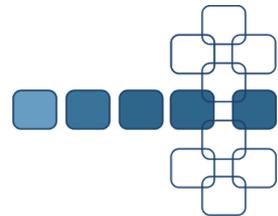


Radioenlaces I

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación
Sistemas y servicios de transmisión por radio

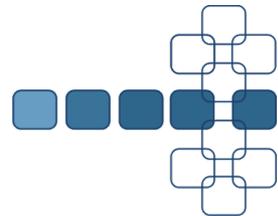
1. Introducción
 - 1.1 Servicios de radiocomunicación
 - 1.2 Gestión de las frecuencias
2. Estructura general de un radioenlace
3. Planes de frecuencia
4. Dispositivos de microondas y antenas
5. Parámetros básicos y balance de enlace
6. La refracción y sus efectos en el radioenlace
7. Atenuación por lluvia y gases
8. El efecto de los obstáculos: difracción
9. Calidad y disponibilidad



1. Introducción

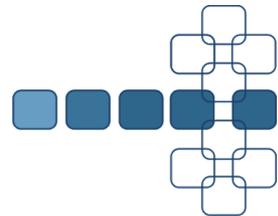
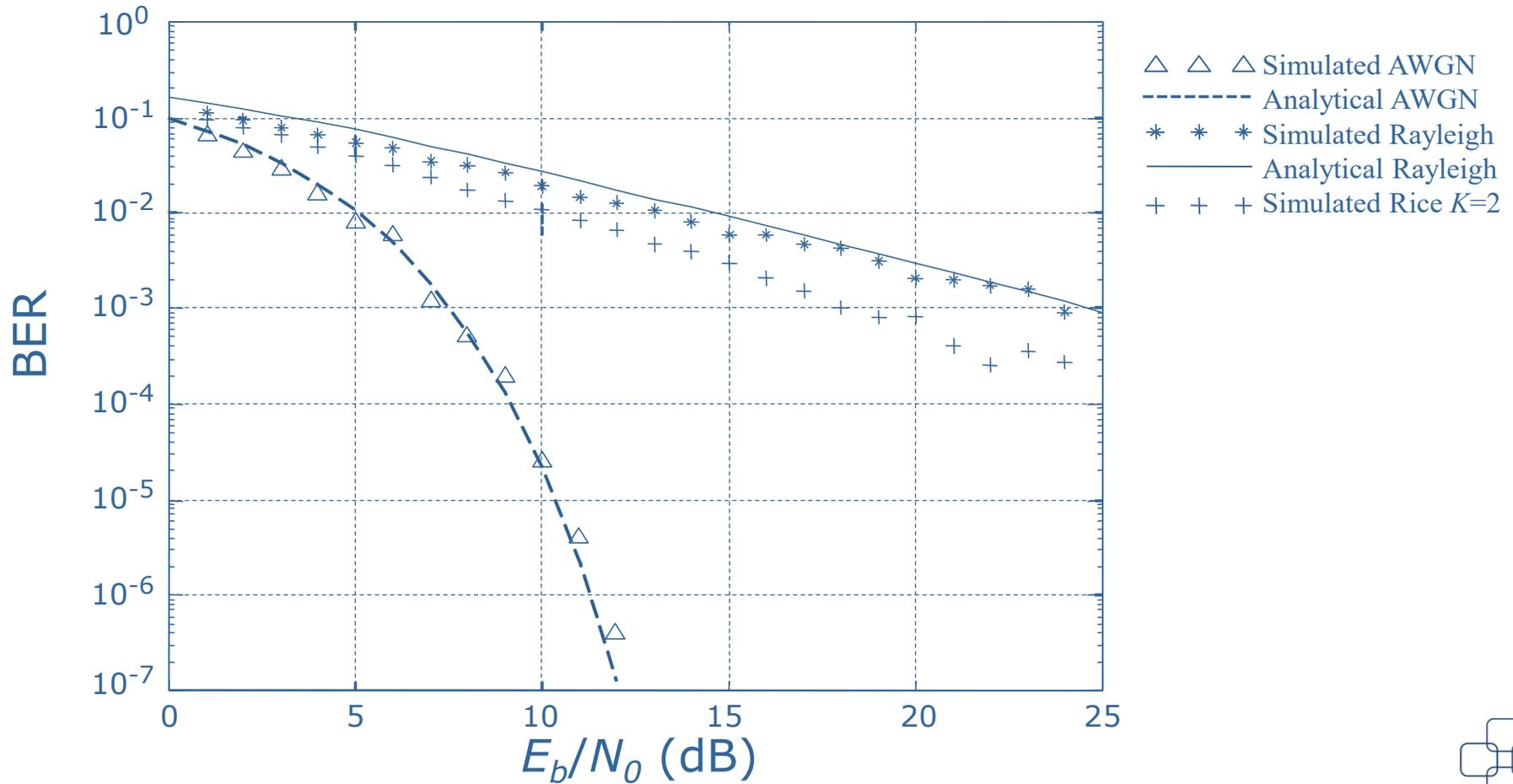
- 1.1 Servicios de radiocomunicación:
 - Servicios fijos: punto a punto, radioenlaces.
 - Servicios de radiodifusión.
 - Servicios móviles: telefonía y redes inalámbricas.
 - Servicios vía satélite.

$$(P_t)_{min} = P_{noise} + SNR_{min} + L_{x\%} - G_T - G_R$$



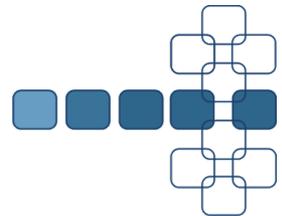
1. Introducción

■ Modulación GMSK



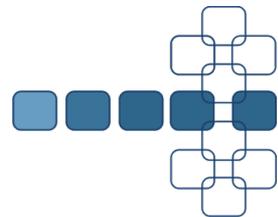
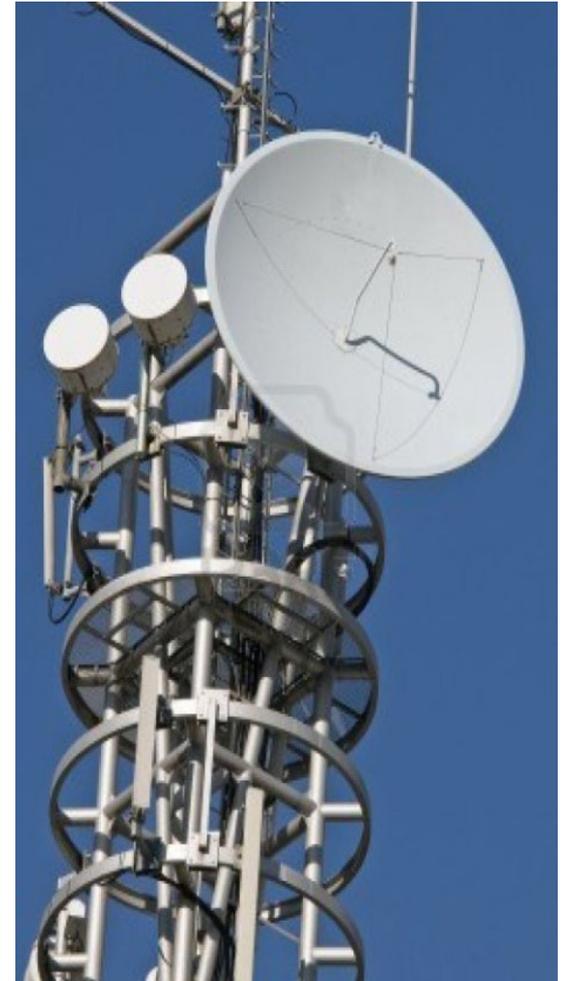
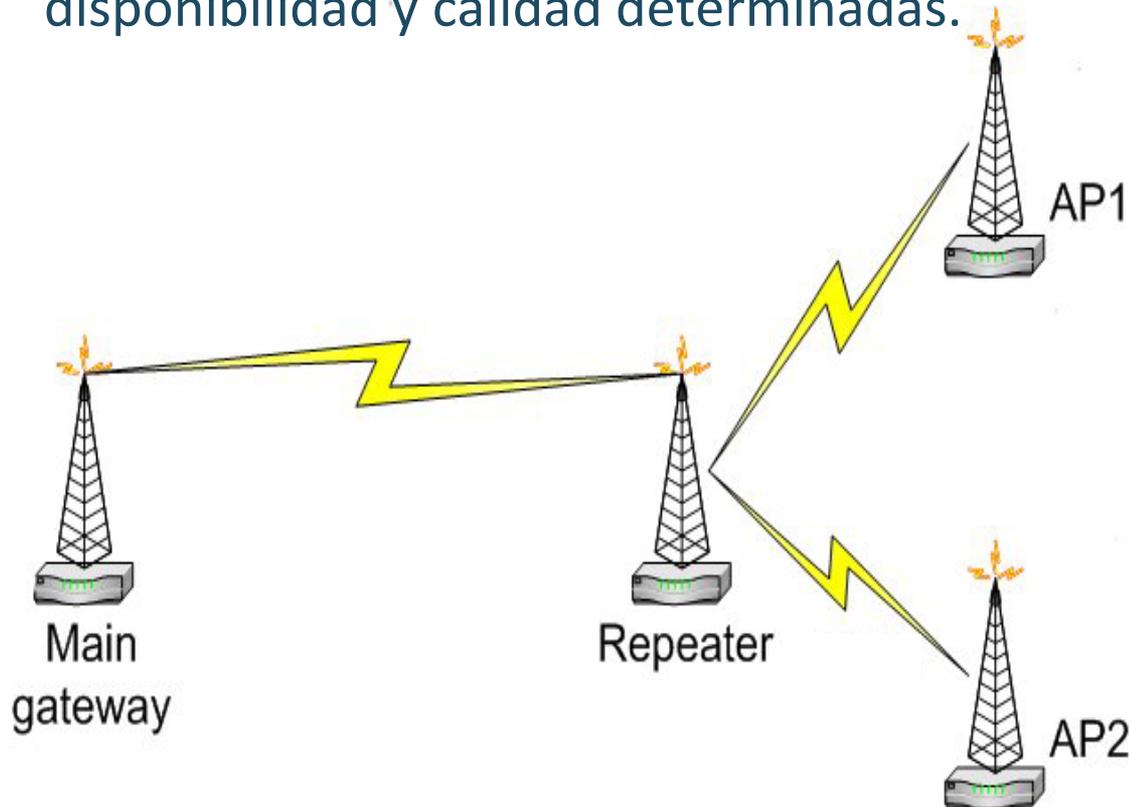
1. Introducción

- 1.1 Otros servicios de radiocomunicación
 - Servicios de radionavegación y radiolocalización.
 - Servicios de exploración de la tierra por satélite.
 - Servicios de radioastronomía.
 - Servicios de frecuencias patrón e información horaria.
 - Servicios de radioaficionados.



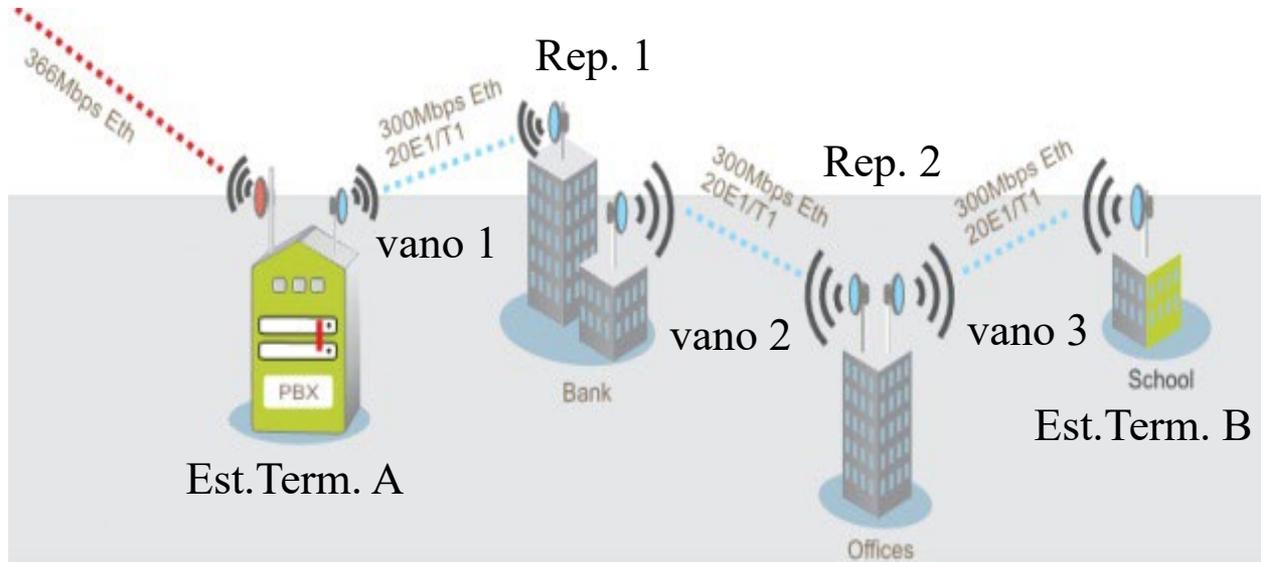
2. Estructura general de un radioenlace.

- Radioenlaces terrenales del servicio fijo:
 - Sistemas de radiocomunicaciones entre puntos fijos situados sobre la superficie terrestre, que proporcionan una capacidad de transmisión de información con unas características de disponibilidad y calidad determinadas.



2. Estructura general de un radioenlace.

- Esquema de un radioenlace con repetidores:



antenas del repetidor

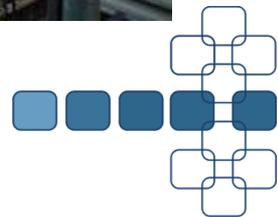
- Tipos de repetidores:

- Activos: se recibe la señal, se convierte a FI, se amplifica y se retransmite
- Activos regenerativos: a su vez, la señal se remodula (regeneración)
- Pasivos: se utiliza un reflector (espejo) para cambiar la dirección del haz radioeléctrico



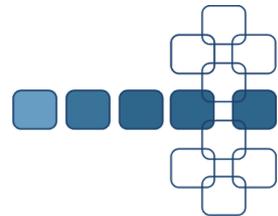
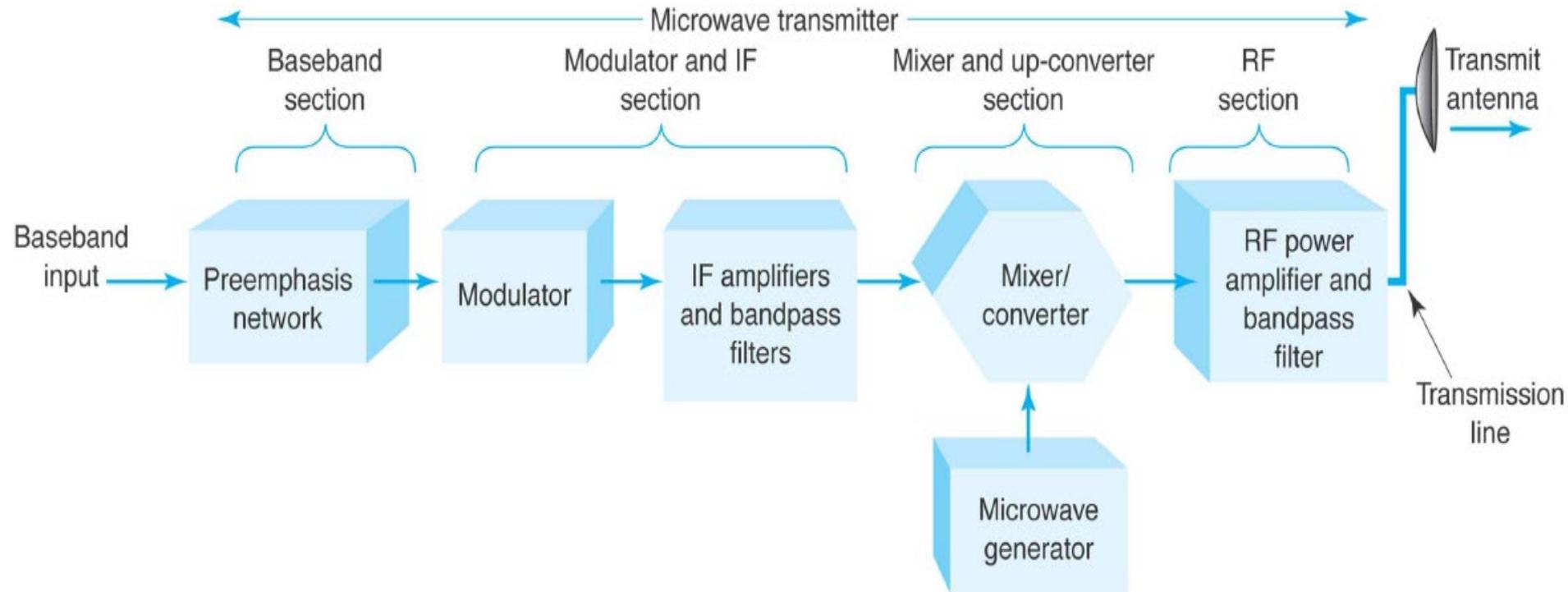
2. Estructura general de un radioenlace.

- Ventajas de los radioenlaces:
 - Adecuado para zonas aisladas o de difícil acceso
 - Rápido despliegue
 - Implantación y crecimiento progresivo
 - Menor coste de mantenimiento
 - Pueden superarse las irregularidades del terreno
- Limitaciones frente al cable:
 - Medio compartido: interferencias
 - Explotación restringida a tramos con visión directa
 - Fiabilidad y disponibilidad: desvanecimientos y lluvia
 - Necesidad de acceso adecuado a las estaciones repetidoras, suministro de energía y mantenimiento
 - Radiaciones electromagnéticas (¿efectos sobre la salud?)



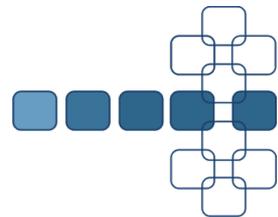
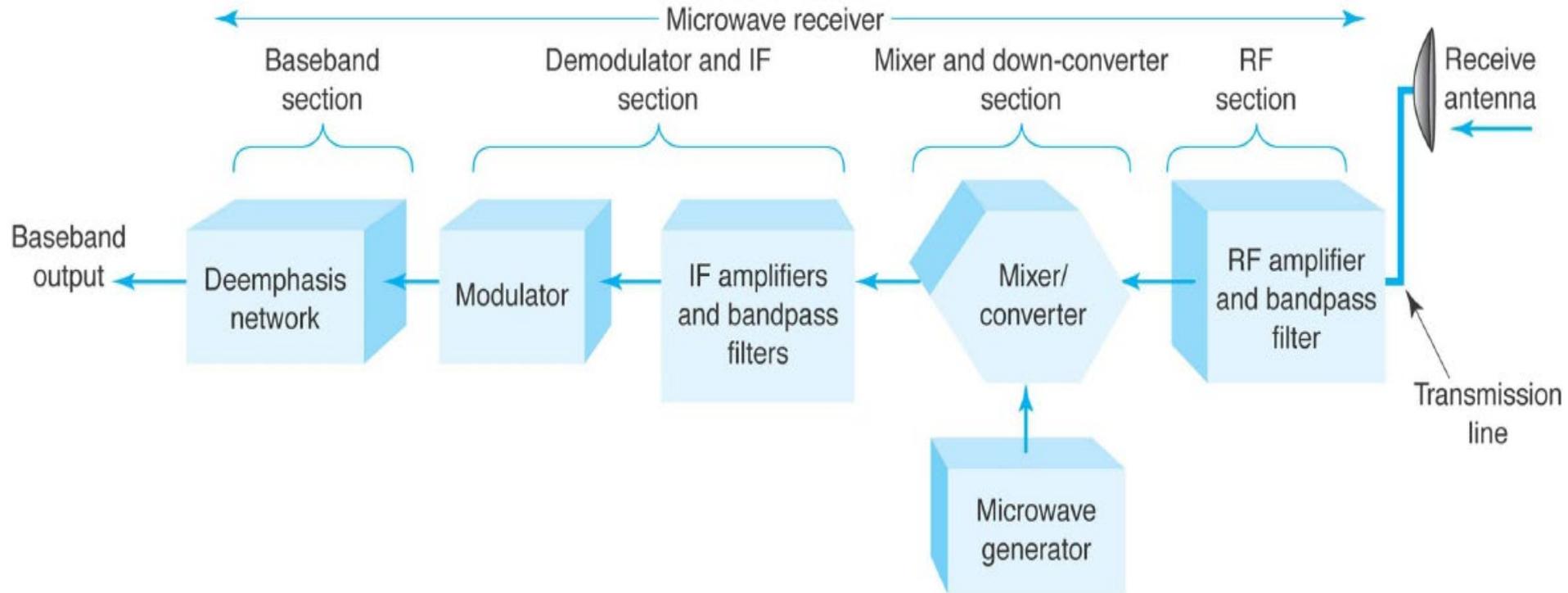
2. Estructura general de un radioenlace.

