

# CAPÍTULO 2: MODELOS DE ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN RADIOELÉCTRICA

## 2.1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de análisis para la propagación radioeléctrica de las ondas que se presentan aquí nos servirán para entender los mecanismos y las consideraciones necesarias para el diseño de los radioenlaces comprendidos en la banda de VHF y UHF, como es el caso de los radioenlaces de la Telefonía Rural.

## 2.2. CONCEPTO DE PÉRDIDA EN EL ESPACIO LIBRE [8a]

El frente de la onda de energía electromagnética radiada se propaga en la dirección a donde enfoca el reflector como un frente de onda de expansión constante. Esta expansión se efectúa fundamentalmente siguiendo la conocida ley de radiación del cuadrado inverso. Las pérdidas en el espacio libre (FSL) son el resultado de esta expansión del frente de onda y su valor viene dado en la ecuación (2.1). En esta ecuación de FSL, se supone que el transmisor y el receptor son radiadores isótropos, lo que significa que el frente de onda se expande uniformemente en todas las direcciones y que no se han utilizado elementos direccionales. Para tener en cuenta la directividad de la antena, se ha añadido por separado las ganancias de las antenas del transmisor y del receptor.

La pérdida del trayecto en el espacio libre, se expresa mediante el siguiente modelo matemático:

$$FSL = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad dB \quad (2.1)$$

donde:

FSL: pérdidas básicas de transmisión en el espacio libre

d: distancia entre estaciones

$\lambda$ : longitud de onda del enlace

La ecuación 2.1 puede también escribirse en función de la frecuencia en vez de la longitud de onda. Recordando que la velocidad de las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz,  $c$ , y ésta se obtiene por el modelo matemático:  $c = \lambda f$ . en función de la frecuencia,  $f$ , y la longitud de onda  $\lambda$ , por lo tanto podemos escribir (2.1), en función de la frecuencia:

$$FSL = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\frac{c}{f}} \right) = 20 \log \left( \frac{4\pi}{c} d f \right) \quad (2.2)$$

La ecuación 2.2 se acostumbra expresar en unidades prácticas, es decir, la separación entre la antena transmisora y receptora se expresa generalmente en Kilómetros (Km) y la frecuencia de transmisión y recepción en Megahertz (MHz) o bien en Gigahertz (GHz). Ahora, si decidimos

expresar la frecuencia en Megahertz (MHz) y la distancia entre las antenas en Kilómetros (Km), entonces la  $d$ , se sustituye por  $10^3 d$  y la  $f$ , por  $10^6 f$ ; y si consideramos que la velocidad de la luz es:

$c = \text{velocidad de la luz} = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ , podemos escribir:

$$FSL = 20 \log \left[ \left( \frac{4\pi}{3 \times 10^8} \right) (10^3 d) (10^6 f) \right] = 20 \log \left( \frac{40\pi}{3} d f \right) \quad (2.3)$$

Aplicando la propiedad de los logaritmos a la ecuación (2.3), se tiene:

$$\log (a \cdot b \cdot c) = \log a + \log b + \log c$$

$$FSL = 20 \log \left( \frac{40\pi}{3} \right) + 20 \log d + 20 \log f$$

$$FSL = 32.44 + 20 \log d + 20 \log f \quad (2.4)$$

donde:

FSL: pérdidas básicas de transmisión en el espacio libre ( dB )

f: frecuencia de radiación en (MHz)

d: distancia entre el transmisor y el receptor (Km)

Se procede de igual manera para obtener un modelo matemático en donde la separación entre las antenas transmisora y receptora se exprese en Kilómetros y la frecuencia en Gigahertz, para obtener:

$$FSL = 92.44 + 20 \log d + 20 \log f \quad (2.5)$$

donde:

FSL: pérdidas básicas de transmisión en el espacio libre (dB)

f: frecuencia en (GHz)

d: distancia en (Km)

Las ecuaciones 2.4 y 2.5 las podemos expresar en forma gráfica para ver su comportamiento a diversas distancias y distintas frecuencias.

La figura 2.1 es la representación de las pérdidas de transmisión en el espacio libre para diversas distancias y distintas frecuencias, expresadas en GHz, tomando como referencia la gráfica superior hacia la gráfica inferior, sus frecuencias correspondientes son de 15, 10, 7, 6, 4, 2 GHz.

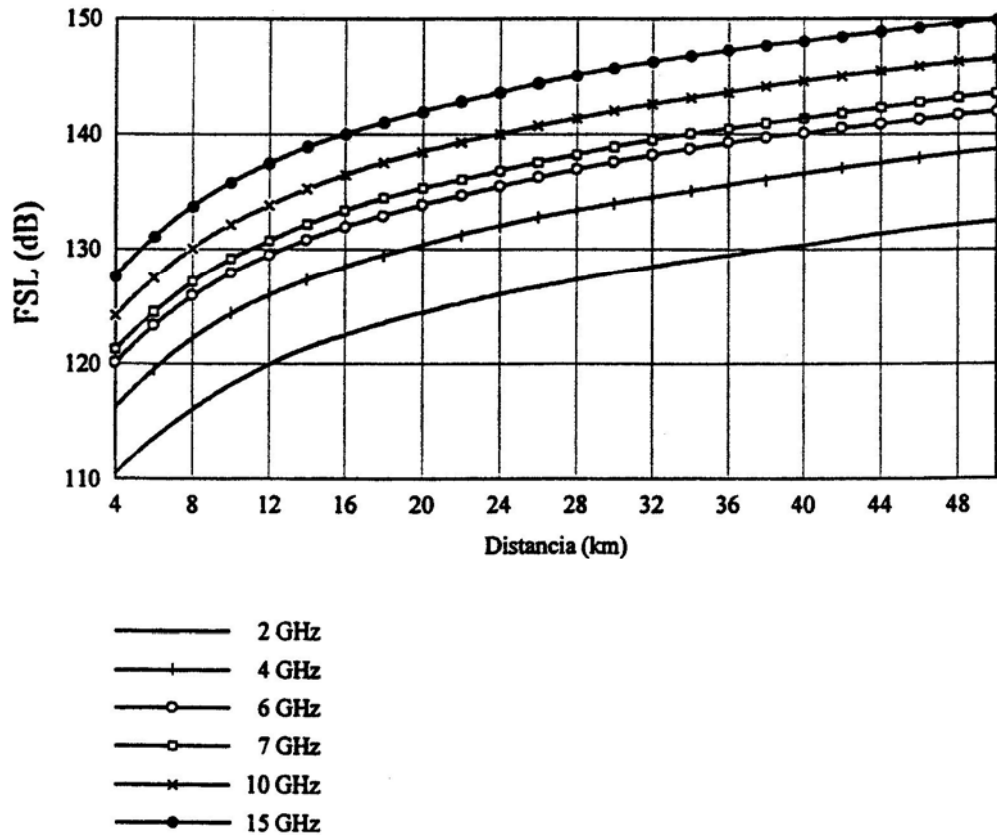


Figura 2.1. Pérdidas en el espacio libre en función de la distancia para varias frecuencias.

## 2.3. REFRACCIÓN DE LAS ONDAS [9] [10] [11]

### 2.3.1. GENERALIDADES

Las ondas que se propagan por las capas bajas de la atmósfera denominadas tropósfera, se ven sometidas a la refracción ocasionada por la falta de uniformidad de las capas atmosféricas, lo cual influye en la transmisión de frecuencias superiores a 30 MHz en radio enlaces terrestres y espaciales, manifestándose en una curvatura del trayecto real de propagación.

En los radio enlaces terrestres es importante la posición relativa del trayecto con respecto a los obstáculos, la curvatura puede ser contraproducente ya que puede ocasionar un desvanecimiento bajo ciertas condiciones, en otras puede provocar una propagación anómala con un alcance atípico que puede originar interferencias. En comunicaciones espaciales hay que tener en cuenta la curvatura para lograr la correcta puntería de la antena hacia el satélite.

### 2.3.2. RADIO EQUIVALENTE DE LA TIERRA. FACTOR $k$

Al momento de realizar un diseño de cobertura radio eléctrica, conviene trabajar con haces rectilíneos (curvatura cero). Esto puede conseguirse sustituyendo el radio de la tierra real,  $a$ , por otro equivalente, de radio  $ka$ , tal que podamos indicar el rayo por una línea recta:

$$a_{eq} = ka \quad (2.6)$$

de manera que se conserve la curvatura relativa, teniéndose:

$$\frac{1}{a_{eq}} = \frac{1}{ka} = \frac{1}{a} + \frac{dn}{dh} \quad (2.7)$$

donde:  $n$  = índice de refracción  
 $h$  = altura del haz

así: 
$$\frac{1}{k} = a \left( \frac{1}{a} + \frac{dn}{dh} \right) = 1 + a \frac{dn}{dh}$$

de donde el factor,  $k$  es:

$$k = \frac{1}{1 + a \frac{dn}{dh}} \quad (2.8)$$

Y si consideramos que  $a = 6.37 \cdot 10^3$  Km, es el radio aproximado de la superficie terrestre, y  $\frac{dn}{dh} = \frac{dn}{dh} \cdot 10^{-6} = \Delta N \cdot 10^{-6}$ , donde  $\Delta N$  es el gradiente de refractividad. Así, podemos expresar la ecuación 2.8 como:

$$\begin{aligned} k &= \frac{1}{1 + a \Delta N \cdot 10^{-6}} = \frac{1}{\frac{a \cdot 10^{-6}}{a \cdot 10^{-6}} (1 + a \Delta N \cdot 10^{-6})} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{a \cdot 10^{-6}} + \Delta N} = \frac{1}{\frac{6.37 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}}{6.37 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}} + \Delta N} = \\ &= \frac{157}{157 + \Delta N} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Por consiguiente, en una atmósfera sobre el valle de México, para el mes de agosto, vea el mapa de la figura 2.2 [12] ( $\Delta N = -50$ ) implica que,  $k = 1.467$ , y puede entonces sustituirse la trayectoria real curvilínea del eje del haz radio eléctrico, por otra rectilínea, si se multiplica el radio terrestre por el factor  $k$ , denominado como el **factor del radio efectivo de la Tierra**.

