

## RECOMENDACIÓN UIT-R P.682-1\*

**DATOS DE PROPAGACIÓN NECESARIOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN MÓVILES AERONÁUTICOS TIERRA-ESPACIO**

(Cuestión UIT-R 207/3)

(1990-1992)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

- a) que para planificar los sistemas móviles aeronáuticos Tierra-espacio es necesario disponer de datos de propagación y métodos de predicción adecuados;
- b) que para la planificación de sistemas de telecomunicación Tierra-espacio se recomiendan los métodos de la Recomendación UIT-R P.618;
- c) que es necesario elaborar con más detalle los métodos de predicción aplicables específicamente a los sistemas móviles aeronáuticos por satélite con el fin de obtener una precisión adecuada en todas las condiciones de funcionamiento;
- d) que, sin embargo, se dispone de métodos que permiten obtener una precisión suficiente para muchas aplicaciones,

*recomienda*

que se adopten los métodos descritos en el anexo 1 para la planificación de sistemas de telecomunicación móviles aeronáuticos Tierra-espacio, además de los métodos indicados en la Recomendación UIT-R P.618.

## ANEXO 1

**1. Introducción**

Los efectos de propagación en el servicio móvil aeronáutico por satélite difieren de los del servicio fijo por satélite y de otros servicios móviles por satélite pues:

- en las aeronaves se emplean antenas pequeñas, y el fuselaje de la aeronave puede afectar el funcionamiento de la antena;
- las altas velocidades de las aeronaves producen grandes dispersiones debido al efecto Doppler;
- los terminales de las aeronaves deben dar cabida a una amplia gama dinámica de transmisión y recepción;
- las condiciones de seguridad de las aeronaves exigen una elevada integridad de las comunicaciones y aun las degradaciones de propagación de corta duración son muy importantes. La fiabilidad en las comunicaciones se debe mantener durante las maniobras que implican inclinaciones laterales y desplazamientos tridimensionales.

En este anexo se analizan los datos y modelos específicamente necesarios para caracterizar las degradaciones del trayecto, que comprenden:

- los efectos troposféricos, incluidas la atenuación producida por los gases, la atenuación debida a las nubes y a la lluvia, la atenuación debida a la niebla, la refracción y el centelleo;
- los efectos ionosféricos, tales como el centelleo;
- los efectos de la reflexión en la superficie (propagación por trayectos múltiples);
- los efectos ambientales (movimiento de la aeronave, estado del mar, tipo de superficie del terreno).

---

\* La Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones efectuó modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2000 de conformidad con la Resolución UIT-R 44.

Los sistemas móviles aeronáuticos por satélite pueden funcionar en cualquier parte del mundo, incluso con trayectos de propagación de bajo ángulo de elevación. Se han efectuado diversas mediciones de los parámetros de propagación por trayectos múltiples sobre tierra y mar. En algunos casos se utilizaron simulaciones en laboratorio para comparar los datos medidos y verificar los parámetros del modelo. La señal recibida se considera en términos de sus posibles componentes: una onda directa sujeta a los efectos atmosféricos, y una onda reflejada que por lo general contiene principalmente una componente difusa.

Actualmente resulta de interés utilizar frecuencias próximas a 1,5 GHz para los sistemas móviles aeronáuticos por satélite. Teniendo en cuenta que la mayor parte de los experimentos se han llevado a cabo en esta banda, los datos que figuran en esta Recomendación se aplican principalmente a estas frecuencias. A medida que los sistemas aeronáuticos se perfeccionen, se prevé la posibilidad de utilizar otras frecuencias.

## **2. Efectos troposféricos**

Para los servicios aeronáuticos, la altitud de la antena móvil es un parámetro importante. Pueden efectuarse estimaciones de la atenuación troposférica por los métodos especificados en la Recomendación UIT-R P.618.

La señal recibida puede ser afectada por refracción a gran escala y por centelleos inducidos por turbulencias atmosféricas. Estos efectos disminuirán en el caso de las aeronaves que vuelen a gran altura.

