

## RECOMENDACIÓN UIT-R P.833-5

**Atenuación debida a la vegetación**

(Cuestión UIT-R 202/3)

(1992-1994-1999-2001-2003-2005)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

a) que la atenuación debida a la vegetación puede ser importante en diversas aplicaciones prácticas,

*recomienda*

**1** que se utilice el contenido del Anexo 1 para evaluar la atenuación debida a la vegetación en frecuencias comprendidas entre 30 MHz y 60 GHz.

**Anexo 1****1 Introducción**

En ciertos casos, la atenuación debida a la vegetación puede ser importante, tanto para los sistemas terrenales como para los sistemas Tierra-espacio. Pero la gran diversidad de condiciones y tipos de follaje dificultan la elaboración de un procedimiento de predicción general. Además, existe una falta de datos experimentales convenientemente verificados.

Los modelos que se describen a continuación se aplican a gamas de frecuencias específicas y a diferentes tipos de geometría de los trayectos.

**2 Trayecto terrenal con un terminal en zona boscosa**

Para un trayecto radioeléctrico terrenal, uno de cuyos terminales está situado en un bosque o en una zona similar de vegetación extensa, la pérdida adicional debida a la vegetación puede describirse en base a dos parámetros:

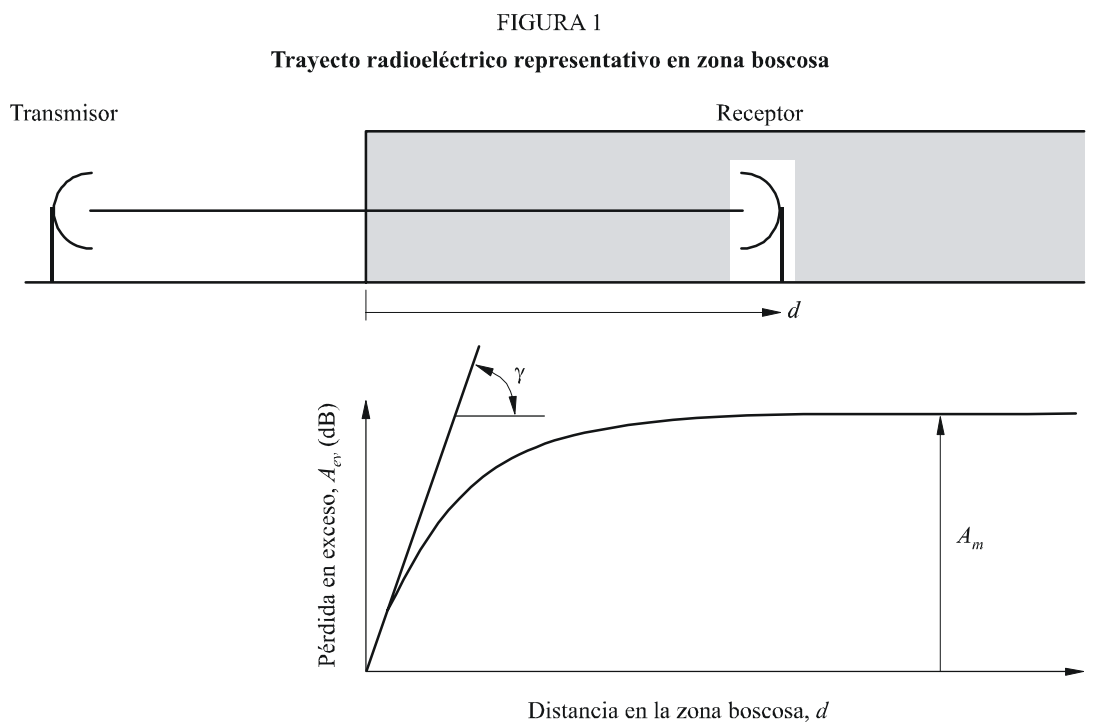
- el índice de atenuación específica (dB/m) debida fundamentalmente a la dispersión de energía fuera del trayecto radioeléctrico, que se mediría en un trayecto muy corto;
- la atenuación adicional total máxima debida a la vegetación en un trayecto radioeléctrico (dB) limitada por el efecto de otros mecanismos, entre ellos, la propagación de ondas de superficie por encima del medio vegetal y la dispersión dentro del mismo.

En la Fig. 1, el transmisor está fuera de la zona boscosa y el receptor está a una cierta distancia,  $d$ , dentro de la misma. La atenuación excesiva,  $A_{ev}$ , debida a la presencia de la vegetación viene dada por:

$$A_{ev} = A_m [ 1 - \exp (- d \gamma / A_m) ] \quad (1)$$

siendo:

- $d$ : longitud del trayecto dentro de la zona boscosa (m)
- $\gamma$ : atenuación específica para trayectos en vegetación muy cortos (dB/m)
- $A_m$ : atenuación máxima cuando un terminal está dentro de una zona de vegetación de un tipo y profundidad específicos (dB).