- Estación terminal (bloque de transmisión):



2. Estructura general de un radioenlace.

- Estación terminal (bloque de recepción):

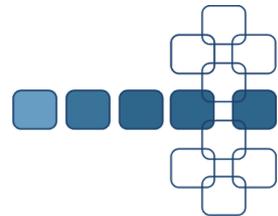
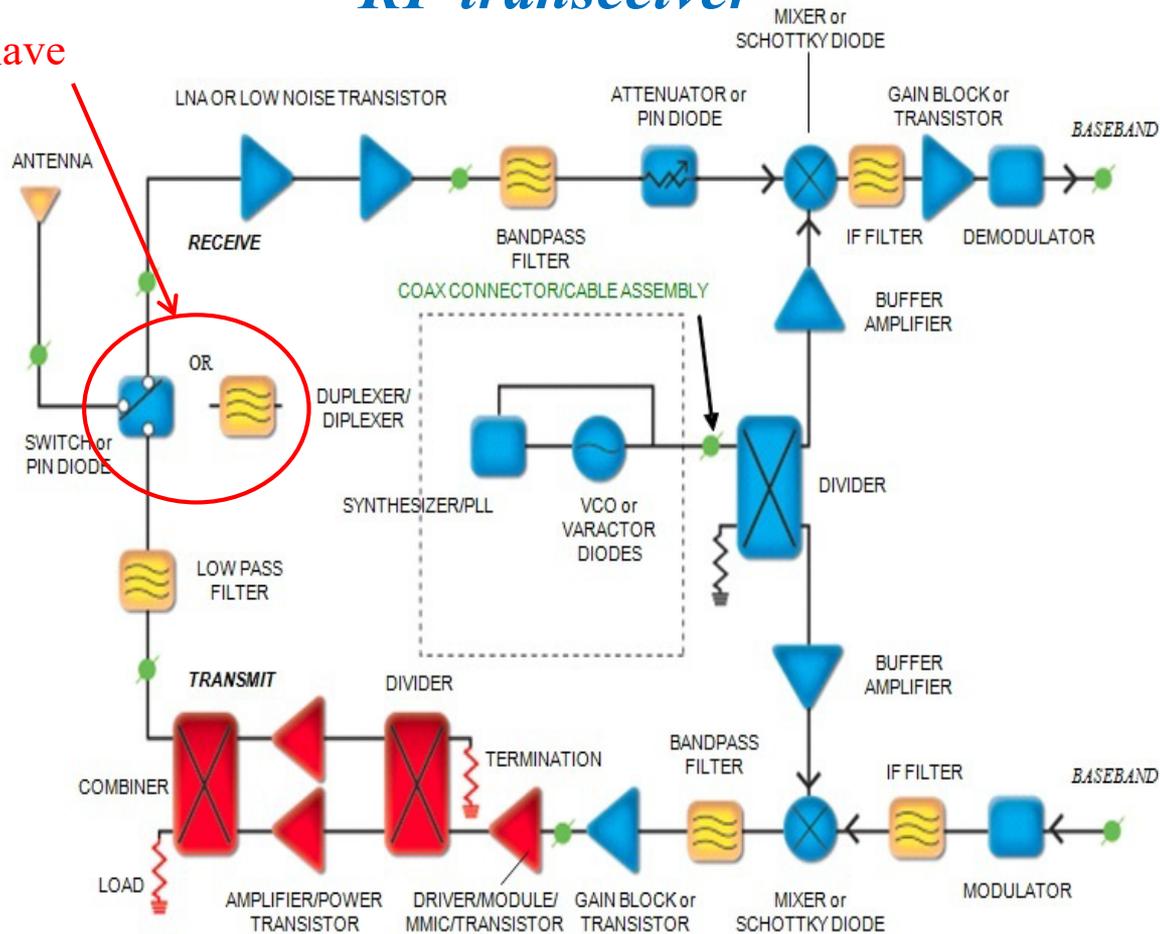


2. Estructura general de un radioenlace.

- Estación terminal (bloque transceptor):

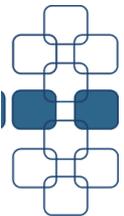
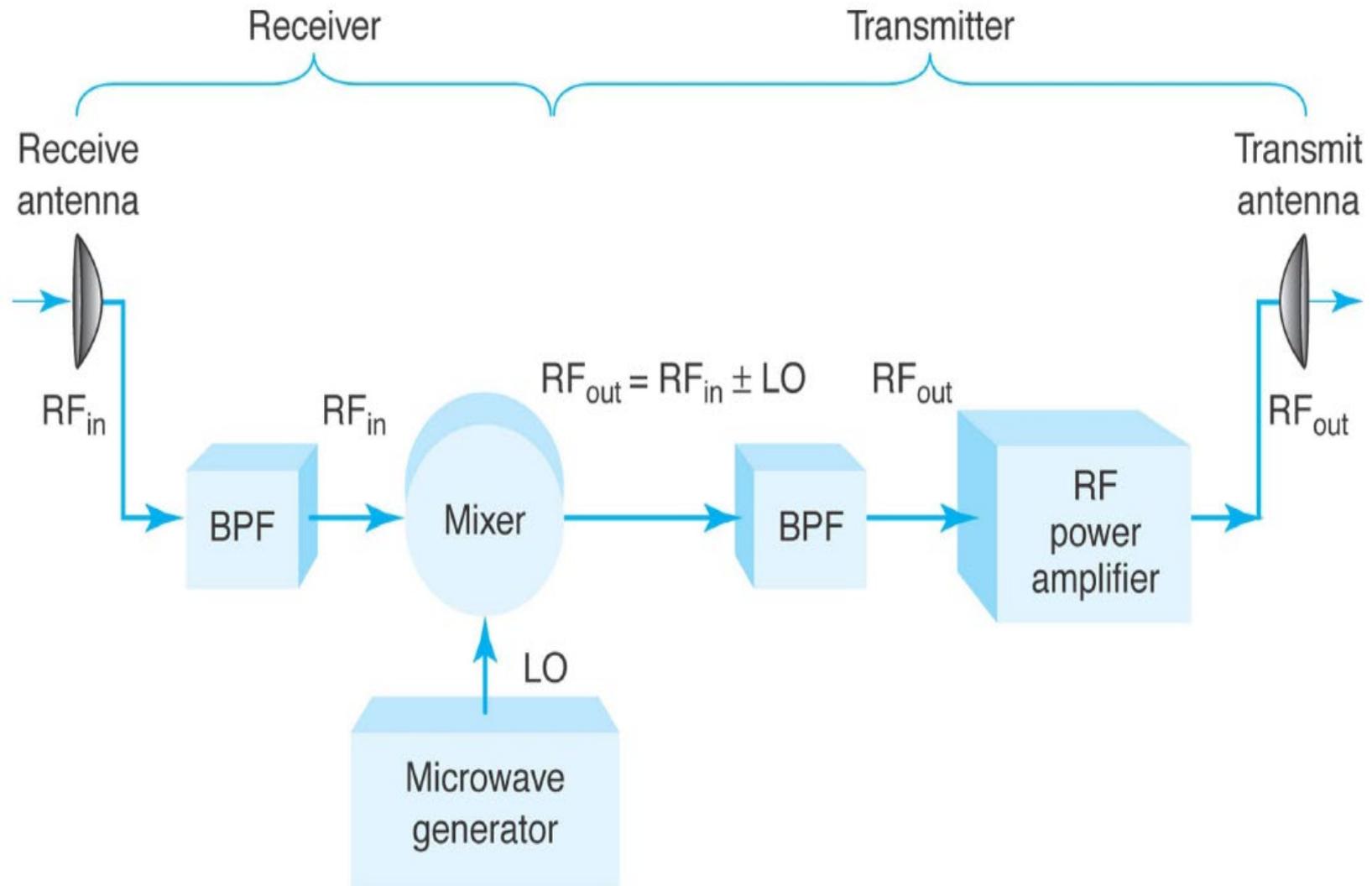
RF transceiver

elemento clave



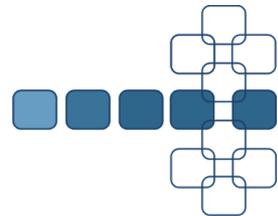
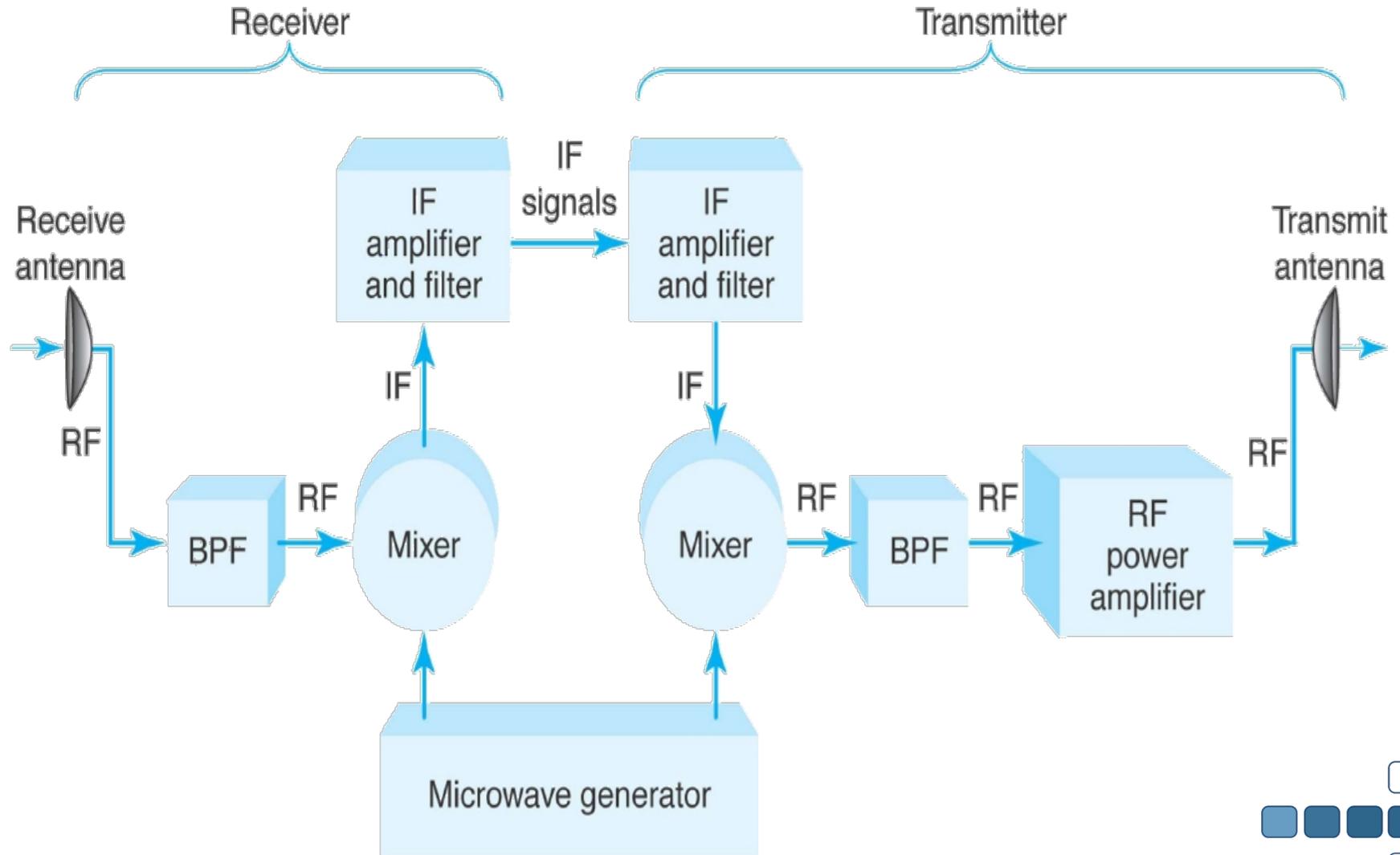
2. Estructura general de un radioenlace.

- Repetidor de microondas (amplificación en RF):



2. Estructura general de un radioenlace.

- Repetidor de microondas (amplificación en IF):



3. Planes de frecuencia.

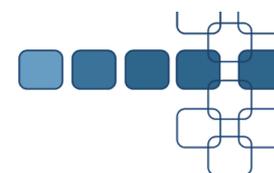
RECOMENDACIÓN UIT-R V.431-6

NOMENCLATURA DE LAS BANDAS DE FRECUENCIAS Y DE LAS LONGITUDES
DE ONDA EMPLEADAS EN TELECOMUNICACIONES

CUADRO 1 (División en décadas)

Número de la banda	Símbolos (en inglés)	Gama de frecuencias (excluido el límite inferior, pero incluido el superior)	Subdivisión métrica correspondiente	Abreviaturas métricas para las bandas
3	ULF	300-3000 Hz	Ondas hectokilométricas	B.hkm
4	VLF	3-30 kHz	Ondas miriamétricas	B.Mam
5	LF	30-300 kHz	Ondas kilométricas	B.km
6	MF	300-3000 kHz	Ondas hectométricas	B.hm
7	HF	3-30 MHz	Ondas decamétricas	B.dam
8	VHF	30-300 MHz	Ondas métricas	B.m
9	UHF	300-3000 MHz	Ondas decimétricas	B.dm
10	SHF	3-30 GHz	Ondas centimétricas	B.cm
11	EHF	30-300 GHz	Ondas milimétricas	B.mm
12		300-3000 GHz	Ondas decimilimétricas	B.dmm
13		3-30 THz	Ondas centimilimétricas	B.cmm
14		30-300 THz	Ondas micrométricas	B.µm
15		300-3000 THz	Ondas decimicrométricas	B.dµm

Nota 1 – La «banda N» se extiende de $0,3 \times 10^N$ a 3×10^N Hz.



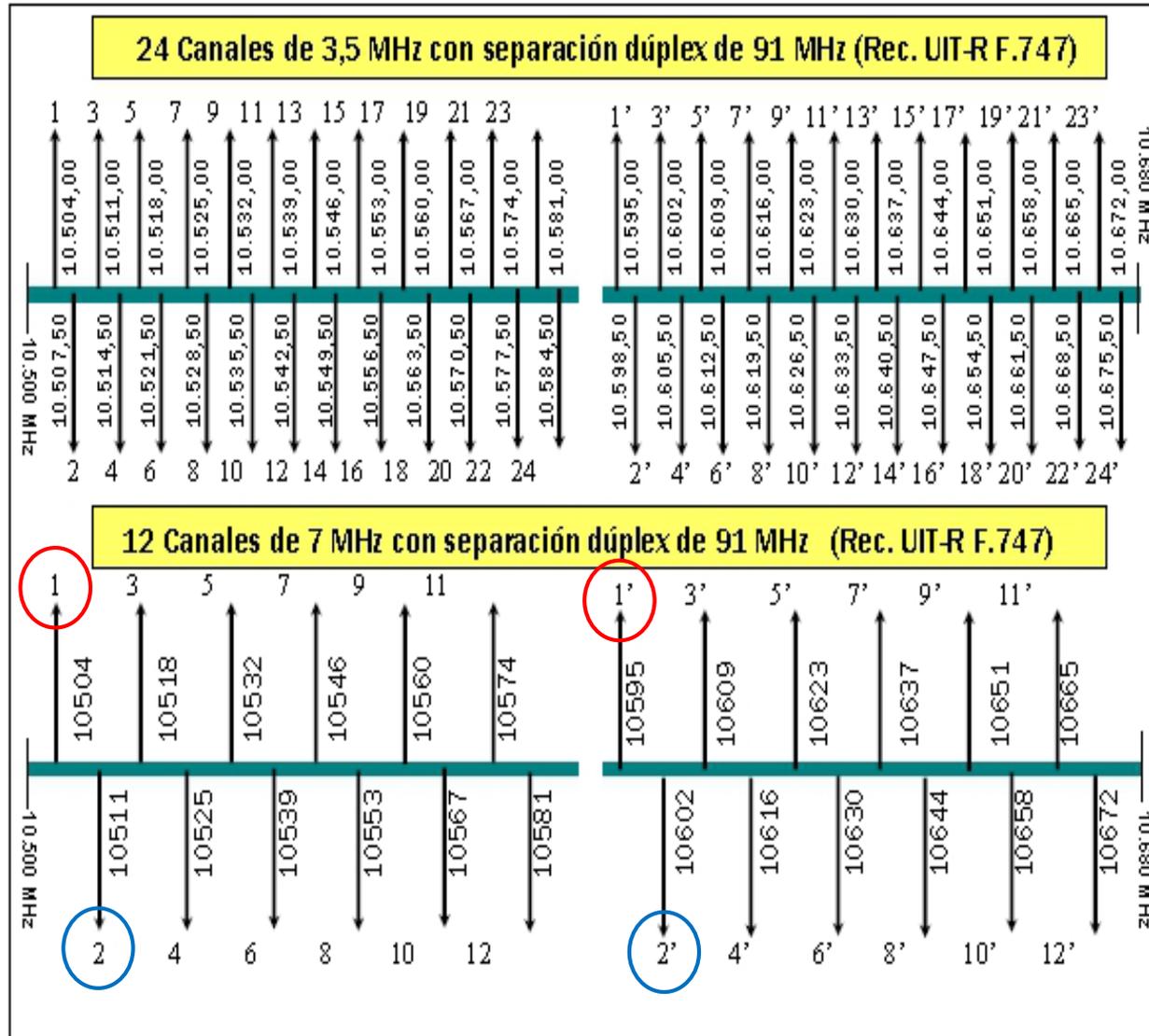
3. Planes de frecuencia.

Denominación	f	λ	Designación métrica	Uso
ELF (Extremely Low Frequency)	< 3 kHz	< 100 km		
VLF (Very Low Frequency)	3 – 30 kHz	10 – 100 km	Ondas miriamétricas	SONAR
LF (Low Frequency)	30 – 300 kHz	1 – 10 km	Ondas kilométricas	Ayuda a la navegación
MF (Medium Frequency)	0.3 – 3 MHz	100 – 1000 m	Ondas hectométricas	Radio marítima, AM commercial, etc.
HF (High Frequency)	3 – 30 MHz	10 – 100 m	Ondas decamétricas	Comunicaciones barco-avión
VHF (Very High Frequency)	30 – 300 MHz	1 – 10 m	Ondas métricas	TV, FM, Policia, Taxis, etc.
UHF (Ultra High Frequency)	0.3 – 3 GHz	0.1 – 1 m	Ondas decimétricas	TV, RADAR, Comunicaciones por satélite, Comunicaciones móviles, etc.
SHF (Super High Frequency)	3 – 30 GHz	1 – 10 cm	Ondas centimétricas	Enlaces de microondas, RADAR, WLL, LMDS, etc.
EHF (Extremely High Frequency)	30 – 300 GHz	1 – 10 mm	Ondas milimétricas	Sistemas de aterrizaje, MVDS
Región submilimétrica	300 – 800 GHz	0.4 – 1 mm	Ondas decimilimétricas	Experimental
IR (Infrarrojo)	800 GHz – 400 THz	0.8 – 400 μm		Comunicaciones ópticas
V (Visible)	400 – 750 THz	0.4 – 0.8 μm		Comunicaciones ópticas
UV (Ultra Violeta)	7.5×10^{14} – 10^{16} Hz	12 – 400 nm		Comunicaciones ópticas
Rayos X	10^{16} – 10^{20} Hz	0.6 – 12 nm		

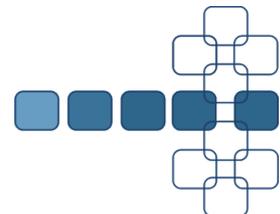


3. Planes de frecuencia.

- Ejemplo de canalización para la banda de 10 GHz (UN-61/ ICNAF):



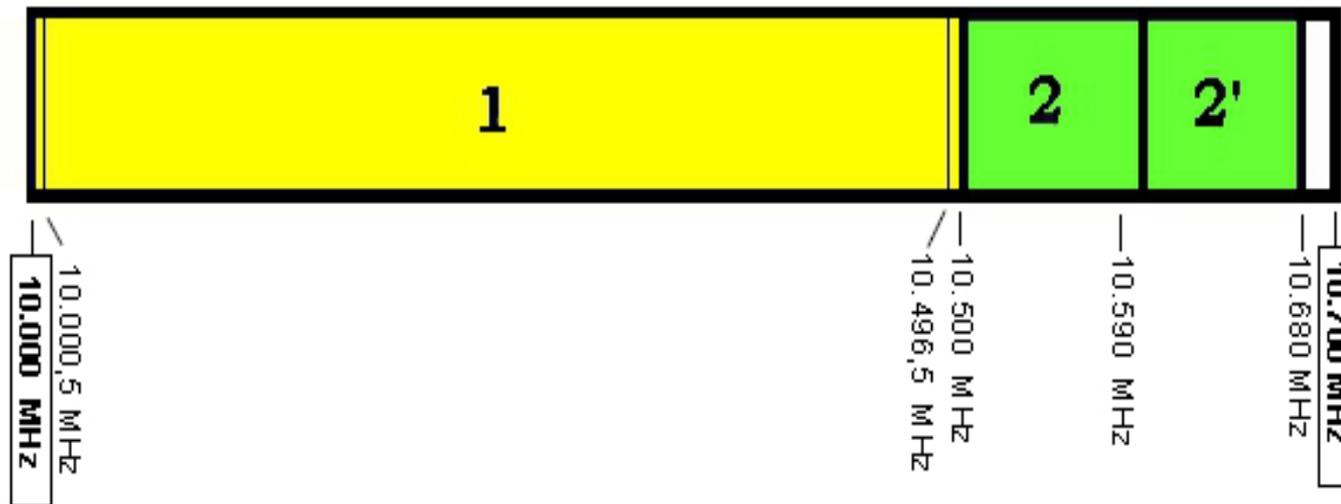
Canales con diferente polarización



3. Planes de frecuencia.

- Ejemplo de canalización para la banda de 10 GHz:

Nota UN-61 del CNAF

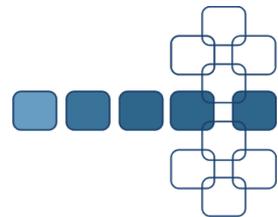


APLICACIONES DE LA BANDA

SUBBANDA 1: 62 canales de 8 MHz para radioenlaces digitales en aplicaciones ENG.