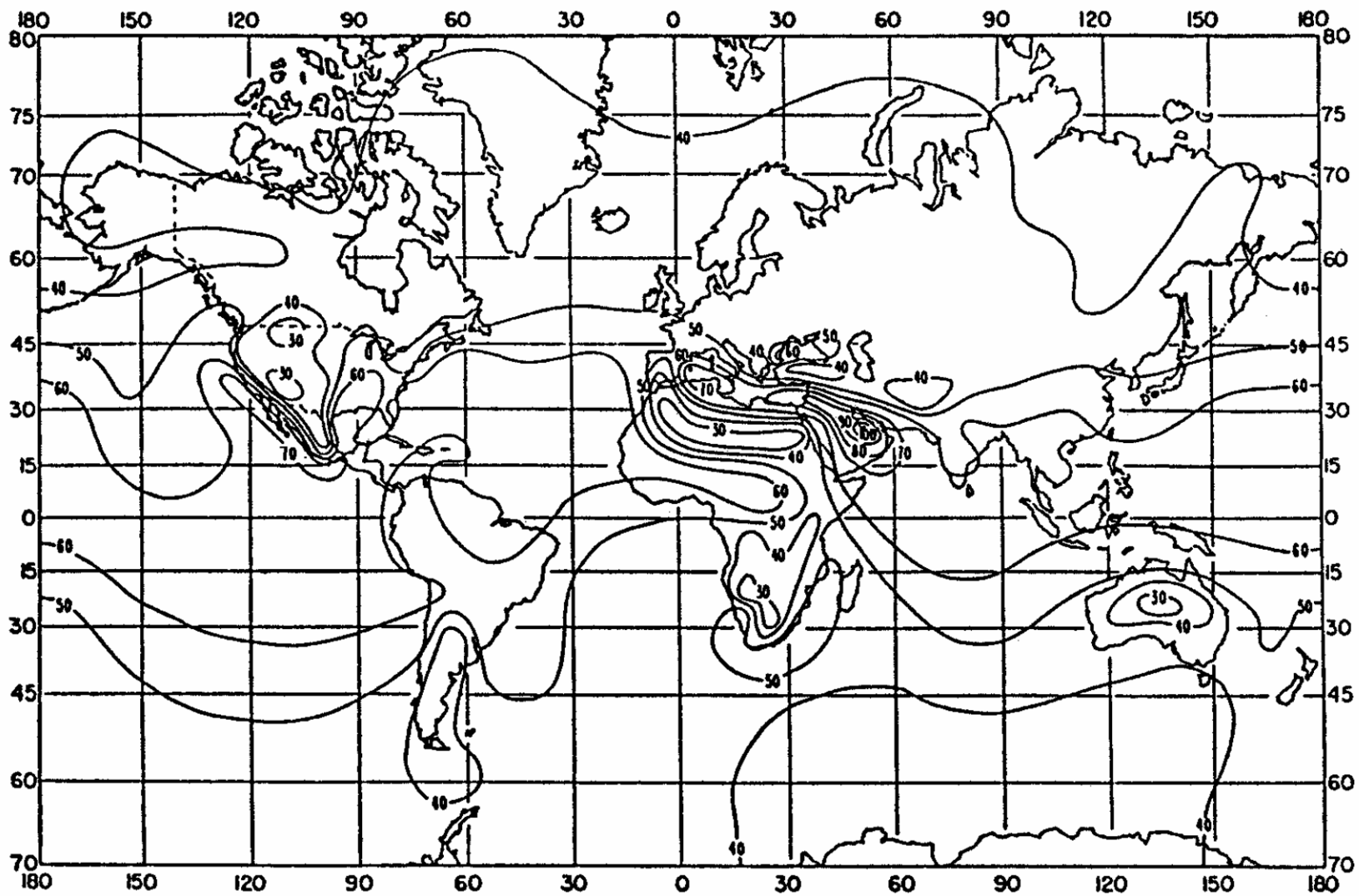
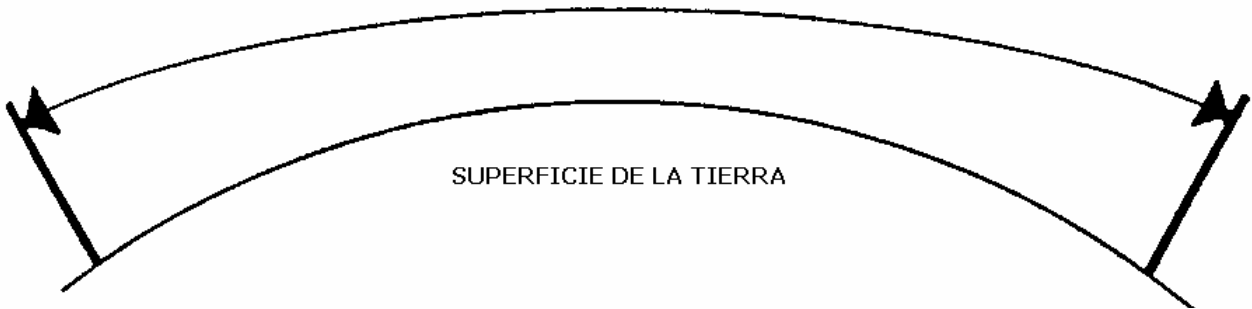


Figura 2.2. Mapa del gradiente de refractividad  $\Delta N$ , proporcionado por la UIT para el mes de agosto



**Figura 2.3. Radio equivalente de la Tierra**

Considerando la ecuación (2.7) y:

$$\frac{dn}{dh} = \frac{dN}{dh} \cdot 10^{-6} = \Delta N \cdot 10^{-6} \quad (2.10)$$

se tiene:

$$\frac{1}{a_{eq}} = \frac{1}{a} + \frac{dn}{dh} = \frac{10^{-6}}{(6.37 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6})} + \frac{dN}{dh} \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{1}{a_{eq}} = \left( 157 + \frac{dN}{dh} \right) \cdot 10^{-6} = (157 + \Delta N) \cdot 10^{-6} \quad (2.11)$$

Entonces, podemos tener el radio equivalente para el valle de México, para el mes de agosto, considerando las ecuaciones (2.11) o bien (2.6 y 2.9):

$$a_{eq} = \frac{1}{(157 - 50) \cdot 10^{-6}} \approx 9346 \text{ Km}$$

O bien:

$$a_{eq} = k a = \left( \frac{157}{157 - 50} \right) \cdot 6370 \text{ Km} = 9346.63 \text{ Km}$$

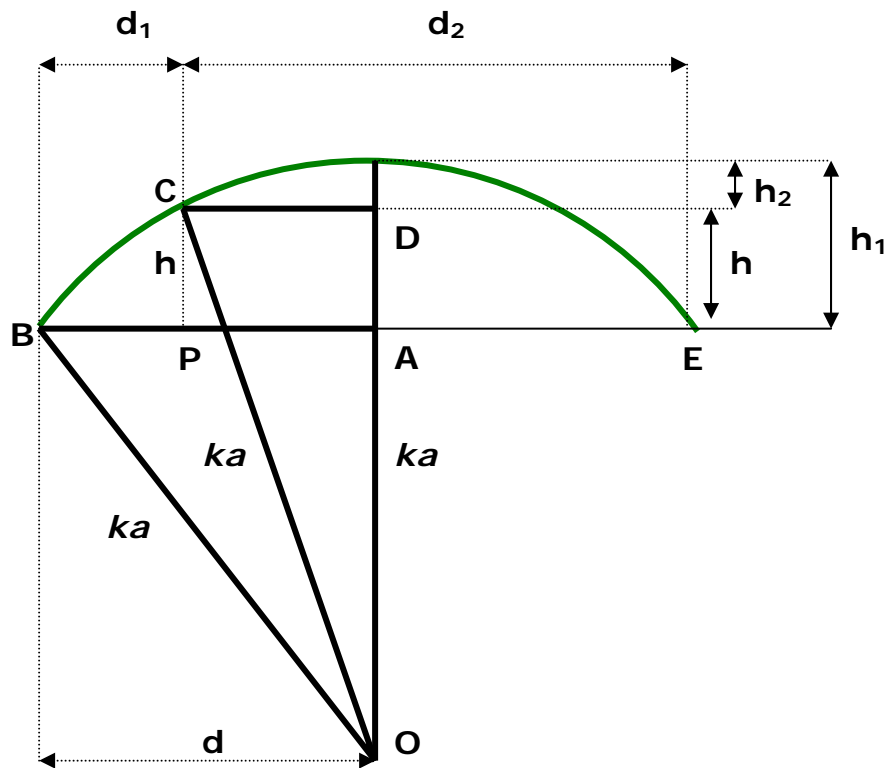
Siempre que  $dn/dh < 0$  y  $k > 1$ , tiene lugar un "aplanamiento" ficticio de la Tierra y mayor alcance, favoreciéndose también el "despeje" del haz con relación a los obstáculos, conociéndose este efecto como **super-refracción**. Si  $dn/dh > 0$ , la Tierra aumenta su curvatura efectiva, se reduce el horizonte radio eléctrico y aumenta la posibilidad de incidencia en los obstáculos.

### 2.3.3. CÁLCULO DE CORRECCIÓN DE CURVATURA TERRESTRE EN FUNCIÓN DEL FACTOR $k$ [13]

En topografía irregular, donde el nivel del suelo es accidentado por montañas, valles, etcétera, se debe considerar la forma en que son afectadas las diferentes alturas al modificar el radio terrestre.

Si el radio modificado  $A$  es mayor que el real, la curvatura de la Tierra sufre un efecto de levantamiento (caso 2 ), por el contrario si  $A < R$  (caso 1 ), la curvatura de la Tierra tiende a disminuir, en ambos casos existe una variación de altura que es necesario determinar.

Cuando existe un perfil lineal es necesario conocer, para un punto determinado, el valor real de su altura; al ser modificado el radio terrestre por un valor  $k$  específico se aplica el siguiente procedimiento, según la figura 2.4.



**Figura 2.4. Modelo para la corrección de la curvatura de la Tierra en función de  $k$ .**

Donde el arco BCE representa la nueva curvatura, debido a la modificación del radio terrestre en  $ka$ ; y  $h$  es el incremento de altura del punto P por la modificación del radio terrestre.

