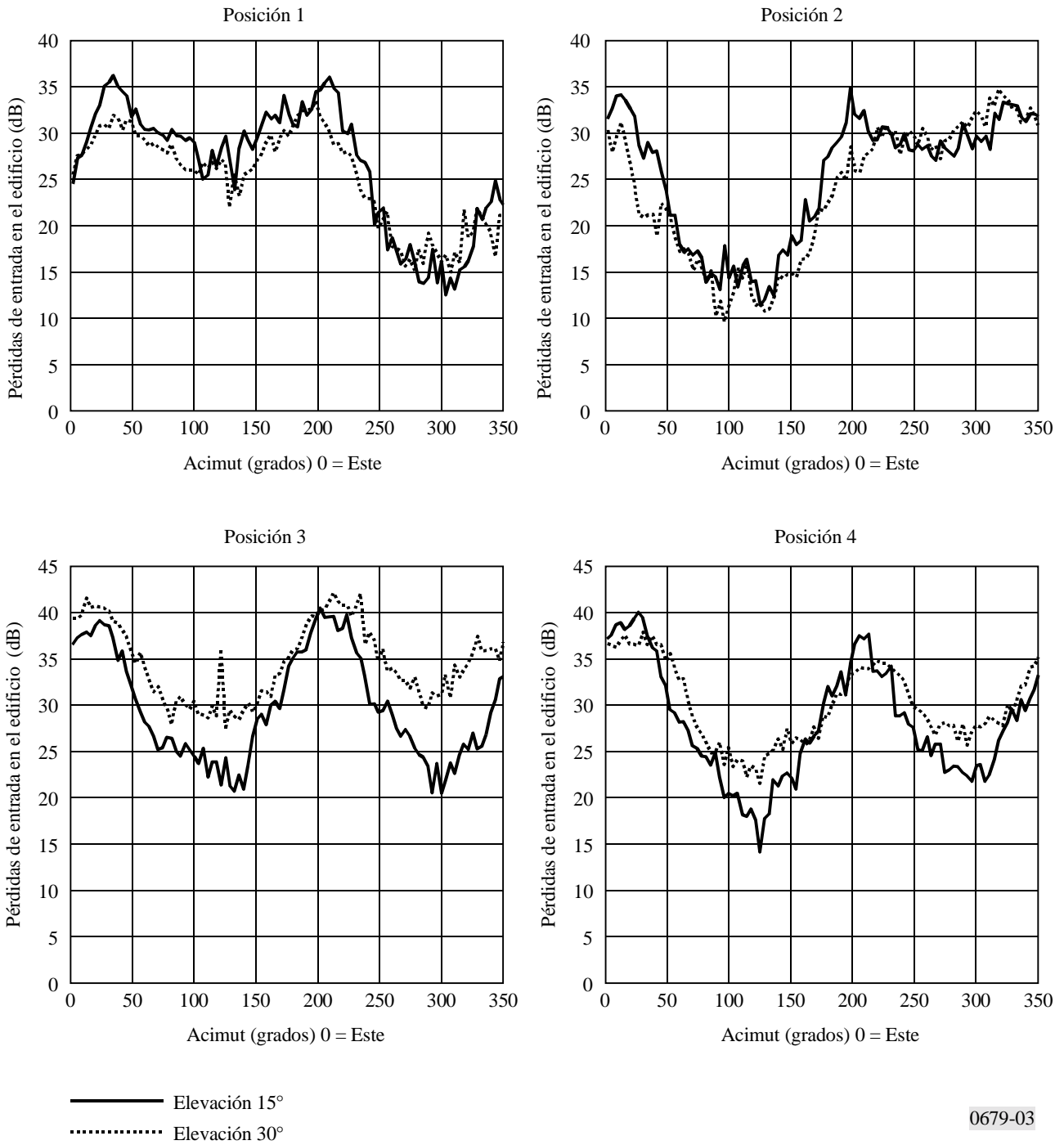
Edificio sección 1: oficinas con ventanas orientadas hacia el transmisor del helicóptero.