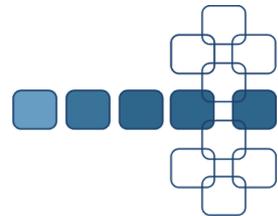
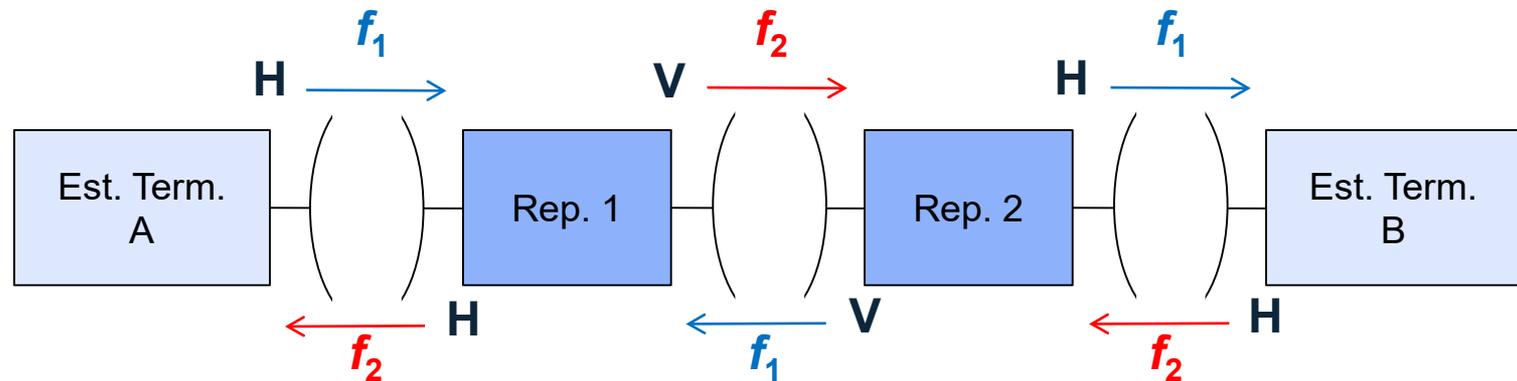
SUBBANDAS 2 y 2': Canalización basada en pasos de 3,5 MHz con una separación Tx/Rx de 91 MHz para radioenlaces digitales de pequeña y mediana capacidad.

Dispone de 24 canales dúplex de 3,5 MHz o de 12 canales dúplex de 7 MHz.



3. Planes de frecuencia.

- Asignación de frecuencias y polarizaciones:
 - En las estaciones terminales se requieren 2 frecuencias (emisión y recepción) por radiocanal (enlace bidireccional).
 - En las estaciones repetidoras es necesario que ambas frecuencias estén suficientemente separadas para evitar acoplos entre ambos sentidos de transmisión (aislamiento del duplexor, insuficiente directividad de las antenas, diferencia de niveles de potencia TX/RX de unos 60-90 dB).
 - Las polarizaciones se alternan entre vanos para reducir las interferencias.



3. Planes de frecuencia.

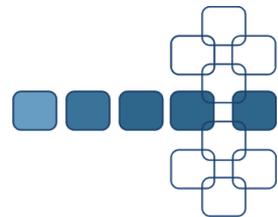
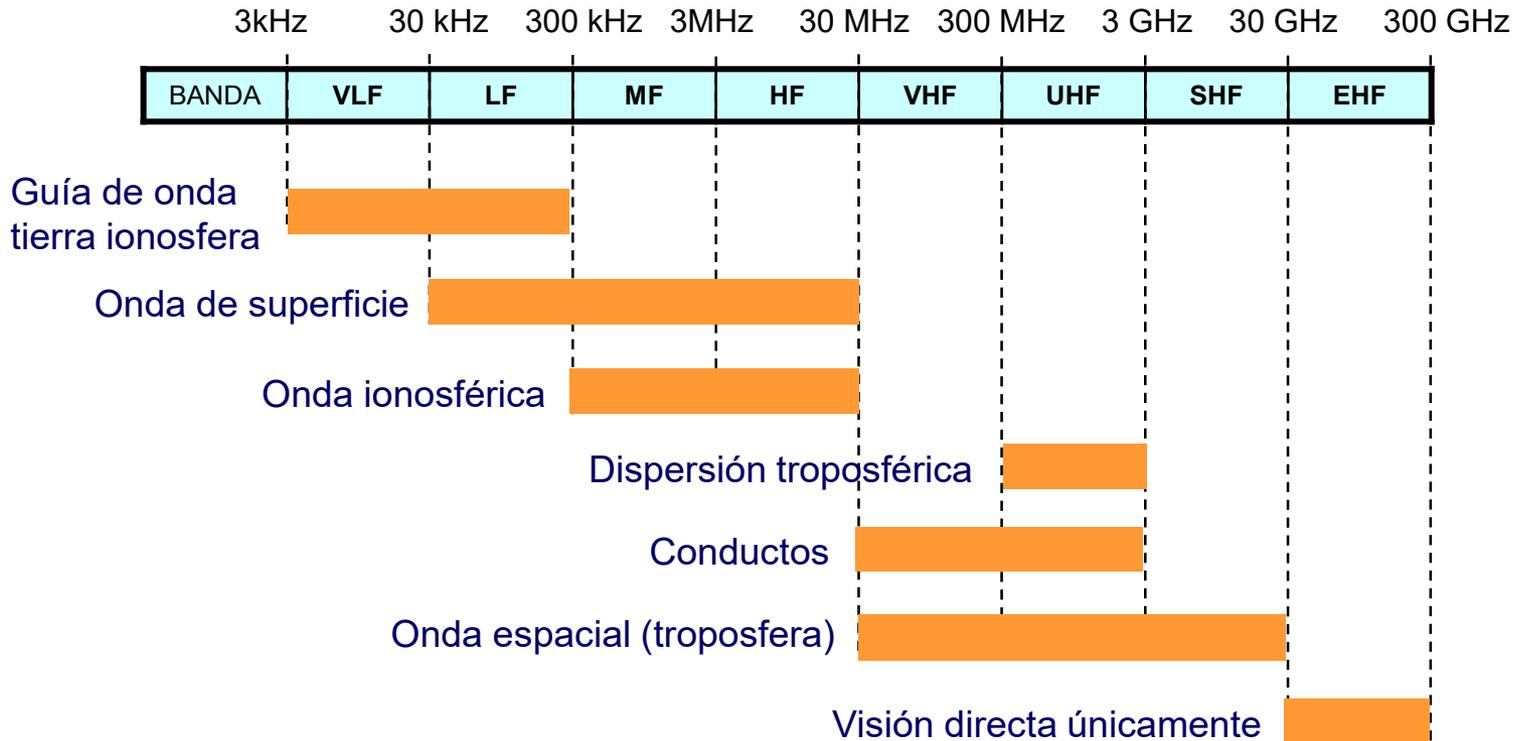
- Bandas de frecuencias en Europa para radioenlaces P-P:

Banda	Rango de frecuencias	Aplicación	Canalización
15 GHz	14,50-15,35 GHz	Enlaces fijos	CEPT/ERC Rec 12-07
	17,10-17,30 GHz	HIPERLAN	EU2, CEPT/ERC Rec 70-03
18 GHz	17,70-19,70 GHz	Enlaces fijos	CEPT/ERC Rec 12-03
23 GHz	22,00-23,60 GHz	Enlaces fijos	ERC Rec T/R 13-02
26 GHz 25 GHz	24,50-26,50 GHz	Enlaces fijos P-P y P-MP	ERC Rec T/R 13-02
28 GHz	27,50-29,50 GHz	Enlaces fijos	ERC Rec T/R 13-02
32 GHz	31,00-33,40 GHz	Enlaces fijos de alta densidad	Bajo revisión
38 GHz	37,00-39,50 GHz	Enlaces fijos de capacidad baja y media	ERC Rec T/R 12-01
52 GHz	51,40-52,60 GHz	Enlaces fijos de alta densidad	
56 GHz	55,78-57,00 GHz	Enlaces fijos de capacidad baja y media, corto alcance y baja potencia	ERC Rec T/R 22-03
58 GHz	58,20-59,00 GHz	Enlaces fijos de alta densidad	
65 GHz	64,00-66,00 GHz	Enlaces fijos de alta densidad	ERC Rec T/R 22-03



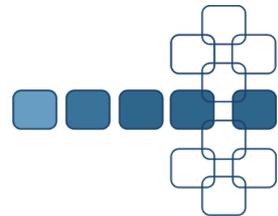
5.10. Modalidad de propagación vs. banda de frecuencia

■ Modo de propagación versus frecuencia



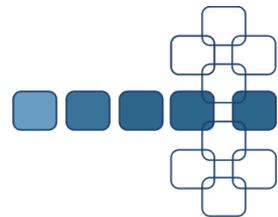
5.10. Modalidad de propagación vs. banda de frecuencia

BANDA	MODO DE PROPAGACIÓN	ALCANCE TÍPICO	DISPONIBILIDAD	UTILIZACIÓN TÍPICA
VLF	Guía onda Tierra-Ionosfera		Todas horas	Radionavegación. Servicio móvil marítimo
LF	Onda de superficie	+1000 Km sobre agua	Todas horas	Frecuencias patrón. Radionavegación
MF	Onda de superficie + onda ionosférica Onda ionosférica	Distancias cortas (100Km) Distancias largas (500Km)	Todas horas Noche	Radiodifusión Radiodifusión
HF	Onda ionosférica (3-8 MHz) (3-12 MHz) (6-25 MHz) (3-30 MHz)	- 300 Km + 500 Km + 500 Km - 100 Km	Día Noche Día Todas horas	Servicio fijo y móvil. Radiodifusión
VHF	Onda espacial (Troposférica) Dispersión ionosférica (f<50 MHz)	Visión directa (50Km) 2000 Km	Todas horas	Servicios móviles. Radiodifusión sonora y TV. Radionavegación Servicio fijo



5.10. Modalidad de propagación vs. banda de frecuencia

BANDA	MODO DE PROPAGACIÓN	ALCANCE TÍPICO	DISPONIBILIDAD	UTILIZACIÓN TÍPICA
UHF	Onda espacial troposférica	Visión directa (40 Km)	Todas horas	Servicio fijo y móvil. Radiodifusión TV. Radiolocalización
	Dispersión troposférica (f>500MHz)	600 Km		Servicio fijo
SHF	Onda espacial troposférica	Visión directa (40 Km)	Todas horas	Servicio fijo (radioenlaces terrenales). Radiodifusión por satélite y radionavegación

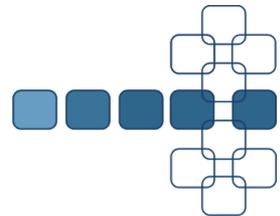


4. Dispositivos de microondas y antenas.

■ 4.1 Dispositivos de Microondas

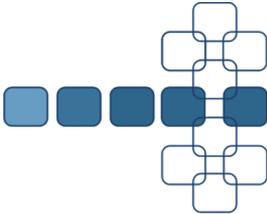
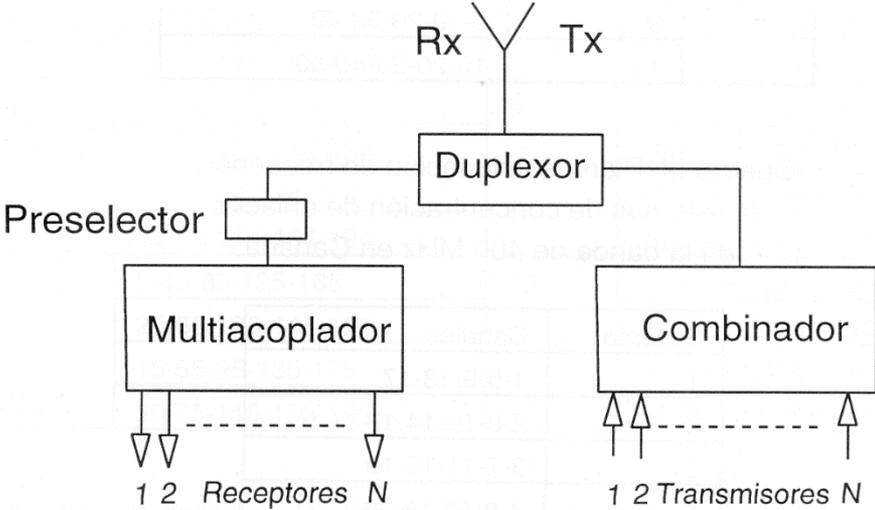
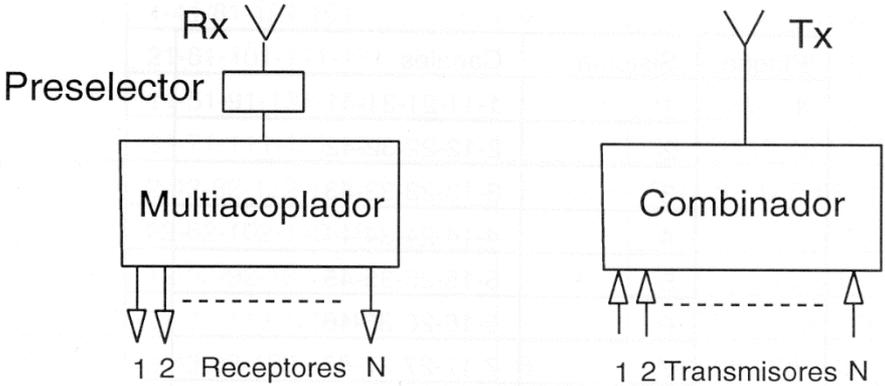
– Los dispositivos pasivos de microondas permiten la transmisión y recepción de varios radiocanales por una misma antena. También se denominan circuitos de acoplo:

- Circuladores.
- Filtros.
- Polarizadores
- Duplexores.



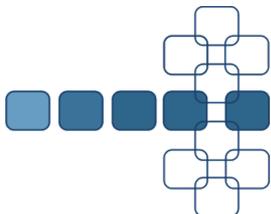
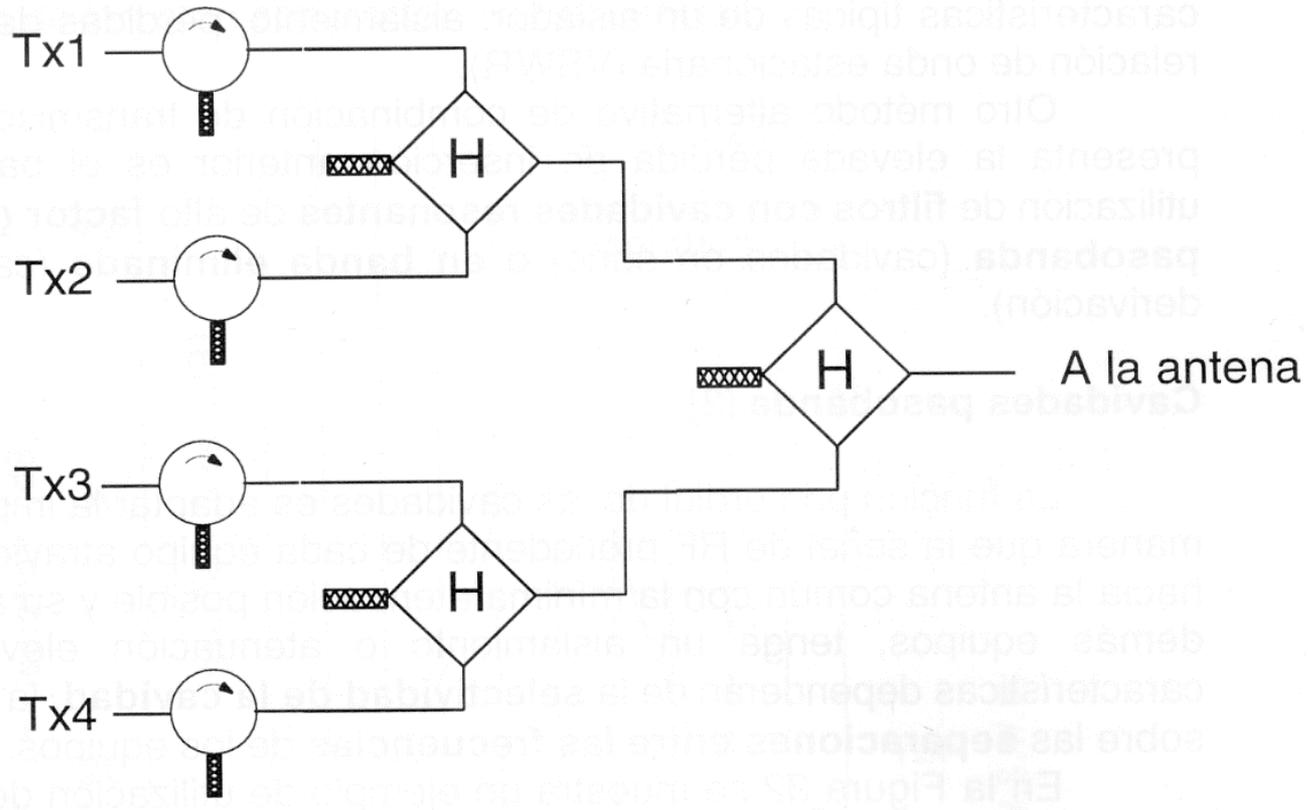
4. Dispositivos de microondas y antenas.

- Combinadores de antenna:



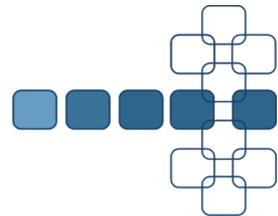
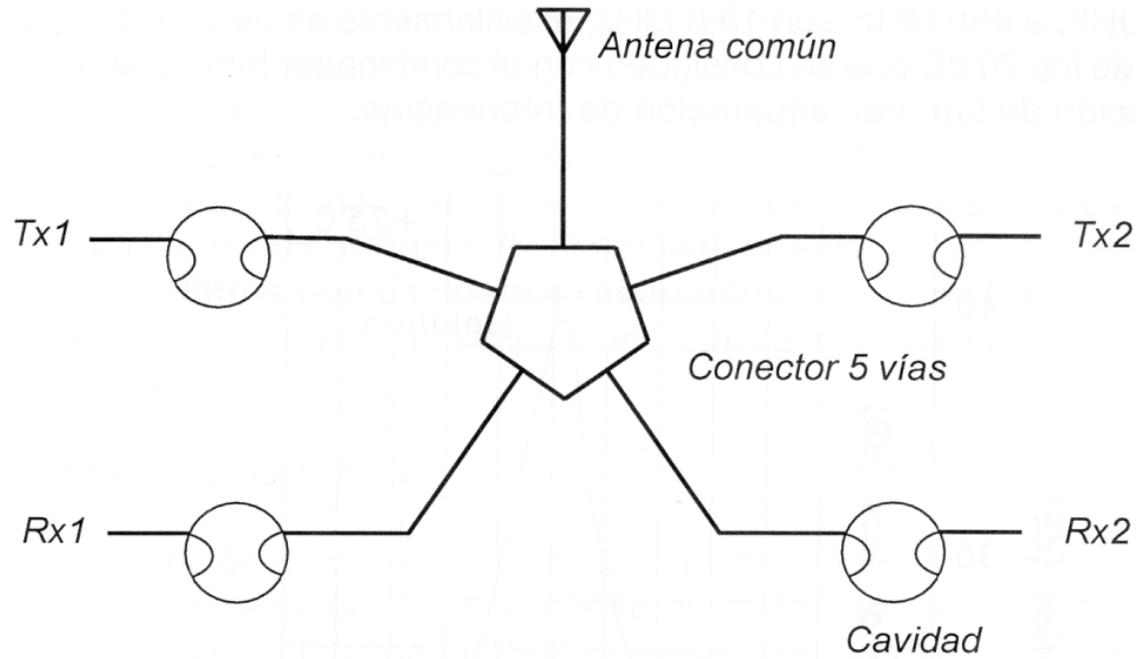
4. Dispositivos de microondas y antenas.

- Combinadores de aisladores de ferrita y uniones híbridas:



4. Dispositivos de microondas y antenas.

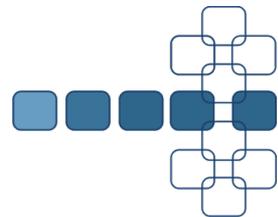
- Combinadores de cavidades pasobanda:



4. Dispositivos de microondas y antenas.

■ 4.2 Antenas

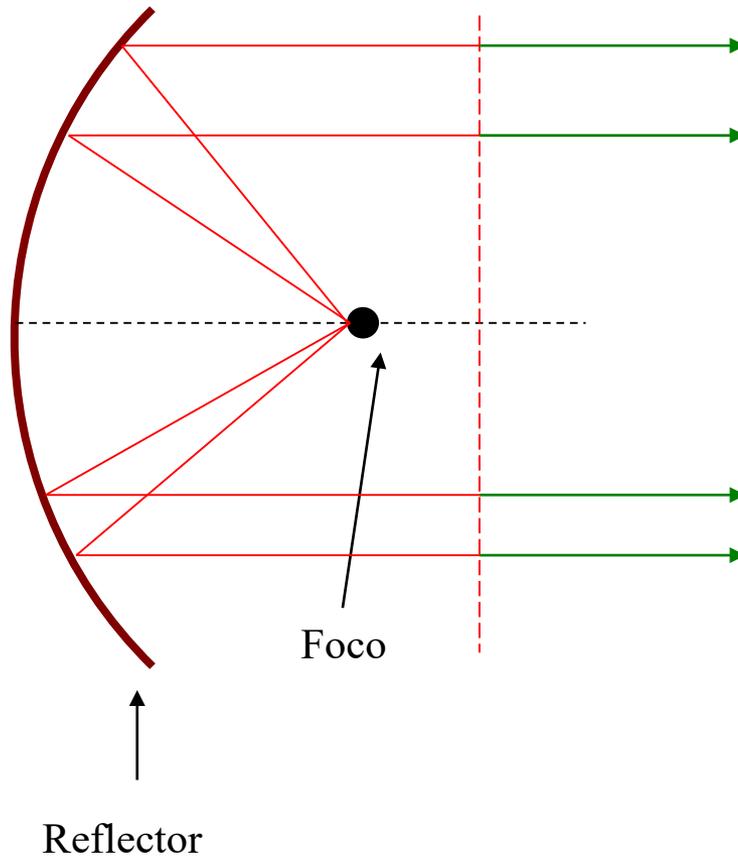
- Las antenas más habituales en el diseño de radioenlaces son parábolas alimentadas en el foco. Sus parámetros fundamentales son:
 - Ganancia Isótropa.
 - Anchura de haz
 - Diagrama de radiación (lóbulos laterales)
 - Pureza de polarización.