Si se parte del análisis del triángulo ABO y se aplica el teorema de Pitágoras, se tiene:

$$d^2 + (ka - h_1)^2 = (ka)^2$$

Desarrollando:

$$d^2 + (ka)^2 - 2kah_1 + h_1^2 = (ka)^2$$

$$d^2 - 2kah_1 + h_1^2 = 0$$

Si:

$$d^2 \gg h_1^2$$

se obtiene:

$$d^2 = 2kah_1$$

De donde:

$$h_1 = \frac{d^2}{2ka} \quad (\text{A})$$

Al aplicar un procedimiento similar al triángulo DCO:

$$(d - d_1)^2 + (ka - h_2)^2 = (ka)^2$$

$$(d - d_1)^2 + (ka)^2 - 2kah_2 + h_2^2 = (ka)^2$$

Si  $(d - d_1)^2 \gg h_2^2$ , se obtiene:

$$(d - d_1)^2 = 2kah_2$$

de donde:

$$h_2 = \frac{(d - d_1)^2}{2ka} \quad (\text{B})$$

Siendo:

$$h = h_1 - h_2 \quad (\text{C})$$

y al sustituir (A) y (B) en (C):

$$h = \frac{d^2}{2ka} - \frac{(d - d_1)^2}{2ka}$$

$$h = \frac{d^2 - (d^2 - 2dd_1 + d_1^2)}{2ka} = \frac{d^2 - d^2 + 2dd_1 - d_1^2}{2ka}$$

Se obtiene:

$$h = \frac{2dd_1 - d_1^2}{2ka}$$

de la figura 2.4,  $d$  se define como:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Al sustituir en  $h$ :

$$h = \frac{\frac{2(d_1 + d_2)d_1}{2} - d_1^2}{2ka} = \frac{d_1^2 + d_1d_2 - d_1^2}{2ka}$$

$$h = \frac{d_1d_2}{2ka}$$

Siendo  $a$ , el radio de la Tierra, igual a 6378 Km

Para expresar  $h$  en metros y  $d_1$  y  $d_2$  en kilómetros se procede de la siguiente forma.

$$\frac{h}{1000} = \frac{d_1d_2}{2k \cdot 6378}$$

De donde se obtiene finalmente:

$$h_m = \frac{1000}{2(6378)} \frac{d_1d_2}{k}$$

$$h_m = \frac{d_1d_2}{(12.756)k} = 0.0784 \frac{d_1d_2}{k} \quad (2.12)$$

En el caso  $d_1 = d_2$  se encuentra en el punto medio de la trayectoria BE, donde la modificación de altura por la variación del factor  $k$  resultará máxima.

## 2.4. ASPECTOS DE LA DIFRACCIÓN

### 2.4.1. ZONAS DE FRESNEL [8b]

La propiedad de la difracción se manifiesta por una curvatura de las ondas electromagnéticas alrededor de un obstáculo tal como el de un filo de cuchillo afilado o una superficie esférica. El fenómeno se explica mediante la teoría clásica de Huyghens que supone que todo punto del frente de onda tiene la propiedad de generar ondas secundarias. De esta manera, no es necesario recibir la señal únicamente por el trayecto de visibilidad directa sino que la recepción es posible, especialmente en las regiones de enmascaramiento, mediante ondas secundarias, terciarias o incluso

de orden superior. Esta propiedad de la curvatura está relacionada con la longitud de onda y con las dimensiones del obstáculo, siendo más pronunciada para longitudes de onda elevadas y para obstáculos agudos. Véase también a este respecto la Recomendación UIT-R P.526.

Podemos ver de la expresión 2.13 que entre más pequeña es la frecuencia de transmisión más se dispersa el rayo radioeléctrico y por lo tanto mayor es el radio de Fresnel, por ejemplo, se tiene que a la frecuencia de 200 MHz, el radio de Fresnel es de 190m, mientras que a la frecuencia de 800 MHz, el radio de Fresnel es de 5m.

Por la teoría de la difracción vemos que un rayo que acaba de pasar la parte superior de un *filo de cuchillo*, según la figura 2.7 en una colina situada a 12.5 Km, se atenúa en 6 dB en comparación con la transmisión en el espacio libre. Esta pérdida puede evitarse si hay algún despejamiento entre el rayo y la obstrucción, lo que normalmente se expresa en términos de la primera *zona de Fresnel* o elipse. El eje mayor del primer elipse de Fresnel está en el rayo directo entre el Transmisor y el Receptor y el propio elipse es el lugar geométrico de todos los puntos de reflexión que producen señales en el receptor retardadas en  $\Delta = 0.5 \lambda$  respecto al rayo directo. La ecuación elipse de Fresnel, superpuesto al rayo directo es la siguiente:

$$x = \left[ z \operatorname{sen} \varphi_t + z^2 / 2k a \right] / \cos \varphi_t + \left\{ n_f \lambda z \left[ 1 - \left( z / z_r \right) \right] \right\}^{0.5} \quad (2.15)$$

en donde:  $x$  = altura relativa de la elipse con respecto a la del transmisor (en m)  
 $z$  = distancia horizontal para cada punto (en Km)  
 $\varphi_t$  = ángulo de la trayectoria radioeléctrica respecto a la horizontal local  
 $z_r$  = distancia horizontal a la que se encuentra el Receptor (en Km)  
 $x_r$  = distancia vertical considerando como referencia al Transmisor (en m)  
 $\lambda$  = longitud de onda (en mm)  
 $n_f$  = número de la zona de *Fresnel*

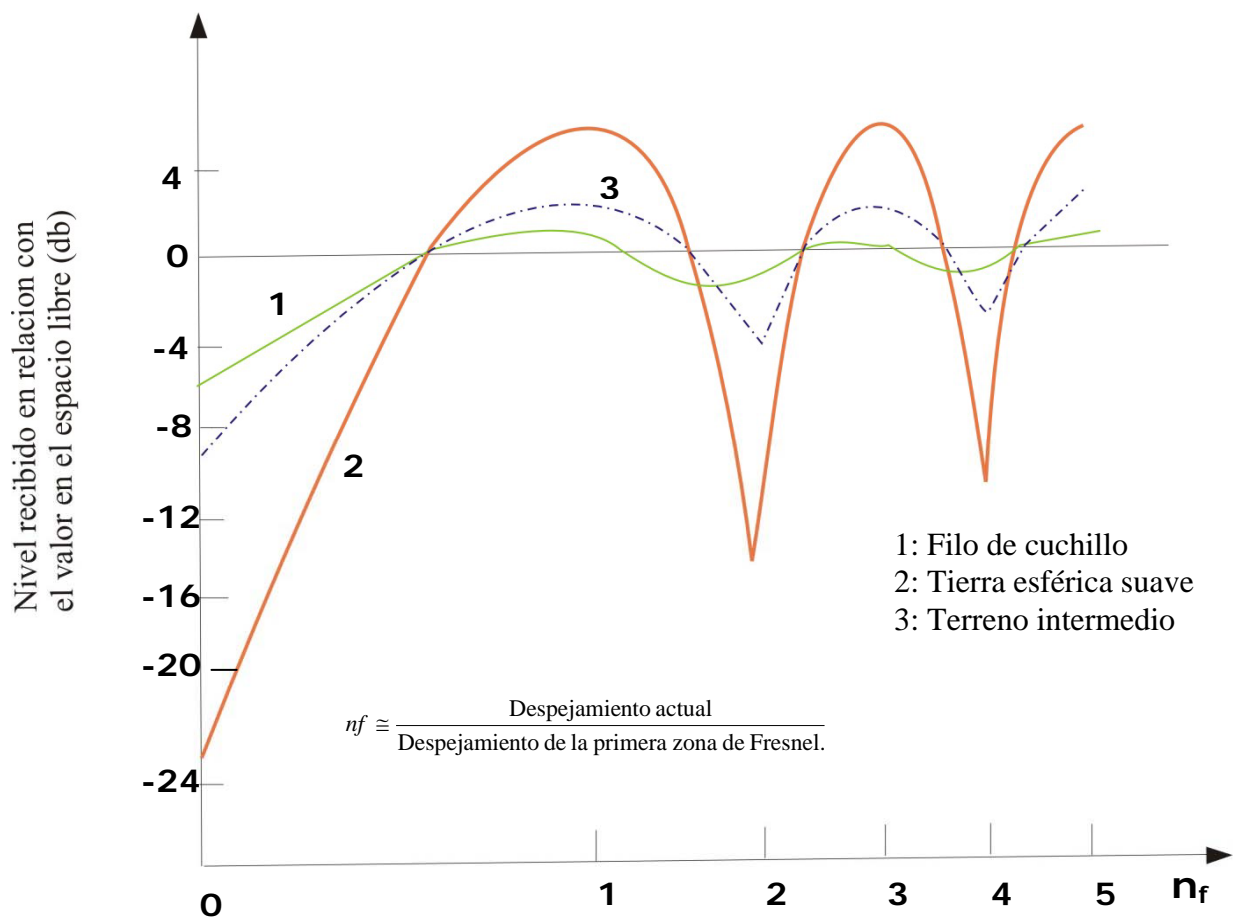
La figura 2.6 [14], muestra las pérdidas de difracción para el filo de cuchillo y otros obstáculos. Puede verse que con un despejamiento de sólo el 30% de la primera zona de Fresnel se obtiene el nivel de la señal en el espacio libre. No obstante, suele ser habitual diseñar trayectos radioeléctricos que tengan un despejamiento pleno de la primera zona de Fresnel para  $k = 4/3$ . Un requisito adicional es evitar los *desvanecimientos de obstrucción*, dejando cierto despejamiento para el factor  $k$  mínimo previsto. A menudo se utiliza en el diseño del trayecto un valor de  $k_{min} = 0.5$  a 0.7. El despejamiento con el límite inferior de  $k$  puede ser inferior al de una zona de Fresnel porque durante esta condición atmosférica excepcional hay aún un gran margen de desvanecimiento (normalmente, una reserva de 40 dB) disponible en el equipo radioeléctrico. También hay que señalar que un despejamiento demasiado grande, más allá de la primera zona de Fresnel, dará lugar a variaciones no deseadas de los niveles de la señal cuando varíe el factor  $k$ .

