

## Interferencias por Onda Ionosférica

- Las señales de LF y MF se propagan tanto por onda de tierra como por onda ionosférica.
  - De día la onda ionosférica se atenúa mucho por la presencia de la capa D ( $\alpha_1$  del orden de 50 dB o superiores).
  - Por la noche, cuando esta desaparece, las señales reflejadas en la capa E (a unos 100 km de altura) retornan a tierra con suficiente potencia como para producir interferencias, dando lugar a fenómenos de "fading" y a obtener alcances mucho mayores que con onda de Tierra. (responsable en muchos casos de interferencias sobre otras estaciones locales que funcionan a la misma o parecida frecuencia).

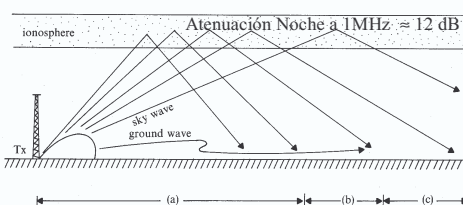


Fig. 2.9 The interference between sky wave and ground wave from the same transmitter. The reception is principally that of ground wave in zone (a) and of sky wave in zone (c), but the two modes produce interference in zone (b). A flat earth model is used for illustration.

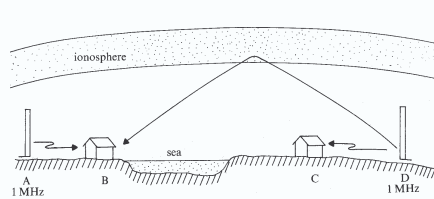
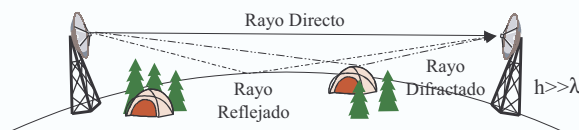


Fig. 2.10 Night-time interference from the sky wave produced by a non-synchronized transmitter (D) operating at the same frequency as the wanted transmitter (A) but broadcasting a different program.

RDPR -3 - 25

## Propagación por Onda de Espacio (VHF y superiores)

- Se consideran aquellos mecanismos de propagación en los que la contribución más importante proviene de:
  - Rayo de visión directa: (propagación en espacio libre)
  - Rayo reflejado en la superficie terrestre
  - Rayos difractados por las irregularidades de la superficie terrestre



- Este mecanismo de propagación es el utilizado a frecuencias por encima de VHF donde no existe propagación por onda de superficie ni propagación ionosférica.

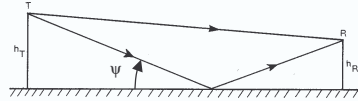
RDPR -3 - 26

## Coeficientes de Reflexión de la Tierra.

- Los coeficientes de reflexión se obtienen considerando una incidencia oblicua sobre un dieléctrico plano con pérdidas ( $\epsilon_r$ ,  $\sigma$ ) que simula la Tierra.

- **Polarización Horizontal.**

$$\rho_h = \frac{\sin \psi - \sqrt{(\epsilon_r - jx) - \cos^2 \psi}}{\sin \psi + \sqrt{(\epsilon_r - jx) - \cos^2 \psi}} \quad x = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$$



- En ángulos próximos a la incidencia rasante ( $\psi=0$ ):  $\rho_h = -1$
- Para otros ángulos, la fase permanece prácticamente fija a valores cercanos a  $180^\circ$ .
- El módulo se altera sobre todo para altas frecuencias o bajas conductividades