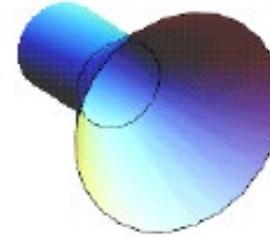
4. Dispositivos de microondas y antenas.

- Diferentes tipos de antenas físicas

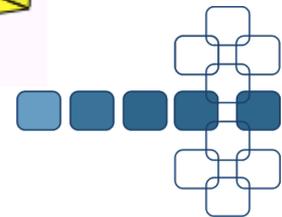
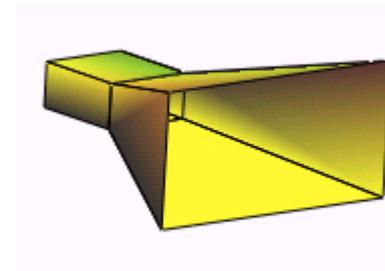
Reflectores



Bocina cónica

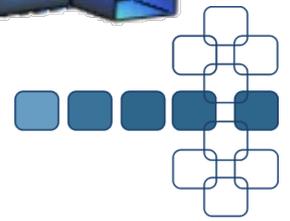
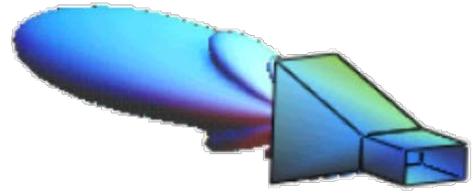
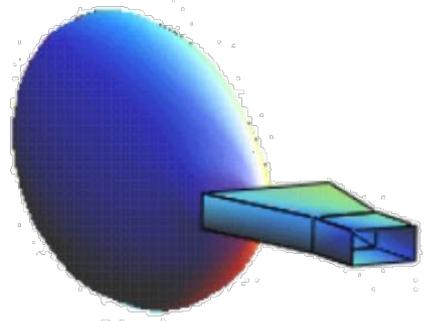
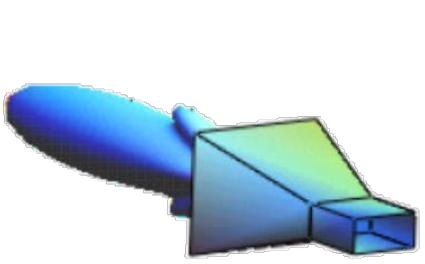
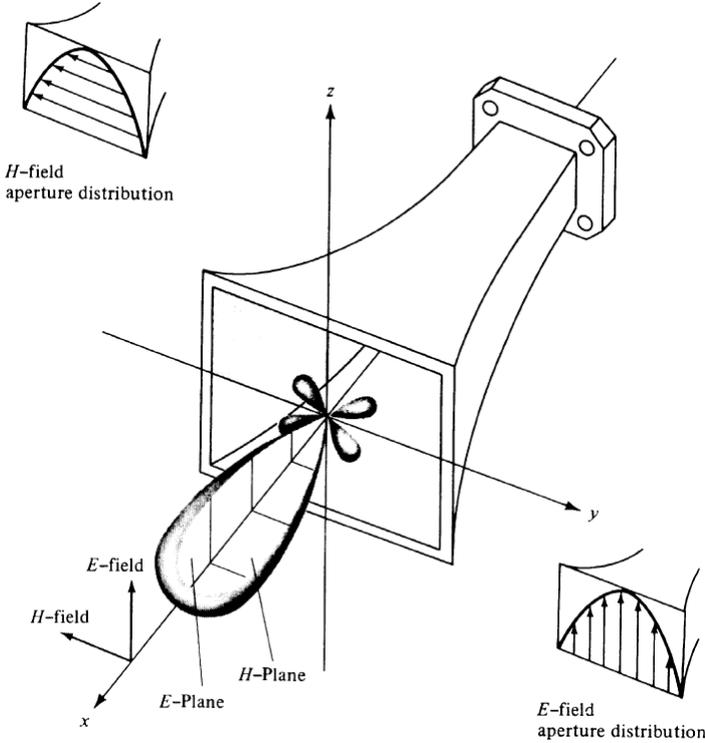


Bocina rectangular



4. Dispositivos de microondas y antenas.

- Bocinas



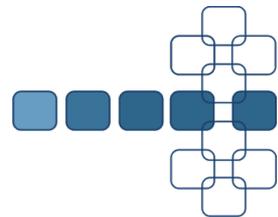
4. Dispositivos de microondas y antenas.

■ 4.2 Antenas

– La ganancia viene dada por la expresión:

$$g = k \frac{4\pi S_g}{\lambda^2} = \frac{4\pi S_e}{\lambda^2}$$

- k es el rendimiento de iluminación , comprendido entre 0,55 y 0,6
- S_g Superficie geométrica de la apertura
- S_e Superficie equivalente de recepción.



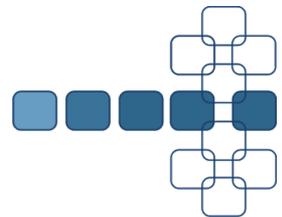
4. Dispositivos de microondas y antenas.

■ 4.2 Antenas

- La anchura del haz a 3 dB viene dado aproximadamente:

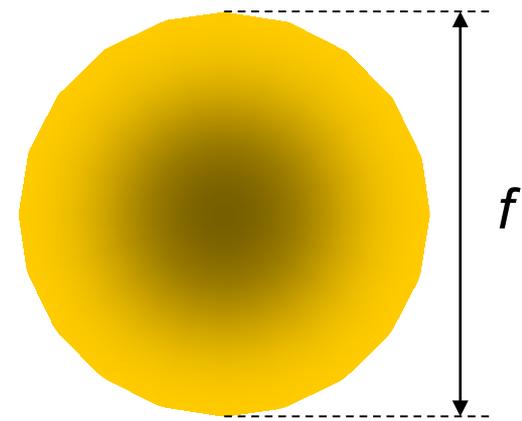
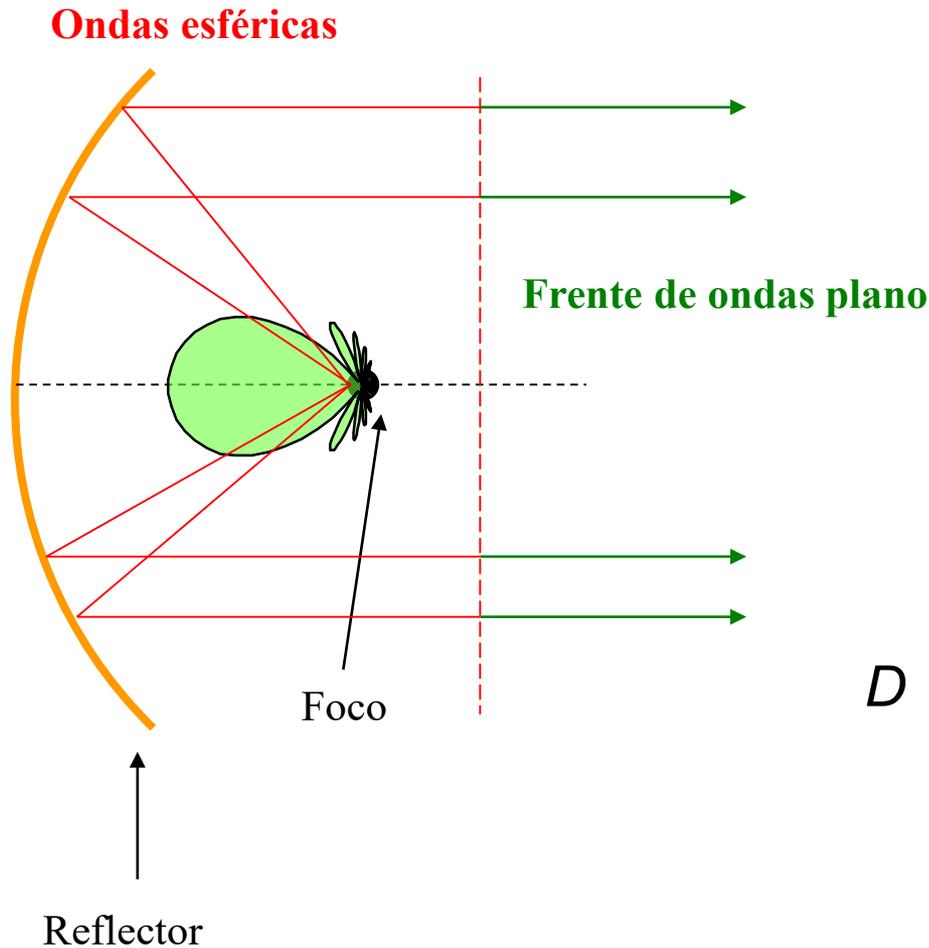
$$BW^\circ \approx 70 \frac{\lambda}{D} = \frac{21}{f(\text{GHz}) \cdot D(\text{m})}$$

- La relación XPD de una antena es la diferencia en dB entre la radiación copolar y contrapolar.



4. Dispositivos de microondas y antenas.

■ Reflectores parabólicos

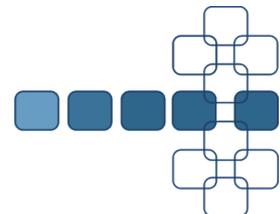


$$A_{ef} = A_{geométrica} h_{Total}$$

$$A_{geométrica} = \rho \frac{f^2}{4}$$

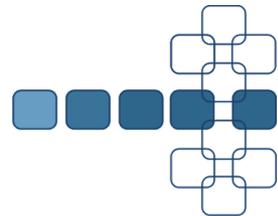
$$D = \frac{4\rho}{l^2} (A_{geométrica} h_{Total}) = \frac{4\rho f^2}{4l^2} h_{Total}$$

$$h_w \gg 1 \quad G \gg D$$



5. Parámetros básicos y balance de enlace.

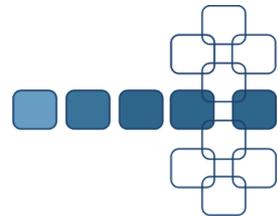
- **Pt**: Potencia de transmisión (dBm). Potencia entregada por el transmisor a los circuitos de acoplamiento de la antena.
- **Ltt, Ltr** : Pérdidas en los circuitos de acoplamiento (dB), también se denominan pérdidas en terminales.
- **Gt, Gr** : Ganancia de las antenas (dB)
- **Lb**: Pérdidas básicas de propagación.
- **Pr**: Potencia recibida a la entrada del amplificador RF del receptor (dBm).
- **Fr**: Factor de ruido del receptor (dB)
- **Pth**: Potencia umbral para alcanzar una tasa de error determinada en el receptor ó sensibilidad, (dBm)



5. Parámetros básicos y balance de enlace.

- **P_n**: Potencia de ruido (dBm) en el punto de referencia
- $P_r/P_n = C/N$ (dB) relación potencia recibida vs potencia de ruido.
- **E_b/N₀** (dB): relación energía por bit frente a densidad espectral de ruido.
- Ecuación del balance de enlace:

$$P_r(\text{dBm}) = P_t(\text{dBm}) - L_{tt}(\text{dB}) + G_t(\text{dB}) - L_b(\text{dB}) + G_r(\text{dB}) - L_{tr}(\text{dB})$$

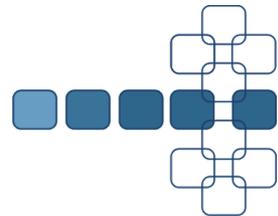


5. Parámetros básicos y balance de enlace.

- **P_n**: Potencia de ruido (dBm) en el punto de referencia

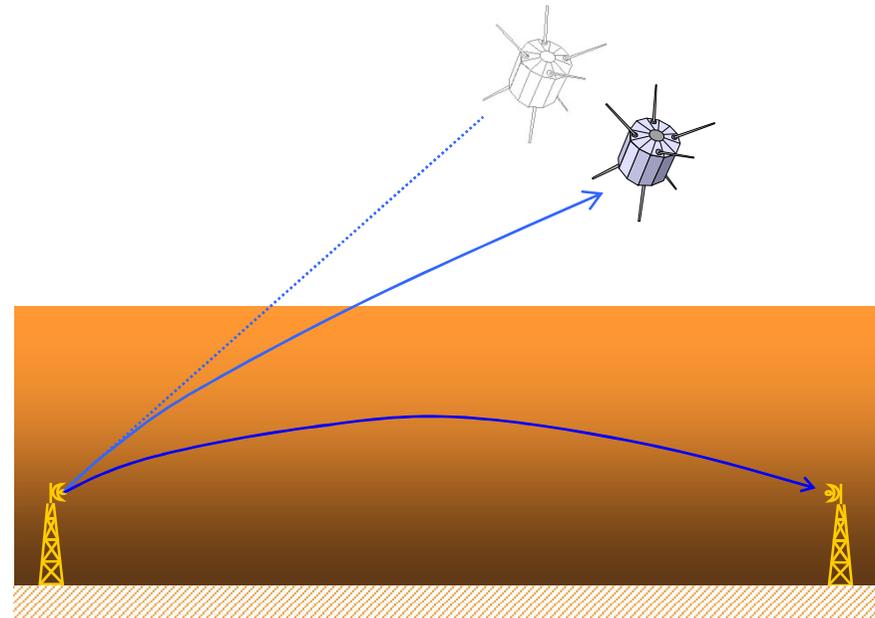
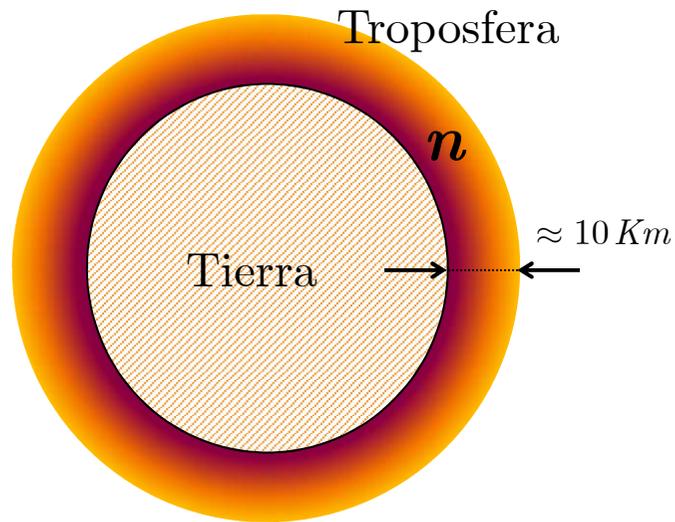
$$P_n = k T_o f_r b$$

- $P_r/P_n = C/N$ (dB) relación potencia recibida vs potencia de ruido.
- $C/N = 10 \log (P_r/ k T_o f_r b)$
- $E_b/N_o = 10 \log (P_r/ k T_o f_r V_b)$
- V_b es la velocidad binaria neta (bit/s)



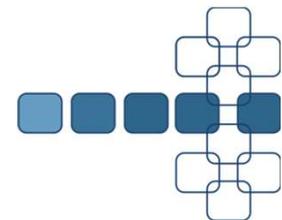
6. La refracción y sus efectos en el radioenlace.

■ Curvatura del haz radioeléctrico



Atmósfera estratificada horizontalmente

- El índice de refracción, en una atmósfera normal, disminuye con la altura ya que éste varía con la concentración de gases (no uniformidad de la atmósfera)
- Debido a la no uniformidad de la troposfera, se produce una curvatura del haz radioeléctrico a lo largo del trayecto
- Efecto importante para frecuencias superiores a 30 MHz



6. La refracción y sus efectos en el radioenlace.

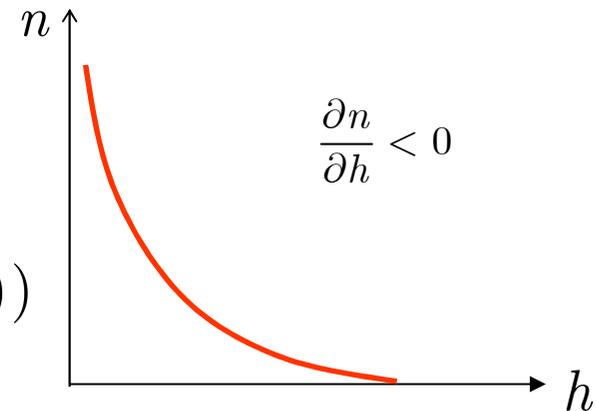
- El índice de refracción depende de la presión atmosférica (p), de la presión de vapor de agua (e), y de la temperatura (T). En condiciones normales ($p=1013$ mbar, $e=10.2$ mbar y $T=288K$), se tiene $n=1.000319$
- Dado que $n \approx 1$, se define el coíndice de refracción (N) como

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

- Para la atmósfera de referencia (ITU-R P.453), la variación de n con la altura (h) es

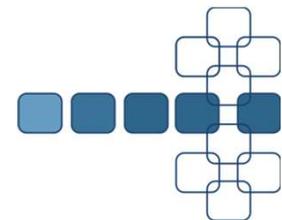
$$n(h) = 1 + 315 \cdot 10^{-6} \exp(-0.136h(Km))$$

$$N(h) = (n - 1)10^6 = 315 \exp(-0.136h(Km))$$



- La ITU proporciona valores de $N(h)$ para distintas regiones del planeta

$$N(h) = N_o \exp(-bh) \left| \begin{array}{l} b \equiv \text{factor de clima} \\ N_o = N(h=0) \end{array} \right.$$

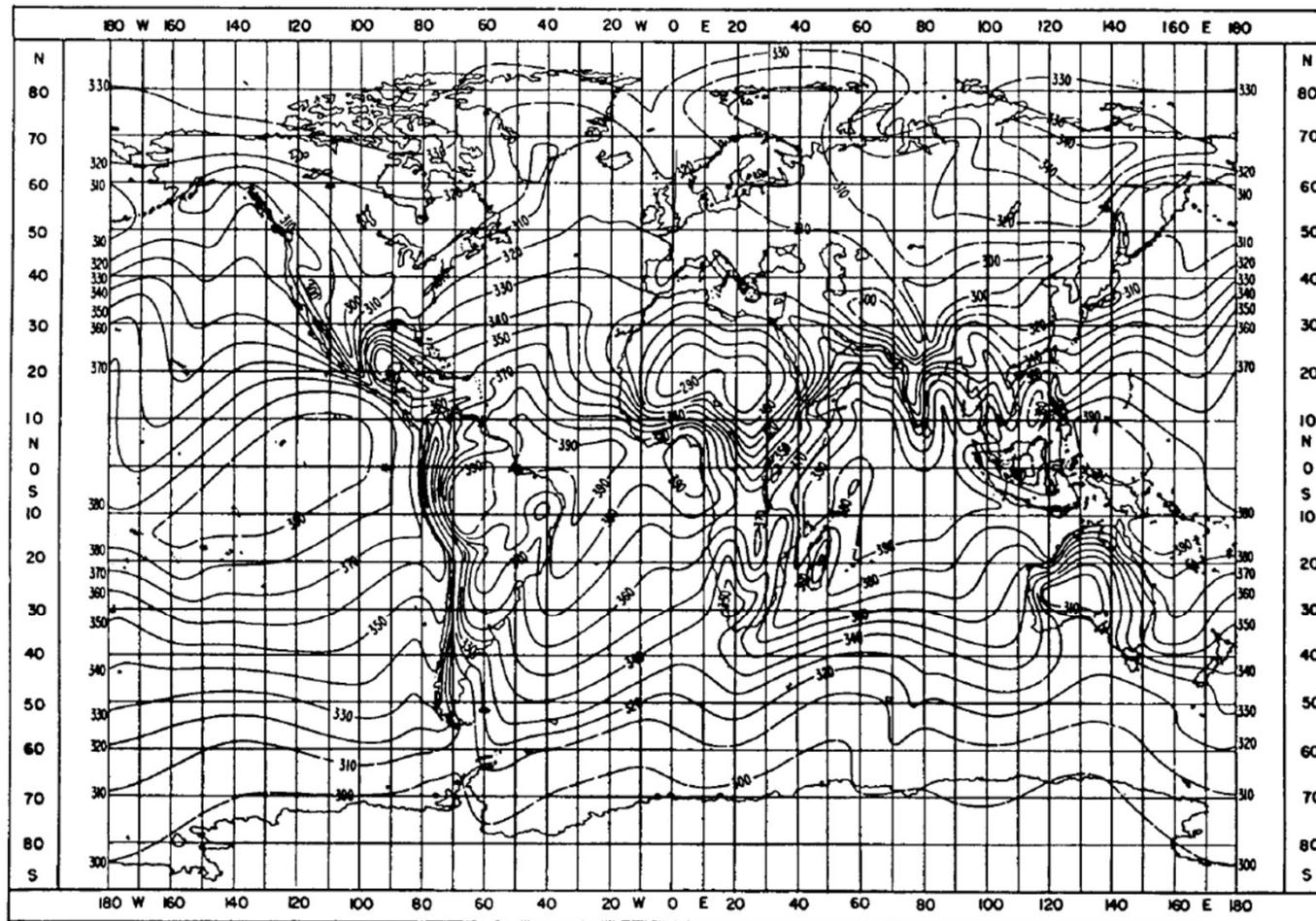


6. La refracción y sus efectos en el radioenlace.

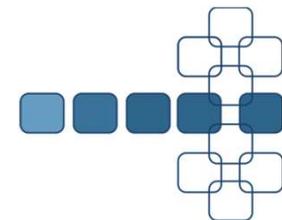
- Ejemplo de valores de N_0 según la ITU_R P.453

FIGURA 1

Valores medios mensuales de N_0 : febrero

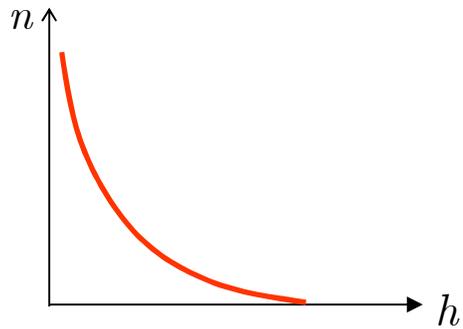


0453-01

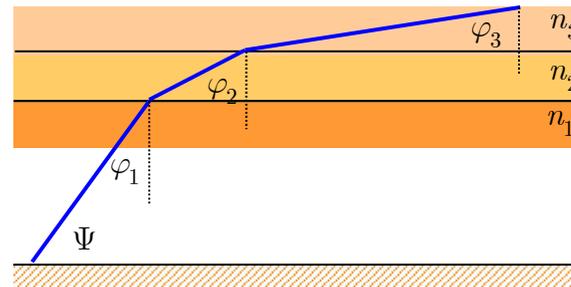


6. La refracción y sus efectos en el radioenlace.

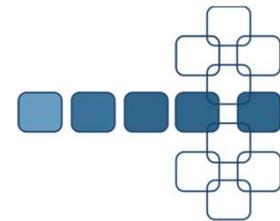
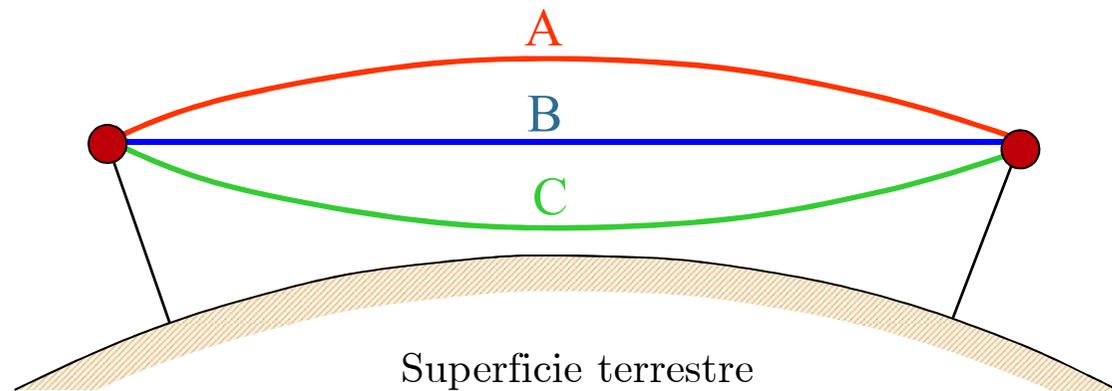
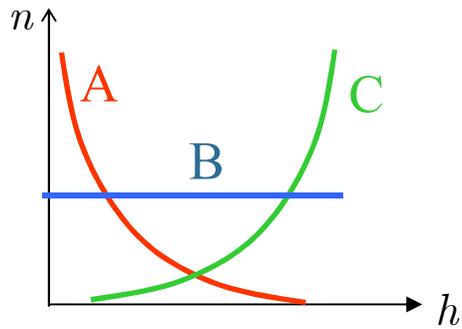
- ¿Curvatura del haz?