La figura 2.6 representa el efecto de la intensidad de la señal en los despejamientos del trayecto, en términos del radio de la primera zona de Fresnel.

Los requisitos de despejamiento para  $k = 4/3$  se ilustran en la figura 2.7 en la que se ha utilizado la ecuación (2.14) para trazar un número de elipses de Fresnel correspondiente. Se muestran elipses que empiezan con la primera zona de Fresnel correspondiente a  $n_f = 1$ , y que continúan en escalones de 0.25 hasta la segunda zona de Fresnel correspondiente a  $n_f = 2$ . Puede verse que la cresta de la colina que es el obstáculo más próximo al radio directo cumple el requisito de despejamiento de primera zona de Fresnel. Si no fuese así, habría que aumentar la altura de la antena transmisora o de la receptora.

Como regla práctica, se supone que la propagación se produce con visibilidad directa respecto a la horizontal. En general, la práctica habitual entre muchos diseñadores ha consistido en evitar simplemente los trayectos de visibilidad directa horizontales y, a ser posible, concentrarse en trayectos denominados inclinados. El modelo de predicción de la calidad del UIT-R (ver sección 4.3.2.6) utiliza la investigación teórica y práctica sobre los efectos de la inclinación del trayecto (ec. 2.30) que en este modelo contribuyen explícitamente al resultado de los cálculos.

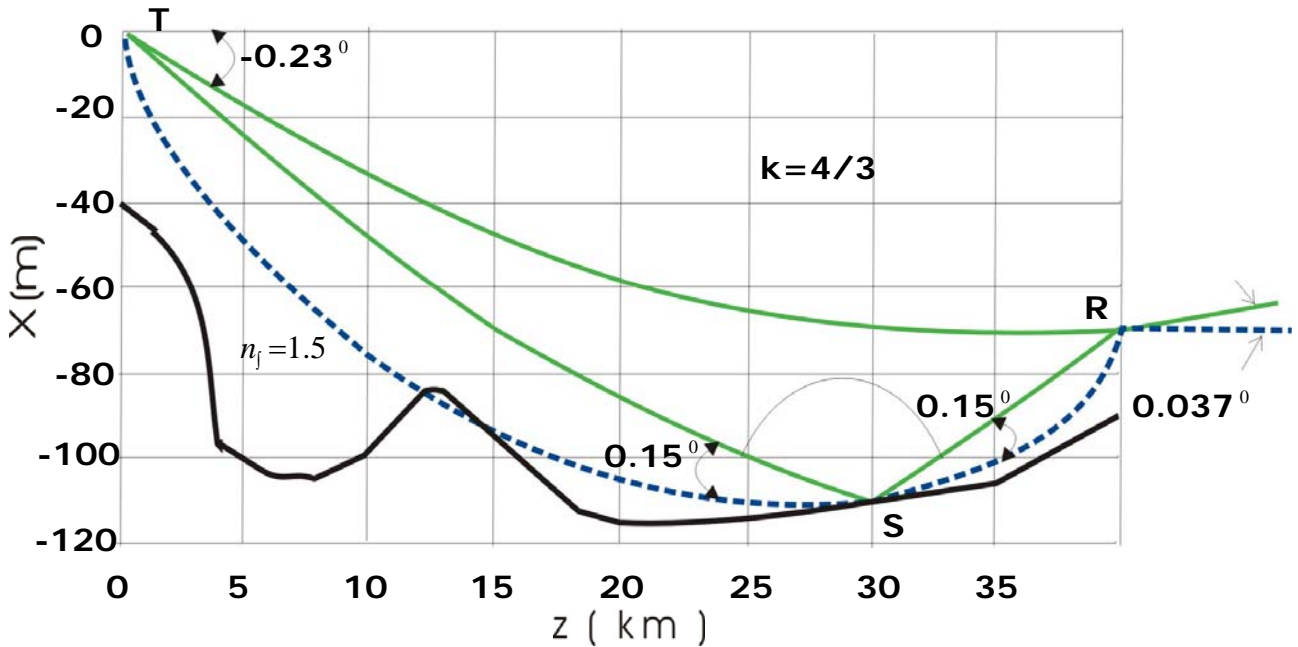
Cualquiera que sea el método elegido de diseño del trayecto, se suelen necesitar a menudo diversas repeticiones para llegar al resultado óptimo respecto a las alturas mínimas de torre. A menudo, la tarea de trazado de perfiles y diseño del trayecto se tiene que efectuar manualmente. No obstante, puede ser más fácil esta tarea cuando se dispone de una computadora, ya sea aplicando soporte lógico normalizado de hoja de cálculo, utilizando tablas de cálculo y presentaciones gráficas



**Figura 2.6. Despejamiento de la primera zona de Fresnel**

Cabe aquí decir algo sobre la precisión de la elevación en los perfiles del terreno. La precisión puede ser únicamente de 5 a 10 m en los mapas topográficos convencionales o en los nuevos mapas digitales disponibles en CD-ROM para algunas regiones. La incertidumbre de la elevación del mapa puede resultar comparable a los despejamientos que requiere el trayecto radioeléctrico. Se observa que los despejamientos de la zona de Fresnel por ejemplo pueden ser del orden de 20 a 40 m, en 2 GHz. En 20 GHz, los despejamientos necesarios serían aproximadamente un tercio, o sea de 6 a 12 m (el despejamiento es proporcional a la raíz cuadrada de la longitud de

onda, vea la ecuación 2.13). Las incertidumbres de los datos de elevación del terreno exigirán que la torre sea más alta de lo necesario, anulando la ventaja de que una torre pueda ser inferior si se utilizan para la transmisión de altas frecuencias. Como hay muchos motivos para mantener las torres lo más bajas posible, han de adoptarse medidas para examinar detenidamente los puntos críticos del terreno, a fin de obtener una precisión mayor de la elevación. A estos efectos se han utilizado altímetros barométricos, aunque hoy en día pueden utilizarse los receptores del sistema de posicionamiento mundial diferencial (GPS). También debe hacerse hincapié en la necesidad, al trazar el perfil, de tener en cuenta la cobertura del terreno tal como árboles, cosechas, casas, etc.



**Figura 2.7. Perfil del trayecto con elipses de Fresnel para  $k = 4/3$  y 2 GHz.**

En definitiva, se pueden resumir los efectos de la difracción en la propagación de la manera siguiente:

Una vez conocida las alturas de las antenas se determina la trayectoria radioeléctrica mediante la línea recta que conecta los dos emplazamientos terminales, si se utiliza el modelo de la Tierra equivalente para el valor de  $k_e$  en cuestión. Las posibles pérdidas asociadas de la señal dependen principalmente del grado de la obstrucción que determina el obstáculo predominante y que se obtiene a partir del perfil del terreno sobre la curva de la Tierra. Por motivos conceptuales, la teoría de la difracción utiliza la primera zona de Fresnel y un despejamiento normalizado.

El despejamiento normalizado del trayecto se define por la relación:

$$n_f = F_c = \frac{h}{F_1} = \frac{H_s}{r_1} \quad (2.16)$$

en la que  $h$  ó  $H_s$  es la altura (m) del obstáculo o bloqueo más significativo del trayecto por encima de la trayectoria de éste ( $h$  es negativa si la parte superior de la obstrucción en cuestión está por encima de la línea de visibilidad directa virtual) y  $F_1$  ó  $r_1$  es el radio (m) del primer elipsoide de Fresnel, calculado en el emplazamiento de la obstrucción del trayecto (ecuación 2.13).

## 2.4.2. ALTURA DE LIBRAMIENTO O CLARIDAD [15]

La altura de libramiento o claridad es una característica muy importante de las trayectorias radioeléctricas y es la medida en que la trayectoria está libre de obstáculos, sea cual fuere el tipo de éstos, que pueden ser la curvatura de la Tierra, obstáculos naturales como montañas o árboles, obstáculos originados por el hombre como edificios, estructuras, etc.

Si consideramos el perfil de la figura 2.8, la altura de libramiento entre la línea de trayectoria directa y el obstáculo tiene las siguientes notaciones:

$H_1$	= Altura sobre el nivel del mar de la estación 1 en metros
$H_{A1}$	= Altura de la base de la antena de la estación 1 en metros
$h_1 = H_1 + H_{A1}$	= Altura total de la estación 1 en metros
$H_2$	= Altura sobre el nivel del mar de la estación 2 en metros
$H_{A2}$	= Altura de la base de la antena de la estación 2 en metros
$h_2 = H_2 + H_{A2}$	= Altura total de la estación 2 en metros
$H_s$	= Altura sobre el nivel del mar del obstáculo en un punto dado en metros
$H_c$	= Altura de libramiento o de claridad en metros
$H_p$	= Altura sobre el nivel del mar del haz radioeléctrico en metros
$d_1$	= Distancia de la estación 1 al obstáculo en kilómetros
$d_2$	= Distancia del obstáculo a la estación 2 en kilómetros
$d$	= Distancia total del radioenlace