- **Polarización Vertical.**

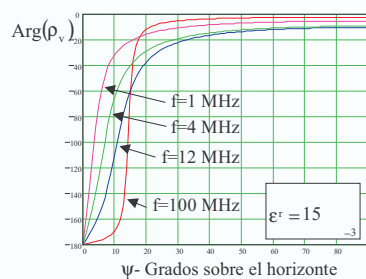
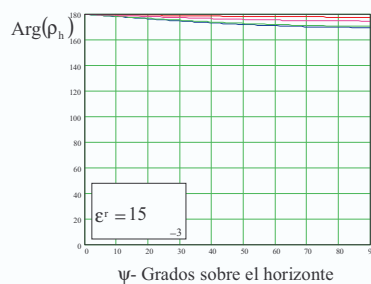
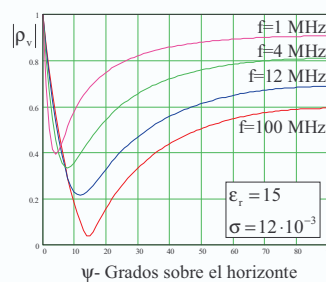
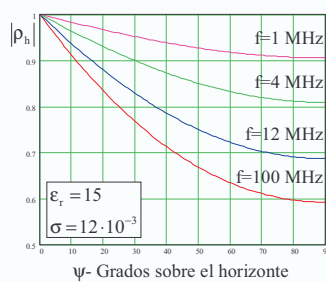
$$\rho_v = \frac{(\epsilon_r - jx) \sin \psi - \sqrt{(\epsilon_r - jx) - \cos^2 \psi}}{(\epsilon_r - jx) \sin \psi + \sqrt{(\epsilon_r - jx) - \cos^2 \psi}}$$

- Para incidencia rasante ( $\psi=0$ ):  $\rho_v = -1$
- Para ángulos mayores cambia muy deprisa tanto la fase como el módulo.
- Para cada frecuencia aparece un pseudo-ángulo de Brewster.

- Para  $f > 100 \text{ MHz}$  son válidas las gráficas de esta frecuencia.

RDPR -3 - 27

## Coeficientes de Reflexión de la Tierra.



RDPR -3 - 28

## Radioenlaces con Modelo de Tierra Plana

- Cuando la distancia es del orden de unas decenas de kilómetros, la Tierra se puede modelar en muchas ocasiones como una superficie plana ( $d \gg h_T, h_R \Rightarrow \psi \rightarrow 0$  ( $< BW_{-3dB}$ ),  $\rho \rightarrow -1$ )  $\Delta\phi = k_o(R_2 - R_1)$

$$E = E_d(1 + |\rho| \exp(-j\theta) \exp(-j\Delta\phi)) = E_d(1 - \exp(-j\Delta\phi))$$

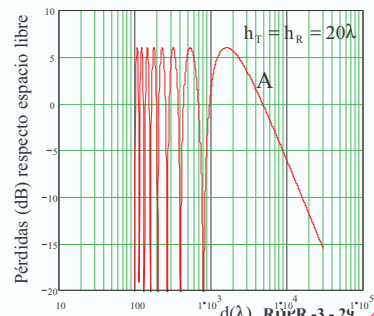
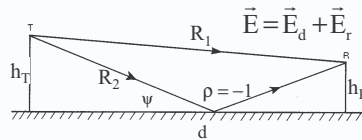
$$E = 2|E_d| \text{sen} \frac{\Delta\phi}{2} = 2|E_d| \text{sen} \left( \frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d} \right)$$



**Ecuación de Propagación para Tierra plana**

$$\frac{P_R}{P_T} = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot G_T \cdot G_R \cdot 4 \text{sen}^2 \left( \frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d} \right)$$

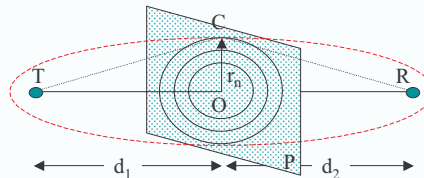
$$\frac{P_{\text{Entregada Rx}}}{P_{\text{Disponible Tx}}} \approx \frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d} \ll \frac{\pi}{2} \approx \frac{(h_T h_R)^2}{d^4} G_T G_R$$