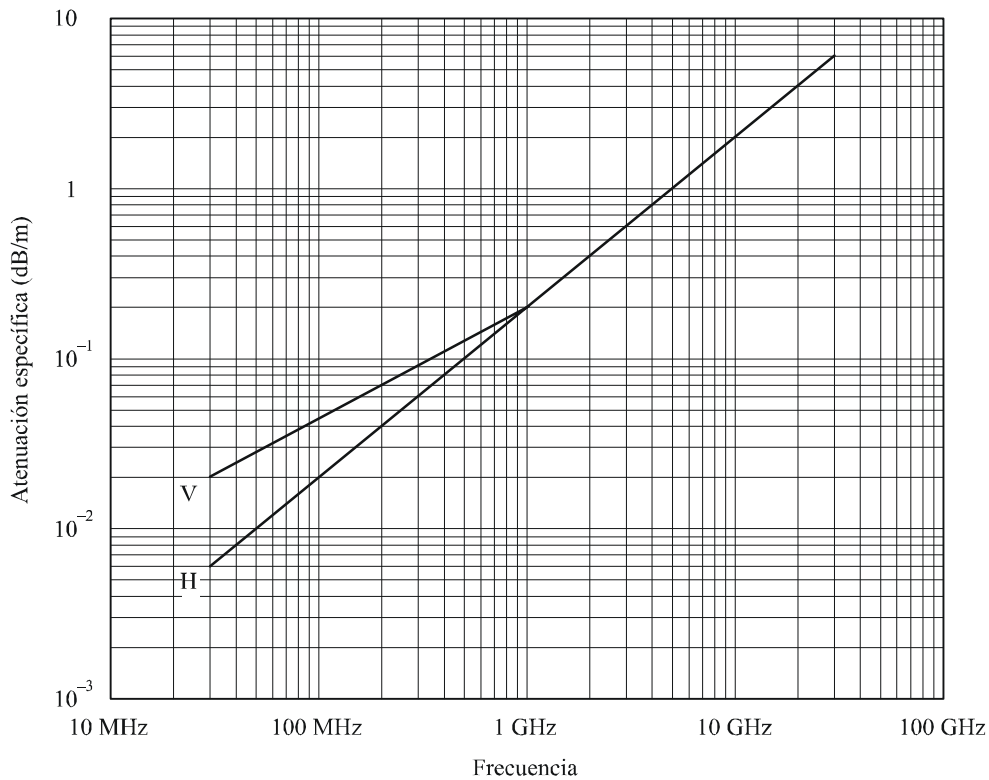
Es importante observar que en la definición de exceso de atenuación,  $A_{ev}$ , se incluye el exceso debido a todos los demás mecanismos, y no sólo la pérdida en espacio abierto. Por consiguiente, si la geometría del trayecto radioeléctrico de la Fig. 1 fuese de tal forma que el despejamiento total de Fresnel del terreno no existiera,  $A_{ev}$  sería el exceso de atenuación producido tanto en espacio abierto como por la pérdida por difracción. De igual forma, si la frecuencia fuera suficientemente alta como para que la absorción gaseosa resultara significativa,  $A_{ev}$  sería también el exceso producido por la absorción gaseosa.

Debe observarse asimismo que,  $A_m$ , es equivalente a la pérdida por ocupación del suelo observada frecuentemente en el caso de terminales obstruidos por alguna forma de cobertura del terreno u ocupación del suelo.

El valor de la atenuación específica debida a la vegetación,  $\gamma$  dB/m, depende de la especie y la densidad de dicha vegetación. En la Fig. 2 se proporcionan valores aproximados en función de la frecuencia.

En la Fig. 2 se muestran valores típicos de atenuación específica obtenidos a partir de diferentes mediciones en la gama de frecuencias que va de 30 MHz a 30 GHz aproximadamente en zona boscosa. Por debajo de 1 GHz las señales polarizadas verticalmente tienen tendencia a experimentar una atenuación superior a la que experimentan las polarizadas horizontalmente, aunque esto se debe a la dispersión causada por los troncos de los árboles.

FIGURA 2  
Atenuación específica en zona boscosa



V: Polarización vertical  
H: Polarización horizontal

0833-02

Se hace hincapié en que la atenuación debida a la vegetación varía ampliamente debido a la naturaleza irregular del medio y a la gran variedad de especies, densidades y condiciones de humedad que se da en la práctica. Los valores que se muestran en la Fig. 2 deben considerarse únicamente como ejemplos.

A frecuencias del orden de 1 GHz, la atenuación específica en zonas de árboles con hojas es normalmente un 20% superior (dB/m) que en las zonas de árboles sin hojas. También puede haber variaciones de la atenuación debido al movimiento del follaje, por ejemplo a causa del viento.

El valor de la atenuación máxima,  $A_m$ , limitada por la dispersión de la onda de superficie, depende del tipo y la densidad de la vegetación, así como del diagrama de radiación de la antena del terminal que se encuentra dentro de la vegetación y de la distancia en vertical entre la antena y el punto más alto de la vegetación.

