

Curso
“Introducción a los Sistemas Radioenlaces Fijos”
Unidad 2 de 6

CePETel Sindicato de los Profesionales de las Telecomunicaciones Personería Gremial N°650

62 años

IPEI

UN global

RS RADAR

CEA

CURSO DE FORMACIÓN PROFESIONAL
MODALIDAD VIRTUAL - INCLUYE MATERIAL DE ESTUDIO - ENTREGA DE CERTIFICADOS



**INTRODUCCIÓN A
LOS SISTEMAS
RADIOENLACES
FIJOS**

**DOCENTE
HUGO REYNOSO**

OBJETIVOS

Al finalizar este curso, el alumno será capaz de alcanzar los siguientes objetivos:

- Comprender las modalidades de propagación de señales SHF, modelos de tierra plana/curva y atenuaciones del trayecto radioeléctrico..
- Conocer los distintos componentes y parámetros involucrados en una arquitectura superheterodina.
- Adquirir conocimientos relacionados con los diferentes tipos de antenas utilizados en los sistemas de microondas.
- Realizar el cálculo radioeléctrico de un sistema de radioenlace fijo.

6 CLASES DE 3 HS C/U
DE 17:30 A 20:30 HS.
TODOS LOS JUEVES
A CONTAR DEL
30 DE SEPTIEMBRE

INFORMES: ENVIAR CORREO A TECNICO@CEPETEL.ORG.AR

Nota: este curso y muchas de sus imágenes y tablas se basan en bibliografía existente que se menciona al final del documento.

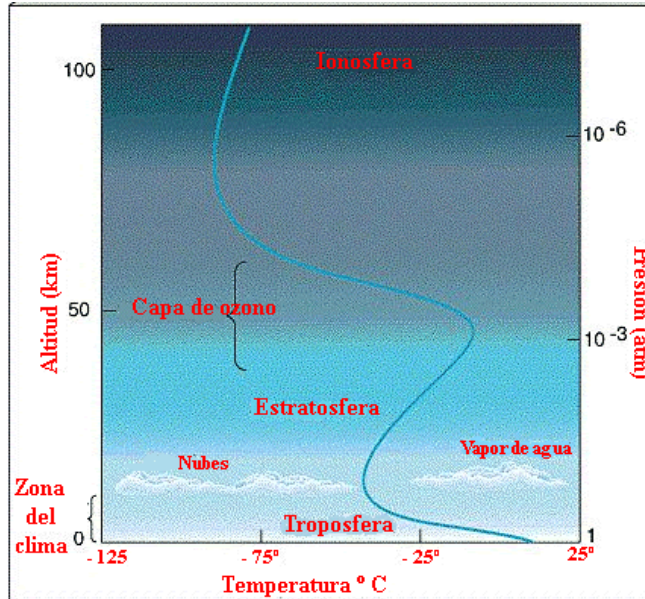
Contenido

Curso “Introducción a los Sistemas Radioenlaces Fijos” Unidad 2 de 6.....	1
1. Modalidades de propagación en SHF.	3
2. Reflexión, difracción, modelo de tierra plana / tierra curva.	6
3. Tipos de atenuaciones del trayecto.	21
4. Tipo de desvanecimientos de la señal.	37
5. Criterios de diseño de un sistema radioeléctrico de visibilidad directa.	49
Bibliografía utilizada para el dictado de este curso:.....	52

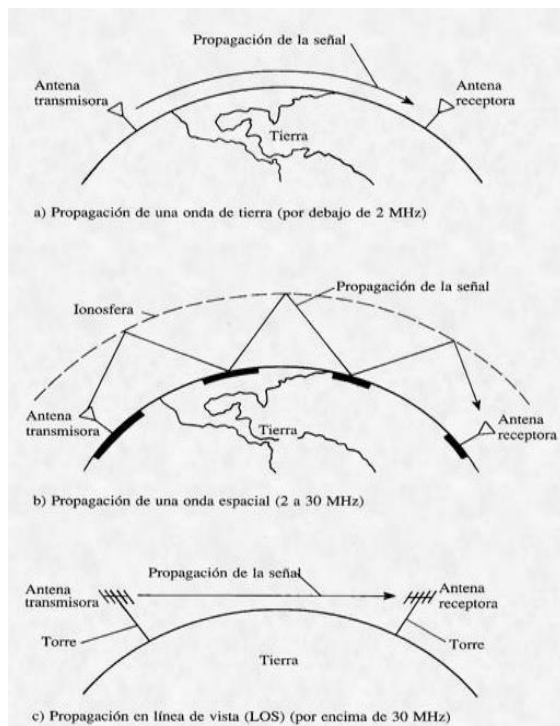
1. Modalidades de propagación en SHF.

Resumen de modalidades de propagación en general

Vista de la atmosfera de la tierra.



¿Qué tipo de propagación conocemos?

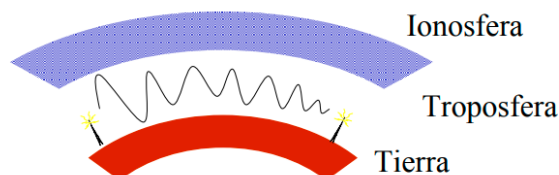


¿Dónde se ubica la modalidad SHF?

	λ	f	Banda	
	100-10 Km	ondas miriámétricas	3-30 KHz	VLF
	10-1 Km	ondas kilométricas	30-300 KHz	LF
	1-1 Km	ondas hectométricas	0.3-3 MHz	MF
	100-10 m	ondas decamétricas	3-30 MHz	HF
Propagación Troposférica	10-1 m	ondas métricas	30-300 MHz	VHF
	1-1 m	ondas decimétricas	0.3- 3 GHz	UHF
	10-1 cm	ondas centrimétricas	3-30 GHz	SHF

Propagación en **VLF**: Onda Guiada Tierra-Ionosfera

- En VLF (3KHz-30KHz) el suelo y la ionosfera se comportan como **buenos conductores**.
- Como la distancia h que los separa (60-100Km) es comparable con la longitud de onda en esta banda (100Km-10Km), la propagación se modela **como una guía esférica** con pérdidas.
- **Las antenas**, verticales, son eléctricamente pequeñas, aunque de dimensiones físicas muy grandes.
- Las aplicaciones son Telegrafía naval y submarina, ayudas a la navegación, etc. Y poseen **cobertura global**.



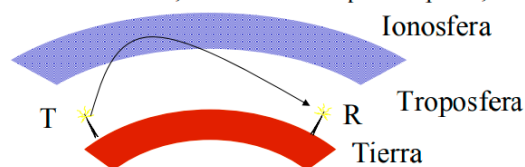
Propagación en **LF, MF y HF**. Onda de Tierra o de Superficie.

- En las bandas LF, MF y HF (hasta 10-150 MHz) aparece una **onda de superficie** que se propaga en la discontinuidad tierra-aire.
- Las antenas habituales son **monopolos verticales** con alturas entre 50 y 200 m que producen polarización vertical.
- **Buen alcance** geográfico, función de la potencia transmitida y la frecuencia, varía entre
 - LF: 1000 a 5000 Km
 - MF: 100 a 1000 Km (**AM**)
 - HF: menor de 100 Km
- Se aplica a sistemas **navales y radiodifusión**.



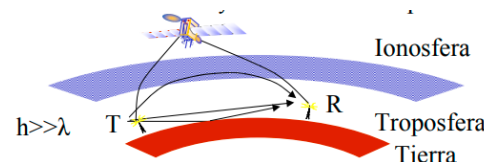
Propagación en **MF y HF**. Onda Ionosférica.

- Las “reflexiones ionosféricas” (**realmente refracciones**) se producen en las bandas MF y HF (0.3-30 MHz).
- En HF se utilizan antenas elevadas con polarizaciones horizontales y verticales.
- El **alcance de un solo** salto varía entre:
 - MF: 0 a 2000 Km
 - HF: 50 a 4000 Km
- Se aplica en radiodifusión (**radio onda corta**), comunicaciones punto a punto, navales



Propagación desde **VHF en adelante**. (> 30 MHz) Onda de espacio o troposférica

- Para las frecuencias de VHF y superiores, para las que **la ionosfera se hace transparente**, se asume una propagación en espacio libre modificada por el **suelo (reflexión y difracción)** y por la **troposfera (refracción, atenuación y dispersión)**.
- Se emplea con **antenas elevadas y directivas**. En SHF (parábolas)
- El **alcance es muy variable**: decenas de Km a los 40.000 Km en comunicaciones por satélite.
- Este modelo se aplica a Radiodifusión de FM y TV, Telefonía móvil, **enlaces fijos**, radar, comunicaciones vía satélite, etc.
- Se aplica en radiodifusión y comunicaciones **punto a punto**



2. Reflexión, difracción, modelo de tierra plana / tierra curva.

A continuación, nos concentraremos en la **banda SHF**.

Propagación Troposférica, características:

- ¿Cuáles son las **características** generales de la propagación?
- ¿Hay variaciones del **Índice de Refracción** con la altura? ¿Qué valor tiene?
- ¿Cómo se afecta el rayo? ¿Se curva? ¿Cuánto?
- ¿Qué es tierra ficticia?

Tierra Curva (en vez de rayo curvo)

- ¿Qué es Tierra Curva ?
- ¿Qué papel juega el perfil del terreno y cómo lo represento?
- ¿Cómo puedo reescribir las ecuaciones de tierra plana para tierra curva?
- ¿Cuándo uso tierra plana y cuando tierra curva

—

Propagación Troposférica y Tierra Curva

Por encima de los 150Mhz (VHF, UHF,...) dejan de ser utilizables los modos de propagación por superficie e ionosfera.

Onda troposférica: propagación en capas bajas de la atmósfera

- Antenas elevadas, $h \gg \lambda$
- Efectos en la trayectorias de la onda:
 - Atenuación por obstáculos (difracción)
 - Multitrayecto por reflexiones en suelo o capas de atmósfera estratificadas → conductos troposféricos: alcance superiores e interferencias
 - Refracción: trayectoria curvilínea; apuntado de las antenas.
- Condiciones atmosféricas ($f > 10$ GHz):
 - Atenuación por moléculas de oxígeno, vapor de agua. Por lluvia, nubes y nieblas)
 - Producen incremento T_a (Temperatura de ruido) y despolarización de la señal
- Dispersión:
 - Ventajas: posibilidad de sobre alcance de enlace por “iluminación” en parte de la tropósfera.
 - Inconvenientes: también puede causar interferencia

—

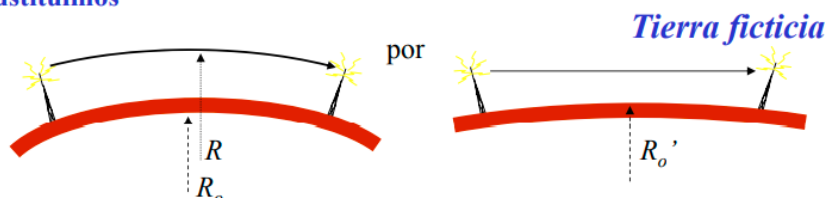
Como se mencionó, una característica fundamental en este modo de propagación es que el **rayo se curva** debido al **índice de refracción variable** de la troposfera en función de la altura.

Ventajas: la mayor parte del tiempo se curva hacia abajo, por lo que apuntando mas alto se alcanza mayores distancias.

Inconvenientes: Hay que tener en cuenta esta particularidad para diseñar el enlace.

Antes del gran avance de la computación, fue útil **modificar la curvatura de la tierra** para diferentes gradientes de refracción (según zonas geográficas) y tener estas **plantillas normalizadas** para que el usuario solo tenga que trazar una línea en ella como si el rayo no se curvara.

• **Sustituimos**



Esto implicó el cálculo de un **radio terrestre ficticio** y un factor k para relacionarlo con el radio real de la tierra.

Para este fin hay que determinar cual es el **índice de refracción** y como **varía con la altura**, en cada región del planeta.

—

El índice de refracción en la troposfera **n** es una función **f(p,e,T)** donde

- **p** es la presión atmosférica (mbar),
- **e** la presión del vapor de agua (mbar) y
- **T** la temperatura absoluta (°K).

Se define el coíndice o **refractividad N** para facilitar el estudio, como:

$$N = (n-1) 10^6$$

- La Rec UIT-R P-453 proporciona la siguiente fórmula:

$$N = \frac{77.6}{T} \left(p + 4810 \frac{e}{T} \right)$$

- En condición normales de presión, temperatura y humedad: p=1013mb, e=10.2mb, T=290°K, se tiene **N=316 ó n=1.000316**.

—

Estos índices **varían con la altura**: Rec. 369 de la ITU-R, se define la llamada “atmósfera de referencia”,

$$N(h) = 315 \cdot e^{-0.136 \cdot h} \quad \text{ó} \quad n(h) = 1 + 315 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-0.136 \cdot h}$$

Donde 315 es el valor medio N_0 extrapolada al nivel del mar y h es la altura en km.

La ley exponencial se utiliza para evaluar la refractividad N_s en la superficie terrestre:

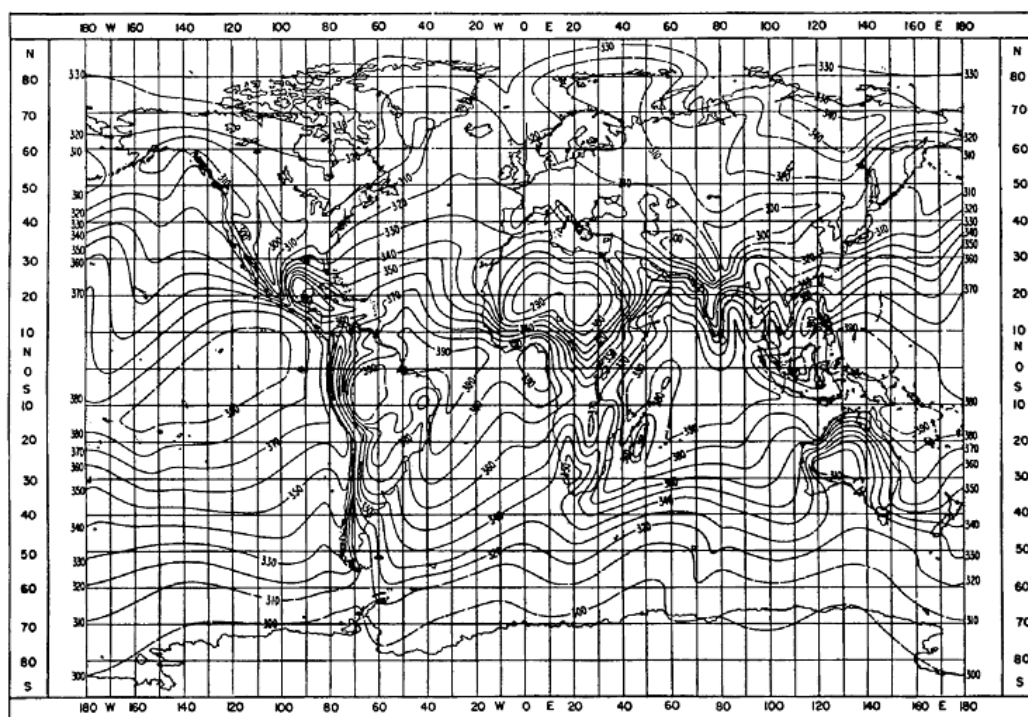
$$N_s = N_0 e^{-0.136 \cdot h_s}$$

La Rec. UIT-R P.453 proporciona **mapas mundiales** de valores de N_0 para distintos meses del año como el que se ve más abajo. La Altura h_s es calculado sobre el nivel del mar.

No obstante, un valor más útil es el gradiente de N definido como **$\Delta N = N_s - N_1$** .

El valor de N_1 representa el valor de N a 1km sobre el nivel del mar.