Atmósfera estratificada horizontalmente



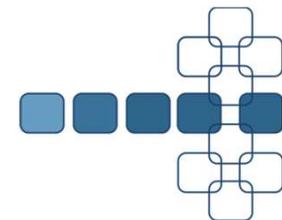
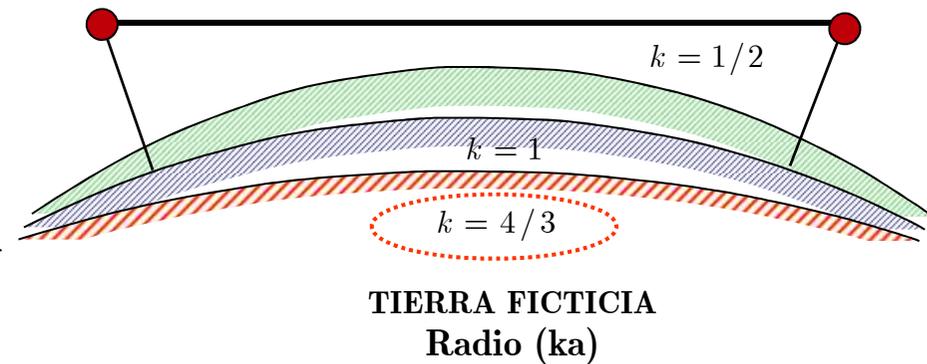
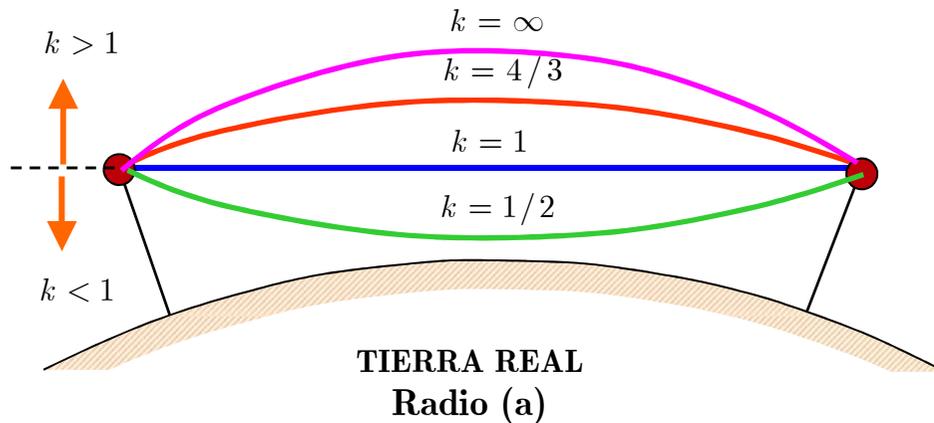
$$n_1 > n_2 > n_3$$
$$n_1 \sin(\varphi_1) = n_2 \sin(\varphi_2)$$
$$\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3$$



6. La refracción y sus efectos en el radioenlace.

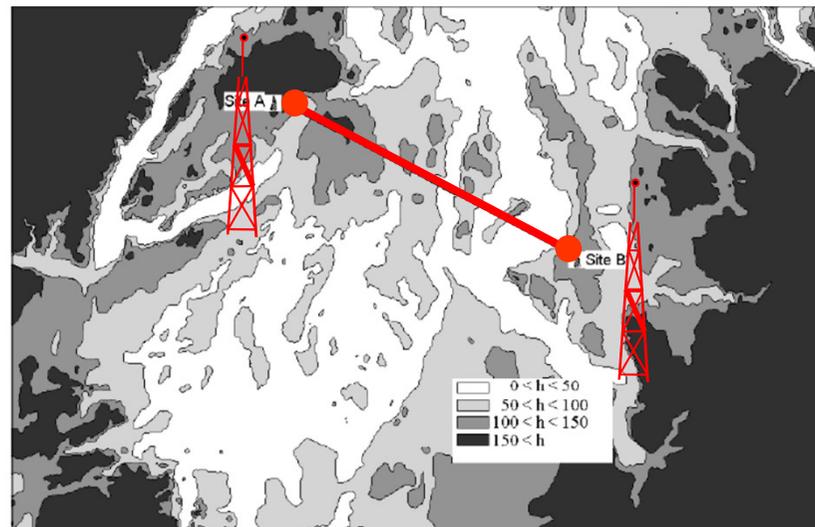
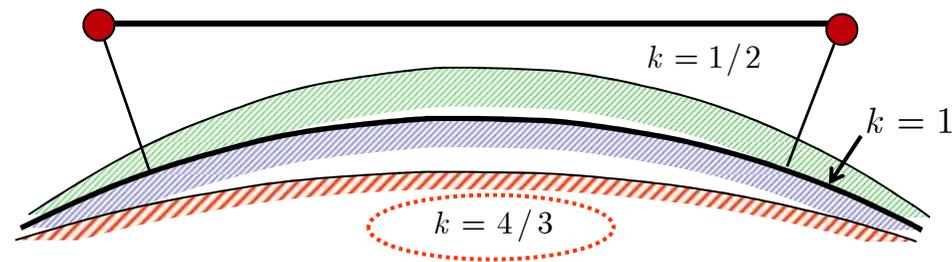
- Radio ficticio de la Tierra
 - Para trabajar con haces rectilíneos, se introduce el parámetro k que modifica el radio real de la tierra (a)

$$k = \frac{1}{1 + a \frac{\partial n}{\partial h}}$$

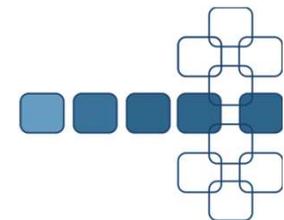


6. La refracción y sus efectos en el radioenlace.

- Por efecto de la refracción, para distancias superiores a 10 Km, la Tierra debe considerarse con su curvatura correspondiente, corrigiendo el perfil entre transmisor y receptor

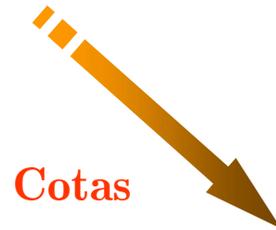
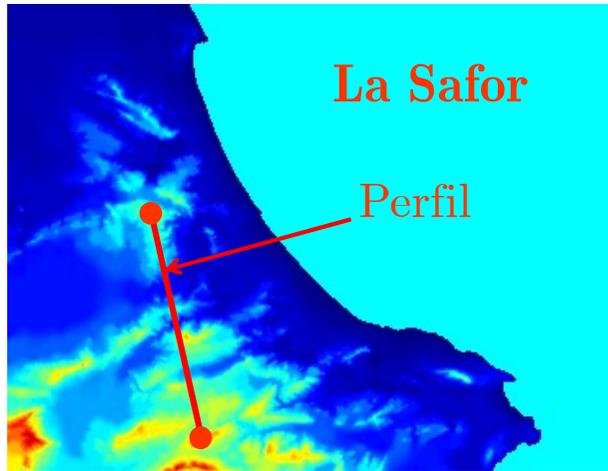


© S.R. Saunders, 1999

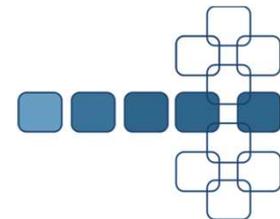
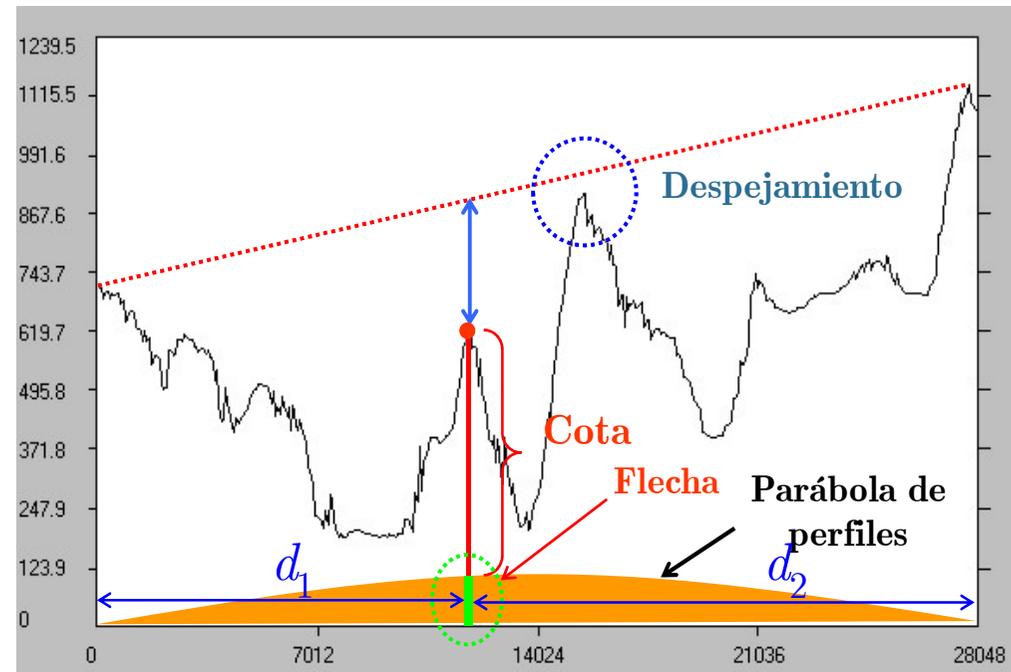


6. La refracción y sus efectos en el radioenlace.

- Trazado de perfiles: Parábola de perfiles

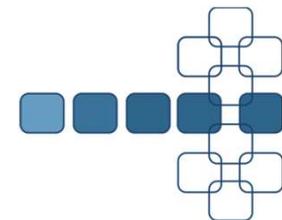
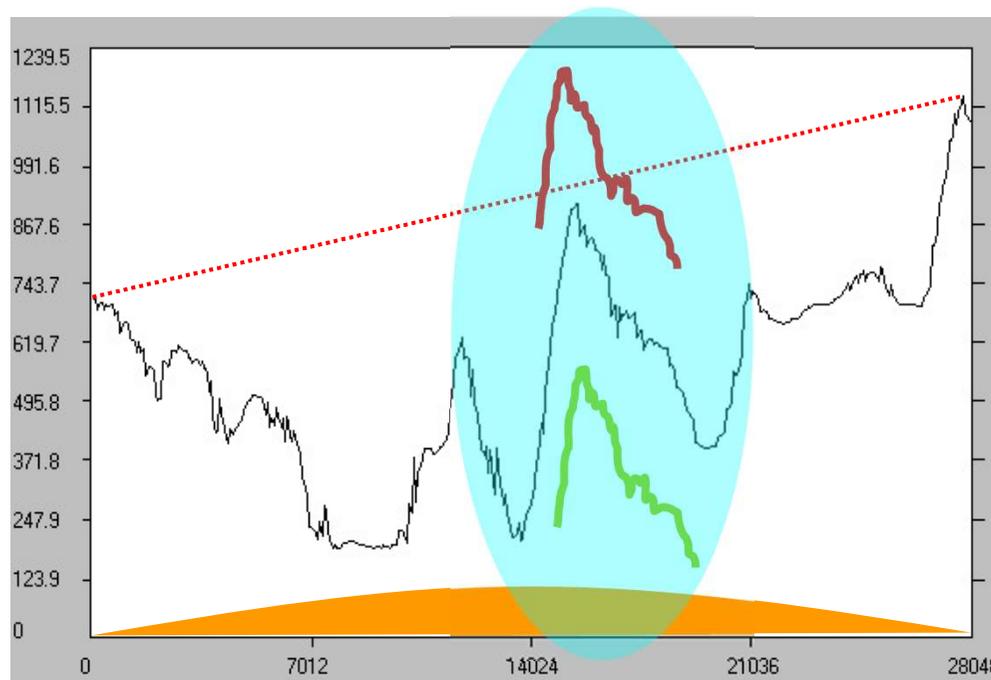


$$flecha \equiv f(d_1, d_2) = \frac{d_1 d_2}{2ka}$$

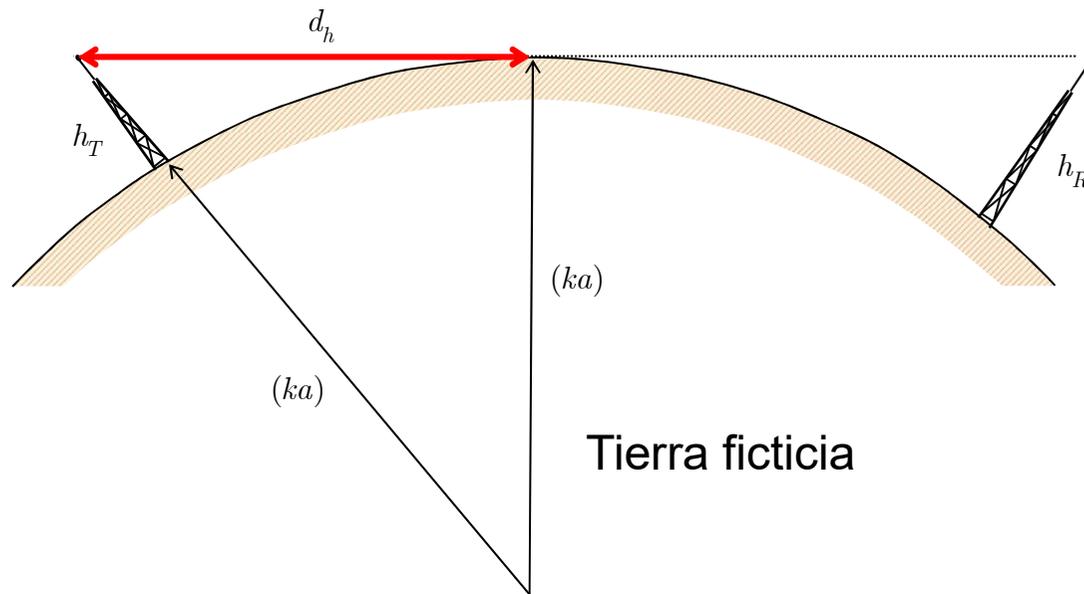


6. La refracción y sus efectos en el radioenlace.

- Influencia de k sobre el perfil
 - Para $k=4/3$, la Tierra resulta un poco más plana de lo que realmente es. Esto ocurre siempre que $k>1$, y supone mejores alcances. En cambio, cuando $k<1$, la Tierra ficticia es más curva que la real, lo que implica condiciones de propagación menos favorables.
 - Por tanto, si k disminuye también lo hace el despejamiento, y lo contrario cuando k aumenta.



6. La refracción y sus efectos en el radioenlace.



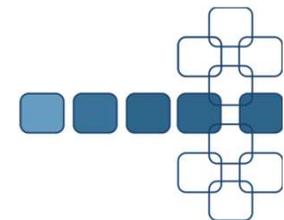
Alcances del orden de la visibilidad radioeléctrica. Es posible conseguir enlaces más allá del horizonte radioeléctrico, pero con una atenuación extra por difracción

- Horizonte radioeléctrico

$$d_h = \sqrt{(ka + h_T)^2 - (ka)^2} \Big|_{ka \gg h_T} \approx \sqrt{2ka h_T}$$

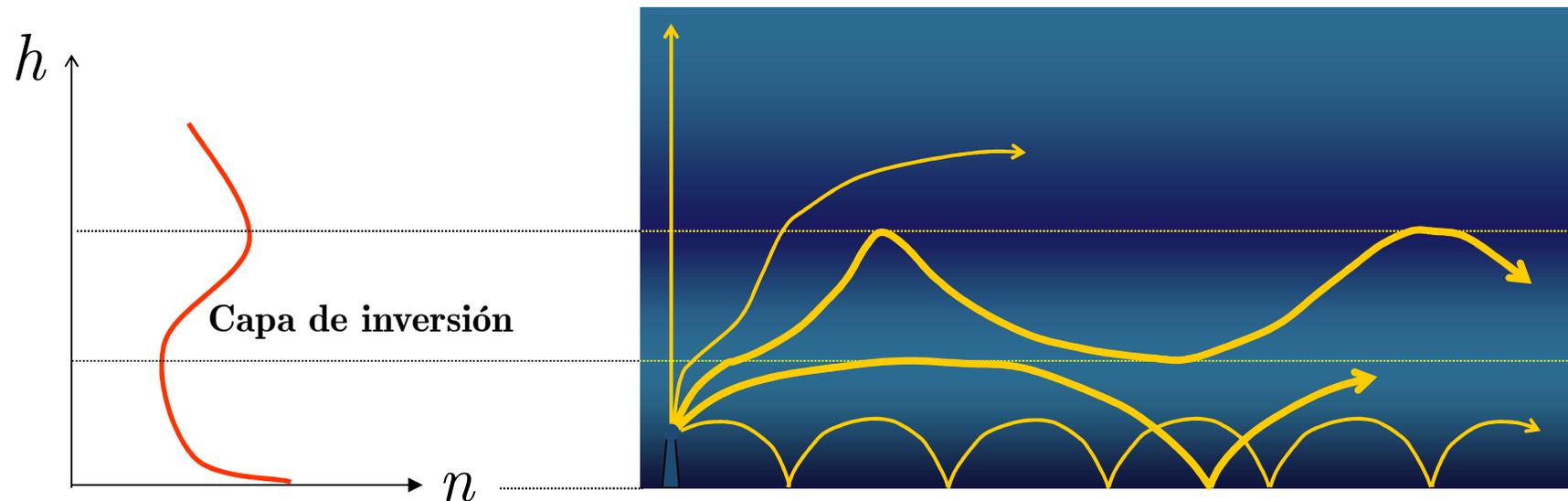
- Visibilidad radioeléctrica

$$d_V = d_h|_{TX} + d_h|_{RX} \approx \sqrt{2ka} (\sqrt{h_T} + \sqrt{h_R})$$



6. La refracción y sus efectos en el radioenlace.

- Propagación por conductos
 - La formación de conductos está asociada a grandes variaciones del gradiente del índice de refracción, debidas a variaciones elevadas en la concentración de vapor de agua en las capas altas de la atmósfera

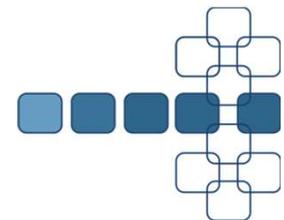


- Esta situación suele darse principalmente en verano, cuando la tierra y el mar se recalientan, provocando la transmisión guiada de las ondas con baja atenuación y grandes alcances



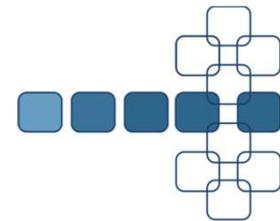
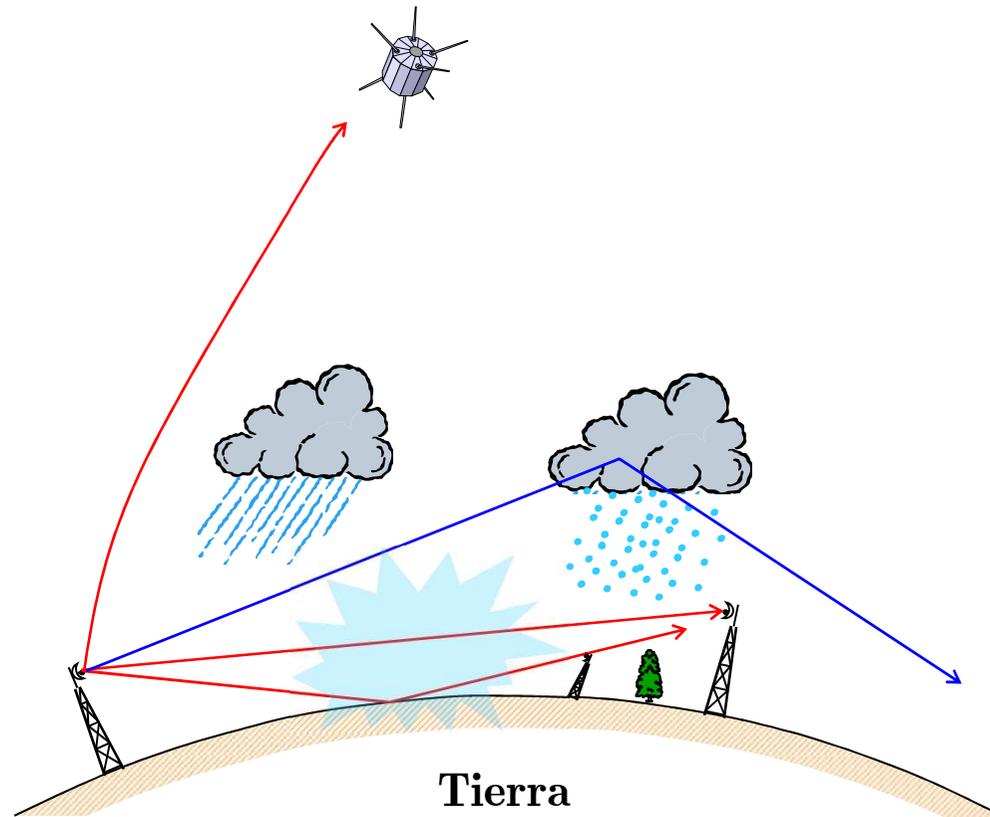
6. La refracción y sus efectos en el radioenlace.