La dependencia de la frecuencia de  $A_m$  (dB):

$$A_m = A_1 f^\alpha \quad (2)$$

donde  $f$  es la frecuencia (MHz), se ha obtenido mediante diversos experimentos:

- Mediciones en la gama de frecuencias 900-1 800 MHz realizadas en un parque con árboles tropicales en Río de Janeiro (Brasil) con una altura media de los árboles de 15 m. Se obtuvieron valores de  $A_1 = 0,18$  dB y  $\alpha = 0,752$ . La altura de la antena receptora era de 2,4 m.
- Mediciones en la gama de frecuencias 900-2 200 MHz realizadas en un bosque cerca de Mulhouse (Francia) en trayectos de longitudes diferentes, desde unos pocos cientos de metros hasta 6 km con diversos tipos de árboles de altura media de 15 m. Se obtuvieron valores de  $A_1 = 1,15$  dB y  $\alpha = 0,43$ . La antena receptora en el bosque era un monopolo de  $\lambda/4$  montada sobre un vehículo a una altura de 1,6 m y la antena transmisora era un dipolo de  $\lambda/2$  con una altura de 25 m. La desviación típica de las mediciones fue de 8,7 dB. Se observaron unas variaciones según la estación del año de 2 dB a 900 MHz y de 8,5 dB a 2 200 MHz.

### 3 Obstrucción por un solo obstáculo vegetal

#### 3.1 A 1 GHz o por debajo de 1 GHz

La ecuación (1) no se aplica a trayectos radioeléctricos obstruidos por un solo obstáculo vegetal cuando ambos terminales están fuera del medio vegetal, como por ejemplo un trayecto que pase por la copa de un árbol aislado. En ondas métricas y decimétricas, cuando la atenuación específica tiene valores relativamente bajos, y en especial cuando la parte vegetal del trayecto radioeléctrico es relativamente corta, esta situación puede simularse de forma aproximada en términos de atenuación específica y de límite máximo de pérdida total en exceso:

$$A_{et} = d \gamma \quad (3)$$

donde:

$d$ : longitud del trayecto a través de la copa del árbol (m)

$\gamma$ : atenuación específica para trayectos en vegetación muy cortos (dB/m)

y  $A_{et} \leq$  el exceso de atenuación más bajo para otros trayectos (dB).

La restricción del valor máximo para  $A_{et}$  es necesaria porque si la atenuación específica es suficientemente alta, existirá un trayecto con menor pérdida que rodee la zona de vegetación. Puede calcularse un valor aproximado de atenuación mínima para otros trayectos, como si la copa del árbol fuera una delgada pantalla de difracción de anchura finita utilizando el método de la Recomendación UIT-R P.526.

Se hace hincapié en que la ecuación (3), con el límite máximo de  $A_{et}$ , es únicamente una aproximación. En general, tenderá a sobrestimar el exceso de pérdida debido a la vegetación. Por consiguiente, es la más útil para una evaluación aproximada de la pérdida adicional a la hora de planificar un determinado servicio. Si se utiliza para una señal no deseada, la fórmula puede dar lugar a una subestimación significativa de la interferencia resultante.

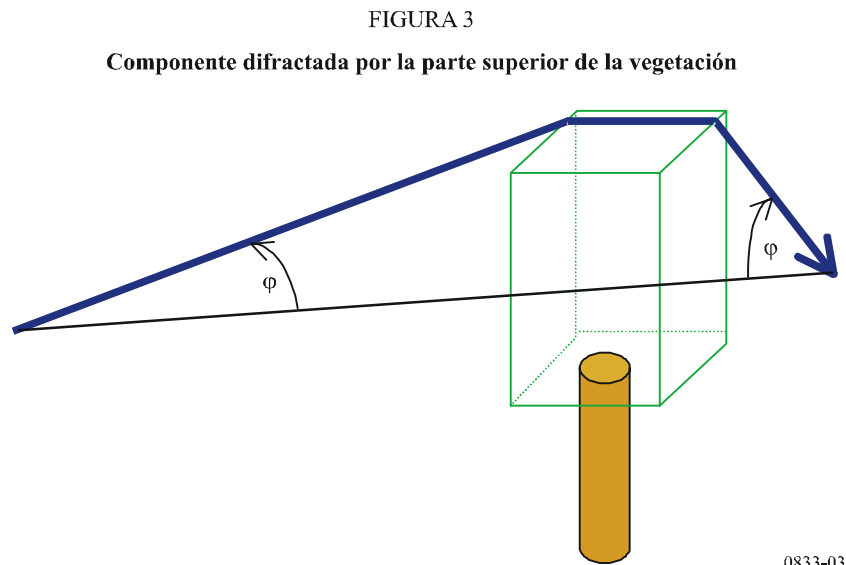
### 3.2 Por encima de 1 GHz

Para realizar una estimación del campo total, se calculan en primer lugar las componentes de difracción, las reflejadas en el suelo y las de dispersión por la vegetación y a continuación se combinan.

Las componentes difractadas se componen de aquellas que lo son por la parte superior de la vegetación y las que se difractan por los lados de dicha vegetación. Estas componentes y la componente reflejada en el suelo se determinan aplicando las Recomendaciones UIT-R. La componente que atraviesa la vegetación o dispersada por la misma se calcula utilizando un modelo basado en la teoría de transferencia de energía radiada (TER).

#### 3.2.1 Cálculo de la componente difractada por la parte superior de la vegetación

Las pérdidas de difracción,  $L_{top}$ , experimentadas por el trayecto de la señal difractado por la vegetación, pueden considerarse como una difracción en arista en filo de cuchillo aislada doble con la geometría representada en la Fig. 3.