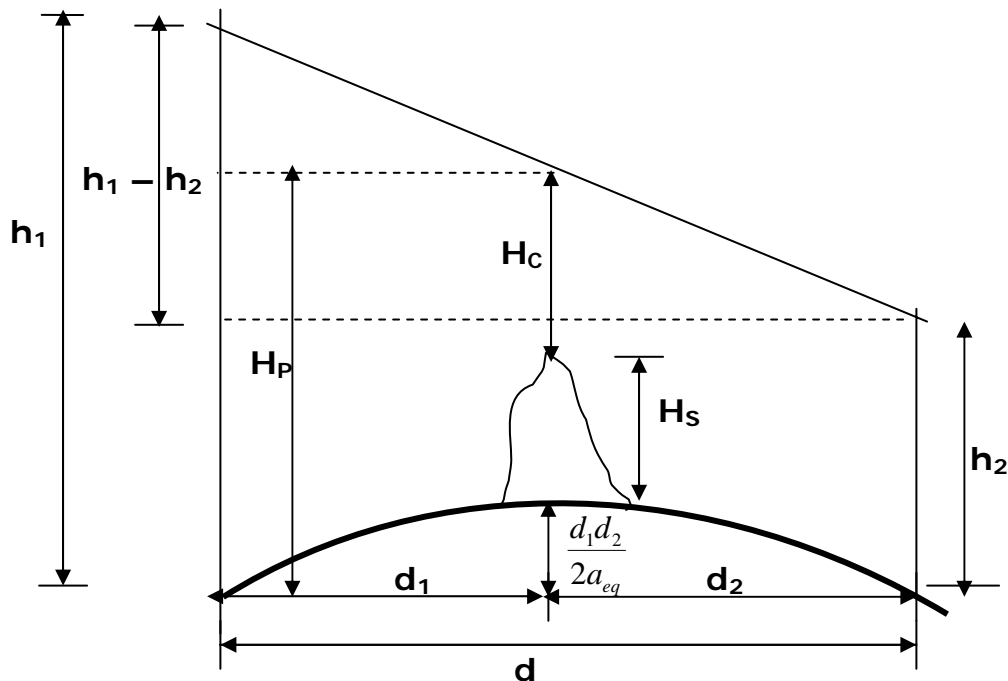


Figura 2.8. Altura de libramiento de una trayectoria en un punto

Considerando la Tierra plana, según el teorema de los triángulos semejantes:

$$\frac{h_1 - H_p}{h_1 - h_2} = \frac{d_1}{d} \quad (2.17)$$

despejando:

$$H_p = h_1 - \frac{d_1}{d}(h_1 - h_2)$$

Introduciendo la corrección por la curvatura de la Tierra, según ec. B de la sección 2.3.3:

$$h = \frac{d_1 d_2}{2a_{eq.}} = \frac{d_1 d_2}{2ka.} \quad (2.18)$$

Entonces, la altura sobre el nivel del mar del haz radioeléctrico en metros, es:

$$H_p = h_1 - \frac{d_1}{d}(h_1 - h_2) - \frac{d_1 d_2}{2ka.}$$

Finalmente, la altura de libramiento o de claridad en metros:

$$H_c = H_p - H_s = h_1 - \frac{d_1}{d}(h_1 - h_2) - \frac{d_1 d_2}{2ka.} - H_s \quad (2.19)$$

### 2.4.3. DESVANECIMIENTOS POR DIFRACCIÓN [16a]

Las variaciones de las condiciones de refracción de la atmósfera pueden modificar el radio efectivo de la Tierra, es decir el factor  $k$ , con respecto a su valor medio que es aproximadamente de  $4/3$  para la atmósfera normal. Cuando la altura es suficientemente subrefractiva (grandes valores positivos del gradiente del índice de refracción, o valores reducidos del factor  $k$ ), los rayos se curvan de forma que la Tierra obstruye el trayecto directo entre el transmisor y el receptor, lo que da lugar a un tipo de desvanecimiento llamado desvanecimiento por difracción. Este desvanecimiento es el factor que determina la altura de las antenas.

Las estadísticas del factor  $k$  para un punto, pueden determinarse a partir de medidas o predicciones del gradiente del índice de refracción,  $\Delta N$  en los primeros 100 m de la atmósfera.

### 2.4.4. DEPENDENCIA DE LA PÉRDIDA POR DIFRACCIÓN DEL DESPEJAMIENTO DEL TRAYECTO (Rec. UIT-R PN.530-5)

La pérdida por difracción dependerá del tipo de terreno y de la altura de la vegetación. Para un determinado despejamiento del trayecto del rayo, la pérdida por difracción variará desde un valor mínimo en el caso de un obstáculo único en arista hasta un valor máximo en el caso de una Tierra esférica lisa. En la figura 2.9 se muestran esos límites superior e inferior de la pérdida por difracción.

Las pérdidas por difracción en un terreno medio pueden aproximarse, para pérdidas mayores de unos 15 dB, mediante la fórmula:

$$A_d = -20 \frac{H_s}{r_1} + 10 = -20 \frac{h}{F_1} + 10 \quad \text{dB} \quad (2.20)$$

en la que  $h$  ó  $H_s$  es la altura (m) del obstáculo más importante del trayecto por encima de la trayectoria de éste ( $h$  es negativa si la parte superior del obstáculo en cuestión está por encima de la línea de visibilidad directa), y  $r_1$  ó  $F_1$  es el radio del primer elipsoide de Fresnel, indicado por la ecuación 2.13:

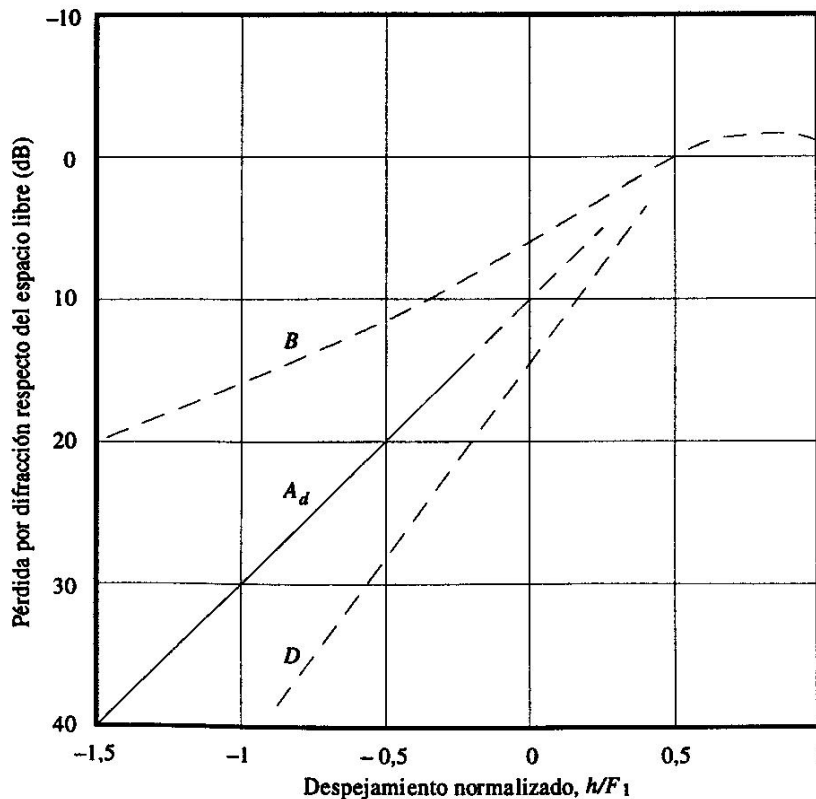
$$r_1 = F_1 = 17.3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f d}} \quad (\text{m}) \quad (2.21)$$

donde:

$f$  = frecuencia (GHz)

$d$  = longitud del trayecto (Km)

$d_1$  y  $d_2$  = distancia (Km) entre las terminales y obstáculo más alto del trayecto



**Figura 2.9. Pérdida por difracción en el caso de existir obstáculos en trayectos radioeléctricos con visibilidad directa**

donde:

B: Curva teórica de pérdida por difracción en obstáculos en filo de cuchillo.

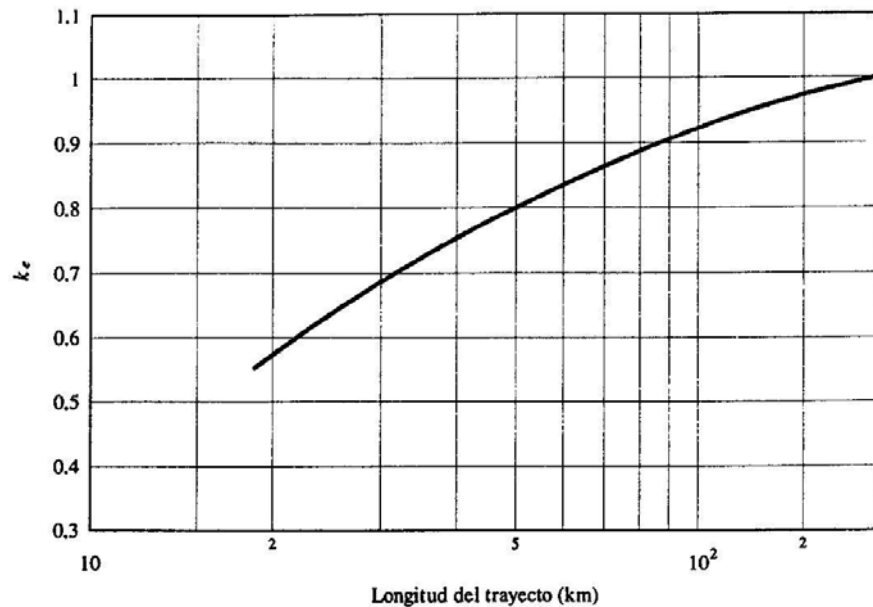
D: Curva teórica de pérdida sobre la Tierra esférica lisa a 6.5 GHz y  $k = 4/3$ .

$A_d$ : Curva empírica de la pérdida por difracción basada en la ecuación 2.20 para terreno intermedio.

En la figura 2.9 se muestra también una curva, denominada  $A_d$  basada en la ecuación 2.20. Esta curva, estrictamente válida para pérdidas superiores a 15 dB, se ha extrapolado hasta una pérdida de 6 dB para satisfacer la necesidad de los diseñadores de enlaces.

#### 2.4.5. CRITERIOS DE PLANIFICACIÓN PARA EL DESPEJAMIENTO DEL TRAYECTO

En el pasado, el desvanecimiento por difracción de este tipo de frecuencias por encima de unos 2 GHz se aliviaba instalando antenas de altura suficiente para que, en condiciones de curvatura muy acentuada de los rayos, el receptor no se encontrase en la región de difracción cuando el radio efectivo de la Tierra es inferior a su valor normal. La teoría de la difracción indica que el trayecto directo entre el transmisor y el receptor debe estar libre de obstáculos, a partir de una altura por encima del suelo igual, como mínimo, al 60% del radio de la primera zona de Fresnel para que se cumplan las condiciones de propagación en el espacio libre. Últimamente, disponiendo de más información sobre este mecanismo y de los valores estadísticos de  $k_e$ , que se requieren para realizar predicciones estadísticas, algunas administraciones están instalando antenas a alturas que producirán algunas pequeñas interrupciones conocidas.