Monthly mean values of N_0 : February



Índice de refracción. **Trayectoria del rayo**

- La trayectoria es curvilínea debido a la disminución del índice de refracción con la altura. Por la ley de Snell,

$$n_i \cdot \text{sen} \varphi_i = \text{cte} \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

- $n_2 < n_1 \rightarrow \text{sen} \varphi_2 > \text{sen} \varphi_1 \rightarrow$ **el rayo se curva!**

- Expresada en la variable continua h y tomando diferenciales,

$$n(h) \cdot \text{sen} \varphi(h) = \text{cte}$$

Así $\left\{ \begin{array}{l} \cos(\varphi(h)) = dh / ds \\ ds = R d\varphi \rightarrow 1/R = d\varphi / ds \end{array} \right.$

Índice de refracción. **Curvatura**

- Derivando la ley de Snell se obtiene $\frac{dn}{dh} \cdot \text{sen} \varphi + n \cdot \cos \varphi \cdot \frac{d\varphi}{dh} = 0$
- Y por otro lado, se puede escribir, utilizando $\cos \varphi = dh/ds$,

$$\cos \varphi \cdot \frac{d\varphi}{dh} = \frac{d\varphi}{ds}$$

- Despejamos $d\varphi/ds$ para obtener la curvatura

$$\frac{1}{R} = \frac{d\varphi}{ds} = -\frac{1}{n} \cdot \text{sen} \varphi \cdot \frac{dn}{dh} \Big|_{\varphi=90^\circ, n(h) \approx 1} \approx -\frac{dn}{dh}$$

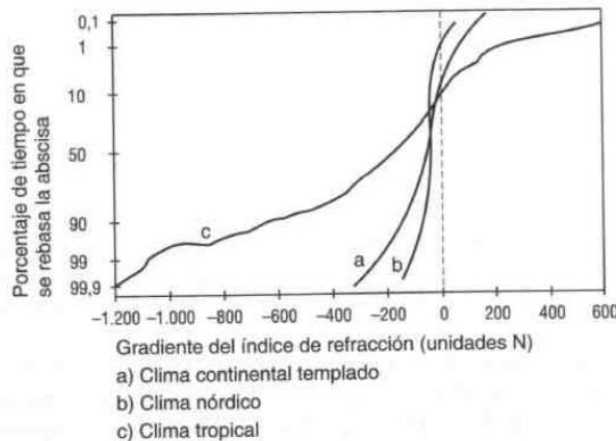
$$-\frac{dn}{dh} = -\frac{dN}{dh} \cdot 10^{-6} = 0.136 \cdot N_s \cdot 10^{-6}$$

UN ARCO DE RADIO

$$R = \frac{1}{0.136 \cdot N_s \cdot 10^{-6}}$$

$N = (n - 1) \cdot 10^6$ $N(h) = N_s(1 - 0.136 \cdot h), h = 0$

Pero N_s ó ΔN no son invariables en el tiempo, como se ve en el siguiente gráfico:



Vemos que el gradiente ΔN para el 50% del tiempo es aprox.:

-40 N/km para los climas fríos y -200 para los climas tropicales

Si ponemos R en función de ΔN , tenemos: $R = -10^6 / \Delta N$.

Esto significa que tenemos para el 50% del tiempo tenemos: $R = 25.000$ km (templado) y 5.000 km (tropical). Podemos compararlo con el diámetro de la tierra: 6370 km.

Conclusión: el rayo “apuntado” hace una “panza” hacia:

- Abajo ↓ en climas **templados y fríos** → con tendencia **a obstruirse** y por lo tanto a elevar las antenas
- Arriba ↑ en climas **tropicales** → con tendencia **a sobre despejarse** y por lo tanto a bajar las antenas.

También podemos ver cual es el valor de ΔN para que iguale al diámetro de la tierra y el rayo siga exactamente la curvatura de la tierra y veremos que este valor es de -157 N/km.

Radio de curvatura equivalente de la tierra

De aquí podemos ver otra práctica común en la planificación de las alturas de antenas.

$R = 22343 \text{ Km}$
 $R_o = 6370 \text{ Km}$

por

Tierra ficticia
 $R_o' = 8910 \text{ Km}$

- Donde $\frac{1}{R_o'} = \frac{1}{R_o} - \frac{1}{R} \approx \frac{1}{R_o} + \frac{dn}{dh} \approx \left(157 + \frac{dN}{dh}\right) \cdot 10^{-6}$
- Que se puede expresar en función del **factor de radio efectivo** (Rec ITU 310)

$$\frac{1}{R_o'} = \frac{1}{kR_o} = \left(157 + \frac{dN}{dh}\right) \cdot 10^{-6} \Rightarrow k = \frac{157}{157 + dN/dh}$$

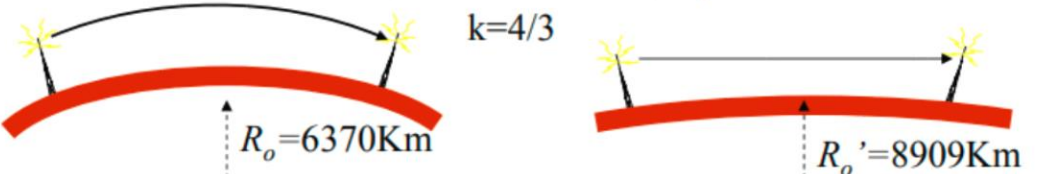
- En climas templados y rayo horizontal (Ej: España en Feb)

$$R_o' = kR_o \approx \frac{4}{3} \cdot R_o = 8490 \text{ Km}$$

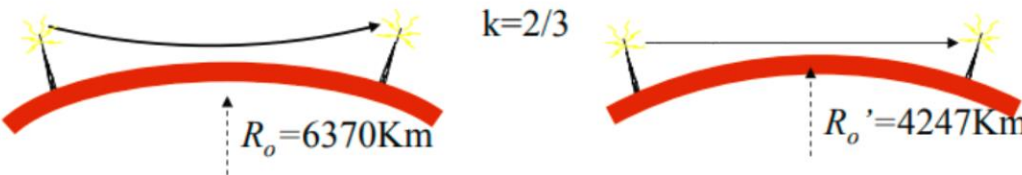
Nota: Curvatura = 1/R

Nota: esto fue indispensable en tiempos en donde los programas de cálculo no eran tan avanzados y los perfiles se realizaban a mano sobre **plantillas normalizadas para diferentes K**.

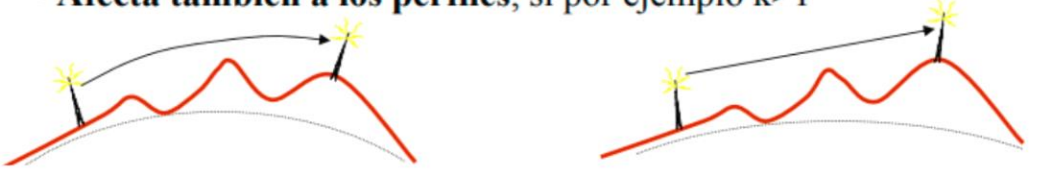
- Si $k > 1$ el despejamiento y alcance aumenta,
 - $1 < k < 4/3$ normal, $k = 4/3$ estándar, superrefractiva $k > 4/3$



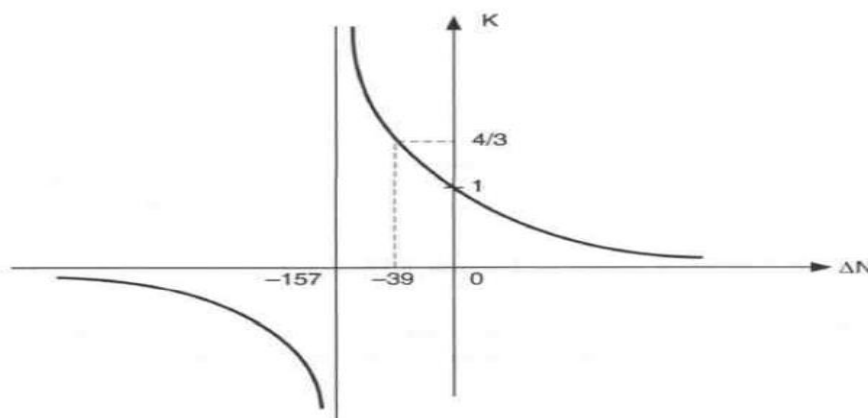
- Si $0 < k < 1$ el despejamiento y alcance (1 salto) disminuye
 - $0 < k < 1$ subrefractiva intensa, $k < 0$ conductiva.



- **Afecta también a los perfiles**, si por ejemplo $k > 1$



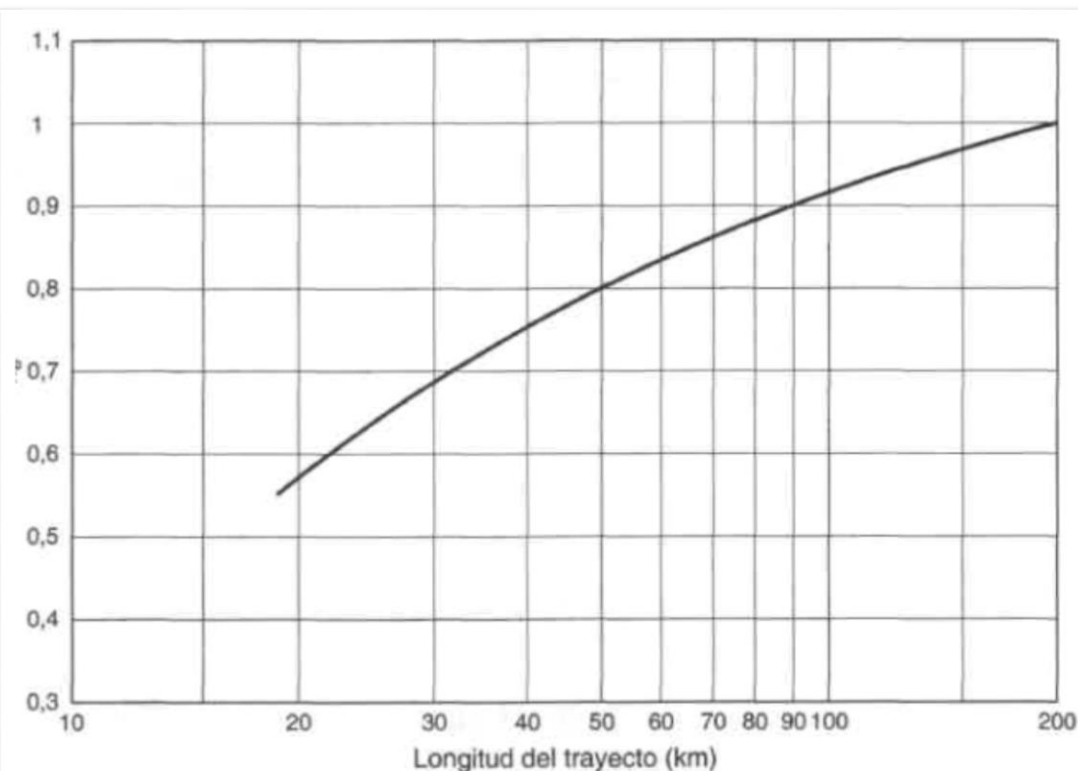
Relación entre K y ΔN .



Ver Excel.

Variación de ΔN a lo largo del trayecto y del tiempo.

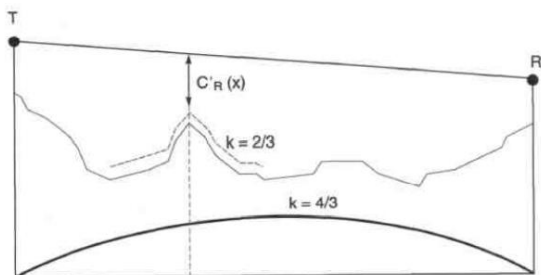
- Si llamamos $\Delta N = dN/dh$ $R_o' = kR_o \Rightarrow k = \frac{157}{157 + \Delta N}$
- ΔN es una v.a. (variable aleatoria) normal, $N(\Delta \bar{N}, \sigma_{\Delta N})$ cuyos parámetros estadísticos se conocen.
- Este ΔN varía aleatoriamente, tanto en tiempo como a lo largo del trayecto.
- \Rightarrow En la práctica, se trabaja con un ΔN “efectivo”, ΔN_e , que se supone fijo para todo el trayecto.
 - Si $d < 20$ Km, $\Delta N_e \sim N(\Delta \bar{N}, \sigma_{\Delta N})$
 - Si $d \geq 20$ Km $\Delta N_e \sim N(\Delta \bar{N}, \sigma_{\Delta N_e})$ $\sigma_{\Delta N_e} = \frac{\sigma_{\Delta N}}{\sqrt{1 + d/d_o}}$, $d_o = 13.5$ Km
- Dada la naturaleza estadística, se evalúa el valor mínimo de k a fin de mantener el despejamiento sobre el obstáculo más desfavorable durante la mayor parte del tiempo (Ej: 99.9%, Fig 3.23). Se define,
 - $k_{min} = k(0.1)$ tal que $P_r(k < k_{min}) = 0.1\%$ empleando $k(0.1) = \frac{157}{157 + \Delta N_e(0.1)}$
 - Existen tablas-figuras ITU-R



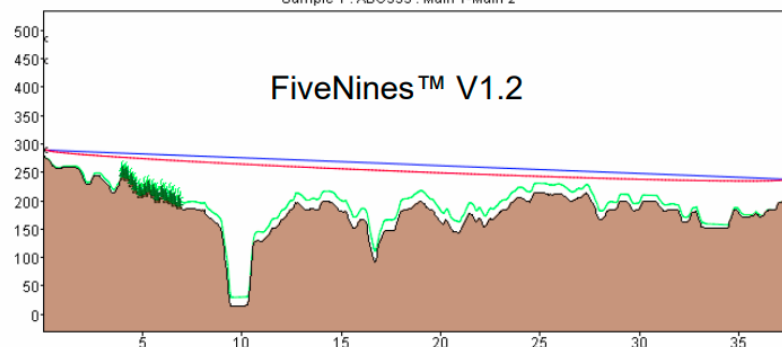
Valor de k_s excedido aproximadamente durante el 99,9% del mes más desfavorable (Clima templado continental)

Figura 3.23.

Perfil de terreno con $K=4/3$ y $k_{min} = 2/3$



Sample 1 : ABC333 : Main 1-Main 2



QUARRYVILLE	
Id:	Site3
Latitude:	39 53 10.00 N
Longitude:	76 15 4.00 W
Ant. Azimuth:	225.91 Deg
Elevation:	281.03 m
Antenna Ht:	9.73 m

Path Length:	37.609 km
Frequency Band:	6000.0 Mhz
First Criteria	
K-Factor:	1.33
% of First Fresnel:	60
Second Criteria	
K-Factor:	0.67
% of First Fresnel:	30

SHAWSVILLE	
Id:	Site4
Latitude:	39 39 0.00 N
Longitude:	76 33 57.00 W
Ant. Azimuth:	45.71 Deg
Elevation:	220.07 m
Antenna Ht:	18.81 m

Reflexión en tierra plana.

▪ Ecuación general de propagación

• La expresión general del campo recibido en estas condiciones viene dada por la “ecuación general de la propagación”:

$$e = e_o \left(\underbrace{1 + R}_{RD} \cdot e^{-j\Delta} + \underbrace{(1 - R)}_{RR} \cdot A \cdot e^{-j\Delta} \right)$$

• Donde:

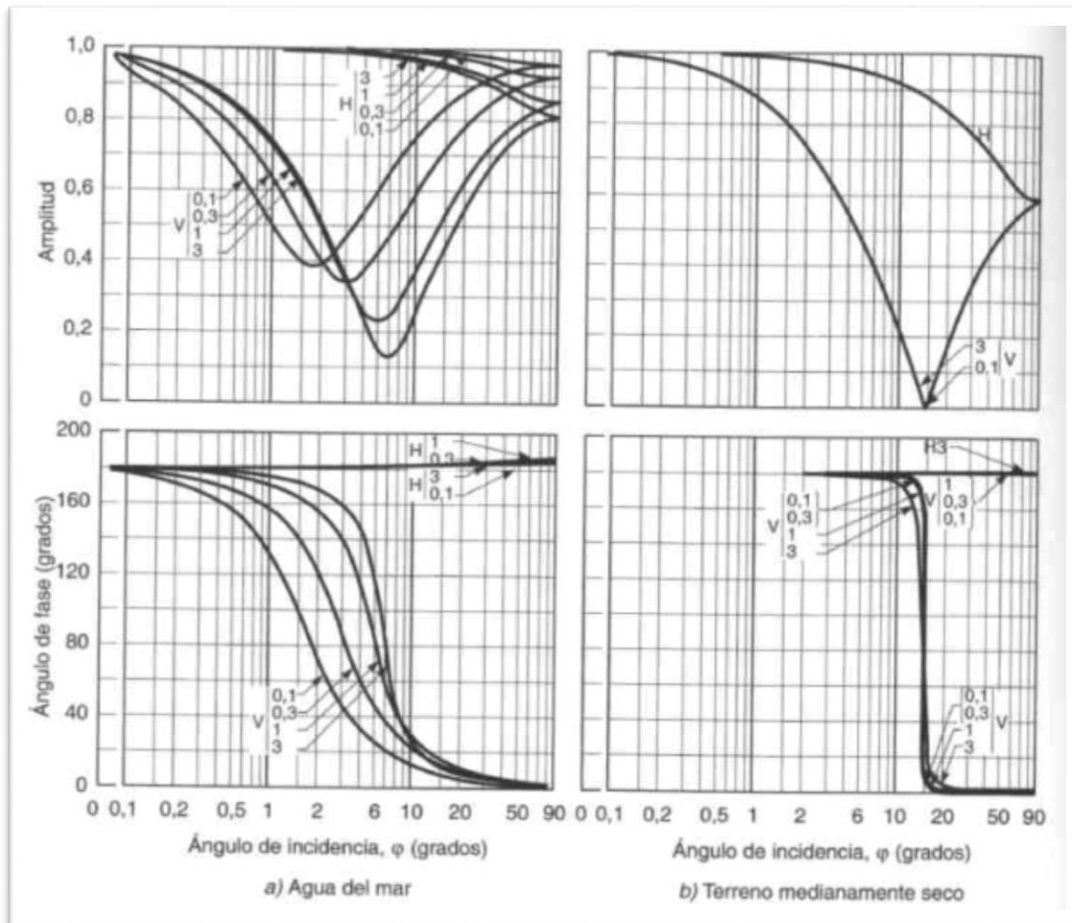
- e intensidad de campo en recepción en condiciones reales
- e_o : intensidad de campo en condiciones de espacio libre

R es el coeficiente de reflexión para tierra plana.