## **3. Efectos ionosféricos**

Los efectos ionosféricos en trayectos oblicuos se examinan en la Recomendación UIT-R P.531. Estos fenómenos son importantes para muchos trayectos en frecuencias por debajo de 10 GHz aproximadamente, en particular dentro de  $\pm 15^\circ$  del ecuador geomagnético y, en menor medida, dentro de las zonas aurales y los casquetes polares. Los efectos ionosféricos alcanzan su mayor nivel cerca del máximo del ciclo de manchas solares.

Las degradaciones causadas por la ionosfera no disminuirán a las altitudes típicas de las aeronaves. En la Recomendación UIT-R P.680 figura una descripción resumida de los efectos ionosféricos de interés particular para los sistemas móviles por satélite. Para la mayoría de las señales de telecomunicación, la degradación más grave se deberá probablemente al centelleo ionosférico. El cuadro 1 de la Recomendación UIT-R P.680 presenta estimaciones de los efectos ionosféricos máximos previstos a frecuencias hasta 10 GHz para trayectos con un ángulo de elevación de  $30^\circ$ .

## **4. Desvanecimiento debido a reflexiones y dispersiones en la superficie de la Tierra**

### **4.1 Generalidades**

En los sistemas móviles aeronáuticos por satélite, el desvanecimiento debido a la propagación por trayectos múltiples causada por las reflexiones en la superficie de la Tierra difiere del que se produce en otros sistemas móviles por satélite porque las velocidades y altitudes de las aeronaves son mucho mayores que las de otras plataformas móviles. Las características de desvanecimiento de los sistemas aeronáuticos pueden analizarse por métodos similares a los utilizados para los sistemas marítimos descritos en la Recomendación UIT-R P.680, teniendo debidamente en cuenta la esfericidad de la Tierra, que se hace importante al aumentar la altitud de la antena por encima de la superficie reflectora.

### **4.2 Desvanecimiento debido a reflexiones en la superficie del mar**

#### **4.2.1 Influencia de la altitud y la ganancia de la antena**

El siguiente método sencillo, basado en un modelo teórico, permite efectuar estimaciones aproximadas de la potencia de la señal propagada por trayectos múltiples o de la profundidad del desvanecimiento utilizables en el diseño de sistemas.

El procedimiento es el siguiente:

*Gamas aplicables:*

Frecuencias: 1-2 GHz  
 Ángulos de elevación:  $\theta_i \geq 3^\circ$ , y  $G(1,5\theta_i) \geq -10$  dB

donde  $G(\theta)$  es el diagrama de radiación del lóbulo principal, expresado por:

$$G(\theta) = -4 \times 10^{-4} (10^{G_m/10} - 1) \theta^2 \quad \text{dB} \quad (1)$$

donde:

$G_m$ : valor de la ganancia máxima de la antena (dB)  
 $\theta$ : ángulo medido desde el eje de puntería (grados)  
 Polarizaciones: circular y horizontal; vertical para  $\theta_i \geq 8^\circ$   
 Estado del mar: olas de altura entre 1 a 3 m (componente incoherente totalmente desarrollada).

*Paso 1:* Calcular los ángulos rasantes del punto de reflexión especular,  $\theta_{sp}$ , y el horizonte,  $\theta_{hr}$ , por medio de:

$$\theta_{sp} = 2 \gamma_{sp} + \theta_i \quad \text{grados} \quad (2a)$$

$$\theta_{hr} = \cos^{-1} [R_e / (R_e + H_a)] \quad \text{grados} \quad (2b)$$

donde:

$$\gamma_{sp} = 7,2 \times 10^{-3} H_a / \text{tg } \theta_i$$

$R_e$ : radio de la Tierra = 6 371 km

$H_a$ : altura de la antena (km)

*Paso 2:* Hallar la ganancia relativa de la antena,  $G$ , en la dirección intermedia entre el punto especular y el horizonte. La ganancia relativa de antena, se calcula aproximadamente por medio de la ecuación (1), donde  $\theta = \theta_i + (\theta_{sp} + \theta_{hr})/2$  (grados).