## Difracción por Obstáculos. Elipsoides de Fresnel.

- Las ondas electromagnéticas cuando inciden sobre obstáculos se difractan.
  - En el análisis de la difracción hay que tener en cuenta el volumen que ocupa la onda.
  - Para ello se definen los elipsoides de Fresnel con aquellos puntos C del espacio que cumplen:  $TC + CR = TOR + n\lambda/2$   $n = 1, 2, \dots$
  - Las intersecciones de estos elipsoides con un plano P (situado sobre el obstáculo) definen las llamadas Zonas de Fresnel, cuyos radios  $r_n$  valen:

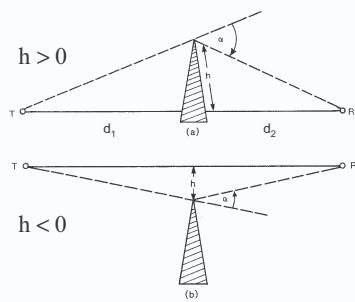
$$r_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad \text{cuando } d_1, d_2 \gg r_n$$



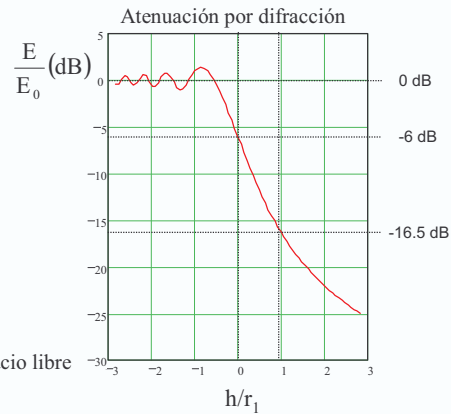
- Aplicando el Principio de Huygens, el campo sobre la antena receptora puede obtenerse como la superposición de los campos provenientes de las fuentes secundarias elementales situadas en un plano P, llegando cada contribución con una fase proporcional al camino TCR recorrido.
- El campo total en R coincide en primera aproximación con la contribución de las fuentes de la primera zona de Fresnel.**

## Difracción sobre Obstáculos del Terreno.

- Las pérdidas de Difracción por los obstáculos montañosos del terreno se modelan con la solución analítica de la difracción producida por una cuña.



$E$  nivel de campo recibido  
 $E_0$  nivel de campo en espacio libre

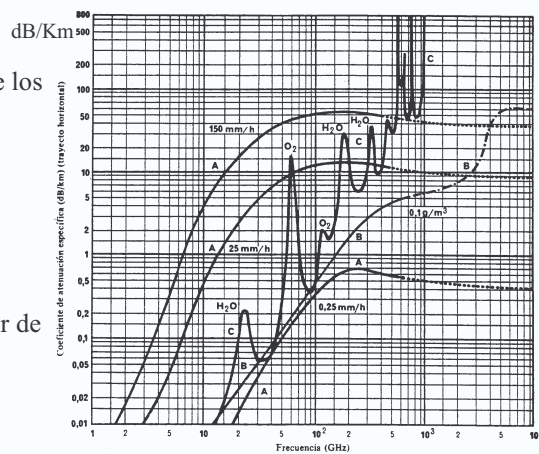


Como se ve, si el obstáculo no penetra dentro de la primera zona de Fresnel el efecto de la difracción es despreciable.

RDPR -3 - 31

## Atenuación propia de los gases y por hidrometeoros

- La atmósfera apenas introduce ninguna atenuación por debajo de los 3 GHz.
- Por encima de 3 GHz aparece:
  - Atenuación por lluvia.
  - Atenuación por niebla.
  - Atenuación por resonancias moleculares.
- Las curvas del UIT-R dan el valor de atenuación para trayectos horizontales próximos a tierra.