Se calcula de la forma siguiente:

$$L_{top} = L_{top\_diff} + G_{Tx}(\varphi) + G_{Rx}(\varphi) \quad (4)$$

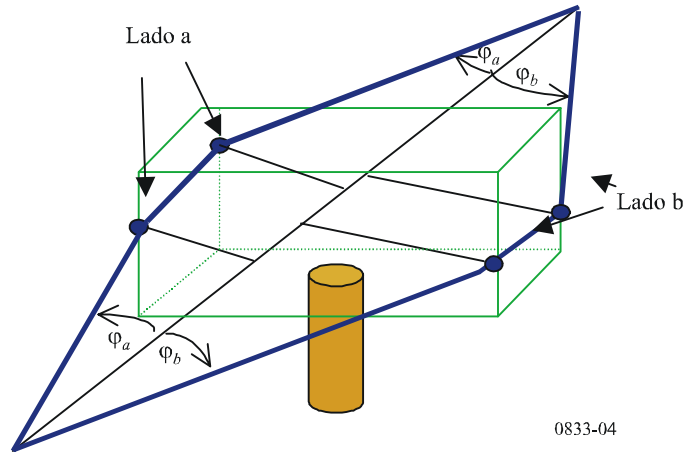
donde  $G_{Tx}(\varphi)$  y  $G_{Rx}(\varphi)$  son las pérdidas debidas a los ángulos de la onda difractada emitida por la antena transmisora y que llega a la antena receptora, respectivamente.  $L_{top\_diff}$  son las pérdidas de difracción total calculadas utilizando el método de la Recomendación UIT-R P.526 para bordes doblemente aislados.

### 3.2.2 Cálculo de la componente difractada lateral

Las pérdidas de difracción,  $L_{sidea}$  y  $L_{sideb}$ , experimentadas por la señal difractada en torno a la vegetación pueden tratarse nuevamente como una difracción en arista en filo de cuchillo aislada doble, con la geometría definida en la Fig. 4.

FIGURA 4

Componentes difractados en torno a la vegetación



0833-04

Las pérdidas se calculan utilizando las ecuaciones (5) y (6).

$$L_{sidea} = L_{diff\_sidea} + G_{Tx}(\varphi_a) + G_{Rx}(\varphi_a) \quad (5)$$

y

$$L_{sideb} = L_{diff\_sideb} + G_{Tx}(\varphi_b) + G_{Rx}(\varphi_b) \quad (6)$$

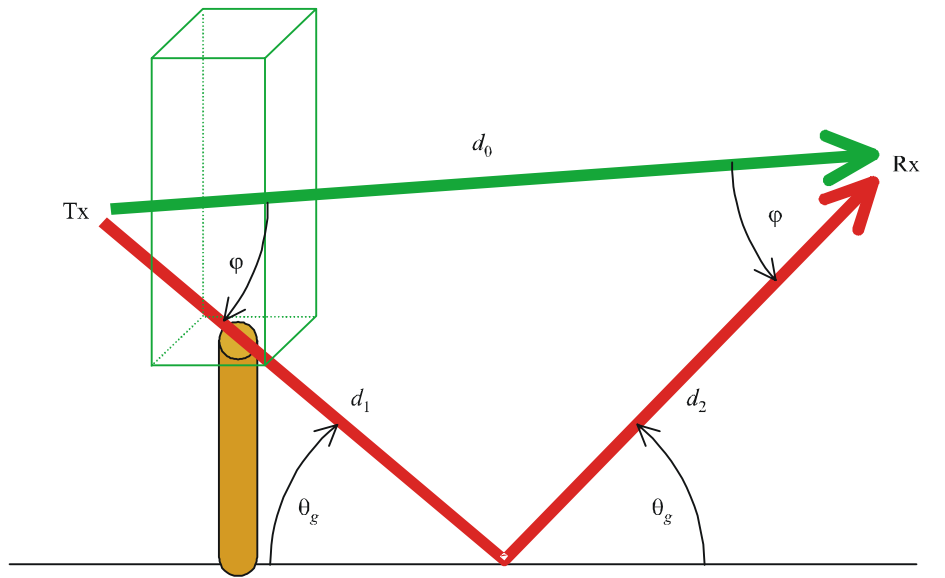
donde  $G_{Tx}(\varphi_{a,b})$  y  $G_{Rx}(\varphi_{a,b})$  son las pérdidas debidas a los ángulos de la onda difractada emitida por la antena transmisora y recibida por la antena receptora, para los lados a y b, respectivamente.  $L_{diff\_sidea}$  y  $L_{diff\_sideb}$  son las pérdidas de difracción totales en torno a cada lado y se han determinado utilizando el método de la Recomendación UIT-R P.526 para dos aristas aisladas.

### 3.2.3 Cálculo de la componente reflejada en el suelo

Se supone que el trayecto es lo suficientemente corto como para que la onda reflejada en el suelo pueda modelarse mediante la geometría ilustrada en la Fig. 5.

Para calcular las pérdidas experimentadas en el receptor por la onda reflejada en el suelo, puede determinarse el coeficiente de reflexión,  $R_0$ , de la señal reflejada en el suelo con un determinado ángulo rasante,  $\theta_g$ . Se trata de un método normalizado que se describe en la Recomendación UIT-R P.1238. Los valores de permitividad y conductancia se obtienen de la Recomendación UIT-R P.527.