*Paso 3:* Calcular el coeficiente de reflexión Fresnel del mar:

$$R_H = \frac{\text{sen } \theta_i - \sqrt{\eta - \cos^2 \theta_i}}{\text{sen } \theta_i + \sqrt{\eta - \cos^2 \theta_i}} \quad (\text{polarización horizontal}) \quad (3a)$$

$$R_V = \frac{\text{sen } \theta_i - \sqrt{(\eta - \cos^2 \theta_i) / \eta^2}}{\text{sen } \theta_i + \sqrt{(\eta - \cos^2 \theta_i) / \eta^2}} \quad (\text{polarización vertical}) \quad (3b)$$

$$R_C = \frac{R_H + R_V}{2} \quad (\text{polarización circular}) \quad (3c)$$

$$\eta = \epsilon_r(f) - j 60 \lambda \sigma(f)$$

donde:

$\epsilon_r(f)$ : permitividad relativa de la superficie a la frecuencia  $f$  (según la Recomendación UIT-R P.527)

$\sigma(f)$ : conductividad (S/m) de la superficie a la frecuencia  $f$  (según la Recomendación UIT-R P.527)

$\lambda$ : longitud de onda en el espacio libre (m).

*Paso 4:* Calcular el factor de corrección  $C_\theta$  (dB):

$$C_\theta = \begin{cases} 0 & \text{para } \theta_{sp} \geq 7^\circ \\ (\theta_{sp} - 7) / 2 & \text{para } \theta_{sp} < 7^\circ \end{cases} \quad (4)$$

Paso 5: Calcular el factor de divergencia  $D$  (dB) debido a la curvatura de la Tierra:

$$D = -10 \log \left[ 1 + \frac{2 \operatorname{sen} \gamma_{sp}}{\cos \theta_{sp} \operatorname{sen} (\gamma_{sp} + \theta_i)} \right] \quad (5)$$

Paso 6: La potencia incoherente media de las ondas reflejadas en el mar con respecto a la onda directa,  $P_r$ , viene dada por:

$$P_r = G + R + C_\theta + D \quad \text{dB} \quad (6)$$

donde:

$$R = 20 \log |R_i|$$

con  $R_i = R_H, R_V$  o  $R_C$  según las ecuaciones (3).

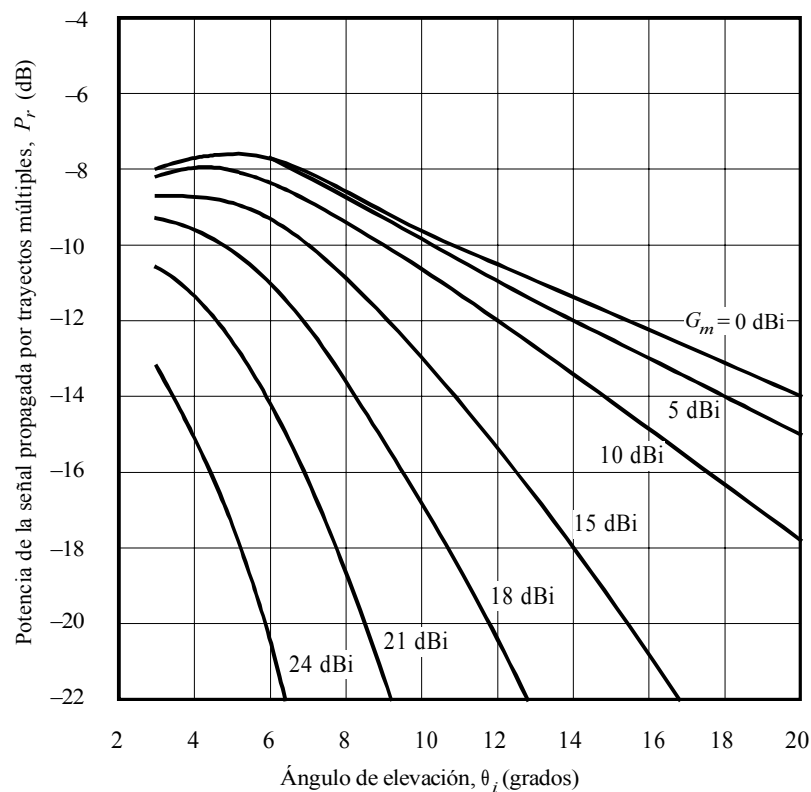
Paso 7: Suponiendo la distribución de Nakagami-Rice se estima la profundidad del desvanecimiento por medio de la expresión:

$$A + 10 \log \left( 1 + 10^{P_r/10} \right) \quad (7)$$

donde  $A$  es la amplitud (dB) tomada de la ordenada de la fig. 1 de la Recomendación UIT-R P.680.

En la fig. 1 posterior se representa la potencia multitrayecto media de la componente incoherente obtenida por este método, en función del ángulo de elevación y para diferentes ganancias. Una comparación con el caso de los sistemas móviles marítimos por satélite (fig. 2 de la Recomendación UIT-R P.680) muestra que en los sistemas móviles aeronáuticos por satélite la potencia de la onda reflejada,  $P_r$ , es de 1 a 3 dB menor en ángulos de elevación bajos.

FIGURA 1  
Potencia media de la señal propagada por trayectos múltiples  
con relación a la potencia de la señal directa en función del ángulo de elevación  
para diferentes ganancias de antena



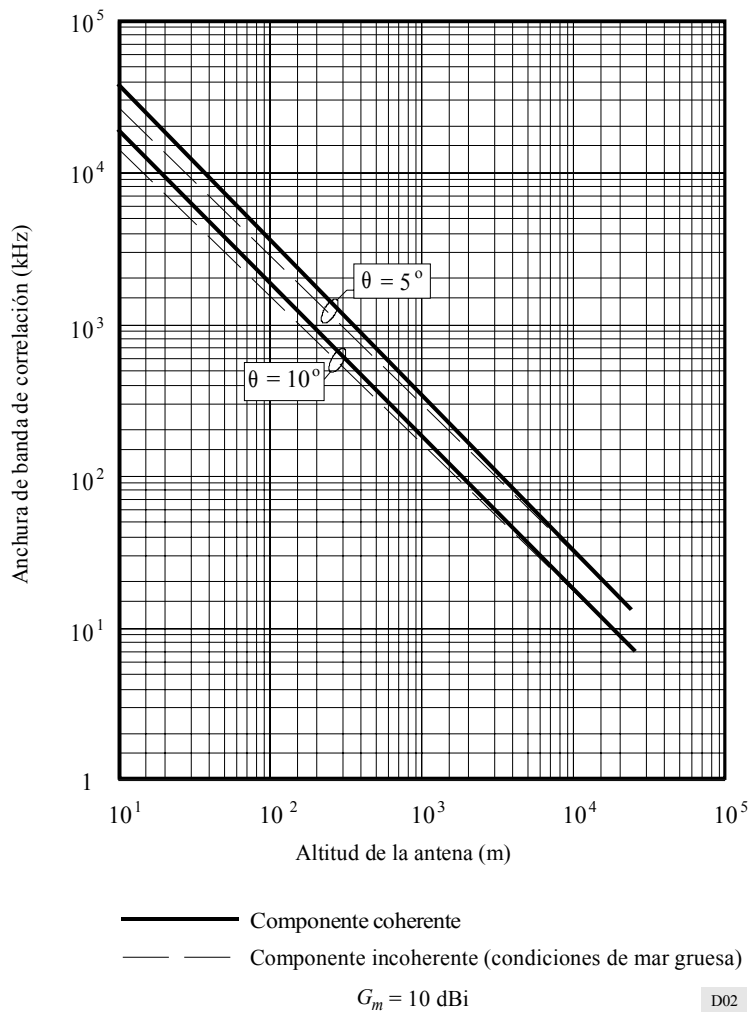
Frecuencia = 1,54 GHz  
Polarización circular  
 $H_a = 10$  km