A partir de las propiedades del suelo se define la **permitividad compleja** del suelo como:

$$\epsilon_0 = \epsilon_r - j60\sigma\lambda$$

A continuación, a modo de ejemplo se aprecia estas variaciones para a) agua de mar y b) terreno medianamente seco en función del ángulo de incidencia.



Se sigue con el tema con el modelo de tierra curva.

Distancia de visibilidad radioeléctrica

- ¿Cuándo deja de ser válido el modelo de tierra plana?: distancias del orden de la distancia de visibilidad radioeléctrica
- Alcance, *distancia de visibilidad radioeléctrica*: suma de las *distancias de horizonte*

$$(kR_o + h_t)^2 = d_{ht}^2 + (kR_o)^2 \Rightarrow d_{ht}^2 \approx 2kR_o h_t$$

$$\begin{cases} d_{h_t} \text{ (Km)} = 3.57 \sqrt{kh_t \text{ (m)}} \\ d_{h_r} \text{ (Km)} = 3.57 \sqrt{kh_r \text{ (m)}} \end{cases}$$

La distancia de visibilidad crece con \sqrt{k}

$$d_v = 3.57(\sqrt{kh_t} + \sqrt{kh_r})$$

Ej: $d_v(k = 4/3) = 4.1(\sqrt{h_t \text{ (m)}} + \sqrt{h_r \text{ (m)}})$

Para h_r y $h_t = 1$ m. y $k=1 \rightarrow d_v = 7,1$ km. Ver Excel

Perfiles y condición de tierra curva

- Se toma la siguiente notación
 - x : distancia del transmisor a un punto, (km)
 - $c(x)$: altura del terreno sobre el nivel del mar, (m)
 - $f(x)$: **protuberancia** de la tierra o **flecha** (m)
 - $z(x)$: altura del terreno sobre la base (m), $z(x) = f(x) + c(x)$
 - $y_R(x)$: altura del rayo sobre la base (m)
 - $h(x)$: **despejamiento** o altura del rayo directo sobre el terreno, en metros

Aquí es donde incluimos la curvatura del rayo

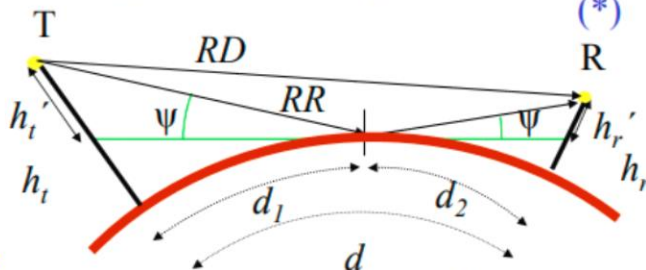
$$f(x) = \frac{x \cdot (d-x)}{2kR_o} = 0.07849 \frac{x \cdot (d-x)}{k}$$

- Tierra curva: si la flecha ($f(x)$ máx) es mayor de 5 metros.

Teniendo en cuenta las limitaciones del modelo de tierra plana, vamos a calcular las pérdidas para el modelo de **tierra curva**. Ver Excel

Modelo de Reflexión, sobre tierra curva

$$\left. \begin{aligned} h_t' &= h_t - \frac{d_1^2}{2kR_0} \\ h_r' &= h_r - \frac{d_2^2}{2kR_0} \\ \frac{h_t'}{h_r'} &= \frac{d_1}{d_2} \\ d &= d_1 + d_2 \end{aligned} \right\} d_1^3 - \frac{3d}{2}d_1^2 - \left[kR_0(h_t + h_r) - \frac{d^2}{2} \right]d_1 + kR_0h_t d = 0 \quad (*)$$



(*) Solución: si asociamos T y l al de mayor altura,

$$d_1 = \frac{d}{2} + p \cdot \cos\left(\frac{\pi + \phi}{3}\right) \quad \left\{ \begin{aligned} p &= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[6,37 \cdot k \cdot (h_t + h_r) + \left(\frac{d}{2}\right)^2 \right]^{1/2} \\ \phi &= \arccos \left[\frac{12,74 \cdot k (h_t - h_r) \cdot d}{p^3} \right] \end{aligned} \right. \quad \left. \begin{aligned} & \text{Donde} \\ & h \text{ (m), } d \text{ (km)} \end{aligned} \right\}$$

- Una vez calculadas d_1 y d_2 (en km), se calculan las alturas

$$h_t' = h_t - \frac{4d_1^2}{51k} \quad h_r' = h_r - \frac{4d_2^2}{51k}$$

- Y el ángulo de incidencia en miliradianes $\psi(\text{mrad}) = \frac{h_t' + h_r'}{d}$

- El límite sobre el cual se puede aplicar óptica geométrica,

¡Ojo! $\psi > \psi_{\text{lim}}$, $\psi_{\text{lim}}(\text{mrad}) = (5400 / f)^{1/3}$, $f(\text{MHz})$

- La diferencia de recorridos, $\Delta l(\text{m}) = \frac{2h_t' h_r'}{d} \cdot 10^{-3}$

- La diferencia de fases, $\Delta = \frac{2\pi \cdot \Delta l}{\lambda} = \frac{\pi \cdot f(\text{MHz}) \cdot \Delta l}{150} \quad (0-2\pi)$

Si ψ fuera menor deberíamos considerar el modelo de difracción sobre tierra esférica que no se suele usar. Ver Excel

Coeficiente Reflexión efectivo

- La reflexión sobre superficie esférica convexa produce **divergencia** que se traduce en reducción aparente del coeficiente de reflexión,

$$R_e' = R \cdot D \quad D = \left[1 + \left(\frac{5}{16k} \right) \frac{d_1^2 \cdot d_2}{d \cdot h_t'} \right]^{-1/2} \quad (D < 1)$$

- Se puede además corregir el coeficiente de Reflexión introduciendo una atenuación (en el RR) debida a la rugosidad del terreno

$$R_e = R \cdot D \cdot e^{-\gamma^2/2}, \text{ donde } \gamma = \frac{4 \cdot \pi \cdot \sigma_z \cdot \text{sen } \psi}{\lambda}$$

y σ_z es la desviación típica de las ondulaciones del terreno

Calculo final de pérdidas para el modelo de tierra curva.

- Con todo esto es posible formular

$$|e| = |e_o| \cdot [1 + |R_e|^2 + 2 \cdot |R_e| \cdot \cos(\beta + \Delta)]^{1/2}$$

- Donde Δ se calcula con h_i' y h_r'
- Y R_e se ha actualizado convenientemente

- Y la pérdida básica de propagación

$$L_b = L_{bf} - 10 \log_{10} [1 + |R_e|^2 + 2 \cdot |R_e| \cdot \cos(\beta + \Delta)]$$

Propagación por difracción:

■ **Problema**

- La propagación encuentra un obstáculo:
 - Por el modelo sencillo de óptica geométrica no habría propagación



- Si recurrimos a un modelo más exacto se comprueba que sí es posible

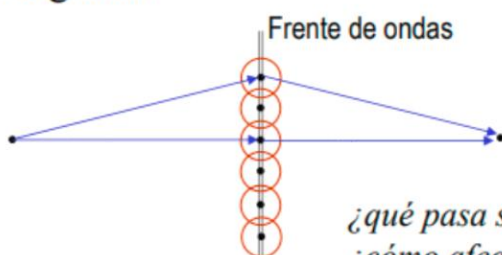


Objetivos: modelar este fenómeno y calcular las pérdidas

- para obstáculos agudos o redondeados, aislados ó múltiples
- y ver cómo se trabaja en la práctica

- Por el principio de Huygens sabemos que en un frente de onda
 - todos los puntos se comportan como fuentes de ondas esféricas
- Por lo tanto, por encima del obstáculo, el frente de onda
 - Se comporta como un conjunto de transmisores de ondas esféricas
 - Pero como parte del frente de ondas no pasa
 - La señal se atenúa

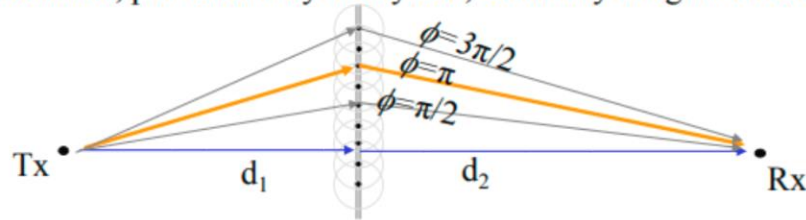
- Esta teoría de un conjunto de fuentes de onda esféricas plantea incógnitas:



*¿qué pasa si llegan con fases opuestas?
¿cómo afectará el obstáculo según este fenómeno?*

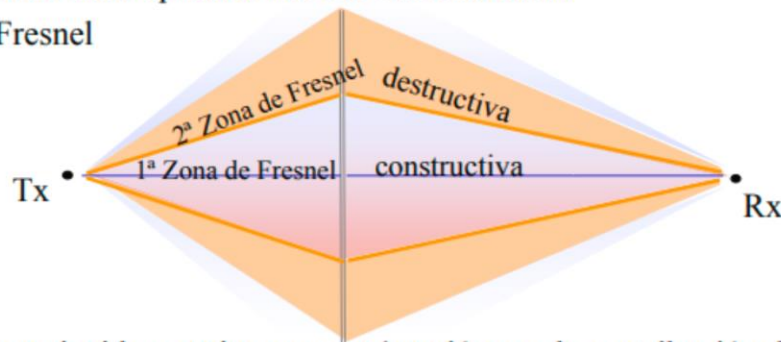
▪ *¿qué pasa si llegan con fases opuestas?*

- Aunque llega atenuada, por tener mayor trayecto, contribuye negativamente en recepción



- Las trayectorias con fases opuestas marcan distintas zonas

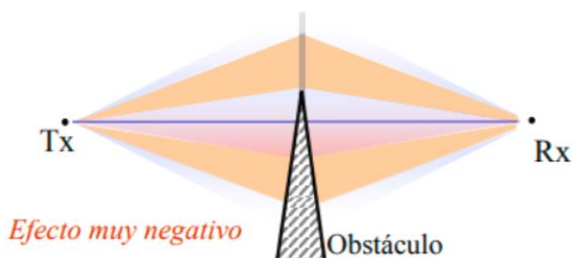
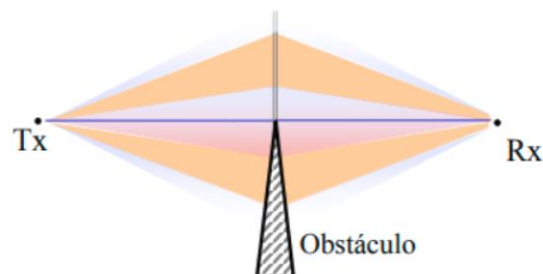
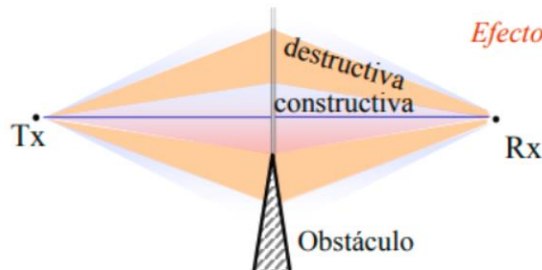
- Zonas de Fresnel



- ▶ El campo en Rx coincide en primera aproximación con la contribución de la primera zona de Fresnel

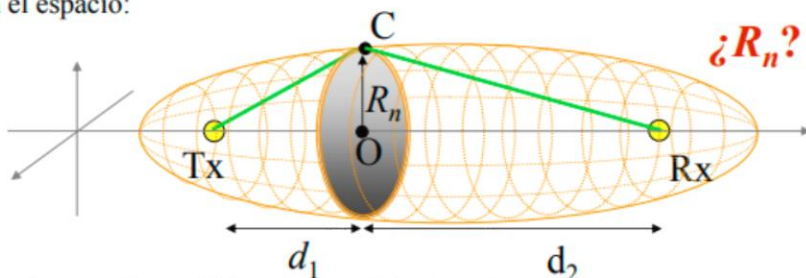
▪ *¿Cómo afecta un obstáculo?*

- Depende de su situación dentro de las zonas

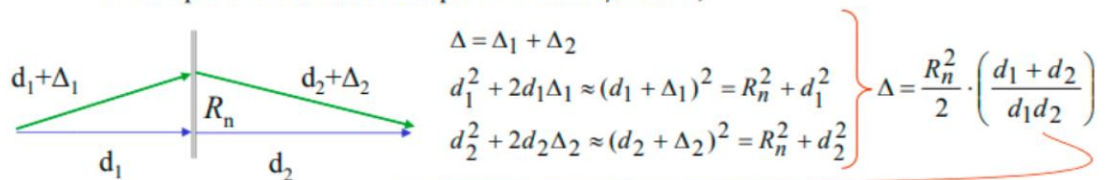


- Queda calcular las zonas de Fresnel,

- En el espacio:



- Si se impone la condición de que el desfase ϕ sea $n\pi$,



$$\phi = n\pi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{R_n^2}{2} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right) = \frac{\pi}{2} v^2 \Rightarrow R_n = \sqrt{\frac{\lambda n d_1 d_2}{d_1 + d_2}} = \begin{cases} R(\text{m}) \\ f(\text{MHz}) \\ d_1, d_2(\text{Km}) \end{cases} = 548 \sqrt{\frac{n d_1 d_2}{f(d_1 + d_2)}}$$

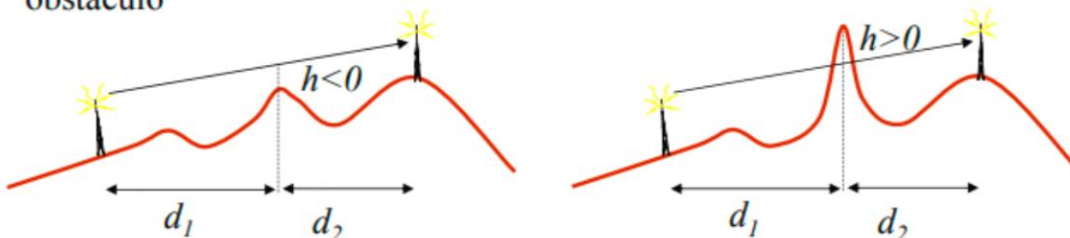
Parámetro de difracción Fresnel-Kirchoff

Ver Excel

- El radio de la primera zona de Fresnel

$$R_1 = 548 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f(d_1 + d_2)}} \text{ es menor a } \begin{cases} \text{Mayor distancia al punto medio} \\ \text{Mayor frecuencia} \end{cases}$$

- Se considera **visibilidad directa** si no existe ningún obstáculo en la primera zona de Fresnel (primer elipsoide).
- Se denomina **despejamiento** a la distancia entre el rayo directo y el obstáculo



- La zona correspondiente a propagación por difracción se corresponde con $-0.6 \leq h/R_1 \leq \infty$. En radioenlaces suele trabajarse con la gama $-0.6 \leq h/R_1 \leq 0.5$

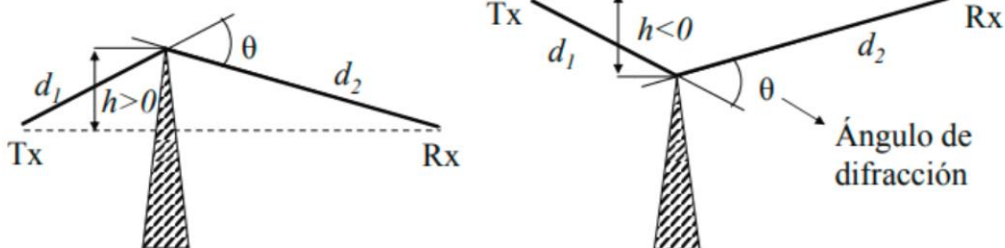
3. Tipos de atenuaciones del trayecto.