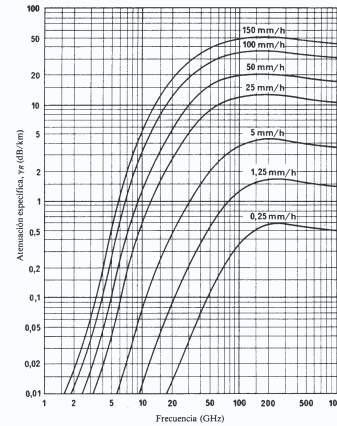


A- Atenuación específica de la lluvia  
 B- Atenuación específica de la niebla  
 C- Atenuación por los componentes gaseosos

RDPR -3 - 32

## Atenuación debida a la lluvia

- Depende del tamaño de las gotas y de su deformación al caer, pero sobre todo de la cantidad global de agua en el aire. Debido a la dificultad de medir los anteriores parámetros se expresa la atenuación en función de la intensidad de lluvia (I) medida en mm/h.
  - Varía con la frecuencia hasta unos 100 GHz.
  - Depende algo de la polarización (H-V). La gráfica adjunta es un valor medio,
  - Se produce por:
    - La disipación por efecto Joule debido al comportamiento del agua como dieléctrico imperfecto.
    - La dispersión de la energía en direcciones diferentes a la de propagación.
  - Se aproxima como:  $\gamma_R \text{ (dB/Km)} = K \cdot I^\alpha$



Frecuencia (GHz)	$K_H$	$K_V$	$\alpha_H$	$\alpha_V$
1	0,0000387	0,0000352	0,912	0,880
10	0,0101	0,00887	1,276	1,264
20	0,0751	0,0691	1,099	1,065
30	0,187	0,167	1,021	1,000
40	0,350	0,310	0,939	0,929

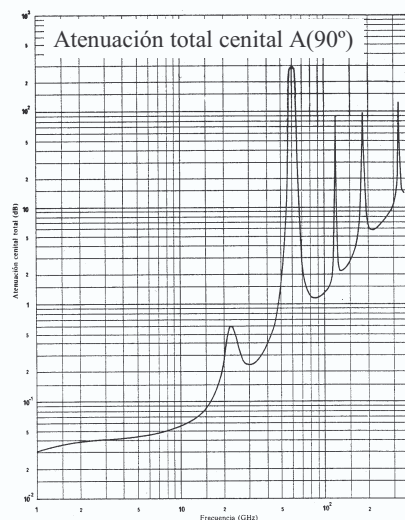
RDPR -3 - 33

## Atenuación total de atmósfera clara para comunicaciones por satélite

- La atenuación total de la atmósfera depende de la inclinación del trayecto, puesto que la atenuación específica por gases es función de la altura.
- Se caracteriza una atenuación total por gases en un trayecto cenital, y se obtiene la atenuación para trayectos inclinados un ángulo  $\psi$  como:

$$A(\psi) = \frac{A(90)}{\sin \psi}$$

- El seno de  $\psi$  mide la diferencia de trayectos dentro de la atmósfera entre el rayo inclinado y el rayo cenital



RDPR -3 - 34

## Refracción Troposférica

- Índice de Refracción.

- El índice es muy próximo a la unidad, aunque existe una pequeña diferencia que depende de las condiciones atmosféricas:

$$n \approx 1 + \frac{77,6}{T} \left( P + \frac{4810 P_{\text{agua}}}{T} \right) 10^{-6} \quad \begin{array}{l} n(0) \approx 1,000289 \\ n(1 \text{ Km}) \approx 1,000250 \end{array}$$

- Por comodidad se maneja el COINDICE, definido con tres cifras enteras:

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

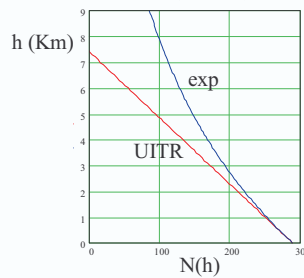
- Se considera una ATMOSFERA STANDARD, definida como un valor medio de las propiedades de la troposfera. Existen varios modelos, donde h (en Km) mide la altura sobre el nivel del mar:

- Modelo Lineal (UITR):

$$N(h) = 289 - 39h \quad \text{unidades N}$$

- Modelo Exponencial :

$$N(h) = 289 \exp(-0,135h) \quad \text{unidades N}$$



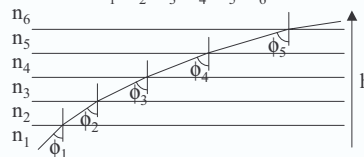
RDPR -3 - 35

## Refracción Troposférica

- Curvatura del Rayo.