*Nota 1* – Tanto los estudios analíticos como los experimentales han demostrado que para ondas polarizadas circularmente en 1,5 GHz o próximas a esta frecuencia y con una ganancia de antena de 7 dB, la profundidad del desvanecimiento de la señal por trayectos múltiples en condiciones de mar gruesa es de 8 a 11 dB aproximadamente para altitudes de aeronave bajas y moderadas, y de 7 a 9 dB aproximadamente para altitudes elevadas (superiores a 2 km). La profundidad del desvanecimiento multitrayecto es aproximadamente 2 dB menor para una ganancia de antena de 15 dB.

**4.2.2 Retardo y anchura de banda de correlación**

La señal recibida se compone de una onda directa y ondas reflejadas. Como la componente reflejada experimenta un mayor retardo de propagación que la directa, la señal compuesta recibida puede estar sujeta a desvanecimientos selectivos en frecuencia. La correlación de la señal disminuye al aumentar la separación de frecuencia. La dependencia de la correlación con respecto a la ganancia de la antena es pequeña para ganancias inferiores a 15 dB. La fig. 2 muestra la relación entre la altitud de la antena y la anchura de banda de correlación, definida aquí como la separación de frecuencia para la cual el coeficiente de correlación entre dos ondas es igual a 0,37 (1/e). La anchura de banda de correlación disminuye a medida que aumenta la altitud de la antena siendo de 10 a 20 kHz aproximadamente (retardo de 6 a 12 μs) para una altitud de antena de 10 km. Por tanto, el desvanecimiento debido a la propagación por trayectos múltiples que sufren los sistemas aeronáuticos puede tener características selectivas en función de la frecuencia.

FIGURA 2  
**Anchura de banda de correlación en función de la altitud de la antena para una ganancia de antena de 10 dBi**



### 4.3 Mediciones de los efectos de la propagación por trayectos múltiples debida a reflexión en el mar

Se han realizado amplios estudios en la banda de 1,5 a 1,6 GHz. En este punto se resumen los resultados de estas mediciones para su aplicación al diseño de sistemas.

En el cuadro 1 se resumen los parámetros de la propagación por trayectos múltiples en el océano observados en las mediciones, completados con los resultados de un modelo analítico. Las dispersiones del retardo indicadas en este cuadro son las anchuras del perfil de potencia/retardo de la señal con dispersión difusa que llega al receptor. La anchura de banda de correlación indicada es la anchura de banda entre los puntos a 3 dB de la función de autocorrelación de frecuencia (transformada de Fourier del espectro del retardo). La dispersión Doppler se determina a partir de la anchura de la densidad espectral de potencia Doppler. El tiempo de descorrelación es la anchura entre los puntos a 3 dB de la función de autocorrelación temporal (transformada de Fourier inversa del espectro Doppler).

CUADRO 1

#### Parámetros de la propagación por trayectos múltiples según las mediciones en el océano

Parámetro	Gama medida	Valor típico para el ángulo de elevación especificado		
		8°	15°	30°
Potencia normalizada de la propagación por trayectos múltiples (dB)				
Polarización horizontal	-5,5 a -0,5	-2,5	-1	-1
Polarización vertical	-15 a -2,5	-14	-9	-3,5
Dispersión del retardo <sup>(1)</sup> (μs)				
Valor entre puntos a 3 dB	0,25-1,8	0,6	0,8	0,8
Valor entre puntos a 10 dB	2,2 -5,6	2,8	3,2	3,2
Anchura de banda de correlación <sup>(2)</sup> (kHz)				
Valor entre puntos a 3 dB	70-380	160	200	200
Dispersión Doppler <sup>(1)</sup> (Hz)				
Geometría en el plano propio				
Valor entre puntos a 3 dB	4-190	5	70	140
Valor entre puntos a 10 dB	13-350	44 40 <sup>(3)</sup>	180	350
Geometría en el plano transversal				
Valor entre puntos a 3 dB	79-240	79	110	190
Valor entre puntos a 10 dB	180-560	180 80 <sup>(3)</sup>	280	470
Tiempo de descorrelación <sup>(2)</sup> (ms)				
Valor entre puntos a 3 dB	1,3-10	7,5	3,2	2,2