- Por las dimensiones de los conductos (de metros a centenares de metros), afectan principalmente a frecuencias superiores a VHF
- La formación de conductos es más probable sobre mares cálidos, mientras que sobre tierra es un fenómeno poco frecuente
- Este modo de propagación es suficientemente impredecible como para no constituir un modo de propagación en el que se pueda establecer un servicio de radiocomunicaciones. Más bien tiene un efecto de interferencia



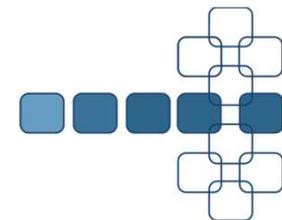
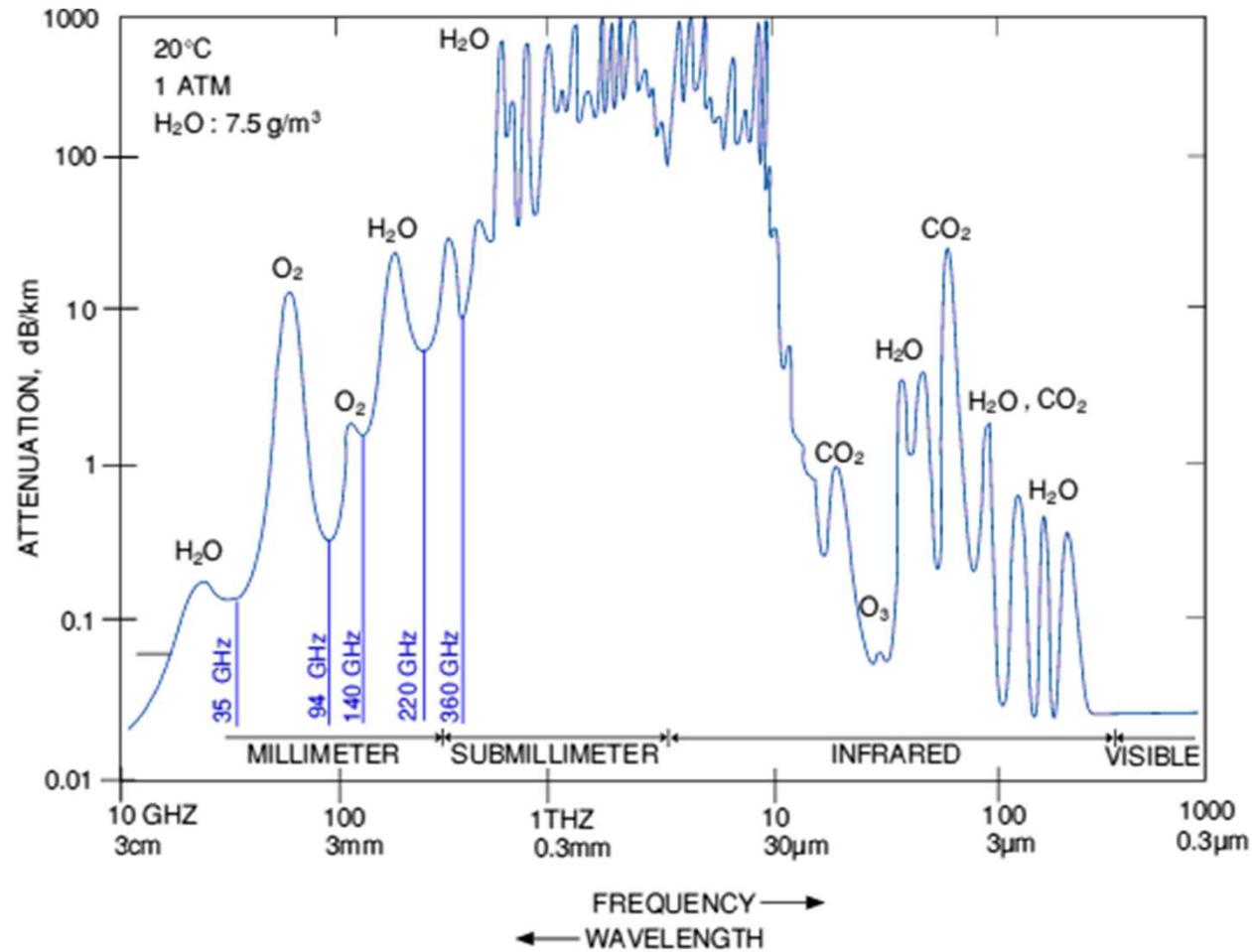
7. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

- Atenuación atmosférica
 - La absorción molecular de los gases contenidos en la atmósfera y la atenuación producida por los hidrometeoros son las principales causas de la atenuación atmosférica



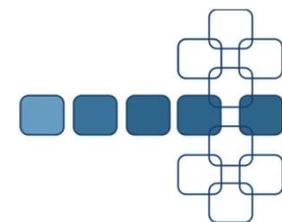
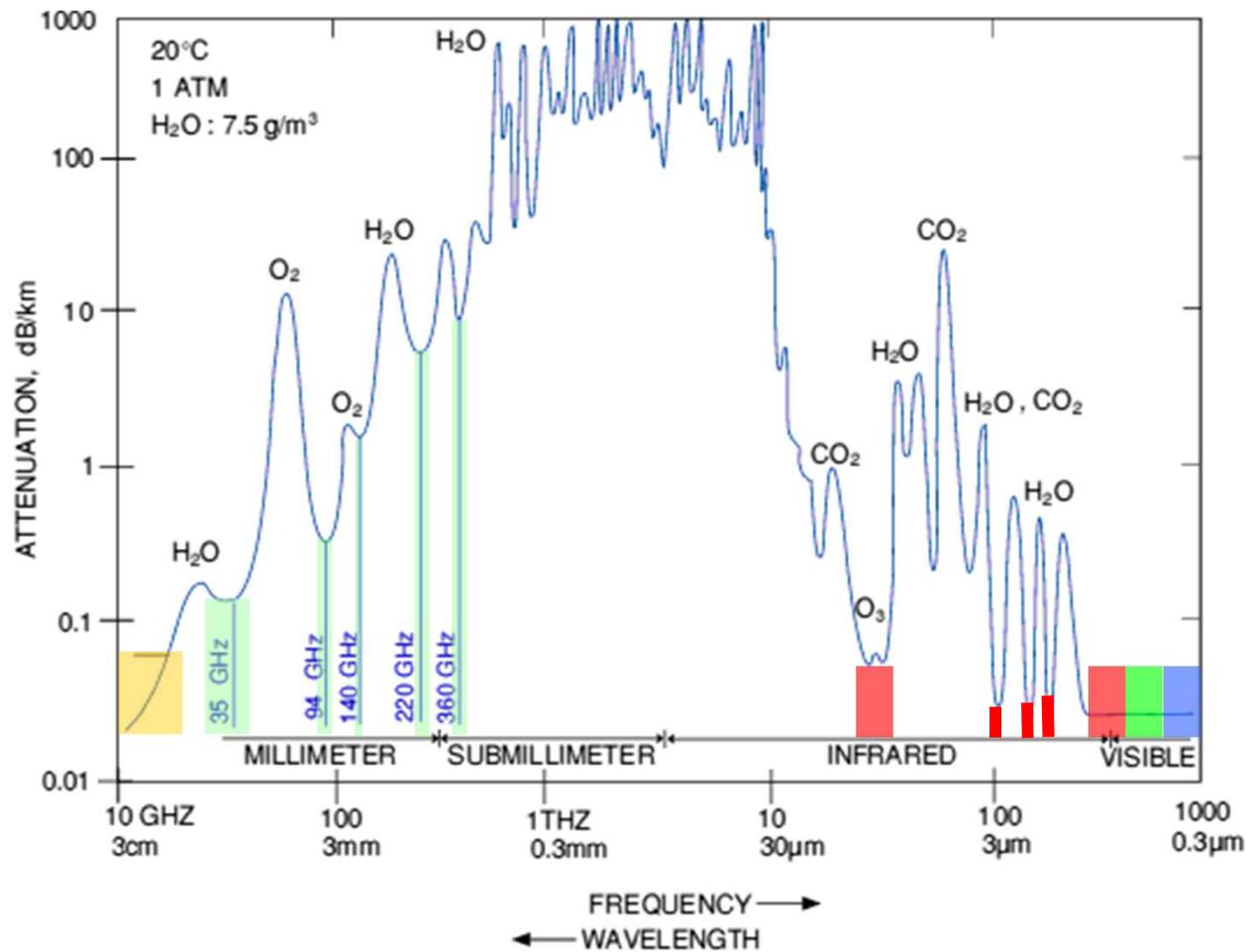
7. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

- Atenuación atmosférica (Trayecto próximo a la superficie)



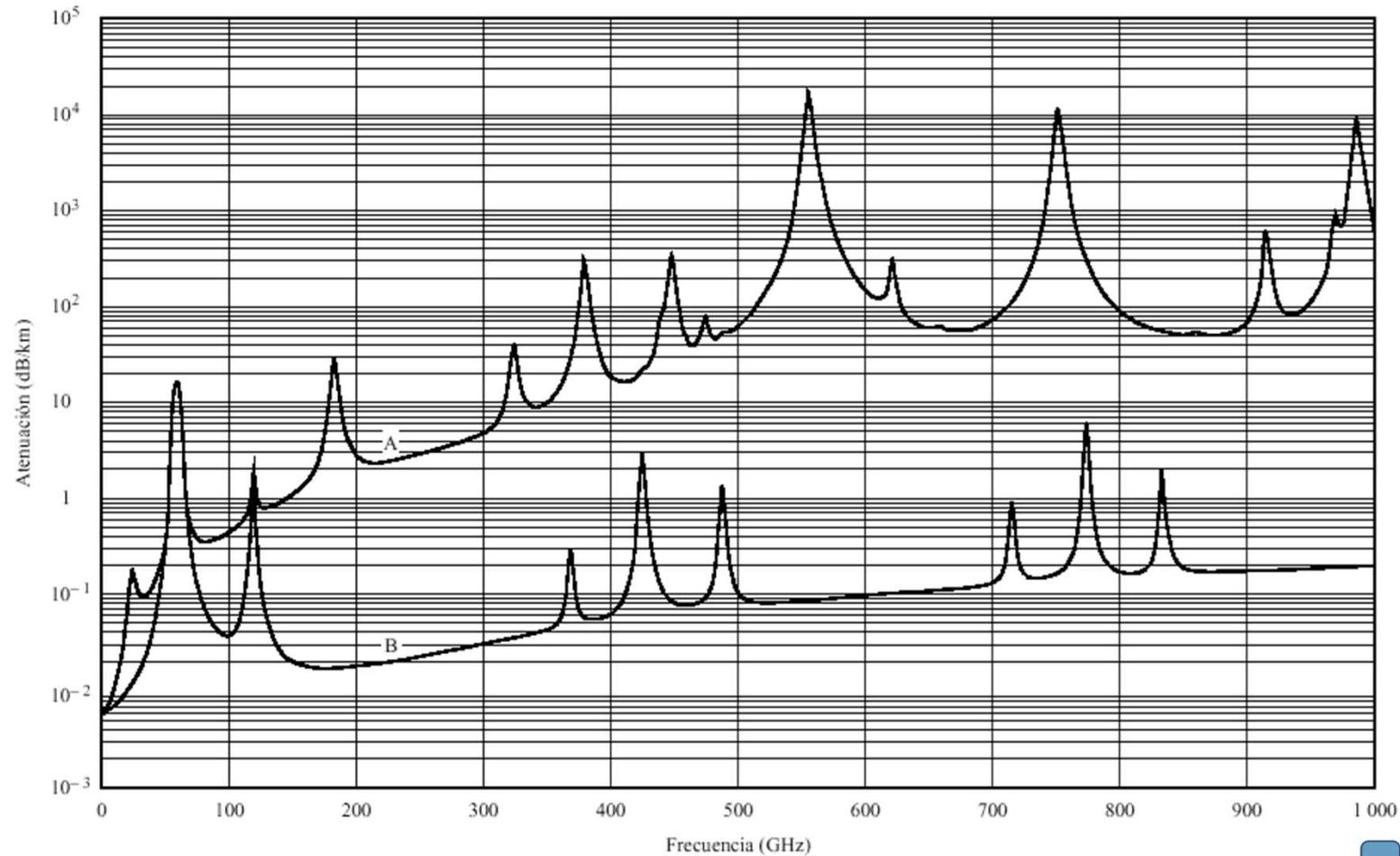
7. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

- Atenuación atmosférica (Trayecto próximo a la superficie)



7. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

- Atenuación específica debida a los gases atmosféricos, calculada en pasos de 1 GHz



Rec. UIT-R P.676-3

Curvas A: atmósfera normal ($7,5 \text{ g/m}^3$)

B: atmósfera seca

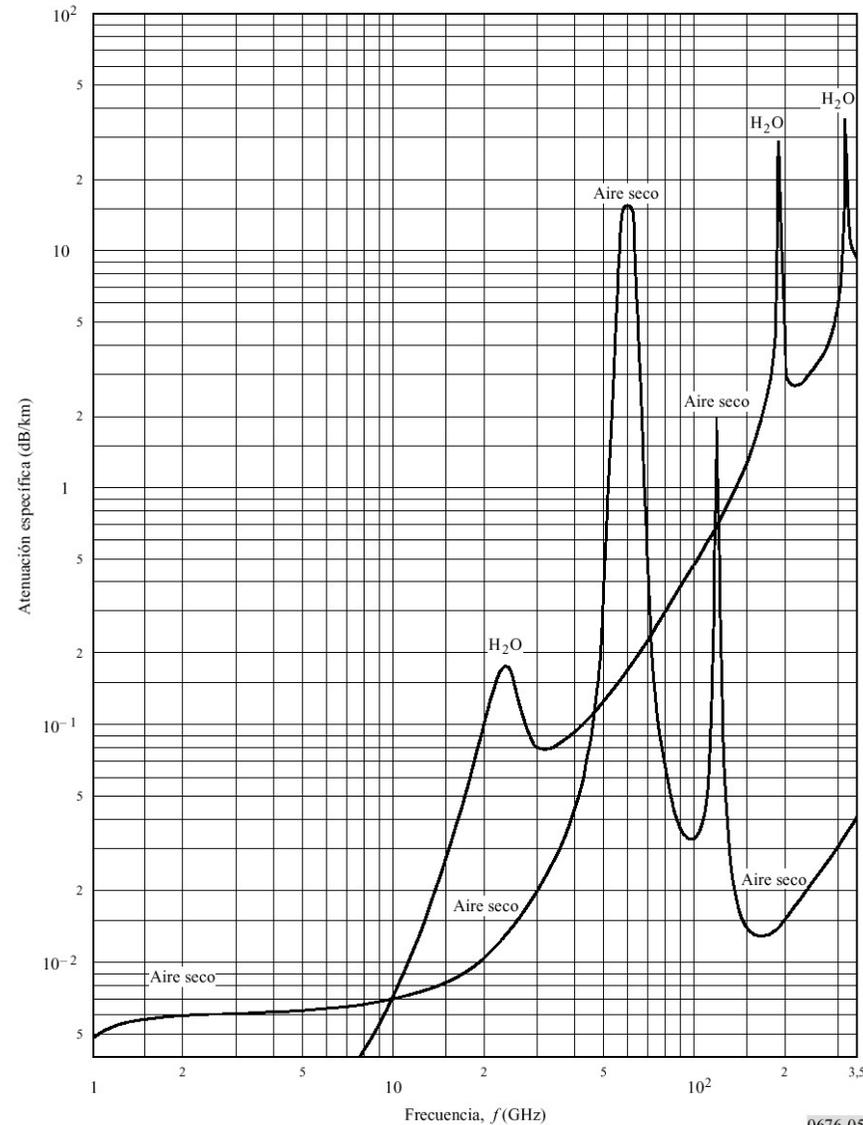
0676-01



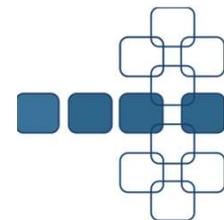
7. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

- Atenuación específica debida a los gases atmosféricos, calculada en pasos de 1 GHz. UIT-R P.676