Difracción en obstáculos

- El cálculo del efecto de los obstáculos es complicado.
- En la práctica se recurre a métodos aproximados
 - Que proporcionan buenos resultados.
- El primer problema es catalogar una protuberancia como obstáculo
 - Se define el recorrido interdecílico, Δh , como la diferencia entre las cota superada en el 10% y el 90% de los puntos.
 - Este parámetro define la *irregularidad* o la *ondulación del terreno*
- El texto de referencia es la ITU-R P.526
- Aquí se clasifica el terreno [HR 2006] en
 - Poco ondulado: irregularidad pequeña y se utiliza tierra esférica (curva).
 - Terreno ondulado: pequeñas colinas no dominantes.
 - Se resuelven con métodos empíricos (Ej: ITU-R P.1546)
 - Obstáculos aislados: arista/redondeados y aislado/múltiples

- Obstáculos ($-0.6R_1 < h, f > 30\text{MHz}$):
 - En primera aproximación, los obstáculos se asimilan
 - a una cuña de espesor despreciable (filo de cuchillo) o
 - a una arista gruesa y redondeada definida por el radio de curvatura en la cima r .
 - Se habla también de
 - Obstáculo aislado
 - Obstáculos múltiples

- Obstáculo Aislado: obstáculo agudo



- La ITU-R P.526 proporciona valores de la atenuación en función del parámetro de difracción

$$v = h \left[\frac{2 \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right) \right]^{1/2} = \theta \left[\frac{2 \left(\frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \right) \right]^{1/2}$$

Se deduce que $v = \sqrt{2} \cdot h / R_1$ ($=\sqrt{2} \cdot$ despejamiento normalizado)

$$v = 2.58 \cdot 10^{-3} \cdot \left[\frac{f \cdot d}{d_1 d_2} \right]^{1/2} \cdot h$$

h en m, d , d_1 , d_2 , en Km y f en MHz.

- La atenuación por difracción es

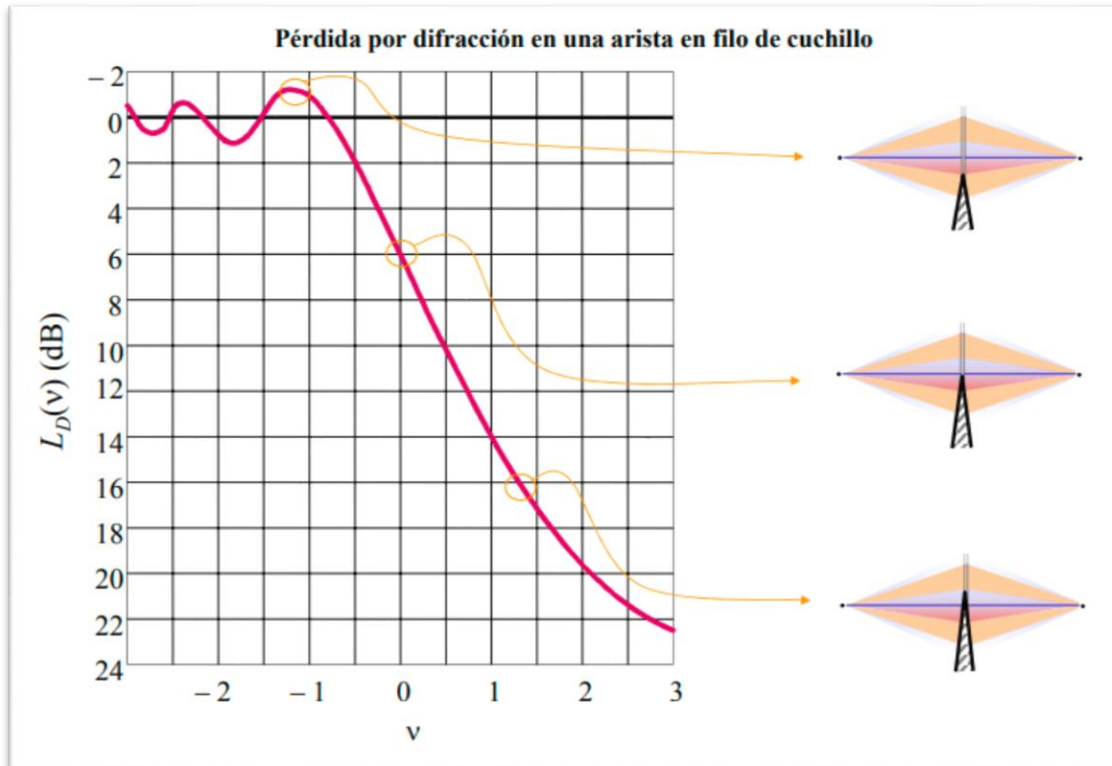
$$L_D(v) = -10 \log_{10} \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{1}{2} - C(v) \right]^2 + \left[\frac{1}{2} - S(v) \right]^2 \right\} \text{ (dB)}$$

Siendo $C(v)$ y $S(v)$ las integrales de Fresnel,...

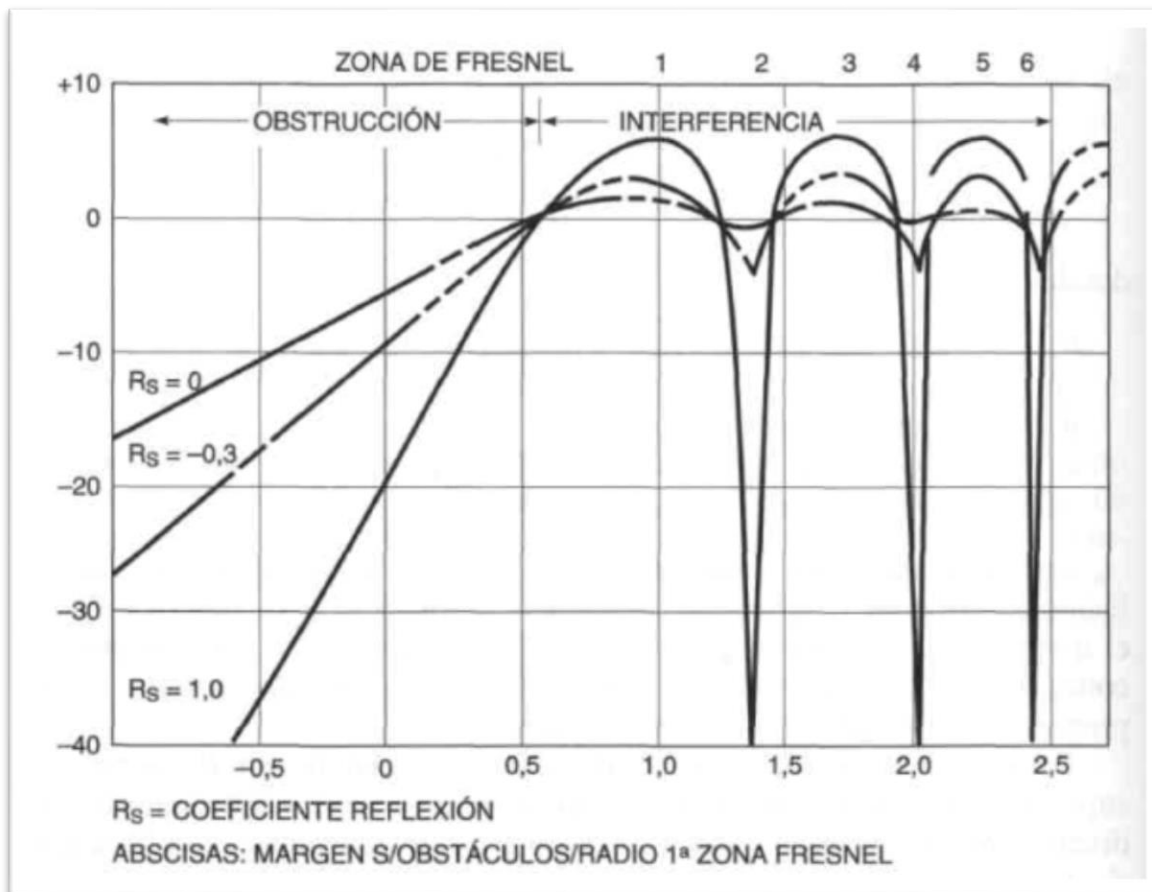
- En la práctica se recurre a gráficas o a la fórmula

$$L_D(v) = 6.9 + 20 \log_{10} (\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1) \text{ dB, Si } v > -0.7$$

$$L_D(v) = 0 \text{ dB, Si } v < -0.7$$

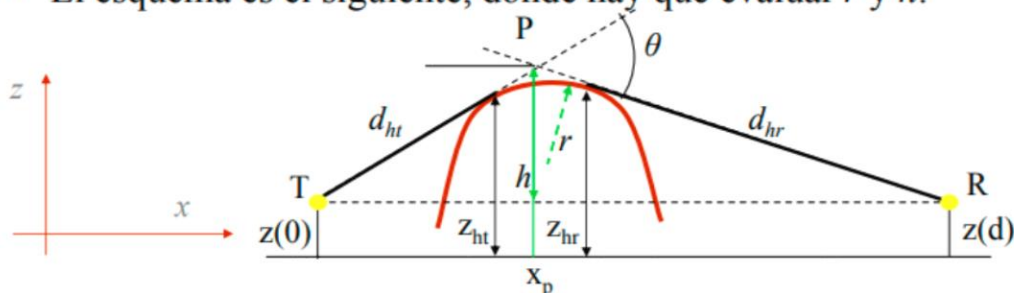


Cuando hay además reflexión sobre los obstáculos tenemos interferencias pronunciadas.



Obstáculos redondeados

- El esquema es el siguiente, donde hay que evaluar r y h .



- En este caso interviene el radio de curvatura del obstáculo

➡ $r(\text{km}) = \frac{d - d_{ht} - d_{hr}}{\theta} \cdot 10^3$, donde $\theta(\text{mrad}) = \frac{z_{ht} - z(0)}{d_{ht}} + \frac{z_{hr} - z(d)}{d_{hr}}$

• Y la altura ➡ $h = x_p \left(\frac{z_{ht} - z(0)}{d_{ht}} - \frac{z(d) - z(0)}{d} \right)$ donde $x_p = \frac{d \cdot \beta}{\theta}$

es la abscisa del punto P y $\beta(\text{mrad}) = \frac{z(d) - z(0)}{d} - \frac{z(d) - z_{hr}}{d_{hr}}$

- Es redondeado si la superficie presenta *irregularidades* menores de $\Delta = 0.04 \cdot (r \cdot \lambda^2)^{1/3}$

- La atenuación por difracción para el obstáculo redondeado viene dada por

$$A = L_D(\nu) + T(m, n)$$

- La L_D es la que correspondería a un obstáculo agudo.
- El sumando $T(m, n)$ viene dado por

$$T(m, n) = 7.3m^{1/2} - (2 - 12.5n)m + 3.6m^{3/2} - 0.8m^2 \quad m \cdot n < 4$$

$$T(m, n) = -6 - 20 \log(m \cdot n) + 7.2m^{1/2} - (2 - 17n)m + 3.6m^{3/2} - 0.8m^2 \quad m \cdot n > 4$$

- donde

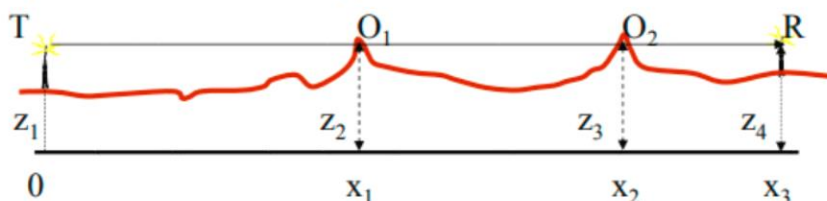
$$m = 0.45708 \frac{d_{h_t} + d_{h_r}}{d_{h_t} \cdot d_{h_r}} \cdot r^{2/3} \cdot f^{-1/3}$$

$$n = 4.787 \cdot 10^{-3} \cdot h \cdot f^{2/3} \cdot r^{-1/3}$$

(r en km, h en m y f en Mhz)

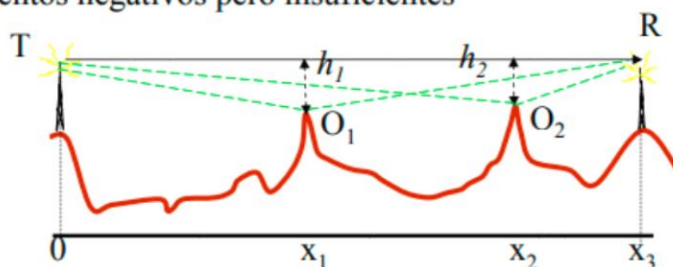
Dos obstáculos aislados

- El esquema ahora es el siguiente



- Se distinguen tres situaciones

- Método EMP: Despejamientos negativos pero insuficientes
 $-0.7 \leq \nu \leq 0$



$$L_D = L_D(TO_1R) + L_D(TO_2R) = L_D(\nu_1) + L_D(\nu_2)$$

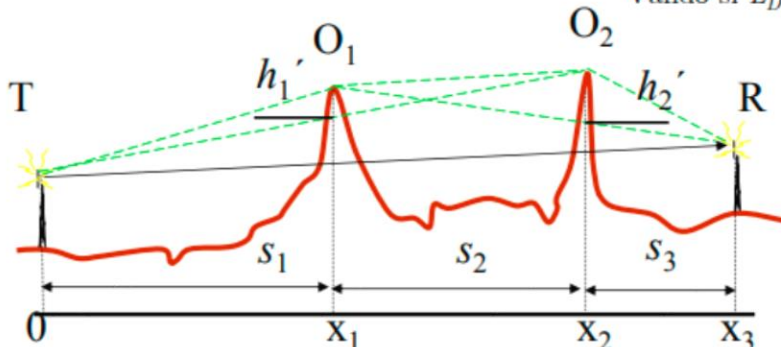
- Método Epstein-Peterson: Despejamientos positivos y parejos

$$L_D = L_D(TO_1O_2) + L_D(O_1O_2R) + L_C = L_D(v_1') + L_D(v_2') + L_C$$

Término de corrección (Millington), que depende sólo de la situación de los obstáculos

$$L_c = 10 \log_{10} \frac{(s_1 + s_2) \cdot (s_2 + s_3)}{s_2 \cdot (s_1 + s_2 + s_3)}$$

Válido si $L_D(v_1'), L_D(v_2') > 15\text{dB}$



- Método de la Rec. 526 ITU-R: Obstáculo con despejamiento positivo y claramente dominante (pérdidas de cada obstáculo dispares)

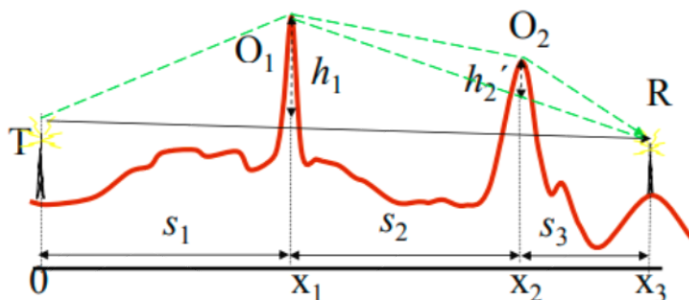
$$L_D = L_D(TO_1R) + L_D(O_1O_2R) - L_C = L_D(v_1) + L_D(v_2') - L_C$$

Término de corrección, que depende de

- la localización de los obstáculos y
- de sus alturas

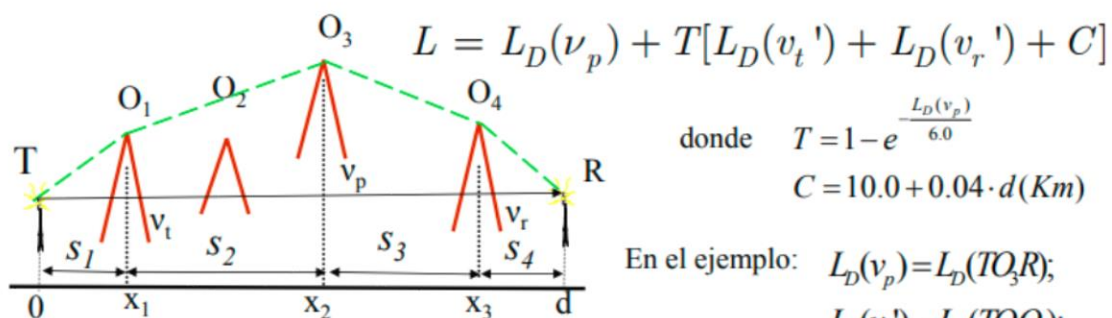
$$L_c = \left[12 - 20 \log_{10} \left(\frac{2}{1 - \alpha / \pi} \right) \right] \cdot \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{2v_1}$$

$$\text{donde } \alpha = \arctg \left[\frac{s_2(s_1 + s_2 + s_3)}{s_1 s_3} \right]^{1/2}$$