**Figura 2.10. Valor de  $k_e$  excedido aproximadamente durante el 99.9% del mes más desfavorable (Clima templado continental)**

## 2.4.6. OBSTÁCULO ÚNICO EN FILO DE CUCHILLO (Rec. UIT PN.526-3) [16b]

En este caso extremadamente idealizado (vea las figuras 2.11a y 2.11b), todos los parámetros geométricos se agrupan en un solo parámetro sin dimensión, que normalmente se designa por  $\nu$  (letra griega nu) y que puede tomar distintas formas equivalentes según los parámetros geométricos elegidos:

$$\nu = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (2.22)$$

$$\nu = \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}} \quad (2.23)$$

$$\nu = \sqrt{\frac{2h\theta}{\lambda}} \quad (\nu \text{ tiene el mismo signo que } h \text{ y } \theta) \quad (2.24)$$

$$\nu = \sqrt{\frac{2d}{\lambda} \alpha_1 \alpha_2} \quad (\nu \text{ tiene el mismo signo que } \alpha_1 \text{ y } \alpha_2) \quad (2.25)$$

donde:

$h$  : altura de la cima del obstáculo sobre la recta que une los dos extremos del trayecto. Si la cima queda por debajo de esa línea,  $h$  es negativa

$d_1, d_2$  : distancias desde los dos extremos del trayecto a la cima del obstáculo (Km)

$d$ : longitud del trayecto (Km)

$\theta$  : ángulo de difracción, en radianes; tiene el mismo signo que  $h$ . Se supone que el ángulo  $\theta$  es inferior a unos 0.2 radianes, o sea,  $11.46^\circ \cong 12^\circ$

$\alpha_1, \alpha_2$  : ángulos bajos los que, a partir de un extremo, se ven la cima del obstáculo y el extremo opuesto; tiene el mismo signo que  $h$  en las relaciones anteriores.

Nota: En las ecuaciones (2.22) a ( 2.25 ) inclusive,  $h, d, d_1, d_2$  y  $\lambda$  deben expresarse en unidades coherentes.

La figura 2.12 da la pérdida ( dB ) causada por la presencia del obstáculo, en función de  $\nu$ . Para  $\nu$  mayor que  $-0.7$ , un valor aproximado puede obtenerse de la expresión:

$$J(\nu) = 6.9 + 20 \log \left[ \left( \sqrt{(\nu - 0.1)^2 + 1} \right) + \nu - 0.1 \right] \text{ dB} \quad (2.26)$$

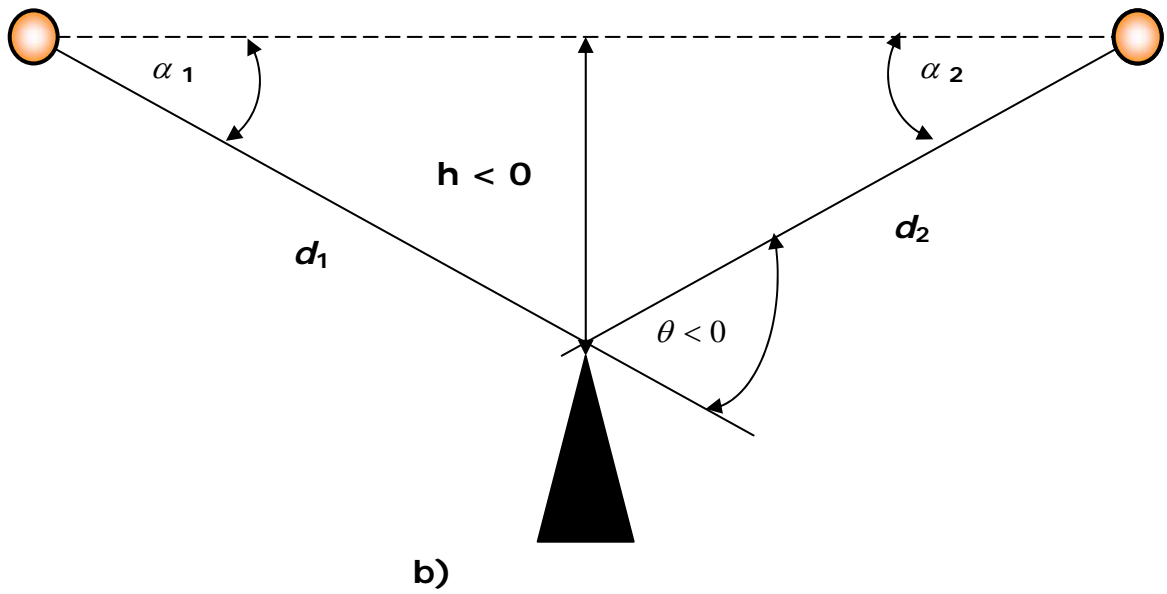
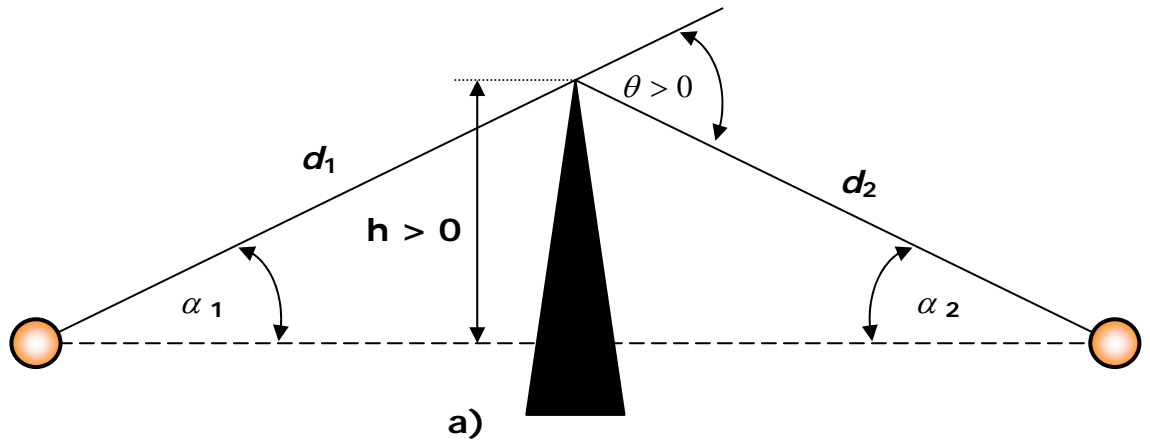
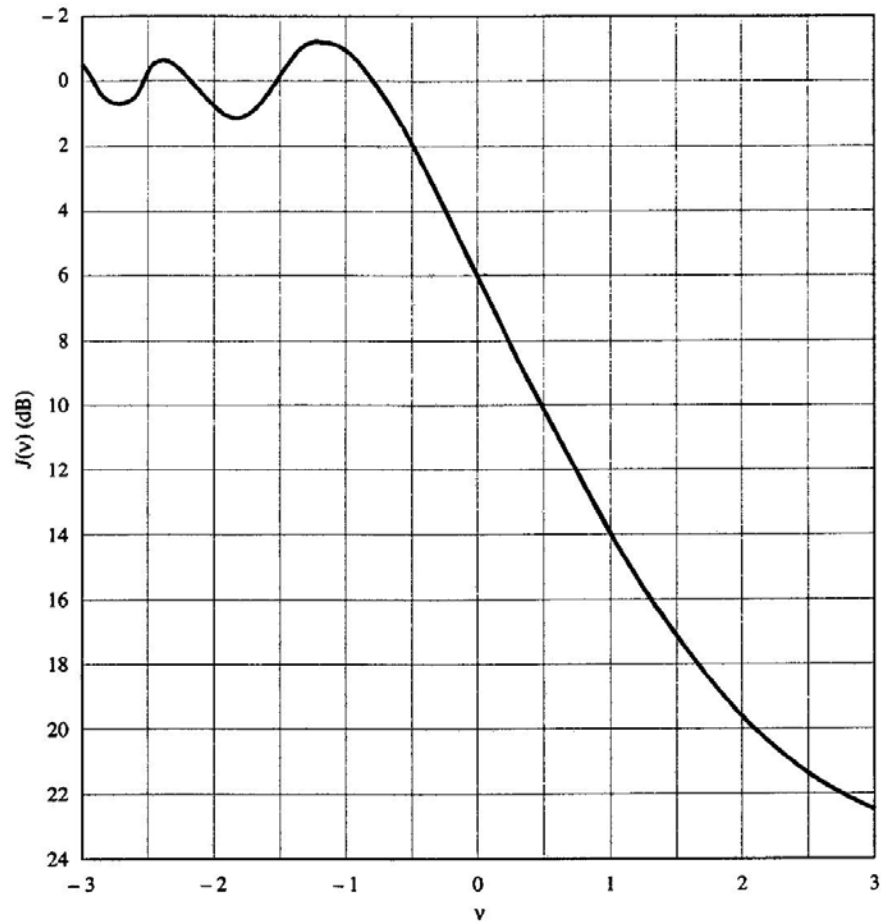


Figura 2.11. Elementos geométricos



**Figura 2.12. Pérdida por difracción en filo de cuchillo**

## 2.5. PROPAGACIÓN MULTITRAYECTO ATMOSFÉRICA [8c]

### 2.5.1. INTRODUCCIÓN

Todo modelo de propagación utiliza información sobre el salto radioeléctrico y probabilidades conjuntas o condicionales para la distribución de los diversos parámetros.

Un conjunto representativo de los parámetros descriptivos puede ser el siguiente:

- zona climática del trayecto,
- longitud del trayecto,
- frecuencia de explotación,
- antena,
- elevación sobre el nivel medio del mar,
- diagrama de radiación de la antena,

- rugosidad de la superficie,
- despejamiento del trayecto,
- características de la reflexión,
- parámetros de la diversidad.

Puede considerarse todo el conjunto de parámetros de un modelo de propagación multitrayecto como las dimensiones (o grados de libertad) de un espacio multidimensional. Las interrupciones se producen cuando estos parámetros caen en ciertas regiones críticas del espacio multidimensional. El cálculo de las interrupciones determina la probabilidad de que los parámetros del modelo multitrayecto caigan en una región crítica (espacio de interrupción). Dichos cálculos o predicciones deben tener en cuenta, siempre que sea posible, las amplias variaciones de las condiciones de propagación de un año a otro. Si no se cuenta con una información total de la propagación, es posible realizar estimaciones aproximadas de la probabilidad de interrupción con un número reducido de dimensiones (es decir, de parámetros del modelo).