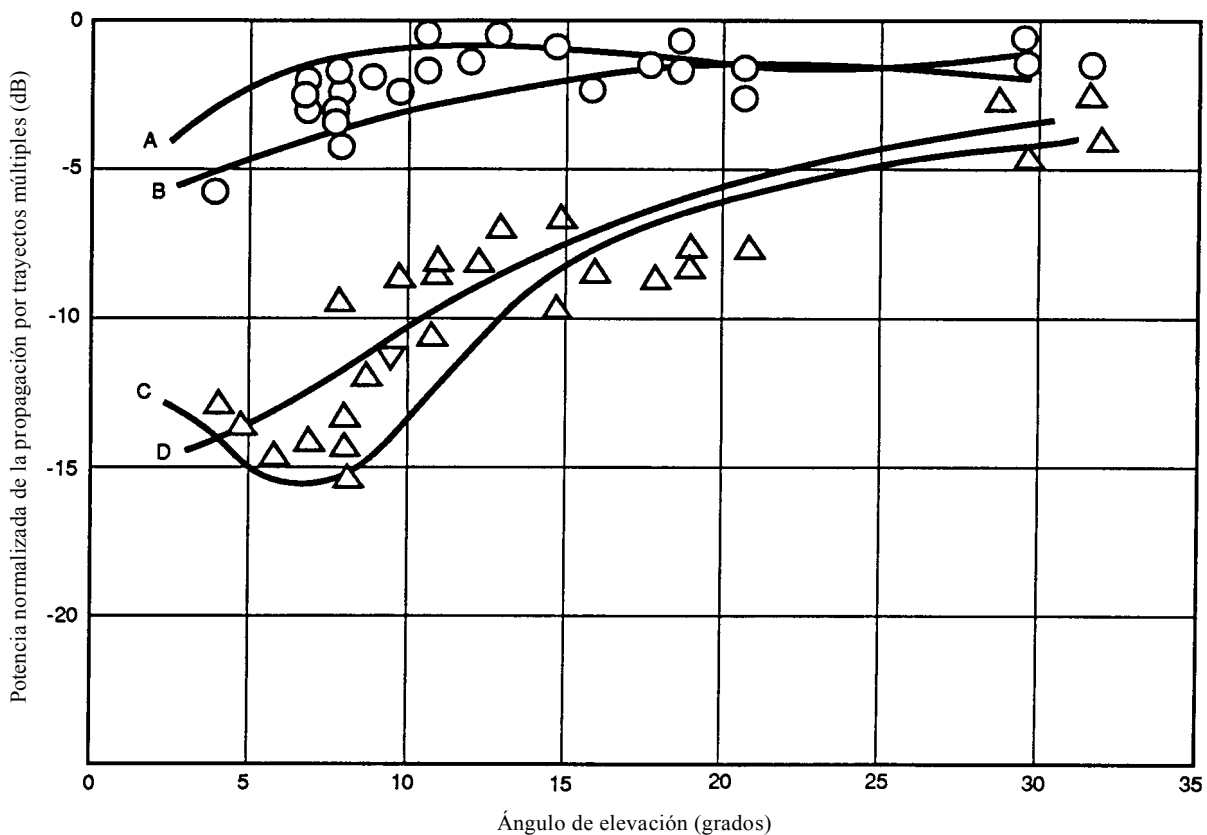
(1) Bilateral.