Edificio sección 2: centro del pasillo.

Edificio sección 3: oficinas con ventanas no orientadas hacia el transmisor del helicóptero.

FIGURA 3

Pérdidas de entrada en el edificio en 5,1 GHz para elevación de 15° y 30° con cuatro posiciones distintas de antena de interiores. Los números 1 y 2 están situados en las proximidades del muro exterior, mientras que los números 3 y 4 están situados en el pasillo



CUADRO 6

Promedio de las medianas de las pérdidas de entrada en edificios y gama observada de la mediana de las pérdidas de entrada en edificios medidas en 5,1 GHz para distintas posiciones en un edificio de oficinas

	Tipo de mediciones: (trayectoria del helicóptero)	Promedio de la mediana de las pérdidas de entrada en edificios para distintas posiciones del receptor en el edificio (dB)	Gama observada de la mediana de las pérdidas de entrada en el edificio (dB)
Edificio de ocho plantas con siete de ellas sobre el suelo y una planta adicional situada en el antiguo techo, con muros de ladrillo y ventanas situadas en hileras: tras el muro de ladrillo hay una pared de hormigón de 10 cm de espesor; las ventanas tienen un doble cristal plano no térmico; las plantas están separadas 3,5 m, con 2,5 m entre el techo y el suelo; dos capas de yeso con listones de madera entre habitaciones separadas; las paredes interiores que dan a pasillos son en la mayoría de los casos de cristal; en las habitaciones hay el mobiliario habitual de mesas y estanterías; en cada planta hay tres secciones, y un pasillo con salas de oficina a cada lado	Mediciones del ángulo de elevación (lineal, perpendicular a la longitud del edificio)	19,1	~ 5-45
	Mediciones del ángulo de acimut (circular en ángulos de elevación de 15° y 30°)	22,3	~ 10-42

4.2 Pérdida por entrada en vehículos

Las mediciones de la penetración de las señales en vehículos son muy escasas y se han obtenido utilizando técnicas con equipo en tierra análogas a las descritas. Se hizo una serie de mediciones a 1 600 MHz utilizando trayectos simulados con ángulos de elevación de 8° a 90°, dos antenas diferentes (parche «microstrip» y hélice cuadrifilar), distintos tipos de vehículos (que se montaron en una plataforma giratoria para evaluar el nivel de la señal como función de la dirección de llegada) y posiciones distintas del usuario del terminal dentro del vehículo. Se hicieron mediciones con las ventanillas del vehículo bajas. Los valores típicos del exceso de pérdida del trayecto (definido como el nivel medio de la señal medido dentro del vehículo menos la mediana de los niveles de desvanecimiento registrados en campo abierto con las mismas posiciones del cuerpo y de la antena utilizadas para las mediciones dentro del vehículo) oscilaron entre 3 y 8 dB (mediana) y entre 4 y 13 dB (percentil 90).

De estos datos pueden extraerse las siguientes observaciones y conclusiones generales:

- el nivel de la señal dentro de los vehículos obedece a la distribución de Rayleigh, es decir que típicamente no existe ningún trayecto de propagación directo y que la potencia de la señal se transmite mediante la dispersión de trayectos múltiples desde los bordes de las aperturas del vehículo (por ejemplo, las ventanillas);
- las pérdidas en el percentil 90 oscilan entre 15 y 20 dB para todos los ángulos de elevación del trayecto;
- la pérdida depende apenas del ángulo de elevación del trayecto, pero la dependencia del ángulo de elevación varía para antenas a nivel de la cadera y antenas a nivel de la cabeza;
- el tipo de vehículo no tiene efecto significativo en la pérdida de penetración de la señal;
- la posición del usuario del terminal dentro del vehículo no tiene efecto significativo en la pérdida;
- la mediana del exceso de pérdida del trayecto (con respecto a las mediciones en campo abierto) tiene una distribución logarítmica normal;
- la antena parche produce menos pérdida de trayecto que una antena a nivel de la cabeza (porque la mayor directividad produce mayores pérdidas en campo abierto, que no se agravan demasiado cuando la antena está dentro del vehículo);
- con un ángulo de elevación de 8°, la mediana promedio del exceso de pérdida del trayecto para todos los vehículos fue de 3,7 dB para una antena a nivel de la cabeza, en comparación con una mediana de 3,2 dB a 900 MHz para la pérdida de un trayecto horizontal en un vehículo sedán grande.