Presión: 1 013 hPa
Temperatura: 15° C
Vapor de agua: 7,5 g/m³



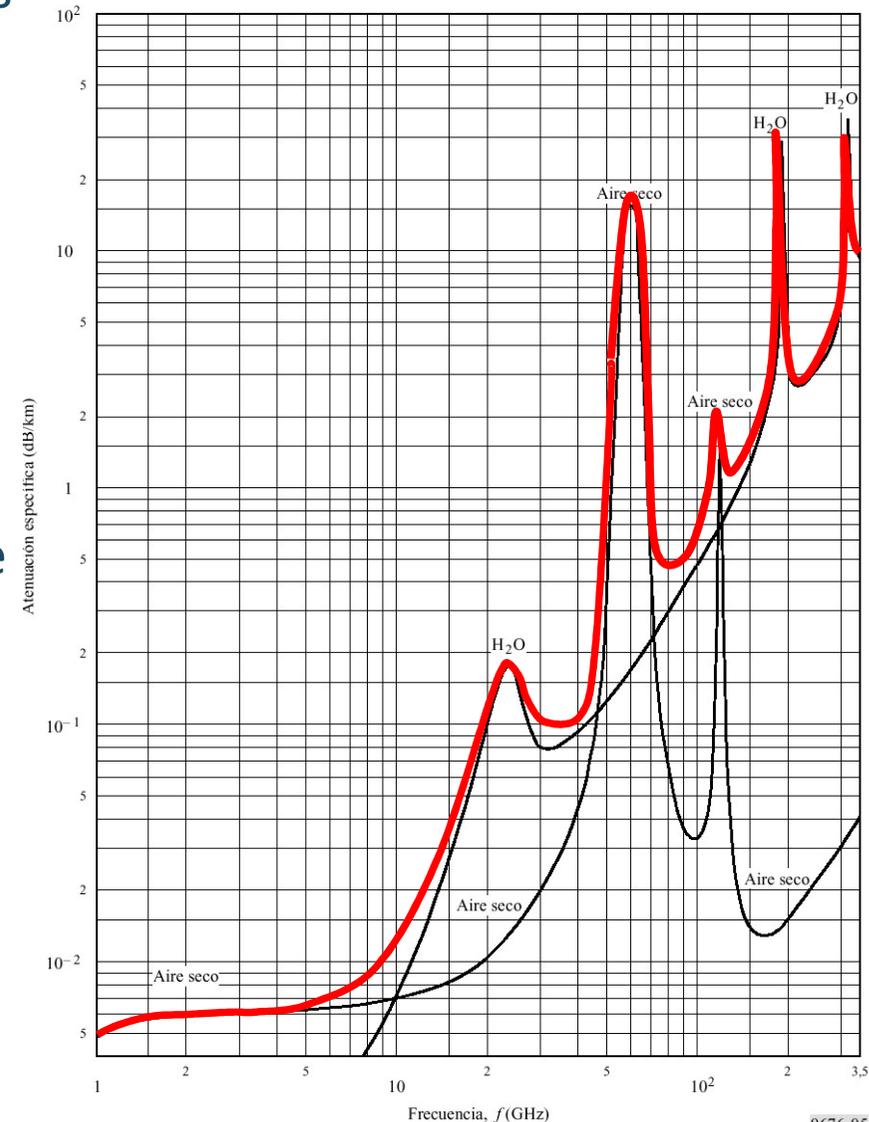
0676-05



7. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

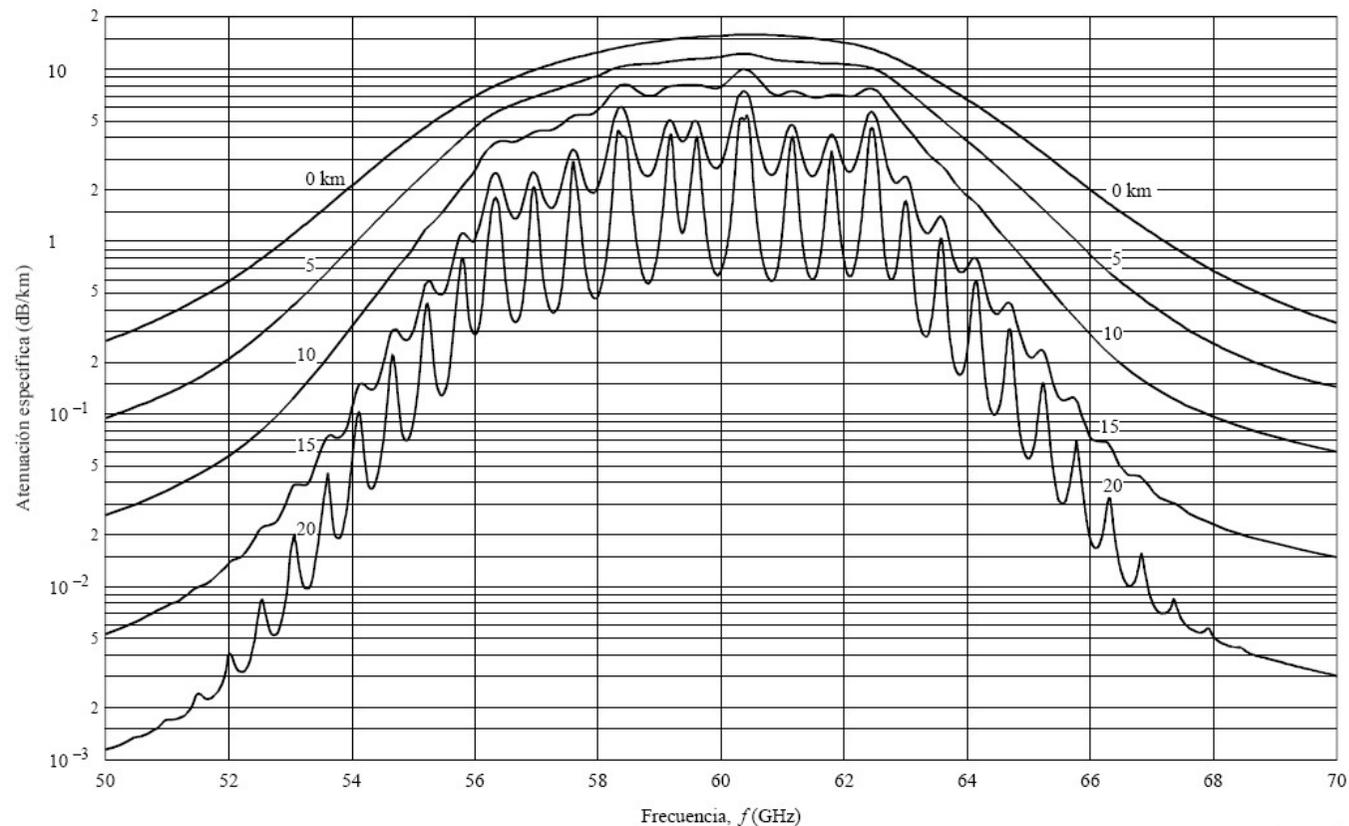
- Atenuación específica debida a los gases atmosféricos, calculada en pasos de 1 GHz. UIT-R P.676
 - (trayecto próximo a la superficie) La atenuación se debe principalmente a las moléculas de oxígeno y vapor de agua
 - Efecto despreciable a frecuencias inferiores a 10 GHz
 - Para una atmósfera normal picos de absorción a 22.3 GHz (vapor de agua) y a 60 GHz (oxígeno)
 - Atenuación a (22.3 GHz) próxima a 1.5 dB/km
 - Atenuación a (60 GHz) próxima a 15 dB/km

Presión: 1 013 hPa
Temperatura: 15° C
Vapor de agua: 7,5 g/m³



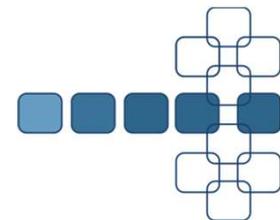
7. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

- Influencia de la inclinación del trayecto sobre la atenuación. UIT-R P.676
 - A medida que aumenta la altura, disminuye la concentración de gases
 - A medida que aumenta la altura, también decrece rápidamente el contenido de vapor de agua, mientras que el de oxígeno es más gradual



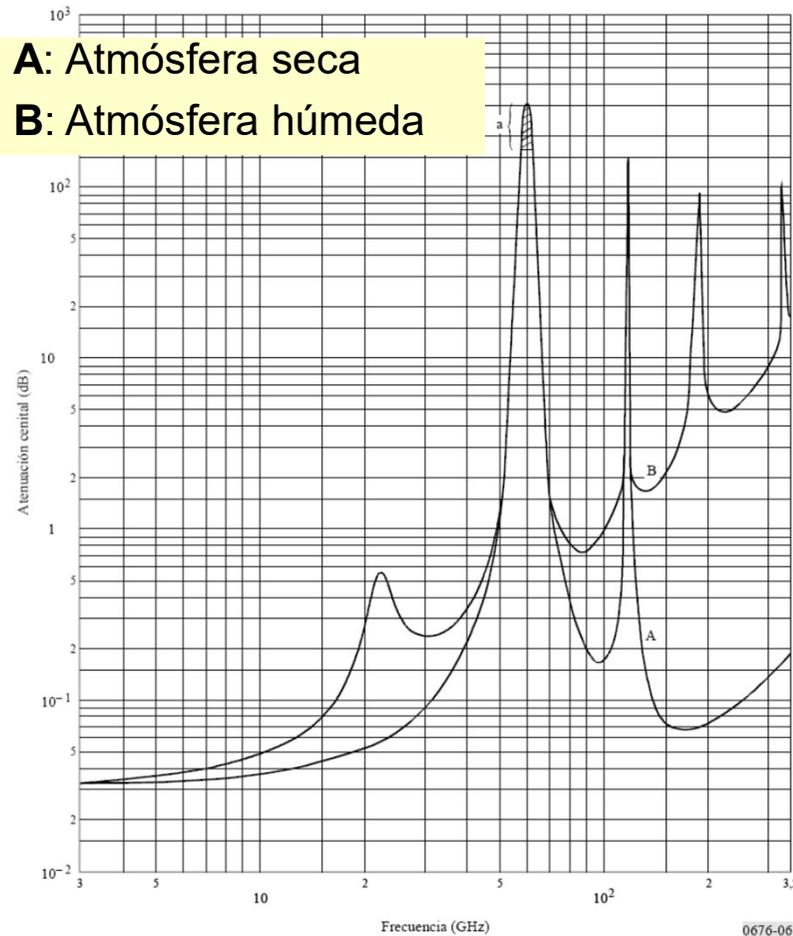
Atenuación entre 50 y 70 GHz en función de la altura

0676-02

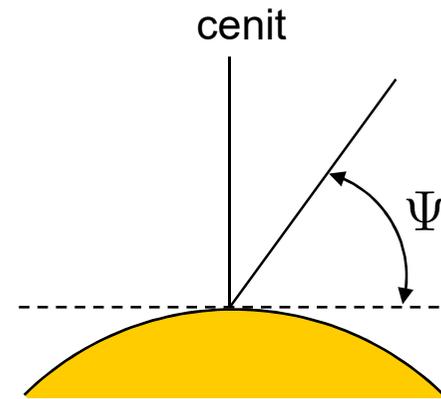


7. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

- Influencia de la inclinación del trayecto sobre la atenuación. ITU-R P.676
 - A medida que aumenta la altura decrece la concentración de gases, y por tanto la atenuación.

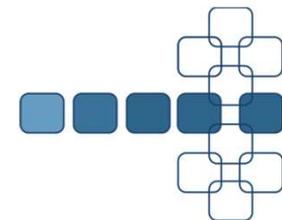


Atenuación cenital a nivel del suelo



Para trayectos no muy alejados de la vertical (Comunicaciones Tierra-Satélite) se tiene:

$$A(\Psi) = \frac{A_{cenital}}{\sin \Psi} = \frac{A(\Psi = 90^\circ)}{\sin \Psi}$$

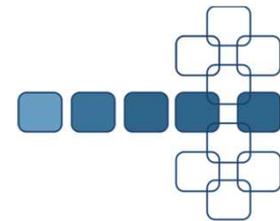


7. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

- Atenuación por hidrometeoros
 - Es especialmente importante la lluvia, ya que a frecuencias en la banda SHF e inferiores el resto de hidrometeoros producen atenuaciones menos significativas



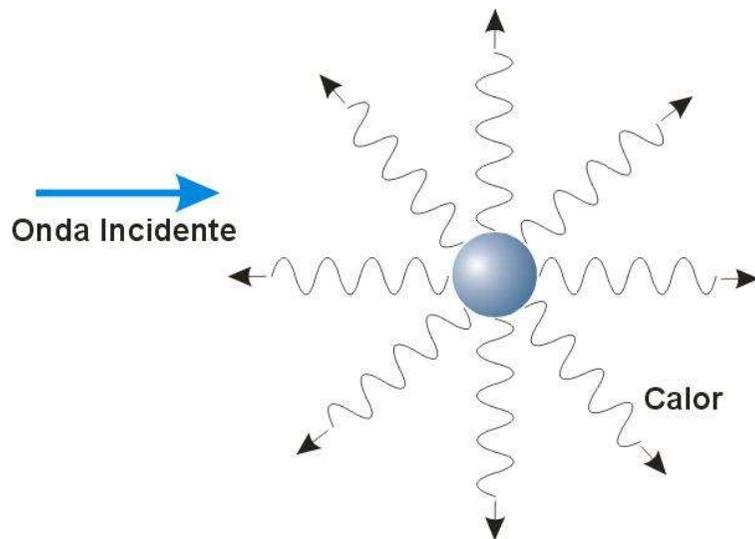
Lluvia, nieve, granizo y niebla



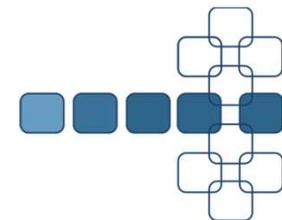
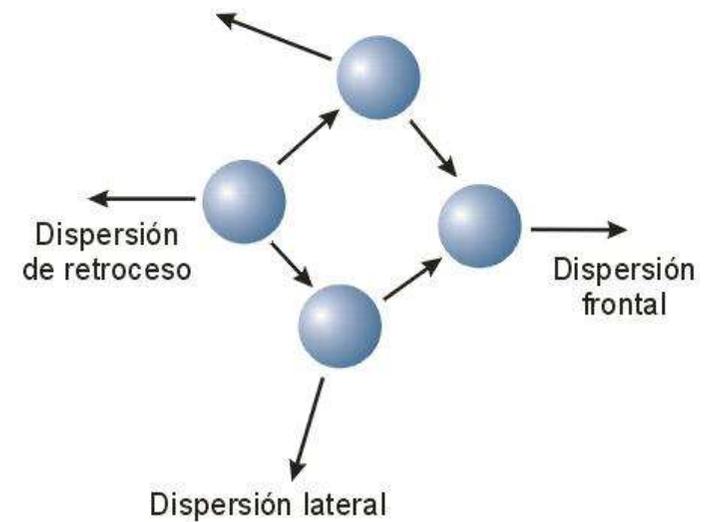
7. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

- Efectos producidos por la lluvia

ATENUACIÓN

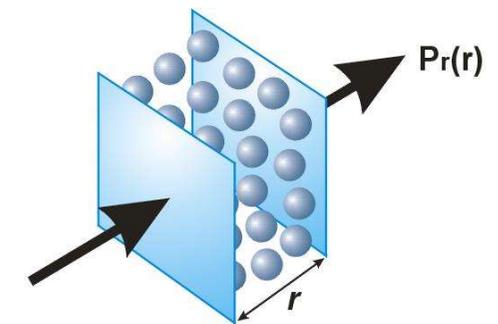
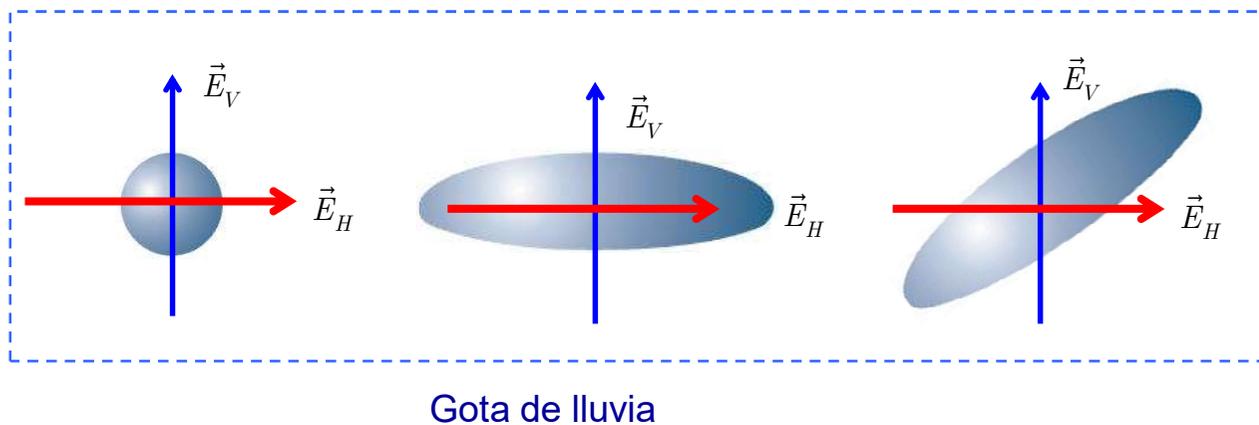


DISPERSIÓN

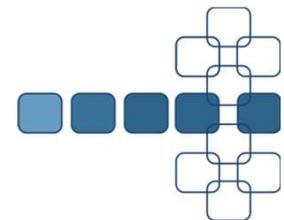


7. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

- Atenuación por lluvia
 - Depende de:
 - Tamaño y velocidad de las gotas de agua
 - Polarización de la onda
 - Intensidad pluviométrica



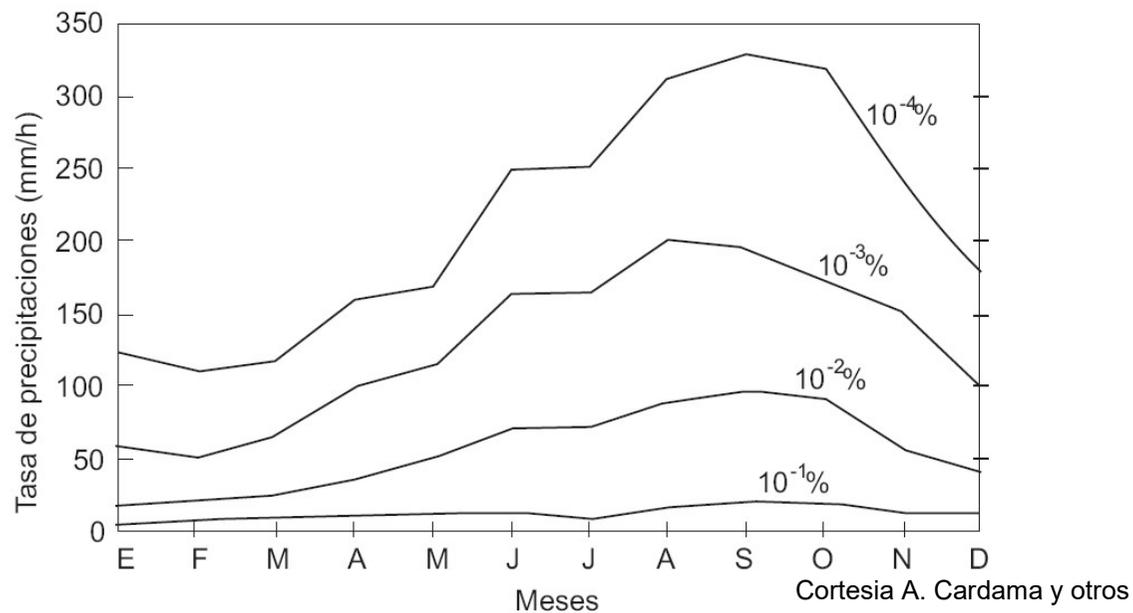
Celda de lluvia
(Intensidad pluviométrica)



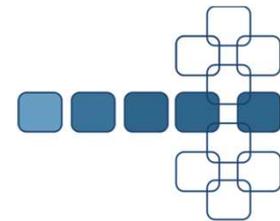
7. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

■ Atenuación por lluvia

- El efecto de la lluvia debe considerarse de forma estadística, teniendo en cuenta la posibilidad de que una cierta intensidad ocurra y sobredimensionando el sistema de forma que la atenuación no afecte al sistema (corte del enlace)

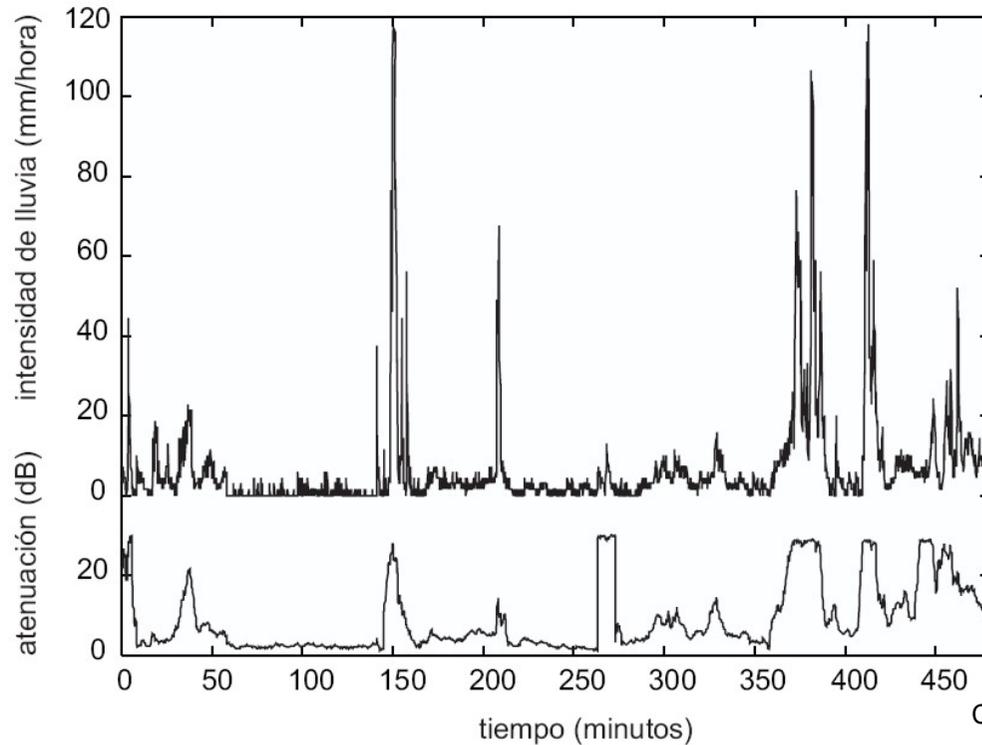


Intensidad de lluvia excedida un cierto porcentaje del tiempo en la ciudad de Barcelona



7. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

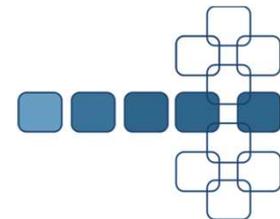
- Atenuación versus intensidad pluviométrica



Notar que durante breves periodos de tiempo la atenuación puede alcanzar valores importantes

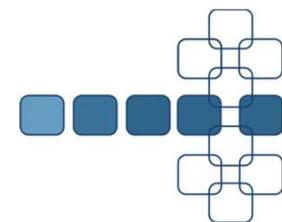
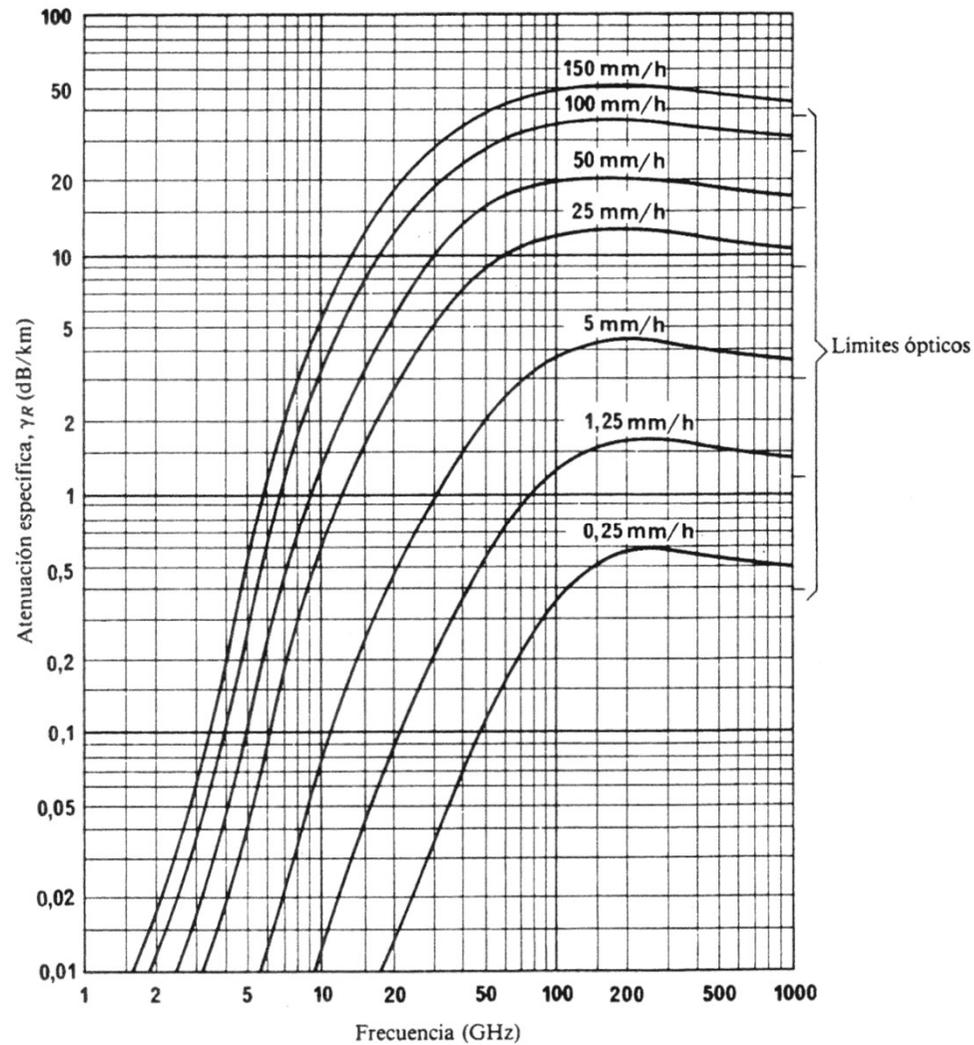
Cortesía A. Cardama y otros