(2) Unilateral.

(3) Datos de un modelo de la propagación por trayectos múltiples para una altitud de aeronave de 10 km y una velocidad de 1 000 km/h.

La fig. 3 representa la potencia normalizada de la propagación por trayectos múltiples con polarizaciones horizontal y vertical de la antena y en condiciones de mar en calma y de mar gruesa en función del ángulo de elevación, junto con las predicciones obtenidas mediante un modelo físico de las características ópticas. Se encontró que la condición del mar tiene un efecto mínimo para ángulos de elevación superiores a unos 10°. La concordancia entre los coeficientes medidos y los predichos para una Tierra plana lisa, modificados por el factor de divergencia de una Tierra esférica, aumenta al apaciguarse el mar.

FIGURA 3  
Potencia normalizada de la propagación por trayectos múltiples en el océano en función del ángulo de elevación a 1,6 GHz



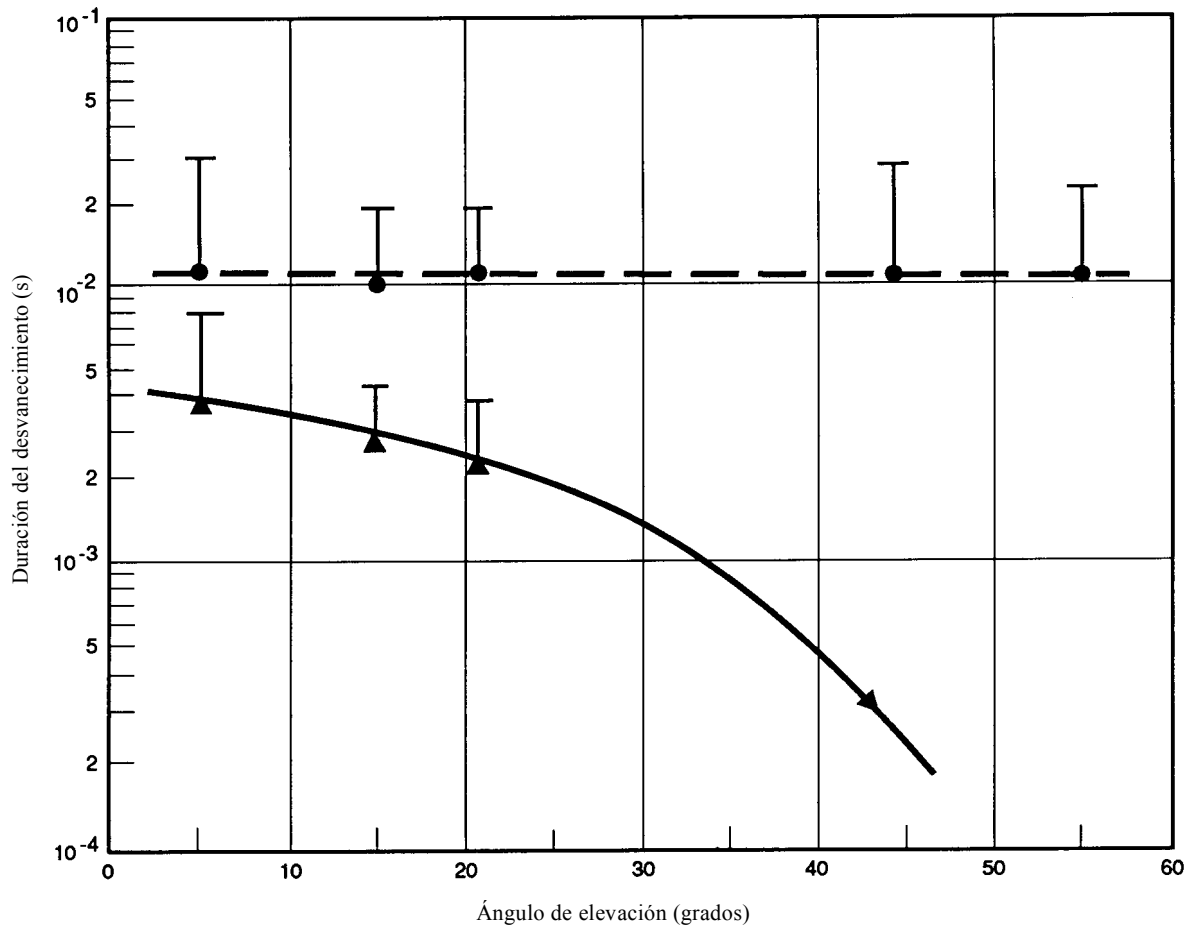
- O : Mediciones con polarización horizontal
- Δ : Mediciones con polarización vertical
- Curvas A : Predicción con polarización horizontal, mar en calma
- B : Predicción con polarización horizontal, mar gruesa
- C : Predicción con polarización vertical, mar en calma
- D : Predicción con polarización vertical, mar gruesa