FIGURA 5  
Componente reflejada en el suelo



0833-05

Las pérdidas experimentadas por la onda reflejada en el suelo,  $L_{ground}$ , vienen dadas por la expresión:

$$L_{ground} = 20 \log_{10} \left( \frac{d_1 + d_2}{d_0} \right) - 20 \log_{10}(R_0) + G_{Tx}(\varphi) + G_{Rx}(\varphi) \quad (7)$$

donde  $G_{Rx}(\varphi)$  y  $G_{Tx}(\varphi)$  son las pérdidas debidas a los ángulos de la onda reflejada emitida por la antena transmisora y recibida por la antena receptora, respectivamente.

### 3.2.4 Cálculo de la componente que pasa a través de la vegetación o dispersada

Para realizar predicciones precisas de la atenuación en exceso debida a la vegetación el usuario necesita partir de los siguientes parámetros para aplicarlos a la ecuación TER (ecuación (8)):

- $\alpha$ : relación entre la potencia dispersada hacia adelante y la potencia total
- $\beta$ : anchura de haz de la función de fase (grados)
- $\sigma_{\tau}$ : coeficiente combinado de absorción y dispersión
- $W$ : albedo
- $\Delta\gamma_R$ : anchura de haz de la antena de recepción (grados)
- $d$ : distancia a la vegetación (m).

Dados los siguientes parámetros de partida: frecuencia (GHz), tamaño de hoja típico de la vegetación que va a modelarse e índice de la superficie de hoja (LAI) de las tres especies, pueden obtenerse los valores más próximos de  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $W$  y  $\sigma_{\tau}$  a partir de los cuadros de los parámetros RET (Cuadros 1-4). Si no se dispone de estos parámetros se toma la aproximación más cercana a la especie indicada en los Cuadros.

Estos cuatro parámetros que aparecen en los Cuadros, junto con la frecuencia y  $\Delta\gamma_{3\text{dB}}$ , la anchura de haz a 3 dB de la antena receptora, se utilizan en el modelo RET.

La atenuación debida a la dispersión a través de la vegetación,  $L_{scat}$ , viene dada por:

$$L_{disp} = -10 \log_{10} \left( \begin{aligned} & e^{-\tau} + \frac{\Delta\gamma_R^2}{4} \cdot \{ [e^{-\hat{\tau}} - e^{-\tau}] \cdot \bar{q}_M + e^{-\tau} \cdot \sum_{m=1}^M \frac{1}{m!} (\alpha W \tau)^m [\bar{q}_m - \bar{q}_M] \} \\ & + \frac{\Delta\gamma_R^2}{2} \cdot \{ -e^{-\tau} \cdot \frac{1}{P_N} + \sum_{k=\frac{N+1}{2}}^N [A_k e^{-\frac{\hat{\tau}}{s_k}} \cdot \sum_{n=0}^N \frac{1}{1 - \frac{\mu_n}{s_k}}] \} \end{aligned} \right) \quad (8)$$

donde:

$\Delta\gamma_R = 0,6 \cdot \Delta\gamma_{3\text{dB}}$  : anchura de haz a 3 dB de la antena receptora

$m$  : el orden del primer término  $I_1$  no cambiará significativamente para  $m > 10$  (por consiguiente en la mayoría de los casos  $M = 10$ )

$\tau = (\sigma_a + \sigma_s) \cdot z$  : densidad óptica  $\tau$  en función de la distancia  $z$

$$\bar{q}_m = \frac{4}{\Delta\gamma_R^2 + m\beta_S^2}$$

$$\beta_S = 0,6 \cdot \beta$$

$$\mu_n = -\cos\left(\frac{n\pi}{N}\right) \quad (9)$$

$$P_n = \text{sen}^2\left(\frac{\pi}{2N}\right)$$

$$\hat{\tau} = (1 - \alpha W)\tau$$

Los coeficientes de atenuación  $s_k$  se determinan mediante la ecuación característica:

$$\frac{\hat{W}}{2} \cdot \sum_{n=0}^N \frac{P_n}{1 - \frac{\mu_n}{s}} = 1$$

donde:

$$P_n = \text{sen}\left(\frac{\pi}{N}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{N}\right) \text{ y } \hat{W} = \frac{(1 - \alpha)W}{1 - \alpha W} \quad (10)$$



siendo  $N$  un número entero impar elegido como un compromiso teniendo en cuenta el tiempo de cálculo. Valores elevados de  $N$  aumentarán enormemente este tiempo de cálculo. Se ha considerado que unos valores razonables serían  $11 \leq N \leq 21$ . El término de la izquierda de la ecuación (10) será igual a 1 para valores de  $s$ , que representan las raíces de esta ecuación. Se obtendrán  $N + 1$  raíces, para las que se aplica la siguiente expresión:

$$S_{0, \dots, \frac{N}{2}} = -S_{N, \dots, \frac{N+1}{2}}$$

Los factores de amplitud,  $A_k$ , se determinan mediante un sistema de ecuaciones lineales que viene dado por:

$$\sum_{k=\frac{N+1}{2}}^N \frac{A_k}{1 - \frac{\mu_n}{s_k}} = \frac{\delta_n}{P_N} \quad \text{para} \quad n = \frac{N+1}{2} \dots N \quad (11)$$

donde:

$$\delta_n = 0 \quad \text{para} \quad n \neq N$$

y

$$\delta_n = 1 \quad \text{para} \quad n = N$$

### 3.2.5 Combinación de los componentes individuales

Las pérdidas totales,  $L_{total}$ , experimentadas por una señal que se propaga a través de árboles vienen dadas por la combinación de los términos de pérdidas:

$$L_{total} = -10 \log_{10} \left\{ 10^{\left(\frac{-L_{sidea}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{sideb}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{top}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{ground}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{scat}}{10}\right)} \right\} \quad (12)$$