Múltiple Obstáculos:

- Rec. 526 ITU-R: Modelo de Deygout modificado
 - Determinar el obstáculo dominante o principal: aquél para el que el parámetro v es el mayor de todos $\rightarrow v_p$.
 - Este obstáculo divide al vano en 2 subvanos
 - En cada subvano se determina el obstáculo dominante: v_t para el del transmisor y v_r para el del receptor.
 - Evaluar la pérdida en exceso con la expresión

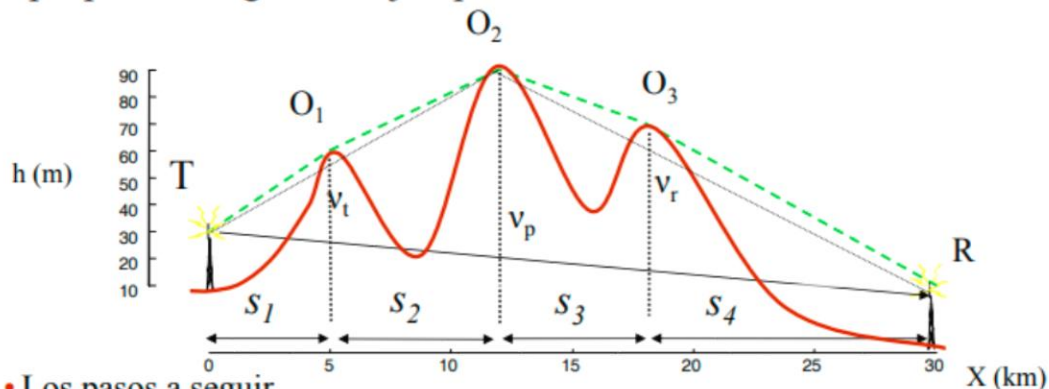


donde $T = 1 - e^{-\frac{L_D(v_p)}{6.0}}$
 $C = 10.0 + 0.04 \cdot d(Km)$

En el ejemplo: $L_D(v_p) = L_D(TO_3R)$;
 $L_D(v_t') = L_D(TO_1O_3)$;
 $L_D(v_r') = L_D(O_3O_4R)$;

- Obstáculos redondeados: se aplica pérdidas pertinentes

- Se propone el siguiente ejemplo:



- Los pasos a seguir

$v_t = 0.092 \rightarrow L_D(v_t) = 6.83\text{dB}$
 $v_p = 0.8 \rightarrow L_D(v_p) = 12.57\text{dB}$
 $v_r = 0.11 \rightarrow L_D(v_r) = 6.98\text{dB}$

$T = 1 - \exp(12.57 / 6) = 0.877$
 $C = 10 + 0.04 \cdot 30$

$L = 12.57 + 0.877 \cdot (6.83 + 6.98 + 11.2) = 34.5\text{dB}$

▪ En la Rec ITU-R P.526 sobre difracción se incluyen además:

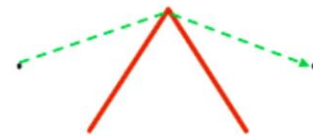
- Difracción sobre tierra esférica: la tierra se presenta como un obstáculo

- Apropiado para trayectos transhorizontes sobre agua o sobre terreno muy plano
- La ITU facilita el programa GRWAVE

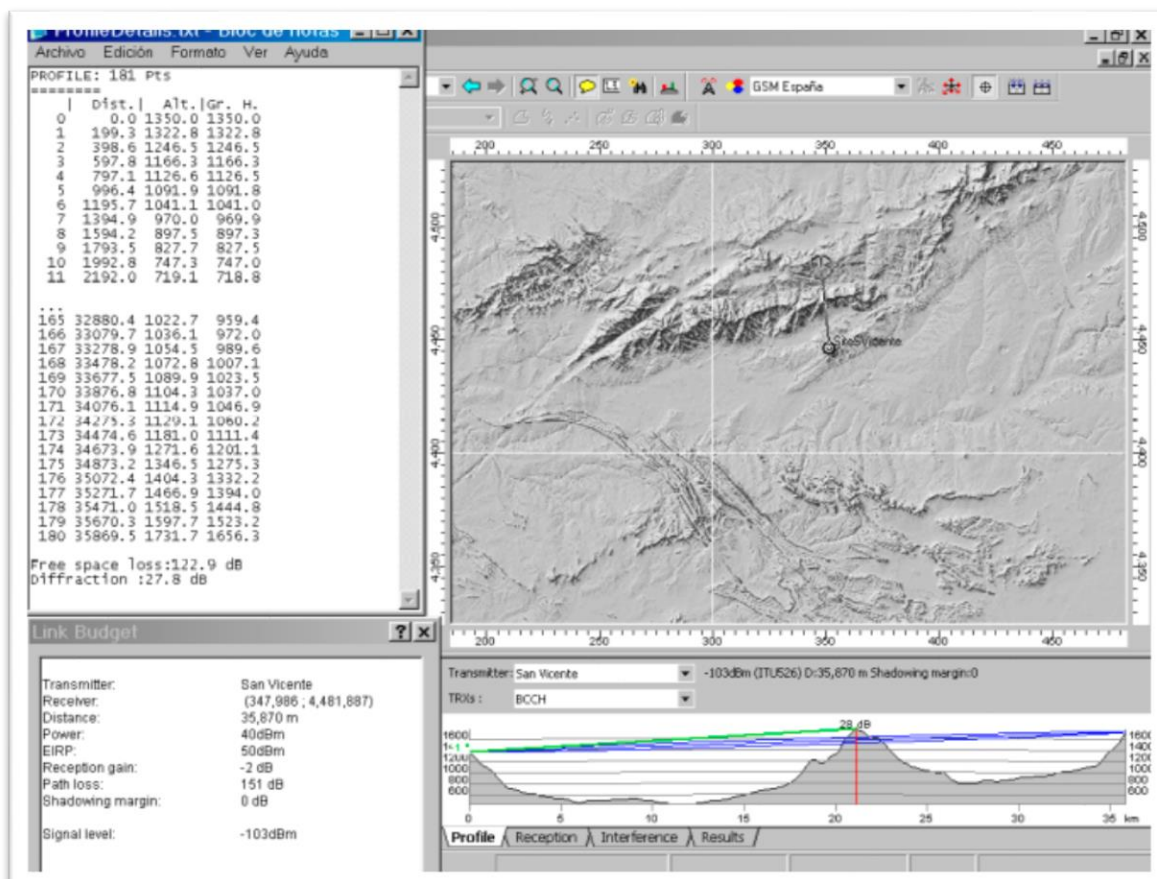
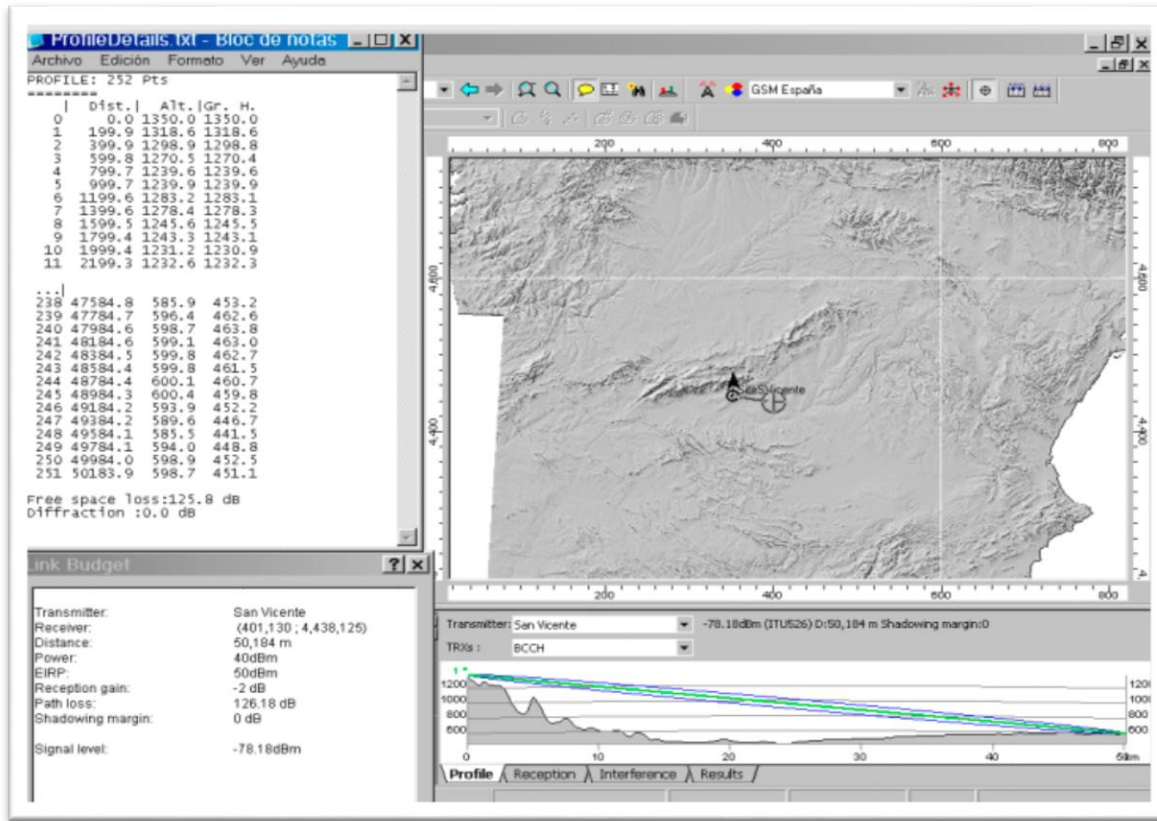


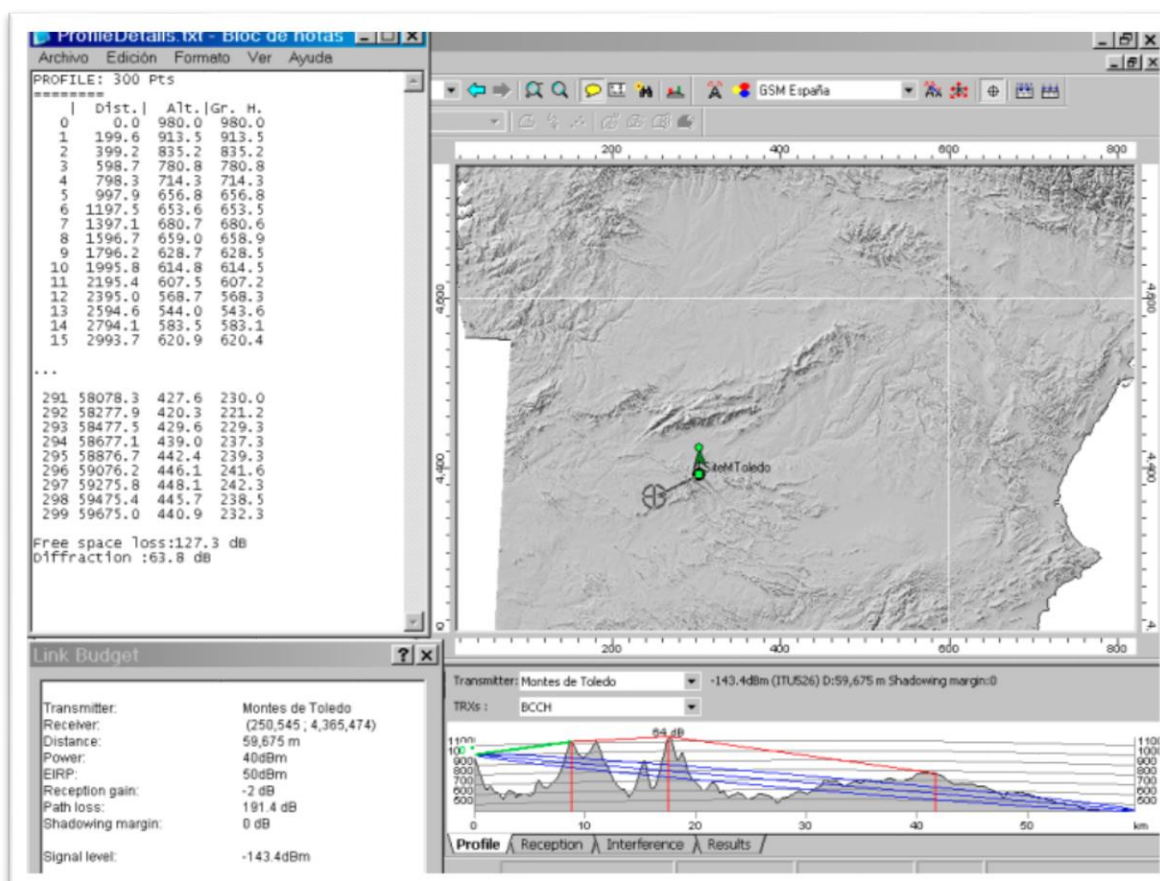
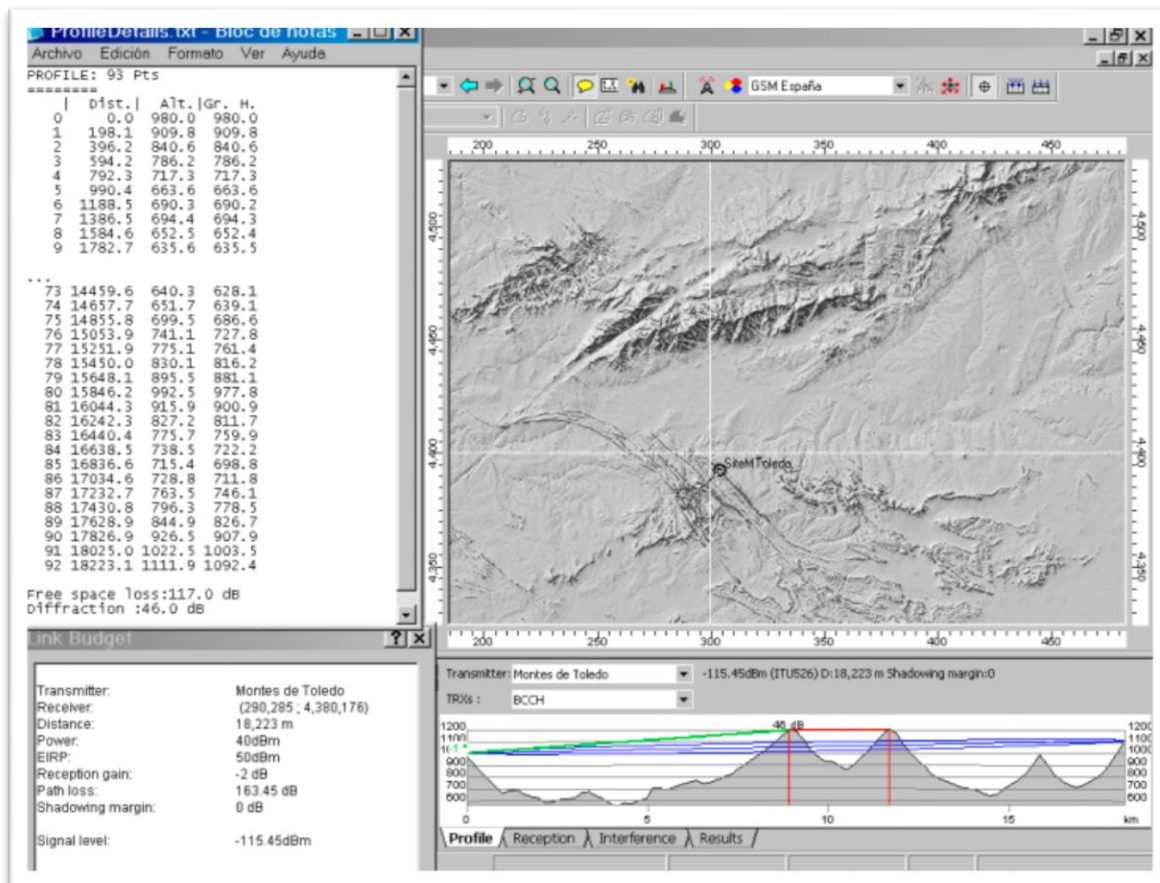
- Difracción sobre un filo conductor finito

- Se utiliza un modelo muy preciso
 - ✓ Esquinas de edificios o tejados
 - ✓ Colinas bien definidas