En los sistemas digitales, las interrupciones tienen su origen en distorsiones de la forma de onda, debidas a desvanecimientos selectivos en frecuencia, por ruido térmico e interferencia. La interrupción total dependerá de estas tres contribuciones. Hay varios métodos para calcular la interrupción de los sistemas digitales que se analizan en este punto. Los resultados de los experimentos demuestran que durante los desvanecimientos selectivos, los errores del tren binario de salida de un sistema radioeléctrico digital se producen en ráfagas, y las estadísticas de estas ráfagas de errores y su duración están directamente relacionadas con las estadísticas de los desvanecimientos por dispersión.

El método convencional para calcular las interrupciones se basa en el concepto de los desvanecimientos planos y por tanto, no es aplicable directamente a los sistemas de radioenlaces digitales de gran velocidad. Un aumento del margen del desvanecimiento plano que en los sistemas analógicos tenderá a reducir el efecto de ruido térmico, no mejorará la calidad de los sistemas digitales, si el desvanecimiento multitrayecto ya ha reducido la amplitud del diagrama de ojo a cero.

Como consecuencia, el aumento de la potencia del transmisor no es un medio para que los sistemas radioeléctricos digitales cumplan sus requisitos en cuanto a interrupciones, a menos que se apliquen contramedidas muy activas, tales como las de ecualizadores en banda de base, para reducir intensamente la sensibilidad del equipo a las distorsiones del canal.

La medida en que el margen de desvanecimiento de un sistema digital se habrá degradado por efectos selectivos en frecuencia durante la propagación por trayectos múltiples depende de:

- las propiedades del sistema radioeléctrico digital (método de modulación, capacidad, anchura de banda utilizada, etc.) y su susceptibilidad a los efectos de dispersión,
- la medida en que se produzcan los efectos selectivos en frecuencia en un determinado trayecto radioeléctrico,
- la intensidad de las distorsiones de amplitud en el canal debidas a desvanecimientos selectivos en frecuencia.

## 2.5.2. DESVANECIMIENTOS DEBIDOS A LA PROPAGACIÓN POR TRAYECTOS MÚLTIPLES Y A LOS MECANISMOS CORRESPONDIENTES

Al planificar enlaces de más de algunos kilómetros de longitud, es preciso tener en cuenta los mecanismos de desvanecimiento en cielo despejado causados por capas de la atmósfera con una extremada refracción:

- dispersión del haz (denominado habitualmente desenfoque, en los textos técnicos ingleses),
- desacoplo de antena,
- multitrayecto en superficie,
- multitrayecto atmosférico.

La mayoría de estos mecanismos pueden producirse de forma aislada o en combinación entre sí. Se produce una forma muy intensa de desvanecimientos selectivos en frecuencia cuando la dispersión del haz de la señal directa se combina con una señal reflejada en la superficie para producir desvanecimientos multitrayecto. Junto a estos mecanismos, están siempre presentes los desvanecimientos de centelleo debidos a irregularidades de turbulencia de pequeña escala en la atmósfera pero a frecuencias inferiores a unos 40 GHz su efecto en la distribución total de los desvanecimientos no es significativo.

Para profundidades grandes del desvanecimiento, el porcentaje de tiempo  $P(W)$  durante el que no se excede la potencia recibida,  $W$ , en el mes medio más desfavorable, en los sistemas de banda estrecha puede aproximarse por la ecuación asintótica:

$$P(W) = K Q f^B d^C \left( \frac{W}{W_0} \right) = 100 P_0 10^{-\frac{A}{10}} \% \quad (2.27)$$

siendo:

- d: longitud del trayecto (Km)
- f: frecuencia (GHz)
- K: factor para los efectos del clima y el terreno
- Q: factor que tiene en cuenta el efecto de las variables del trayecto distintas de d y f
- B, C: factores correspondientes a los efectos regionales
- $W_0$ : potencia recibida en condiciones de ausencia de desvanecimiento
- A: profundidad del desvanecimiento (dB)
- $P_0$ : valor de referencia para el factor  $K Q f^B d^C$

La Recomendación UIT-R P.530 propone la utilización de la media a largo plazo de la potencia recibida,  $W$ , para  $W_0$ . Esta definición puede diferir del valor calculado para el caso de no desvanecimiento, debido a la presencia de una disminución de la potencia media recibida, especialmente en trayectos largos y/o sobre el mar.

Hay que señalar que la profundidad de los desvanecimientos, A (dB), se define por la relación:

$$A = -10 \log\left(\frac{W}{W_0}\right) \quad (2.28)$$

La ecuación (2.27) es una fórmula semiempírica, basada, parcialmente, en la observación de que, para profundidades de los desvanecimientos suficientemente grandes, las distribuciones acumuladas medidas de la profundidad del desvanecimiento, A, pueden aproximarse mediante una distribución paralela a la de Rayleigh (siendo,  $P_0$  el punto de cruce de la probabilidad para  $A = 0$  de la aproximación lineal a la distribución del desvanecimiento con pendiente 10 dB/década).

La forma más simple posible de utilizar la ecuación (2.27) es valerse de la Tabla 2.1 que da valores numéricos para los parámetros de la ecuación (2.27) aplicables en los distintos países o regiones.

La Recomendación UIT-R P.530 da dos métodos: el primero se propone para la planificación inicial y el segundo para el diseño detallado del enlace. Los métodos pueden aplicarse en todas partes del mundo, para trayectos con longitudes comprendidas entre 7 y 95 Km, frecuencias en la gama de 2 a 37 GHz e inclinación de trayecto comprendidas entre 0 y 0.024 rad (0 a 1.375°).

Desarrollando el primer método del UIT -R da:

$$B = 0.89, \quad C = 3.6, \quad Q = \left(1 + |\varepsilon_p|\right)^{-1.4} \quad (2.29)$$

tomando como referencia los datos de la tabla 2.1 [8d], donde,  $\varepsilon_p$  es la inclinación (mrad) del trayecto radioeléctrico:

$$|\varepsilon_p| = \frac{|h_r - h_e|}{d} \quad (2.30)$$

donde:

$h_e$  y  $h_r$ : alturas de antena del transmisor y del receptor (m) sobre el nivel medio del mar  
d: longitud del salto (Km).

El factor geoclimático, K, viene dado en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.1. Valores típicos de los parámetros para la ecuación 2.27**

Propuesto por	Japón	Europa Noroccidentala 1	Reino Unido	Estados Unidos de América	Antigua URSS	Europa Septentrional
<b>B</b>	<b>1.2</b>	<b>1.0</b>	<b>0.85</b>	<b>1.0</b>	<b>1.5</b>	<b>1.0</b>
<b>C</b>	<b>3.5</b>	<b>3.5</b>	<b>3.5</b>	<b>3.0</b>	<b>2.0</b>	<b>3.0</b>
<b>KQ para regiones de clima marítimo templado, mediterráneo, costero o de gran humedad y temperatura elevada</b>				$\frac{4.1 \times 10^{-3}}{S_1^{1.3}}$	$2 \times 10^{-3}$	
<b>KQ para las regiones de clima marítimo subtropical</b>				$\frac{3.1 \times 10^{-3}}{S_1^{1.3}}$		
<b>KQ para regiones de clima continental templado o regiones interiores de latitud media con terreno medianamente ondulado</b>	$1 \times 10^{-7}$	$1.4 \times 10^{-6}$	$\frac{8.1 \times 10^{-5}}{S_2^{1.4}}$ <b>a</b> $\frac{4.0 \times 10^{-4}}{S_2^{1.4}}$	$\frac{2.1 \times 10^{-3}}{S_1^{1.3}}$	$4.1 \times 10^{-4}$	$\frac{2.3 \times 10^{-3}}{S_1^{1.3}}$
<b>KQ para climas templados y regiones costeras con terreno bastante llano</b>	$\frac{9.9 \times 10^{-6}}{\sqrt{(h_1 + h_2)}}$				$2.3 \times 10^{-3}$ <b>a</b> $4.9 \times 10^{-3}$	$\frac{6.5 \times 10^{-3}}{S_1^{1.3}}$
<b>KQ para regiones montañosas elevadas de clima seco</b>	$3.9 \times 10^{-8}$			$\frac{1 \times 10^{-3}}{S_1^{1.3}}$		$1 \times 10^{-6}$
<b>KQ para climas templados y regiones interiores con terreno bastante llano</b>					$7.6 \times 10^{-3}$ <b>a</b> $2 \times 10^{-3}$	$\frac{3.3 \times 10^{-3}}{S_1^{1.3}}$

$h_1$  y  $h_2$  : alturas de las antenas (m)

$S_1$  : rugosidad del terreno (m) por la desviación normalizada de elevaciones del terreno a intervalos de 1 Km a lo largo del trayecto ( $6m \leq S_1 \leq 42m$ ). La altura de los desplazamientos radioeléctricos debe excluirse.

$S_2$  : valor r.m.s. de las vertientes (mrad) medidas entre puntos separados de 1 Km a lo largo del trayecto, pero excluyendo el primero y último intervalo completo de kilómetro ( $1 < S_2 < 80$ ).

Enlaces sobre Tierra para los que la parte inferior de las antenas transmisora y receptora está a menos de 700 m sobre el nivel medio del mar.	$K = p_L^{1.5} \times 10^{-(6.5-C_{Lat}-C_{Lon})}$
Enlaces sobre Tierra para los que la parte inferior de las antenas transmisora y receptora está por encima de 700 m sobre el nivel medio del mar.	$K = p_L^{1.5} \times 10^{-(7.1-C_{Lat}-C_{Lon})}$
Enlaces sobre masas de agua de tamaño medio, zonas costeras junto a dichas masas de agua o regiones de múltiples lagos	$K = p_L^{1.5} \times 10^{-(5.9-C_{Lat}-C_{Lon})}$
Enlaces sobre grandes masas de agua o zonas costeras junto a dichas masas	$K = p_L^{1.5} \times 10^{-(5.5-C_{Lat}-C_{Lon})}$

**Tabla 2.2. Factores geoclimáticos, K, para la Recomendación UIT-R P.530 (método 1)**

Puede considerarse que el enlace atraviesa una zona costera si una sección del perfil del trayecto está a menos de 100 m sobre el nivel del mar y a menos de 50 Km de la costa de una masa de agua mediana o grande, y no hay alturas de Tierra por encima de 100 m entre el enlace y la costa.