## 4 Despolarización

Las mediciones previas a 38 GHz sugieren que la despolarización a través de la vegetación puede muy bien ser importante, es decir, que la señal de polarización cruzada transmitida puede ser similar a la señal copolar a través de la vegetación. Sin embargo, para las profundidades mayores de la vegetación que se requieren para que esto ocurra, la atenuación sería tan grande que ambos componentes, el copolar y el de polarización cruzada, quedarían por debajo de la gama dinámica de la antena receptora.

CUADRO 1

Valores ajustados de  $\alpha$  según la frecuencia/especies

	<b>Castaño de indias</b>	<b>Arce</b>	<b>Arce</b>	<b>Plátano</b>	<b>Plátano</b>	<b>Tilo común</b>	<b>Tilo común</b>	<b>Sicomoro</b>	<b>Sicomoro</b>
	<b>Con hojas</b>	<b>Con hojas</b>	<b>Sin hojas</b>	<b>Con hojas</b>	<b>Sin hojas</b>	<b>Con hojas</b>	<b>Sin hojas</b>	<b>Con hojas</b>	<b>Sin hojas</b>
LAI		1,691		1,93		1,475		1,631	0,483
Tamaño de la hoja	0,300	0,15		0,250		0,100		0,15	
Frecuencia (GHz):	<b><math>\alpha</math></b>								
1,3	0,9	0,95	0,9	0,95	0,9	0,9	0,95		0,95
2	0,75		0,95	0,95			0,95		0,95
2,2			0,95	0,5					
11	0,85	0,9		0,7	0,95	0,95	0,95		0,95
37				0,95					
61,5		0,8		0,25				0,9	

CUADRO 2

Valores ajustados de  $\beta$  según la frecuencia/especies

	<b>Castaño de indias</b>	<b>Arce</b>	<b>Arce</b>	<b>Plátano</b>	<b>Plátano</b>	<b>Tilo común</b>	<b>Tilo común</b>	<b>Sicomoro</b>	<b>Sicomoro</b>
	<b>Con hojas</b>	<b>Con hojas</b>	<b>Sin hojas</b>	<b>Con hojas</b>	<b>Sin hojas</b>	<b>Con hojas</b>	<b>Sin hojas</b>	<b>Con hojas</b>	<b>Sin hojas</b>
LAI		1,691		1,93		1,475		1,631	0,483
Tamaño de la hoja	0,300	0,15		0,250		0,100		0,15	
Frecuencia (GHz):	<b><math>\beta</math></b>								
1,3	21	14	43	42	16	76	50		70
2	80		31	49			60		62
2,2			25	13					
11	69	58		100	19	78	48		44
37				18					
61,5		48		2				59	

CUADRO 3

## Valores ajustados del albedo según la frecuencia/especies

	<b>Castaño de indias</b>	<b>Arce</b>	<b>Arce</b>	<b>Plátano</b>	<b>Plátano</b>	<b>Tilo común</b>	<b>Tilo común</b>	<b>Sicomoro</b>	<b>Sicomoro</b>
	<b>Con hojas</b>	<b>Con hojas</b>	<b>Sin hojas</b>	<b>Con hojas</b>	<b>Sin hojas</b>	<b>Con hojas</b>	<b>Sin hojas</b>	<b>Con hojas</b>	<b>Sin hojas</b>
LAI		1,691		1,93		1,475		1,631	0,483
Tamaño de la hoja	0,300	0,15		0,250		0,100		0,15	
Frecuencia (GHz):					<i>W</i>				
1,3	0,25	0,95	0,25	0,95	0,95	0,95	0,95		0,85
2	0,55		0,95	0,95			0,95		0,95
2,2			0,95	0,45					
11	0,95	0,95		0,95	0,95	0,75	0,95		0,95
37				0,95					
61,5		0,8		0,5				0,9	