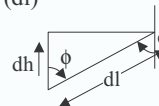
- La variación del índice de refracción con la altura genera una curvatura de los rayos definida por la Ley de Snell.

$$n_1 \sin(\phi_1) = n_2 \sin(\phi_2) = \dots = n_i \sin(\phi_i) = \text{cte}$$



- El radio de curvatura (r) del rayo se obtiene diferenciando la expresión anterior y expresando el resultado en función del diferencial de longitud (dl)

$$\left. \begin{array}{l} dn \sin(\phi) + n \cos(\phi) d\phi = 0 \\ dl = \frac{dh}{\cos(\phi)} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{1}{r} = \frac{d\phi}{dl} = - \frac{1}{n} \frac{dn}{dh} \sin(\phi)$$



- Puesto que las antenas se encuentran habitualmente a alturas semejantes y para una atmósfera estándar el radio de curvatura toma el valor de:

$$\frac{1}{r} = - \frac{1}{n} \frac{dn}{dh} \sin(\phi) \Big|_{\substack{\phi=90^\circ \\ n(h)=1}} \approx - \frac{dn}{dh} \Big|_{\text{Atmosfera Standard}} \Rightarrow r \approx 25640 \text{ km}$$

RDPR -3 - 36

## Refracción Troposférica

- Radio Equivalente de la Tierra

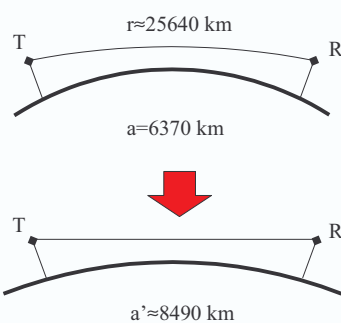
- Un procedimiento muy extendido en el diseño de radioenlaces consiste en tener en cuenta el efecto de la refracción troposférica modificando el radio de la Tierra (a) y suponiendo una trayectoria recta para el rayo.

- El nuevo radio a' se calcula como:

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{r} - \frac{1}{a} \approx \frac{1}{a} + \frac{dn}{dh} \approx \left(157 + \frac{dn}{dh}\right) \cdot 10^{-6}$$

Atmósfera estándar:

$$\left. \begin{array}{l} a = 6370 \text{ km} \\ n \approx 1 \\ \text{sen}(\phi) \approx 1 \\ \left. \frac{dn}{dh} \right|_{\text{Nivel Mar}} \approx -39 \end{array} \right\} \Rightarrow a' = Ka \approx \frac{4}{3}a \approx 8490 \text{ km}$$

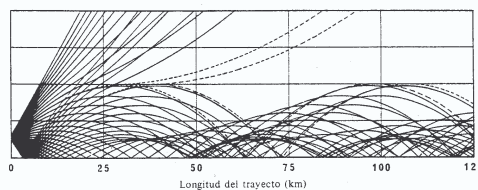


RDPR -3 - 37

## Efecto conducto

- Cuando la derivada del índice es inferior a -0.157, la curvatura del rayo es superior a la de la Tierra dando lugar a propagación por CONDUCTO SUPERFICIAL.

- Estas situaciones suelen darse en el verano cuando la tierra y sobre todo el mar se recalientan haciendo que a ciertas horas la pendiente de temperatura sea muy superior a la estándar



- Estos conductos se forman a través de reflexiones múltiples sucesivas sobre la tierra o el mar.
  - El conducto provoca transmisiones guiadas de baja atenuación y grandes alcances.
  - Por las dimensiones de los conductos (algunos metros hasta centenas de metros en situaciones excepcionales) afecta primordialmente a las bandas de VHF y superiores.
  - Son de aparición esporádica por lo que no son útiles para un canal de comunicaciones pero si pueden ser responsables de fuertes interferencias por sobrealcances anormales.

RDPR -3 - 38