Puede suponerse que estos resultados representen las actuales previsiones generales para la penetración de señales en vehículos.

4.3 Reflexiones y sombras producidas por edificios

Las mediciones hechas mediante la transmisión de señales de radiodifusión sonora MF con polarización circular a 839 MHz y 1 504 MHz desde una torre elevada, indican que, con un ángulo de elevación de 20° aproximadamente, las variaciones de un sitio a otro de la intensidad de campo en zonas urbanas a nivel de la calle se aproximan a 15 dB en 839 MHz y a 18 dB en 1 504 MHz. Las fluctuaciones son prácticamente las mismas en la recepción con antenas polarizadas horizontalmente o verticalmente. La calidad del sonido resulta levemente deteriorada por las variaciones de la intensidad de campo en las condiciones de propagación por trayectos múltiples, aun en el caso de calles estrechas y desfavorablemente orientadas.

En las zonas suburbanas y rurales, las reflexiones en el suelo pueden influir en la elección de la polarización preferida, pues la onda polarizada verticalmente que se refleja en el suelo experimenta un nulo profundo en el pseudoángulo de Brewster, lo que no sucede con la onda polarizada horizontalmente. Por ello, la onda polarizada horizontalmente que se refleja en el suelo será por lo general más intensa que la polarizada verticalmente en el caso de una tierra uniforme, y, por tanto, la suma de la onda directa y de las ondas reflejadas en el suelo dará como resultado nulos más profundos y máximos más altos.

5 Distribución estadística del nivel de la señal en zonas extensas

Un satélite de radiodifusión debe prestar servicio a una zona extensa, preferiblemente con la misma calidad durante un determinado porcentaje de tiempo. Sin embargo, algunas partes de la zona de servicio (por ejemplo, dentro de zonas climáticas distintas) pueden verse afectadas de modo diferente por determinados efectos de la propagación. Tales diferencias se pueden conocer por medio de mediciones coordinadas, hechas en varias ubicaciones de recepción distribuidas a lo largo de la zona de servicio. Dichos datos, aunque son escasos, son útiles tanto para prever los requisitos que ha de reunir el equipo como para determinar las condiciones de interferencia en los límites de la zona de servicio.

Los datos disponibles indican que la probabilidad de que existan condiciones de lluvia en forma simultánea en diferentes lugares es de algunas unidades porcentuales para separaciones de hasta 500 km, y que no puede darse por supuesta la independencia estadística para separaciones inferiores a unos 800 km. En pares de emplazamientos separados por 200 km se halló que la probabilidad conjunta de que existan índices de pluviosidad superiores a 5 mm/h puede ser de aproximadamente cinco veces la probabilidad obtenida suponiendo una independencia estadística.

6 Distribuciones estadísticas y correlación de frecuencia de las señales

Las mediciones hechas mediante la transmisión de una señal de 567,25 MHz desde lo alto de una torre de 515 m para simular una señal de satélite han demostrado que, en la inmensa mayoría de las ubicaciones de recepción, la distribución de los valores instantáneos de la envolvente de la señal se aproxima a una distribución log-normal. Si las obstrucciones por objetos locales introducen atenuaciones superiores a 15 dB con respecto al nivel mediano, la distribución de los valores instantáneos se aproxima a una distribución de Rayleigh.

En el mismo experimento se midieron también las correlaciones de frecuencia entre señales con separaciones de frecuencia de 0,15 MHz, 0,5 MHz, 1,0 MHz, 2,2 MHz, 4,4 MHz y 6,5 MHz. Se observó que la correlación de frecuencia disminuye a medida que aumenta la separación de frecuencia, y que el ángulo de elevación sólo influye en ella en forma ligera e incidental.