Algunos ejemplos reales

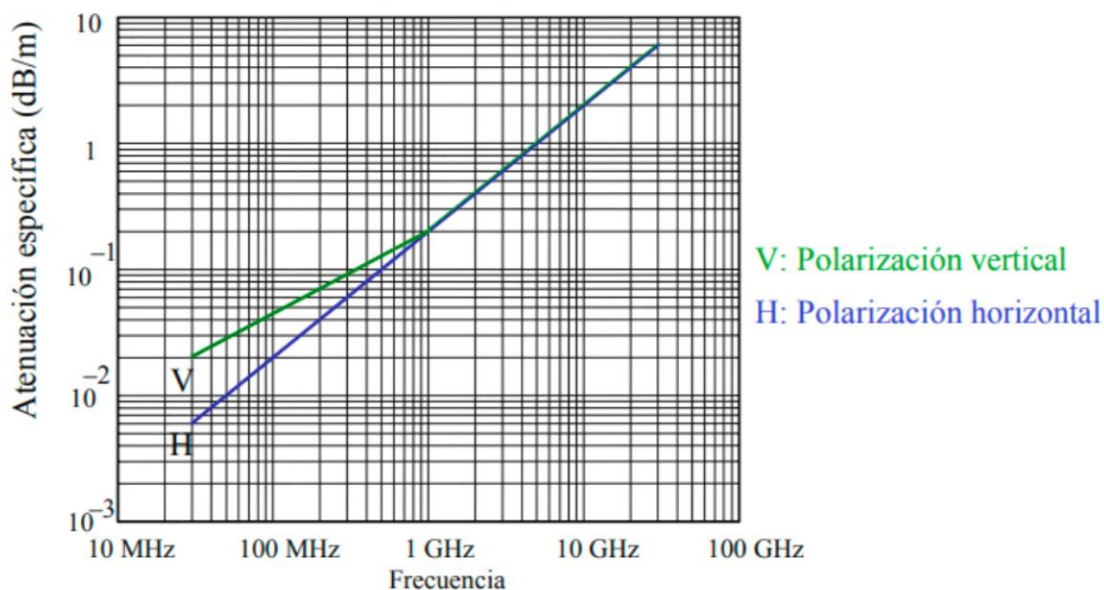




Atenuación y despolarización

▪ **Atenuación por vegetación ITU-R P.833**

Atenuación específica γ en zona boscosa



▪ Cuando ni el transmisor ni el receptor están en zonas arboladas

- pero hay una parte del recorrido que sí
- y la frecuencia es inferior a 1GHz

$$L_{veg} = l_{veg} \cdot \gamma$$

▪ Cuando el transmisor o el receptor están en zonas arboladas

- y la parte del recorrido en bosque es d
- si L_m es la pérdida si todo el recorrido fuera en bosque

$$L_{veg} = L_m (1 - \exp(-d\gamma / L_m))$$

▪ Cuando esta atenuación es alta (ej. frecuencias altas)

- debe considerarse la posibilidad de difracción

▪ A $f > 1\text{GHz}$: difracción, dispersión, reflexiones,...

▪ Atenuación por gases y vapores atmosféricos Rec. ITU-RP.676

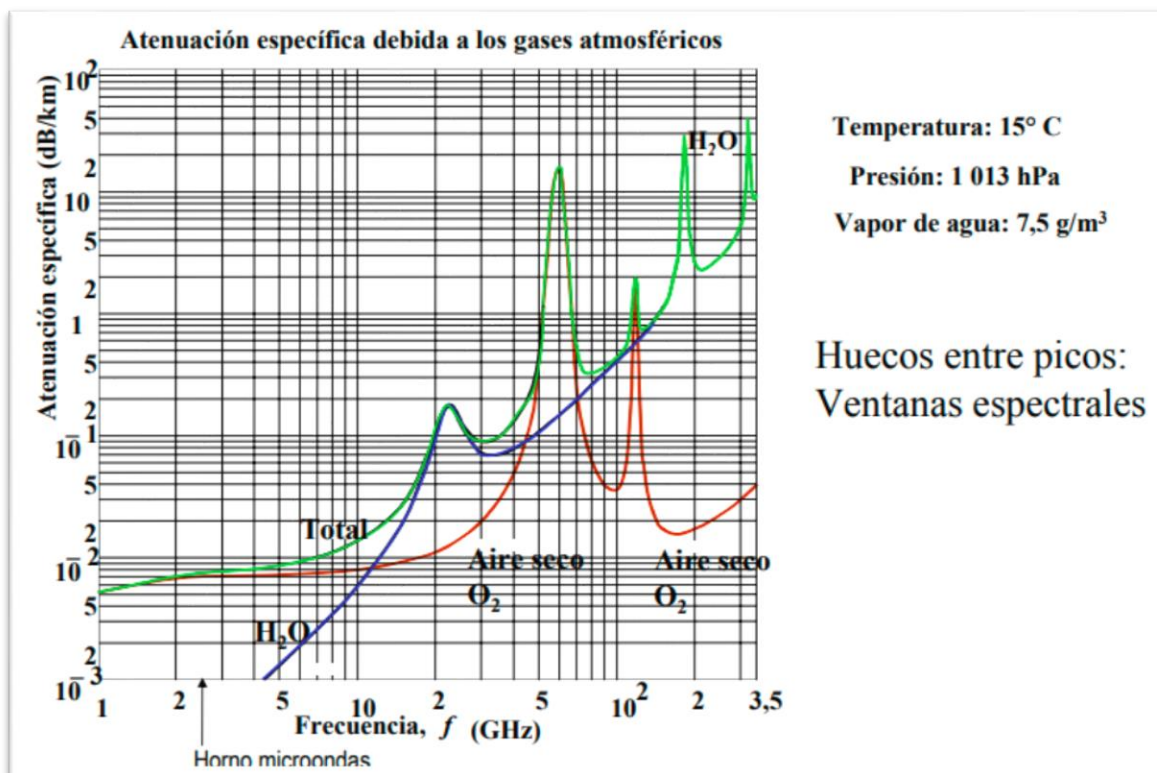
- Frecuencias $f > 10\text{GHz}$
- Trayectos poco inclinados, cercanos al suelo

$$A_a = \gamma_a \cdot d$$

Donde la atenuación específica (dB/m)

$$\gamma_a = \gamma_o + \gamma_w \quad (\text{oxígeno y vapor de agua})$$

- Dependen de la frecuencia
 - Tal como se desprende de las expresiones que proporciona la ITU-R P.676 .



- La atenuación por lluvia se calcula (**f > 6 GHz**) (ó 7GHz en RL)

$$A(R,p) = \gamma(R, p) \cdot L_{ef}$$

Donde $\gamma = k R_p^\alpha$ (dB/m) y

- 1) α y k se calculan ITU-R P.838:

- Para polarizaciones vertical y horizontal

$$\left\{ \begin{array}{l} \log k = \sum_{j=1}^4 g(a_j, b_j, c_j, f) + m_k \cdot \log f + c_k \\ \alpha = \sum_{j=1}^5 g(a_j, b_j, c_j, f) + m_\alpha \cdot \log f + c_\alpha \\ g(a_j, b_j, c_j, f) = \alpha_j \exp \left(- \left(\frac{\log f - b_j}{c_j} \right)^2 \right) \\ f : \text{frecuencia (GHz)} \\ k : k_H, k_V \\ \alpha : \alpha_H, \alpha_V \\ a_j, b_j, c_j, m_k, m_\alpha, c_k, c_\alpha : \text{en tablas} \end{array} \right.$$

- Para polarizaciones lineales y circulares

$$k = [k_H + k_v + (k_H - k_v) \cos^2 \theta \cos^2 \tau] / 2$$

$$\alpha = [k_H \alpha_H + k_v \alpha_v + (k_H \alpha_H - k_v \alpha_v) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2k$$

θ es el ángulo de inclinación del trayecto

τ es el ángulo de inclinación de la polarización respecto a horizontal

- 2) La intensidad de lluvia excedida en el $p\%$ del tiempo, R_p , se puede calcular siguiendo la ITU-R P.837 o con mapas
 - En España, para $p=0,01\%$ del año medio varía entre 20 y 40 mm/h

- 3) La longitud efectiva, el otro parámetro de la atenuación, es, para $R < 100 \text{ mm/h}$,

$$L_{ef} = \frac{d}{1 + d/d_o} \quad (\text{distancias en km})$$

- Donde para el 0.01% del tiempo y $R < 100 \text{ mm/h}$ $d_o = 35 \cdot e^{-0.015 \cdot R_{0.01}}$

- Conocido el valor de la atenuación excedida el 0.01% del tiempo, se puede calcular el valor en la gama 0.001% a 1% mediante

- para latitudes superiores a 30° (N ó S) (España >36°),

$$A_p = A_{0.01} \cdot 0.12 \cdot p^{-(0.546+0.043 \cdot \log p)} \text{dB}$$

- o en caso contrario

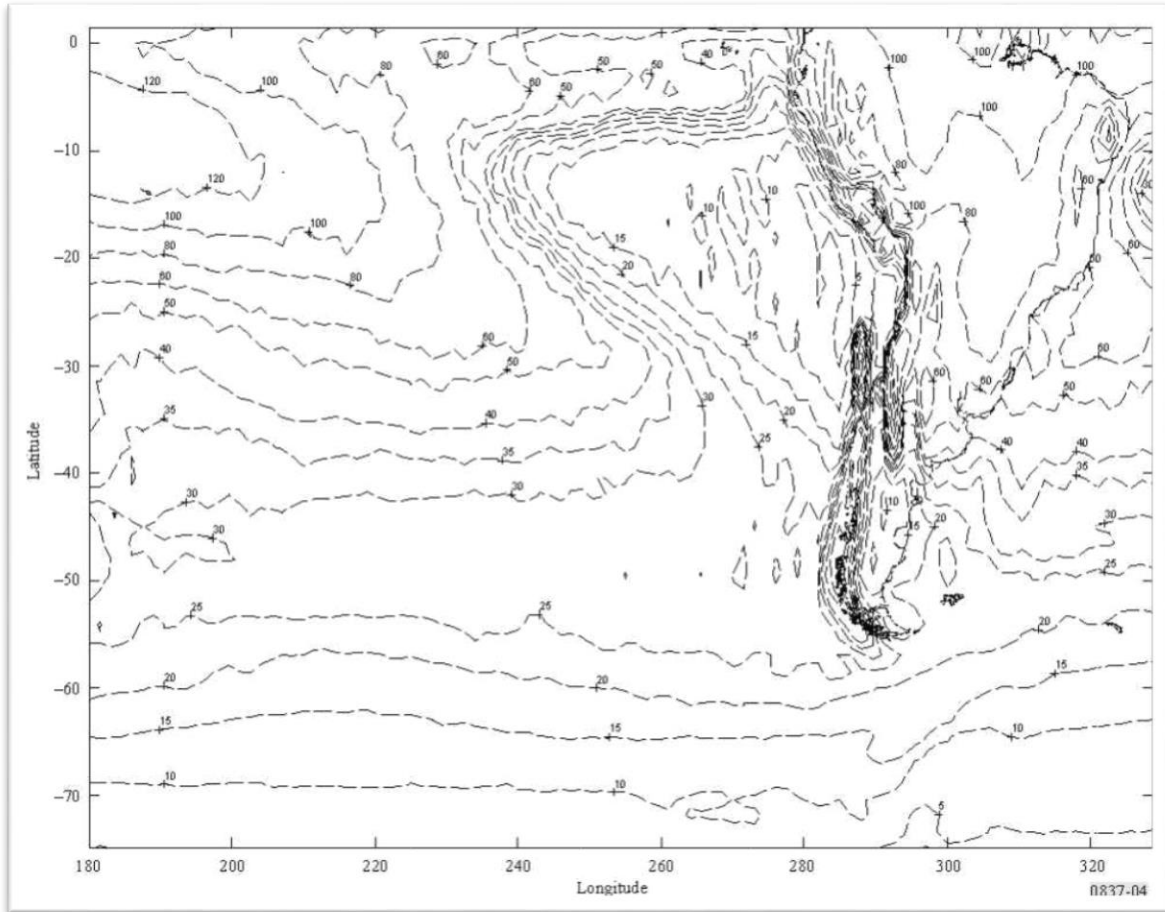
$$A_p = A_{0.01} \cdot 0.07 \cdot p^{-(0.855+0.139 \cdot \log p)} \text{dB}$$

- Existen expresiones para calcular la atenuación
 - Para polarización vertical en función de la atenuación para pol. Horizontal
 - Para una frecuencia dada la atenuación para otra.

Resumen de atenuación por lluvia.

- Objetivo: calcular $A(R,p) = \gamma(R,p) \cdot L_{ef}$
 si la frecuencia es mayor de 6 GHz (7GHz en RL),
- Para ello
 - Calcule $\gamma(R) = k R^\alpha$
 - Para polarización H ó V los valores k y α
 - Calcule R excedido en $p=0.01\%$ tanto por ciento del tiempo
 - ✓ Tablas ó figuras
 - ✓ Expresiones
 - Calcule $L_{ef} = \frac{d}{1+d/d_o}$ con $d_o = 35 \cdot e^{-0.015 \cdot R_{0.01}}$ (Si $R_{0.01} > 100$, $R_{0.01} = 100 \text{mm/h}$)
 - Calcule $A_{0.01} = \gamma \cdot L_{ef}$
 - Para cualquier otro $p\%$ $A_p = A_{0.01} \cdot 0.12 \cdot p^{-(0.546+0.043 \cdot \log p)} \text{dB}$
 - Se puede convertir a otra frecuencia y polarización.

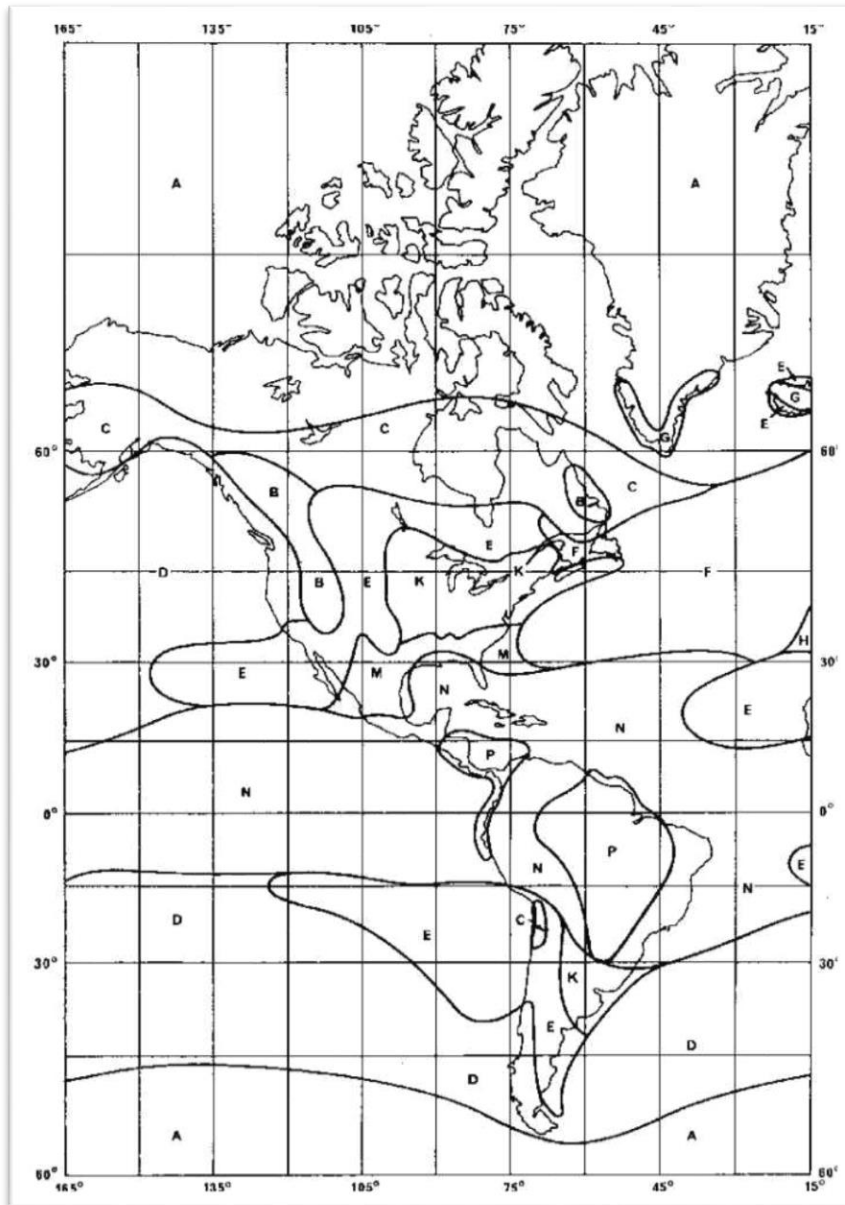
Mapa de ITU-R P.837-4 (Intensidad de la lluvia excedida (mm/h) el 0.01 % del tiempo)



ZONAS HIDROMETEOROLÓGICAS (de ITU-R PN.837-1)

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115

Intensidad de la lluvia excedida (mm/h) el 0.01 % del tiempo



Despolarización.