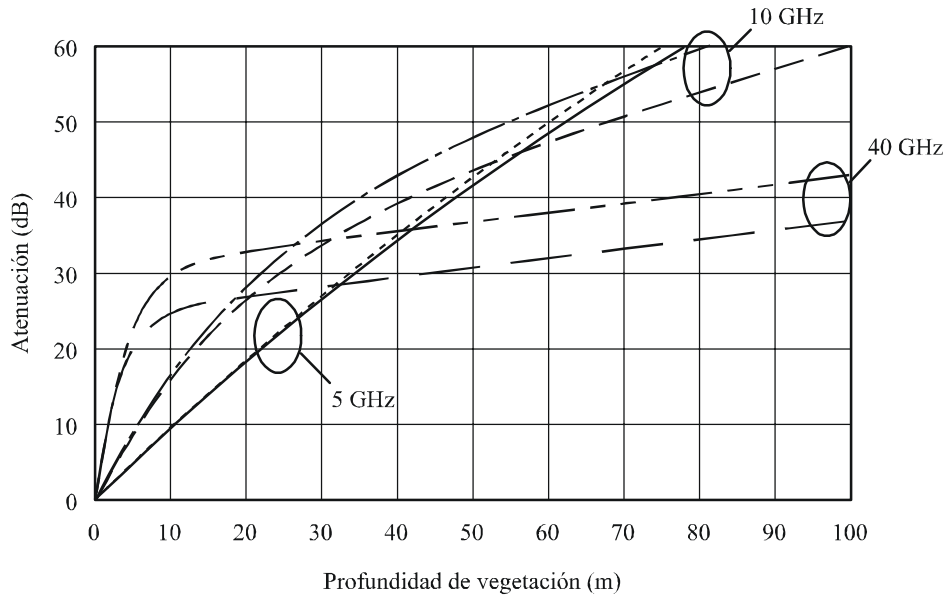
CUADRO 4

Valores ajustados de  $\sigma_r$  según la frecuencia/especies

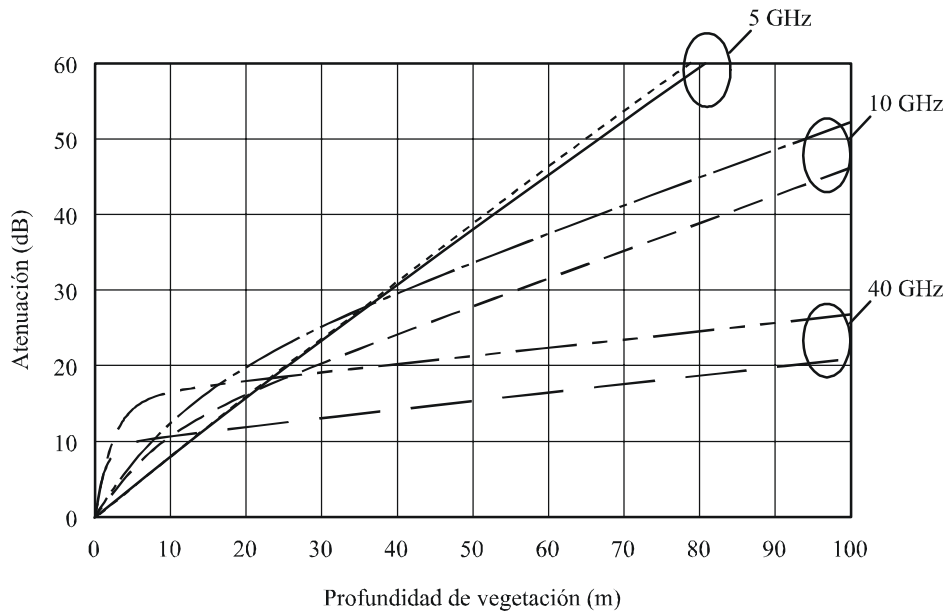
	<b>Castaño de indias</b>	<b>Arce</b>	<b>Arce</b>	<b>Plátano</b>	<b>Plátano</b>	<b>Tilo común</b>	<b>Tilo común</b>	<b>Sicomoro</b>	<b>Sicomoro</b>
	<b>Con hojas</b>	<b>Con hojas</b>	<b>Sin hojas</b>	<b>Con hojas</b>	<b>Sin hojas</b>	<b>Con hojas</b>	<b>Sin hojas</b>	<b>Con hojas</b>	<b>Sin hojas</b>
LAI		1,691		1,93		1,475		1,631	0,483
Tamaño de la hoja	0,300	0,15		0,250		0,100		0,15	
Frecuencia (GHz):					$\sigma_r$				
1,3	0,772	0,241	0,139	0,147	0,221	0,22	0,591		0,36
2	0,091		0,176	0,203			0,692		0,249
2,2			0,377	0,244					
11	0,124	0,321		0,75	0,459	0,56	0,757		0,179
37				0,441					
61,5		0,567		0,498				0,647	

FIGURA 6

Atenuación para un área de iluminación de  $0,5 \text{ m}^2$   $2 \text{ m}^2$ , a) con hojas, b) sin hojas)\*



a)



b)

- |         |                           |       |                           |
|---------|---------------------------|-------|---------------------------|
| -----   | 5 THZ, $0,5 \text{ m}^2$  | — — — | 10 GHz, $2 \text{ m}^2$   |
| ————    | 5 GHz, $2 \text{ m}^2$    | — - - | 40 GHz, $0,5 \text{ m}^2$ |
| — - - - | 10 GHz, $0,5 \text{ m}^2$ | — — — | 40 GHz, $2 \text{ m}^2$   |

\* Las curvas representan las pérdidas en exceso que experimenta la señal al pasar a través de la vegetación. En la práctica, una vez que la señal atraviesa la vegetación recibe contribuciones debidas a la propagación tanto a través de la vegetación como de la difracción que se produce en los alrededores. Así, el mecanismo de propagación dominante limitará las pérdidas totales debidas a la vegetación.