Los coeficientes  $C_{Lat}$  y  $C_{Lon}$  se indican en el Tabla 2.3.

$C_{Lat} = 0$	$53^\circ S \geq \text{Latitud} \leq 53^\circ N$
$C_{Lat} = -53 + \text{Latitud}/10$	$53^\circ N \leq \text{Latitud} \leq 60^\circ N$ $53^\circ S \leq \text{Latitud} \leq 60^\circ S$
$C_{Lat} = 7/10$	$60^\circ N \leq \text{Latitud} \leq 90^\circ N$ $60^\circ S \leq \text{Latitud} \leq 90^\circ S$
$C_{Lon} = 3/10$	Longitudes de Europa y África
$C_{Lon} = -3/10$	Longitudes de América del Norte y del Sur
$C_{Lon} = 0$	Todas las demás longitudes

**Tabla 2.3. Coeficientes  $C_{Lat}$  y  $C_{Lon}$**

El valor de  $p_L$  representa el porcentaje de tiempo en el que los gradientes verticales de refracción son  $dN/dh \leq -100$  unidades N/Km. El mes con el valor máximo de  $p_L$  debe elegirse entre los cuatro meses sobre los que hay mapas mundiales como los que se representan en la figura 2.13 (véase la Recomendación UIT-R P.453).

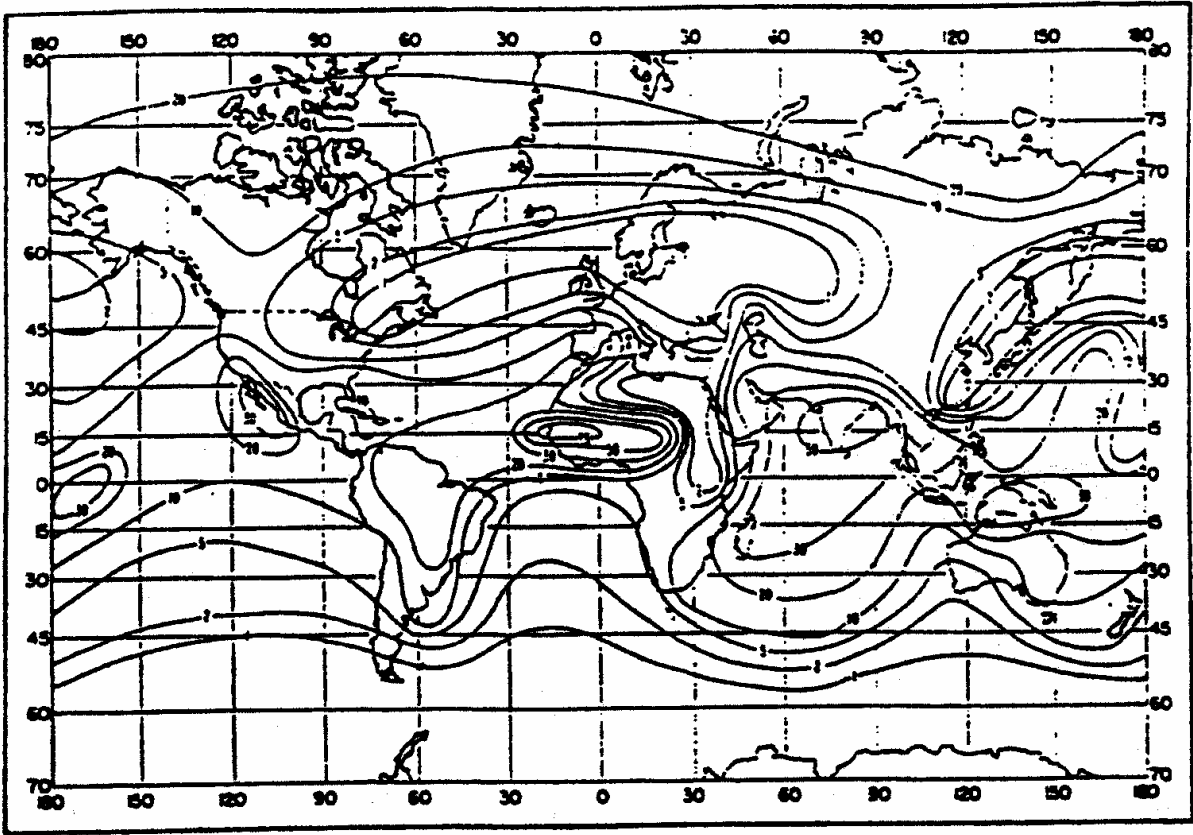


Figura 2.13. Porcentaje del gradiente temporal  $\leq -100$  (unidades N/Km): febrero

## 2.6. DISPONIBILIDAD [17]

La medida de la fiabilidad de un sistema usualmente se refiere a su disponibilidad. Idealmente todos los sistemas deberían tener una disponibilidad del 100%. Puesto que esto no es posible, los ingenieros se esfuerzan para asegurar la disponibilidad más alta que se pueda. La tabla 2.4 muestra el promedio del tiempo fuera que se espera cuando la disponibilidad (fiabilidad) se aparta del 100%. El sistema de comunicaciones queda, no disponible por dos razones principales: la primera, la ocupan las fallas hechas por las personas y son causadas durante el mantenimiento, fallas por un inadecuado diseño en el equipo o en su fabricación. Las fallas debidas a un equipo viejo pueden ser también incluidas en esta categoría; la segunda categoría puede ser llamada indisponibilidad o fallas que no se deben a las personas y son causadas principalmente por cambios en las condiciones atmosféricas. Estas pueden ser controladas hasta cierto punto por la elección del equipo y el diseño de la ruta. Usualmente la interrupción del servicio se debe a desvanecimientos que pueden ocurrir por aproximadamente la mitad del tiempo total fuera. Esta sería una tercera categoría, la cual incluye a los desastres naturales que incluye a los terremotos, incendios, terrorismo, etc., pero afortunadamente estos se cuentan como un pequeño porcentaje de la indisponibilidad total. En el tiempo de ocurrencia los efectos pueden ser temporalmente devastadores.

Disponibilidad (%)	Tiempo fuera (%)	TIEMPO FUERA POR		
		Año	Mes (promedio)	Día (promedio)
0	100	8760 h	720 h	24 h
50	50	4380 h	360 h	12 h
80	20	1752 h	144 h	4.8 h
90	10	876 h	72 h	2.4 h
95	5	438 h	36 h	1.2 h
98	2	175 h	14 h	29 min
99	1	88 h	7 h	14.4 min
99.9	0.1	8.8 h	43 min	1.44 min
99.99	0.01	53 min	4.3 min	8.6 s
99.999	0.001	5.3 min	26 s	0.86 s
99.9999	0.0001	32 s	2.6 s	0.086 s

**Tabla 2.4. Relación entre la disponibilidad del sistema y el tiempo fuera**

Puesto que el efecto del desvanecimiento sobre la disponibilidad está completamente ligado a la ruta diseñada, se discutirá a continuación esta relación.

Puesto que los cambios atmosféricos ocurren sobre un determinado periodo de tiempo, la profundidad de los desvanecimientos de multitrayectoria ocurren sobre una base estadística. Afortunadamente, 40 dB de desvanecimiento ocurren por solamente una porción muy pequeña del tiempo total de operación (aproximadamente 0.01%). Es por lo tanto imposible establecer cuánto tiempo un sistema se interrumpirá cada mes o cada año, pero se puede calcular el tiempo promedio en forma estadística. Como puede verse en la tabla de disponibilidades (Tabla 2.4), un valor de 99% de disponibilidad puede sonar impresionante, pero una evaluación más detallada muestra que esto es equivalente a que el sistema en promedio permanezca fuera 14.4 minutos cada día.

Para un sistema analógico que transmite solamente tráfico telefónico puede no ser serio. Sin embargo esto depende de cómo los 14.4 minutos son distribuidos a lo largo del día. Estadísticamente es improbable que los 14.4 minutos ocurran en un intervalo de tiempo continuo. En el otro extremo (el cual es más probable) cada suscriptor podrá sufrir un corte en la conversación por 1% del tiempo de la llamada. En realidad ciertos periodos del día tienen altas incidencias de desvanecimiento que otros, y durante estos tiempos los suscriptores deberán experimentar varios instantes donde la voz de los interlocutores se desvanece a un nivel que es inaudible.

Para un sistema digital un 99% de fiabilidad puede que no sea desastroso en una compañía telefónica. Un corte en un sistema digital significa que todas las llamadas son cortadas por unos cuantos minutos hasta que el sistema se restablece por sí solo. Esto sucede si la duración de la profundidad de desvanecimiento es de unos 100 ms. La Tabla 2.5 muestra la magnitud de las máximas tolerancias para los tiempos de interrupción de varios tipos de transmisión de información. La transmisión de video y datos son los más intolerantes, pero sin embargo, 100 ms son buenos para el tráfico de voz. Obviamente, si un número corto de desvanecimientos ocurre a lo largo del día, el sistema estará fuera de servicio por un largo periodo del día.

Una disponibilidad de 99.999 % podrá ser un excelente valor para registrarse, y con este alto valor, se causa un corte promedio de 0.86 s por día, el cual puede causar problemas cuando se requiera transmitir datos. Un valor real que se debe intentar obtener en un enlace de algunos miles de kilómetros es de 99.9%. Enlaces nacionales e internacionales se deben subdividir en secciones o categorías separadas con el propósito de repartir la disponibilidad.

Tipo de tráfico	Tiempo de interrupción Máximo tolerado	Efecto si la tolerancia se excede
Video	100 $\mu$ s	Pérdida de sincronización
Telégrafo (50 baud)	1 ms	Error
Datos	10 $\mu$ s	Error
Circuitos de voz	100 ms	Acaparamiento del equipo de conmutación

**Tabla 2.5. Tiempo de interrupción para varios tipos de tráfico**