Discriminación por polarización cruzada [pp 78 HR 2006]

$$XPD(dB) = 10 \log_{10} \frac{PrV}{PrH'} = 10 \log_{10} \frac{PrH}{PrV'}$$

- La **lluvia** provoca efecto de despolarización de la señal,
 - Se traduce en una degradación de la *discriminación por polarización cruzada* (XPD): Interferencia cocanal.
 - La distribución XPD puede calcularse a partir de la distribución de la *atenuación copolar* (CPA) por lluvia (ITU-R PN 530)

$$XPD = U - V(f) \cdot \log(CPA)$$

- Los parámetros involucrados son empíricos
- Para trayectos con
 - visibilidad directa,
 - ángulos de elevación pequeños
 - y polarización horizontal o vertical
$$\left. \begin{array}{l} U = 15 + 30 \log f(\text{GHz}) \text{ dB} \\ V(f) = 12.8 \cdot f^{0.19} \quad 8 \leq f \leq 20 \text{ GHz} \\ V(f) = 22.6 \quad 20 \leq f \leq 35 \text{ GHz} \end{array} \right\}$$
- Se puede extrapolar de una frecuencia f_1 a otra frecuencia f_2

$$\left. \begin{array}{l} XPD(f_2) = XPD(f_1) - 20 \log(f_2 / f_1) \\ 4 \leq f_1, f_2 \leq 30 \text{ GHz} \end{array} \right\}$$

4. Tipo de desvanecimientos de la señal.

Introducción:

¿Qué es el desvanecimiento? ¿Cuáles son sus parámetros?

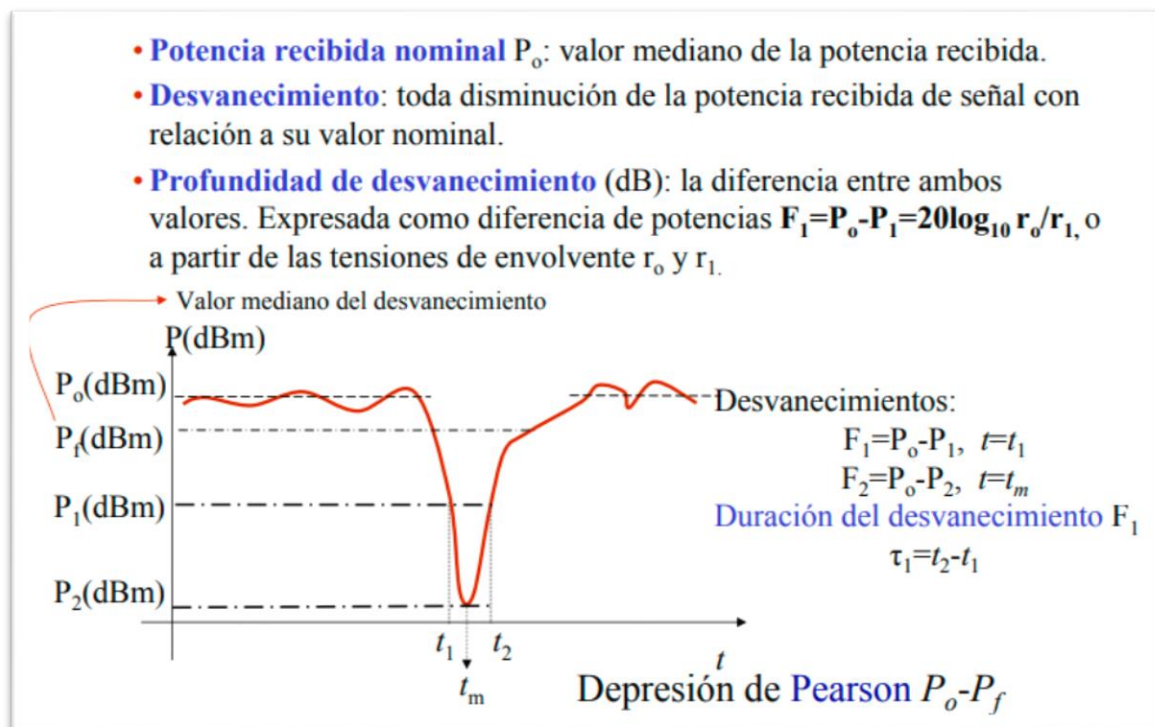
¿Cómo se clasifican los desvanecimientos?

¿Qué características tiene el multitrayecto atmosférico?

¿Cómo modelamos estadísticamente el desvanecimiento?

¿Qué desvanecimiento hay debido al suelo?

¿Cómo modelo el desvanecimiento selectivo en frecuencia? ¿Qué estadísticas tiene?



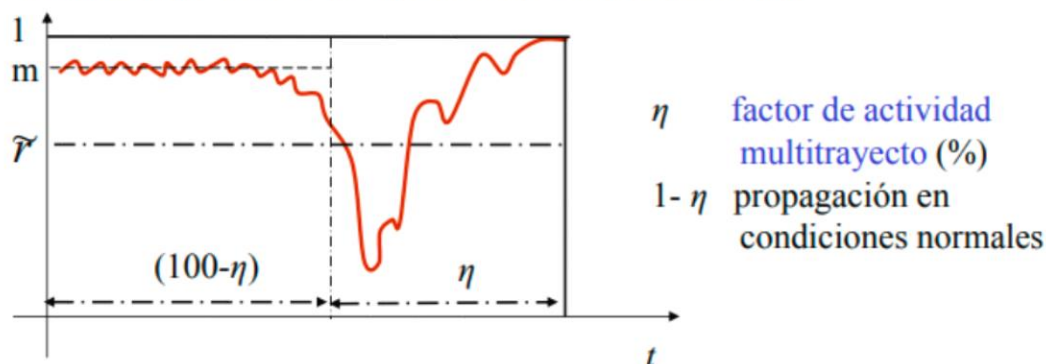
Característica		
Profundidad	Profundo (~3dB)	Muy profundo (>20)dB
Duración	Lento	Rápido
Espectro de frecuencias	Plano	Selectivo
Causa	Factor k	Multitrayecto
Distribución	Gaussiano	Rayleigh, Rice
Dependencia temporal	Continuado	Puntual

Causas:

- **Factor k**
 - Desvanecimiento lento de duración larga, con hasta 6 dB de profundidad
 - El radio de Fresnel depende de la frecuencia, aún así la variación no es significativa dentro del canal. Por ello se consideran planos
 - También pueden ocurrir desvanecimientos por mecanismos de superrefracción y formación de conductos que desenfocan el haz radioeléctrico.
 - Este grupo se modela como una gaussiana o expresiones empíricas.
 - Los desvanecimientos de factor k pueden evitarse mediante alturas de antenas adecuadas.
- **Multitrayecto: multitrayectos atmosféricos y suelo (u otros).**
 - Suele ser muy profundo y selectivo en frecuencia
 - Se modela como Rayleigh o Rice
- **Centelleo**
 - Irregularidades en la troposfera
 - De pequeña intensidad

Multitrayectos atmosféricos

- Obviamos el suelo y estudiamos *Dependencia con Distancia, Gradiente N, Espesor, Altura y Grado de estratificación atmosférica.*
- Si existe componente dominante \Rightarrow Distribución Rice. Ej: radioenlaces
- Si no existe componente dominante \Rightarrow Distribución Rayleigh. Ej: **com. Móviles** (*reflexiones en edificios, dispersión, difracción*)



- Multitrayectos atmosféricos:
 - “Mes más desfavorable” para estadísticas de $\eta_{mes+desf.}$
 - Climas templados: η “para el año medio” se corresponde con los 3 meses del verano: $\eta = 3/12 \cdot \eta_{mes+desf.} = 1/4 \cdot \eta_{mes+desf.}$

Estadísticas (sobre el margen del balance de potencia).

- Objetivo: evaluar la probabilidad de que se rebase una determinada profundidad de desvanecimiento F_1 dB $\Rightarrow P(F > F_1)$.
 - Se predice la duración media de los desvanecimientos
 - Se predice la frecuencia de los desvanecimiento: número de desvanecimientos de profundidad superior a F por unidad de tiempo.
 - Si F es pequeña, usualmente centelleo $F \approx 2-5$ dB se aplica una gaussiana. La probabilidad de rebasar F_1 se expresa mediante

$$P_G(F) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{F_1}{\sigma_G} \right)$$

- Si F es grande $F > 15$ dB $P(F_G) \approx 0$ y se aplican estadísticas derivadas de la función Rayleigh. Se modela a continuación.
- Para valores intermedios se usan métodos de interpolación.

Desvanecimientos profundos

- Sea r la tensión de la envolvente de la señal recibida.
- Normalizamos r haciendo 1 la tensión nominal: valor mediano en condiciones de recepción normal, sin desvanecimiento profundo.
- La fdp de r en el modelo de desvanecimiento Rayleigh: $P(r = x) = \frac{2x}{\sigma_r^2} \cdot e^{-x^2/\sigma_r^2}$

• Y la función de distribución $P(r < x) = 1 - e^{-x^2/\sigma_r^2}$

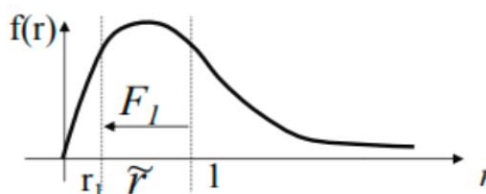
- La profundidad de desvanecimiento F_1 (dB) correspondiente a una tensión recibida normalizada igual a r_1 es

$$F_1 = -20 \log_{10} r_1 \rightarrow r_1^2 = 10^{-F_1/10}$$

- El valor de la mediana

$$-20 \log_{10} \tilde{r} = 1.59 - 10 \log \sigma_r^2$$

$1 - \tilde{r}$ = Depresión de Pearson



- Introduciendo en la función de distribución anterior el valor de $r_1^2 = 10^{-F_1/10}$ y simplificando,

$$P_R(F > F_1 | R) = P(r < r_1) = 1 - \exp(-10^{-F_1/10} / \sigma_r^2) \approx \frac{1}{\sigma_r^2} 10^{-F_1/10}$$

- Se observa que cuando F_1 varía en 10 dB, la probabilidad lo hace en una década, “ley de 10dB/década”.
- La probabilidad absoluta de que el desvanecimiento sea superior a F_1 (dB) incluye la probabilidad de que se de este tipo de desvanecimiento $P(R)=\eta$,

$$P(F > F_1) = \eta \cdot P_R(F > F_1 | R) = \frac{\eta}{\sigma_r^2} \cdot 10^{-F_1/10} = P_0 \cdot 10^{-F_1/10}$$



donde $P_0 = \eta / \sigma_r^2$ es el *factor de aparición de desvanecimiento*

- P_0 depende de
- longitud
 - frecuencia
 - terreno
 - clima

$$P(F_1) = P_0 \cdot 10^{-F_1/10}$$

Esta última fórmula es utilizada en todos los métodos de cálculo. Estos difieren sólo en la forma de evaluar P_0 como veremos a continuación.

Métodos de cálculo de la probabilidad de desvanecimiento

- La ITU-R proporciona la siguiente relación empírica entre η y P_0

$$\eta = 1 - \exp(-0.2 \cdot P_0^{0.75})$$

▪ Método de Mojoli

- El valor de P_0 para el mes más desfavorable se calcula como sigue,

$$P_0 = 0.3 \cdot a \cdot b \cdot \left(\frac{f}{4}\right) \cdot \left(\frac{d}{50}\right)^3 \quad \text{Ver ejemplo} \quad \text{!!}$$

- Donde:

- f frecuencia en GHz
- d longitud del enlace en Km
- a parámetro descriptivo del clima. $a = [0.25, 4]$. En climas templados $a=1$, en secos y montañosos, $a=0.25$, para climas húmedos o que presentan variaciones térmicas intensas (desiertos), $a=4$.
- b parámetro que incluye la influencia del terreno. Para terrenos medianamente ondulados con una ondulación s comprendida entre 5 y 100 m

$$b = \left(\frac{s}{15}\right)^{-1.3}$$

s es la desviación típica terreno sin tener en cuenta el primer y último km

Métodos 1 y 2 Rec 530 ITU-R

- Objetivo: predicción de la probabilidad de desvanecimiento, para el peor mes del año en cualquier parte del mundo
- Dos métodos
 - Método 1:
 - Para pequeños porcentajes de tiempo
 - Para grandes profundidades de desvanecimiento
 - No se utiliza el perfil del trayecto
 - Útil para la planificación inicial o solicitud de licencia de un radioenlace
 - Método 2
 - Para cualquier profundidad de desvanecimiento, mezcla de
 - ✓ Método para desvanecimientos profundos
 - ✓ Interpolación para desvanecimientos poco intensos
- Se completan estos métodos con la conversión entre distribución media anual y mes más desfavorable.
- Se desarrollará el método 1.

- Método 1 de la Rec 530 ITU-R.
 - Validez: desde $f_{\min}=15/d$ (GHz) hasta 45 GHz
 - Error: 5.2dB a 7.3 dB
- Se siguen los siguientes pasos:
 - 1) Cálculo del **Valor geoclimático** del trayecto, en el mes más desfavorable
 - A partir de datos de desvanecimientos en la zona
 - O estimándolo con

$$K = 10^{-3,9-0,003dN_1} S_a^{-0,42}$$

Donde

- dN_1 : valor del gradiente para los 65 m inferiores de la atmósfera, no superado durante el 1% del tiempo
- s_a : rugosidad del suelo
- Para una estimación rápida se puede utilizar

$$K = 10^{-4,2-0,029dN_1} \quad (\text{Ec. 3.18.16})$$

Método 1 Rec 530 ITU-R

- 2) Se calcula el ángulo de inclinación del trayecto $|\varepsilon_p|$ (mrad) y la altura mínima h_L mediante:

$$|\varepsilon_p| = |h_1 - h_2| / d$$

$$h_L = \min(h_1, h_2)$$

donde h_1 y h_2 son las alturas de las antenas en m sobre el nivel del mar y d es la longitud del trayecto en km.

- 3) El valor de la probabilidad $P(F)$, en %, es

$$P(F) = K \cdot d^{3.2} \cdot (1 + |\varepsilon_p|)^{-0.97} \cdot 10^{[0.032f - 0.00085h_L - F/10]} (\%)$$

donde f está en GHz y d en km.

Para una estimación rápida se puede utilizar

$$P(F) = K \cdot d^3 \cdot (1 + |\varepsilon_p|)^{-1.2} \cdot 10^{[0.033f - 0.001h_L - F/10]} (\%)$$

Utilizando el valor aproximado de K (Ec. 3.18.16)

Haciendo las aproximaciones mencionadas tenemos una desviación típica de errores entre 5,2 dB para enlaces por arriba de los 700m del nivel del mar y 7,3 dB para trayectos marítimos.

Desvanecimiento por reflexión en el suelo

- Longitud pequeña y zonas despejadas: mar, lagos, zonas llanas y húmedas

- La función de transferencia del trayecto es

$$H(\omega) = 1 + b \cdot e^{-j(\omega\tau + \beta)}$$

donde b, τ amplitud y retardo rayo reflejado

β desfase por reflexión

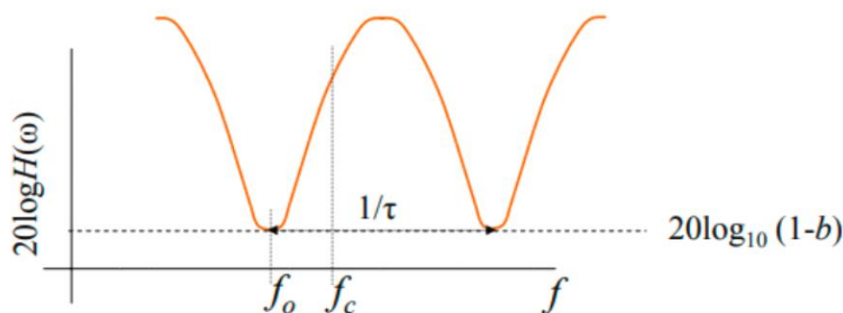
- Así $b = |R| \cdot D \cdot g_{TR} \cdot g_{RR}$

$$\tau = \frac{\Delta}{2\pi f}, \quad \Delta = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda}$$

- Y

$$F_R = -20 \log_{10} |H(\omega)| = -10 \log_{10} [1 + b^2 + 2b \cos(\omega\tau + \beta)]$$

- Que depende de la distancia, de la frecuencia, de las alturas de antenas y del factor k



- El máximo desvanecimiento ($2\pi f_0 \tau + \beta = \pi$) es $F_R(\omega)|_{\max} = -20 \log(1-b)$
- Como el módulo de la FT es una función periódica, para una determinada frecuencia f_c interesa saber en qué lóbulo n_0 estamos y cuál es la frecuencia f_0 donde está el mínimo inmediato inferior.