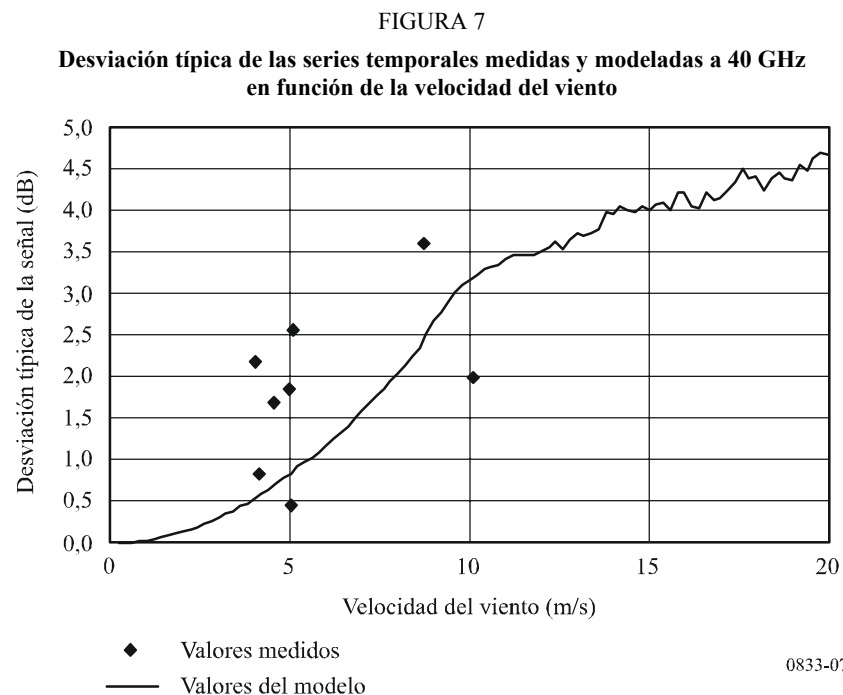
## 5 Efectos dinámicos

Se ha observado que cuando un enlace atraviesa vegetación la amplitud de la señal recibida varía rápidamente cuando la vegetación se mueve. La causa principal del movimiento se debe al viento y mediciones realizadas a 38 GHz y 42 GHz han demostrado que hay una fuerte correlación entre la tasa de fluctuación de la amplitud y la velocidad del viento.

Al considerar los efectos de la vegetación resulta evidente que el entorno no permanecerá estático. Un emplazamiento de receptor puede tener uno o más árboles a lo largo del trayecto de la señal que no proporcionan una atenuación media suficiente para que el nivel de la señal recibida caiga por debajo del margen del sistema. Sin embargo, se ha observado que cuando las hojas de los árboles se mueven, el nivel de la señal varía dinámicamente a lo largo de un amplio margen, lo que puede hacer inviable la prestación de un servicio. Se han efectuado diversas mediciones del nivel de una señal que atraviesa árboles en función del tiempo, y dichas mediciones han mostrado una reducción media del nivel de la señal de unos 20 dB por árbol. Se ha encontrado una importante variabilidad de la señal con frecuentes descensos de hasta 50 dB de atenuación y una duración en torno a los 10 ms.

Cabe señalar que la estructura de nulo profundo observada en las mediciones de series temporales sólo puede producirse por la interacción de un cierto número de componentes de dispersión con la vegetación. Para simular este mecanismo de propagación, se ha calculado el campo suma obtenido a partir de un cierto número de fuentes de dispersión ubicadas aleatoriamente a lo largo de una línea tangencial al trayecto. Para dar a la señal resultante una variabilidad temporal adecuada, se modificó sinusoidalmente la posición de cada elemento de dispersión a fin de simular el movimiento de las ramas de los árboles con el viento. La frecuencia y amplitud de la variabilidad de la posición aumentó al incrementarse la velocidad del viento. Este modelo presentó una similitud razonable con las observaciones.

En la Fig. 7 se presentan las series temporales modeladas y las desviaciones típicas de la amplitud de la señal para diversas velocidades del viento, entre 0 y 20 m/s, y su comparación con los datos medidos.



Para una aproximación lineal sencilla la desviación típica  $\sigma$  se modela de la forma siguiente:

$$\sigma = v/4 \quad \text{dB} \quad (13)$$

donde  $v$  es la velocidad del viento (m/s).

Cabe señalar que a pesar del hecho de que este tipo de modelo muestra una dependencia con la frecuencia inherente, las diferencias de longitud de trayecto a través de los árboles son pequeñas y el desvanecimiento a lo largo de una anchura de banda típica de 40 MHz aparecerá plano. El desvanecimiento rápido se debe a la variabilidad temporal del medio.

En el Cuadro 5 se presentan datos sobre la media y la desviación típica de la atenuación medida a 38 GHz para tres tipos de árboles en condiciones de viento en calma y de viento intenso.

CUADRO 5

**Dinámica del desvanecimiento en la vegetación medida a 38 GHz**

Tipo de árbol		Arbusto de escaramujo, (diámetro de 2 m)	Manzano, (diámetro de 2,8 m)	Pino, (diámetro de 1,5 m)
Sin viento	Pérdidas medias (dB)	8,6	17,4	7,7
	Típicas (dB)	2,0	2,8	2,2
Viento intenso	Pérdidas medias (dB)	11,7	17,8	12,1
	Típicas (dB)	4,4	4,2	4,3