D03

Se han reunido datos de propagación por trayectos múltiples en una serie de mediciones de sistemas móviles aeronáuticos por satélite sobre el Océano Atlántico y partes de Europa. En la fig. 4 se muestran los valores medios y las desviaciones típicas de la duración de los desvanecimientos en 1,6 GHz en función del ángulo de elevación de esos vuelos. (Para recoger estos datos se utilizó una antena de dipolos cruzados con una ganancia de 3,5 dBi. La aeronave volaba a una altitud nominal de 10 km y a una velocidad nominal respecto al suelo de 700 km/h.)

FIGURA 4

Duración del desvanecimiento en función del ángulo de elevación para polarización circular a 1,6 GHz (ganancia de antena = 3,5 dBi), datos recogidos sobre el Océano Atlántico y Europa occidental



- : Media con un umbral de 0 dB
- ▲: Media con un umbral de -5 dB
- T: Desviación típica añadida

D04

#### 4.4 Mediciones de los efectos de la propagación por trayectos múltiples debida a reflexión en tierra

El cuadro 2 muestra los parámetros medidos de la propagación por trayectos múltiples durante vuelos sobre tierra; las definiciones de los parámetros son las mismas que para el cuadro 1. Las señales propagadas por trayectos múltiples en tierra son sumamente variables. No se pudo establecer una dependencia sistemática con respecto al ángulo de elevación, quizá porque la naturaleza del suelo era muy variable (los datos se recogieron sobre suelo húmedo y seco, pantanos, nieve seca y húmeda, hielo, lagos, etc.).

*Nota 1* – Proporción de errores irreducible; el desvanecimiento debido a la propagación por trayectos múltiples en canales móviles produce una proporción de errores irreducible, en el sentido de que su valor no disminuye al aumentar la potencia de la señal directa. Las simulaciones indican que la proporción de errores irreducible es mayor para un canal móvil aeronáutico por satélite que para un canal móvil terrestre por satélite.



CUADRO 2

**Parámetros de la propagación por trayectos múltiples  
según las mediciones en tierra**

Parámetro	Gama medida	Valor típico
Potencia normalizada de la propagación por trayectos múltiples (dB)		
Polarización horizontal	-18 a 2	-9
Polarización vertical	-21 a -3	-13
Dispersión del retardo <sup>(1)</sup> (μs)		
Valor entre puntos a 3 dB	0,1-1,2	0,3
Valor entre puntos a 10 dB	0,2-3	1,2
Anchura de banda de correlación <sup>(2)</sup> (kHz)		
Valor entre puntos a 3 dB	150-3 000	600
Dispersión Doppler <sup>(1)</sup> (Hz)		
Valor entre puntos a 3 dB	20-140	60
Valor entre puntos a 10 dB	40-500	200
Tiempo de descorrelación <sup>(2)</sup> (ms)		
Valor entre puntos a 3 dB	1-10	4

(1) Bilateral.

(2) Unilateral.