- Como $\cos(2\pi f_c \tau + \beta) = \cos(2\pi f_0 \tau + 2\pi(f_c - f_0)\tau + \beta) = \cos(2\pi(f_c - f_0)\tau)$

$$2\pi n_0 + \pi = 2\pi f_0 \tau + \beta$$

- Tenemos $n_0 = \lfloor f_c \cdot \tau + \beta / 2\pi \rfloor$ y $f_0 = \frac{2n_0 + 1 - \beta / \pi}{2\tau}$

Como ejemplo supongamos:

Enlace de 61km sobre agua; alturas de antenas sobre el nivel del mar 122 m y 457 m y frecuencia 6125 MHz

Tenemos los siguientes resultados:

k	d_1	ψ	D	$\tau(\text{ns})$	$F_R(\omega)_{\text{max}}$ dB	f_0 (GHz)
4/3	15,1	0,41	0,854	3,9	16,7	6,154
1	15,7	0,37	0,800	3,3	14,0	6,061
0,83	16,3	0,34	0,754	2,8	12,2	6,071
2/3	17	0,30	0,687	2,2	10,1	5,909

Se puede observar la influencia del factor k .

También la influencia de la frecuencia (selectividad). Si la señal tiene un ancho de banda de 20 MHz. Los valores de fading en los extremos de la banda, para $k=2/3$ sería:

--- $f(\text{inf}) = 6115 \rightarrow F_R = -4,45$ dB

--- $f(\text{sup}) = 6135 \rightarrow F_R = -4,54$ dB

Conclusión: estos valores varían dentro del ancho de banda (desvanecimiento selectivo).

Desvanecimiento Selectivo

- El desvanecimiento es función de la frecuencia
- Resulta necesario conocer
 - Porcentaje de tiempo en el que un desvanecimiento multitrayecto tendrá carácter selectivo
 - Modelo de la función de transferencia $H(\omega)$ (FTM, función de transferencia del multitrayecto),
 - ✓ al menos para el ancho de banda de interés.
 - Estadística de los parámetros que intervienen en el modelo.
- Los modelos de la FTM se clasifican en
 - Modelos de rayos
 - Modelos polinómicos

- Modelo de rayos: modelo “multiecos”

$$H(\omega) = \sum_{i=0}^N a_i e^{-j(\omega\tau_i + \phi_i)}$$

- Modelo polinómico

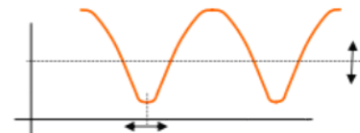
$$H(\omega) = H_0 + \sum_{i=0}^N (A_i + jB_i)(j\omega)^i$$

- En la práctica, modelos simplificados

- Modelo de tres rayos
- Modelo de dos rayos ficticios

- Objetivo:

- Modelar dónde está el notch
- Modelar un desvanecimiento selectivo superpuesto al plano



Modelo simplificado de 3 rayos

• Se parte de $H(\omega) = \sum_{i=0}^3 a_i e^{-j(\omega\tau_i + \phi_i)} = 1 + a_1 e^{-j\omega\tau_1} + a_2 e^{-j\omega\tau_2}$ ($\tau_2 \gg \tau_1$)

• 1) Como τ_1 es pequeño ($\tau_1 \ll$), la dependencia con ω dentro del ancho de banda de interés también lo es y

$$1 + a_1 \cdot e^{-j\omega\tau_1} \approx a \cdot e^{-j\phi}$$

• 2) Haciendo ahora $b = a_2/a$ y $\tau = \tau_2$, queda

$$H(\omega) = a \cdot e^{-j\phi} [1 + b \cdot e^{-j(\omega\tau - \phi)}]$$

• 3) Se calcula la $\omega_o = \phi / \tau$, para escribir $\phi = \omega_o \tau$

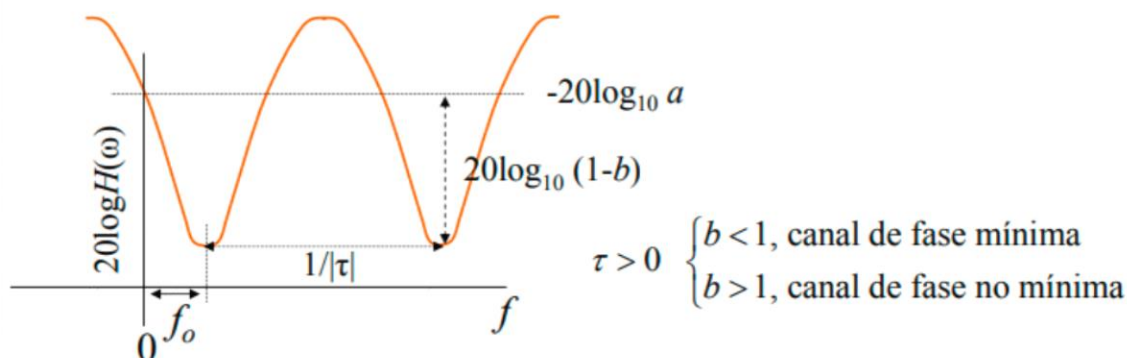
queda $H(\omega) = a \cdot e^{-j\phi} [1 - b \cdot e^{-j(\omega - \omega_o)\tau}]$

• 4) Como $e^{j\phi} \approx 1$ por ser el exponente muy pequeño ($\tau_1 \ll$),

$$H(\omega) = a \cdot [1 - b \cdot e^{-j(\omega - \omega_o)\tau}], \quad -B/2 \leq \omega/2\pi \leq B/2$$

• La profundidad del desvanecimiento es

$$F(\omega) = -20 \log_{10} |H(\omega)| = -20 \log_{10} a - 10 \log_{10} [1 + b^2 - 2b \cos(\omega - \omega_o)\tau]$$



Modelo de 2 rayos ficticios

- La expresión de la FTM en este modelo es a, b, τ

$$H(\omega) = a \cdot [1 + be^{-j\omega\tau}]$$

- Donde las frecuencias están referidas a la frecuencia central

- Para $\omega = \omega_o$, existe un mínimo

$$e^{-j\omega_o\tau} = -1 \Rightarrow |\omega_o\tau| = \pi$$

- Y puede escribirse

$$H(\omega) = a \cdot [1 - be^{-j(\omega-\omega_o)\tau}]$$



- La diferencia con el modelo de 3 rayos es que ahora ω_o depende sólo de τ , y no de τ y ϕ .
- Mojoli ha obtenido estadísticas de los parámetros a, b , y τ . Suponiendo que b y τ son estadísticamente independientes la fdp de b y τ son de tipo exponencial

- Se tiene así para τ

$$p_\tau(\tau) = \frac{1}{\tau_m} e^{-\tau/\tau_m} \quad \tau \geq 0$$

- Para τ_m se ha propuesto el valor

$$\tau_m = 0.7 \left(\frac{d}{50} \right)^{1.3} \text{ (ns)}$$

donde d es la distancia en Km



- Para b , la función de densidad es

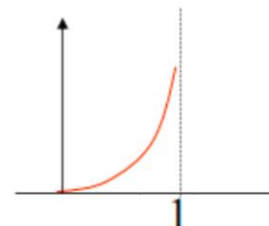
$$p_b(b) = \frac{\alpha}{1 - e^{-\alpha}} e^{-\alpha(1-b)} \quad 0 \leq b \leq 1$$

- α depende de d, f , tipo terreno y clima

- El desvanecimiento $R = a |1 + be^{-j\omega_c\tau}|$

- La dependencia con τ desaparece pues es uniforme, (porque $\omega_c \gg \omega$)

- $P_R(R \leq r) = F(r, a, \alpha)$, del ajuste a una rayleigh: $\alpha = 1.8$ y $a = 0.54 \eta/P_o$



5. Criterios de diseño de un sistema radioeléctrico de visibilidad directa.

A continuación, se darán criterios de diseños para enlaces que tienen visibilidad directa.

El cálculo final de calidad y disponibilidad se verán en capítulos subsiguientes.

Efectos vinculados con la propagación:

- desvanecimiento por **difracción en obstáculos** variables en el tiempo;
- atenuación debida a los **gases atmosféricos**;
- desvanecimiento por trayectos múltiples o dispersión del haz (conocida generalmente como **desenfoque**) asociados a capas refractivas anormales;
- desvanecimiento por los trayectos múltiples que se originan por **reflexiones en superficies**;
- atenuación debida a las **precipitaciones**;
- **variación del ángulo de llegada** en el terminal receptor y del ángulo de salida en el terminal transmisor debida a la refracción;
- reducción de la discriminación por **polarización cruzada (XPD)** en condiciones de propagación por trayectos múltiples o durante las precipitaciones;
- distorsión por desvanecimientos **selectivos** en frecuencia y a **retardos** durante la propagación **por trayectos múltiples**.

Atenuación debida a los gases atmosféricos

Para frecuencias **> 10 GHz** se tiene atenuación por absorción del oxígeno y del vapor de agua.

$A_a = \gamma_a d$ (dB) $\rightarrow \gamma_a$ (dB/km) (desde la Rec. UIT-R P.676) y longitud del trayecto d (km)

En trayectos largos y frecuencias **> 20 GHz**, tener en cuenta las estadísticas conocidas sobre la densidad del vapor de agua y la temperatura (Rec. UIT-R P.836).

Desvanecimiento por difracción

Cuando la atmósfera es suficientemente sub-refractiva da lugar al desvanecimiento por difracción. Este tipo de desvanecimiento es el factor que determina la **altura de las antenas**.

Las **estadísticas del factor k** pueden determinarse a partir de predicciones del gradiente del índice de refracción en los primeros 100 m de la atmósfera (Rec. UIT-R P.453). Estos gradientes deben promediarse para obtener el **valor efectivo k_e** .

La pérdida por difracción dependerá del tipo de terreno y de la vegetación.

Va desde un valor mínimo en el caso de un obstáculo único en arista (**filo de cuchillo**) hasta un valor máximo en el caso de una **Tierra esférica lisa** (Rec. UIT-R P.526).

Para un **terreno medio** y pérdidas mayores a 15 dB se puede aproximar por la fórmula empírica:

$$A_d = -20 h / F_1 + 10 \quad \text{dB}$$

Donde: h (en m.) es el despejamiento por debajo de la línea de vista (negativo si está por encima).

y F_1 es el radio del primer elipsoide de Fresnel, indicado por:

$$F_1 = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fd}} \quad \text{m}$$

Donde: f : frecuencia (GHz); d : longitud del trayecto (km); d_1 y d_2 : distancias (km) entre los terminales y la obstrucción del trayecto.

El siguiente gráfico muestra los 3 tipos de perfiles tratados como caso extremo.

En el caso de la fórmula que es válida estrictamente para valores mayores a 15 dB se la ha extrapolado hasta 6 dB para satisfacer el diseño de enlace preliminar.

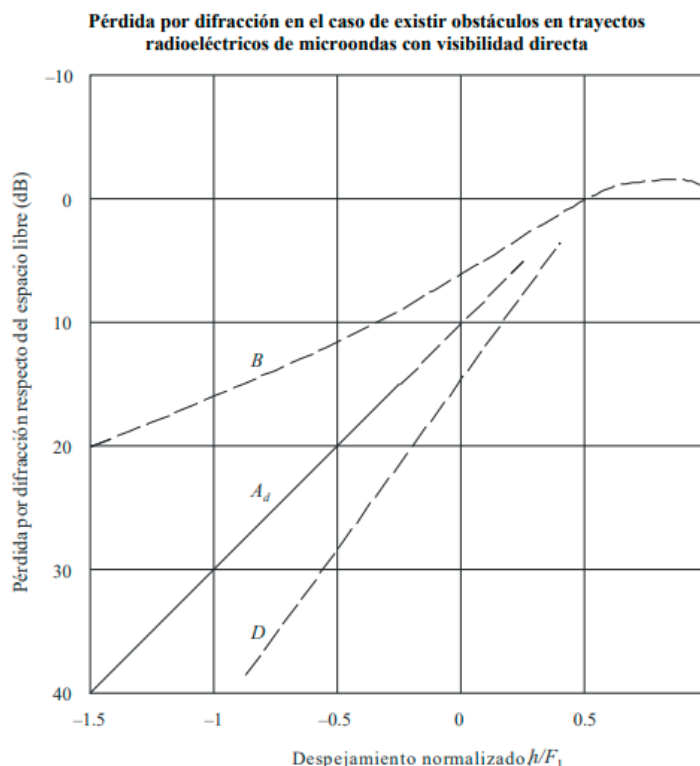
B: Curva teórica por filo de cuchillo.

D: Curva teórica por tierra esférica lisa a 6,5 GHz y $k_e = 4/3$

A_d : Curva empírica de la ecuación vista mas arriba.

H: Despejamiento.

F_1 : Primera zona de Fresnel.



Criterios de despejamiento. Altura de antenas.

Si bien pareciera que hay que ubicar las antenas de manera que todo el tiempo de transmisión el enlace no sea obstruido, la figura anterior nos dice que podemos

La teoría de la difracción indica que el trayecto directo entre el transmisor y el receptor debe estar libre de obstáculos al 60% del radio de la **primera zona de Fresnel** para que se cumplan las condiciones de propagación en el espacio libre. No obstante, en base a la información sobre valores estadísticos de k_e , que se requieren para realizar predicciones estadísticas, algunas administraciones están instalando **antenas a alturas mas bajas** que pueden producir algunas pequeñas interrupciones conocidas.

Un posible procedimiento dado por la Rec. P.530 es el siguiente:

Con antena simple, sin diversidad:

- 1) Se debe despejar al 100% para $k = 4/3$.
- 2) Se obtiene el valor de k_e que es excedido por el 99,9% del tiempo en función de la longitud del trayecto. De la figura que se encuentra en la unidad 2
- 3) Se calculan las alturas de antena necesarias para el valor de k_e obtenido en el Paso 2 y los siguientes radios de despejamiento de la zona de Fresnel:

Clima templado	Clima tropical
<p>0,0 F_1 (es decir, incidencia rasante) si sólo existe una obstrucción aislada del trayecto</p> <p>0,3 F_1 si la obstrucción del trayecto se extiende a lo largo de una parte de éste</p>	<p>0,6 F_1 para longitudes de trayecto superiores a unos 30 km</p>

4) Utilice las mayores alturas de antenas obtenidas del punto 1 y 3.

Para frecuencias inferiores a 2 GHz es posible mayor obstrucción si las antenas quedan excesivamente altas.

Por encima de los 13 GHz se debe tomar mas márgenes de despejamiento para cubrir los posibles errores de datos del terreno. En estas bandas se suele hacer línea de vista para mejor verificación.

Hay que tener en cuenta también que ser mas conservador en estas reglas puede hacer deteriorar las condiciones de caminos múltiples por excesivo despejamiento.

Con antena de diversidad:

1) La antena mas alta se calcula con el procedimiento anterior.

2) La antena mas baja, con los siguientes criterios:

0,6 F_1 a 0,3 F_1 , si la obstrucción del trayecto se extiende a lo largo de una parte de éste;

0,3 F_1 a 0,0 F_1 si existen uno o dos obstáculos aislados en el perfil del trayecto.

Para $F < 2\text{GHz}$ usar el menos conservador.

3) Finalmente, verificar que la separación entre antena principal y diversidad debe cumplir también el requisito para desvanecimiento por multitrayecto.

Estos criterios permiten limitar la pérdida por difracción de 3 a 6 dB y no aumentar la probabilidad de desvanecimiento por trayecto múltiples al mantenerlas lo mas bajas posibles.

Si los trayectos múltiples, debido a reflexiones en el suelo (campo llano o superficie de agua), son predominantes, se debe calcular la separación según el criterio necesario evitar los mismos.

En casos extremos se puede utilizar 3 antenas. La 1 y la 3 según criterio de pérdida por difracción y la 2da o intermedia para los multitrayectos.

Desvanecimientos multitrayectos:

Estos son muy comunes en **enlaces largos**. **Combinan** trayectos múltiples en la superficie y en la atmosfera con dispersión de haz y desalineamiento de antenas. Esta combinación puede dar lugar a **desvanecimiento selectivo**.

El ancho de 3 dB de la antena debe ser el apropiado para evitar desacoplamiento.

Bibliografía utilizada para el dictado de este curso:

“Fundamentos de Radiación y Radiocomunicación” de Juan José Murillo Fuentes

“Transmisión por radio”, de José María Hernando Rábanos.

“Radio system design for Telecommunications”, de Roger L. Freeman.