Atenuación producida por un enlace Tierra (UPC)-Satélite (ITALSAT)
a 40 GHz por lluvia (Tormenta de otoño)



7. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

- Gráficas de atenuación por lluvia (UIT-R P.838)



3.5. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

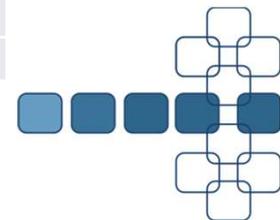
- Modelo de atenuación por lluvia (UIT-R P.838-3(2005))

$$\gamma \left(dB / km \right) = k R^\alpha$$

$R \equiv Tasa\ pluviométrica\ en\ mm / h$

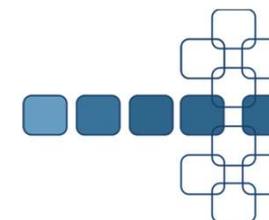
H = PH
V = PV

Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
1	0,0000259	0,9691	0,0000308	0,8592
1,5	0,0000443	1,0185	0,0000574	0,8957
2	0,0000847	1,0664	0,0000998	0,9490
2,5	0,0001321	1,1209	0,0001464	1,0085
3	0,0001390	1,2322	0,0001942	1,0688
3,5	0,0001155	1,4189	0,0002346	1,1387
4	0,0001071	1,6009	0,0002461	1,2476
4,5	0,0001340	1,6948	0,0002347	1,3987
5	0,0002162	1,6969	0,0002428	1,5317
5,5	0,0003909	1,6499	0,0003115	1,5882
6	0,0007056	1,5900	0,0004878	1,5728
7	0,001915	1,4810	0,001425	1,4745
8	0,004115	1,3905	0,003450	1,3797
9	0,007535	1,3155	0,006691	1,2895



3.5. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
10	0,01217	1,2571	0,01129	1,2156
11	0,01772	1,2140	0,01731	1,1617
12	0,02386	1,1825	0,02455	1,1216
13	0,03041	1,1586	0,03266	1,0901
14	0,03738	1,1396	0,04126	1,0646
15	0,04481	1,1233	0,05008	1,0440
16	0,05282	1,1086	0,05899	1,0273
17	0,06146	1,0949	0,06797	1,0137
18	0,07078	1,0818	0,07708	1,0025
19	0,08084	1,0691	0,08642	0,9930
20	0,09164	1,0568	0,09611	0,9847
21	0,1032	1,0447	0,1063	0,9771
22	0,1155	1,0329	0,1170	0,9700
23	0,1286	1,0214	0,1284	0,9630
24	0,1425	1,0101	0,1404	0,9561
25	0,1571	0,9991	0,1533	0,9491
26	0,1724	0,9884	0,1669	0,9421
27	0,1884	0,9780	0,1813	0,9349
28	0,2051	0,9679	0,1964	0,9277
29	0,2224	0,9580	0,2124	0,9203
30	0,2403	0,9485	0,2291	0,9129
31	0,2588	0,9392	0,2465	0,9055
32	0,2778	0,9302	0,2646	0,8981
33	0,2972	0,9214	0,2833	0,8907
34	0,3171	0,9129	0,3026	0,8834
35	0,3374	0,9047	0,3224	0,8761
36	0,3580	0,8967	0,3427	0,8690
37	0,3789	0,8890	0,3633	0,8621
38	0,4001	0,8816	0,3844	0,8552
39	0,4215	0,8743	0,4058	0,8486
40	0,4431	0,8673	0,4274	0,8421
41	0,4647	0,8605	0,4492	0,8357
42	0,4865	0,8539	0,4712	0,8296
43	0,5084	0,8476	0,4932	0,8236
44	0,5302	0,8414	0,5153	0,8179
45	0,5521	0,8355	0,5375	0,8123
46	0,5738	0,8297	0,5596	0,8069
47	0,5956	0,8241	0,5817	0,8017



3.5. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

- Cálculo de atenuación por lluvia en términos estadísticos (0.01%). (**UIT-R P.530**)
 - Tasas de lluvia excedidas el 0.01% del año en España (**UIT-R P.837**)
 - 20 mm/h en zona centro
 - 30 mm/h en zona mediterránea
 - 40 mm/h en zona noroeste

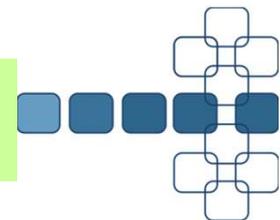
$$\gamma_{0.01} (dB / km) = kR_{0.01}^{\alpha}$$

$$l_{efectiva} (km) = \frac{l_{Real}}{1 + l_{Real}/l_0}$$

$$l_0 (km) = 35 \exp(-0.015R_{0.01})$$

$$A_{0.01} (dB) = \gamma_{0.01} (dB / km) l_{efectiva} (km)$$

Ejemplo: Radioenlace a 15 GHz, tasa al 0.01% de 40 mm/h y longitud del enlace de 20 km. (Sol. Atenuación total excedida el 0.01% del orden de 30 dB)



3.5. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

- Para polarizaciones lineal y circular se calculan los parámetros mediante las relaciones:

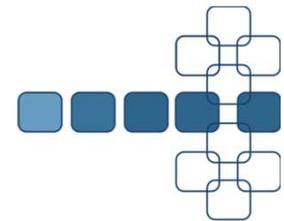
$$K = \left[K_H + K_V + (K_H - K_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau \right] / 2$$

$$\alpha = \left[K_H \alpha_H + K_V \alpha_V + (K_H \alpha_H - K_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau \right] / 2K$$

- Cuando se conoce la atenuación para una polarización puede estimarse para la otra:

$$A_V = \frac{300 A_H}{335 + A_H} \text{ (dB)}$$

$$A_H = \frac{335 A_V}{300 - A_V} \text{ (dB)}$$



3.5. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

- Cálculo de atenuación por lluvia para otros porcentajes de tiempo entre el 1% y el 0.001% (**UIT-R P.530**):

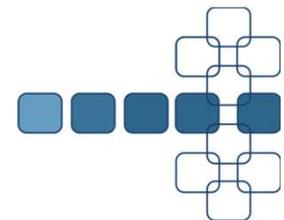
$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = C_1 p^{-(C_2 + C_3 \log_{10} p)}$$

$$C_1 = (0,07^{C_0}) [0,12^{(1-C_0)}]$$

$$C_2 = 0,855 C_0 + 0,546 (1 - C_0)$$

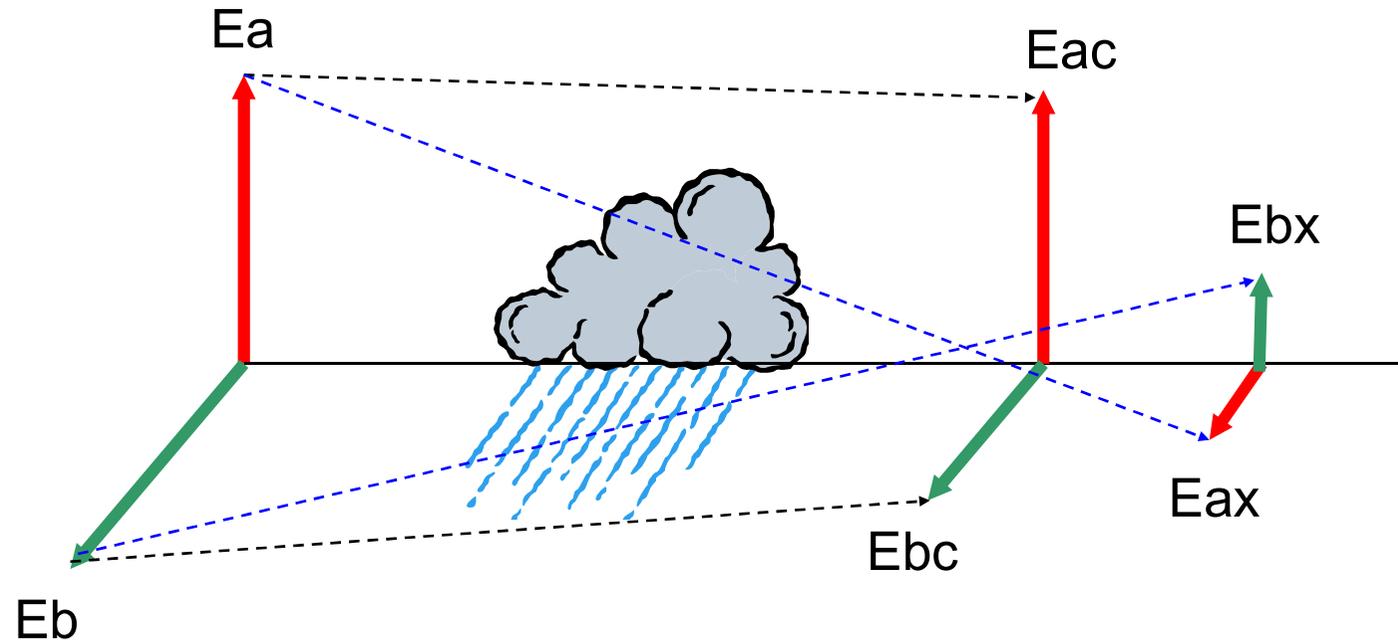
$$C_3 = 0,139 C_0 + 0,043 (1 - C_0)$$

$$C_0 = \begin{cases} 0,12 + 0,4 [\log_{10}(f/10)^{0,8}] & f \geq 10 \text{ GHz} \\ 0,12 & f < 10 \text{ GHz} \end{cases}$$



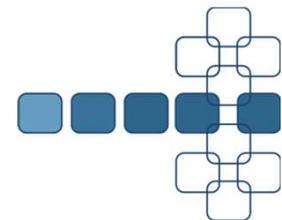
7. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

- La lluvia y las nubes (medios anisotrópicos) pueden provocar un cambio de polarización de la onda



XPD (Cross-Polar Discrimination) = E_{ac}/E_{ax}
XPI (Cross-Polar Isolation) = E_{ac}/E_{bx}

- Otras causas de despolarización son también el granizo y el centelleo troposférico e ionosférico



7. Atenuación atmosférica e hidrometeoros

■ Gráficas de atenuación por niebla (UIT-R P.840)

0.032 g/m³ (visibilidad óptica 700 m)

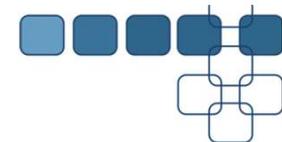
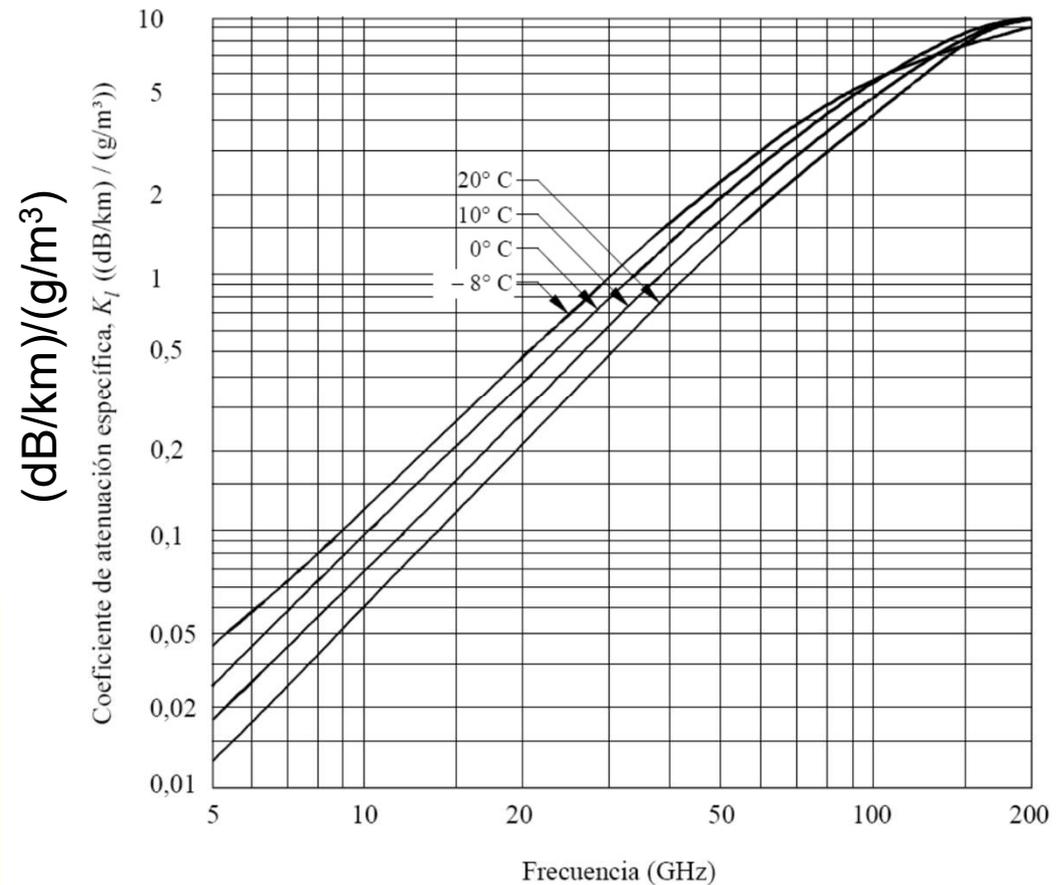
0.32 g/m³ (visibilidad óptica 100 m)

1 g/m³ (Niebla severa)

supone aprox. 5dB/km a 100 GHz

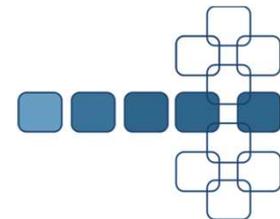
Atenuación inferior a lluvia, luego si el sistema está ya sobredimensionado no supone ningún problema

Atenuación específica de las pequeñas gotas de agua a diversas temperaturas en función de la frecuencia



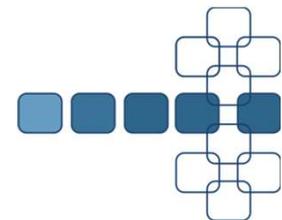
Bibliografía

- Básica
 - [Car02] A. Cardama y otros, Antenas, SPUPC, 2ª Edición 2002 (Cap.3)
 - [Her98] J.M. Hernando, Transmisión por radio, Centro de Estudios Ramón Areces, 1998 (Cap.3)
 - [San99] S.R. Saunders, Antennas and propagation for wireless communications, Wiley, 1999 (Cap.3-5)
- Complementaria
 - Hristo D. Hristov, Fresnel Zones in wireless links, zone plates, lenses and antennas. Artech House, 2000
 - [Par00] J.D. Parsons, Mobile radio propagation channel, Wiley, 2ª Edición, 2000 (Cap.2-5)
 - [Ste99] R. Steele y L. Hanzo, Mobile radio communications, Wiley, 1999 (Cap.1,2)
 - [Stü01] G.L. Stüber, Mobile communications, Kluwer, 2ª Edición, 2001 (Cap.1,2)

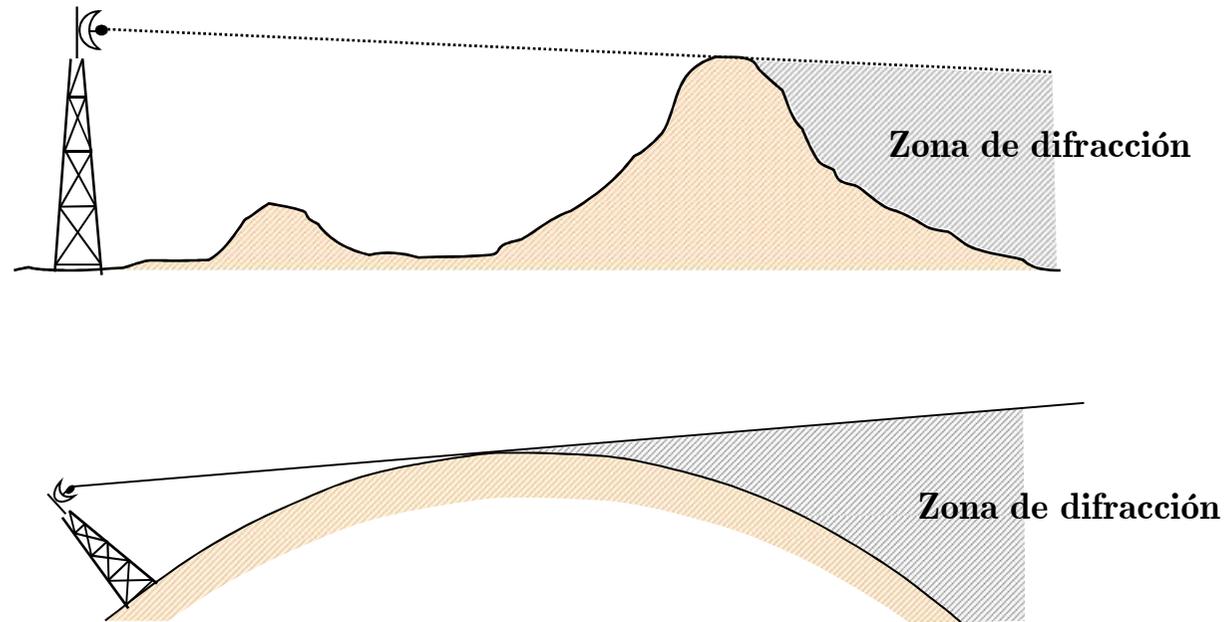


Radioenlaces

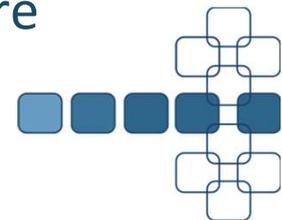
1. Introducción
 - 1.1 Servicios de radiocomunicación
 - 1.2 Gestión de las frecuencias.
2. Estructura general de un radioenlace.
3. Planes de frecuencia.
4. Dispositivos de microondas y antenas.
5. Parámetros básicos y balance de enlace.
6. La refracción y sus efectos en el radioenlace.
7. Atenuación por lluvia y gases.
8. El efecto de los obstáculos: difracción.
9. Calidad y disponibilidad.



8. El efecto de los obstáculos: difracción.

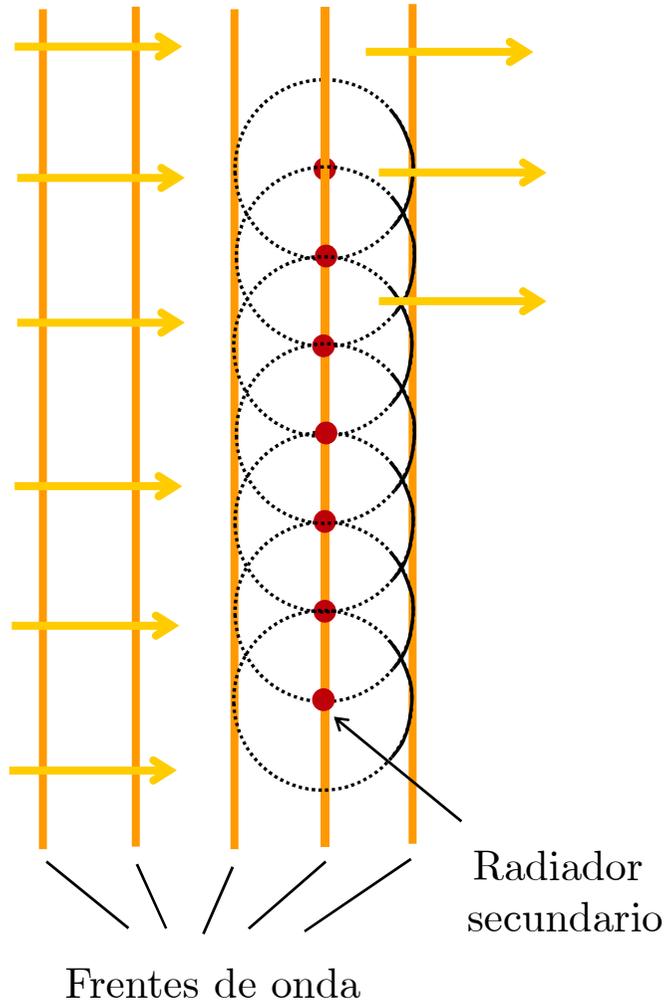


- La difracción es el fenómeno que ocurre cuando una onda incide sobre un obstáculo
- La zona oculta a la antena transmisora se denomina zona de difracción. Debido al fenómeno de difracción, en esta zona los campos no son nulos, si bien presentan atenuaciones superiores a las del espacio libre

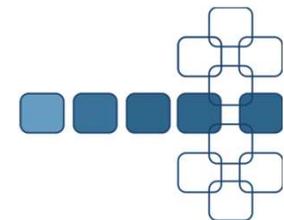
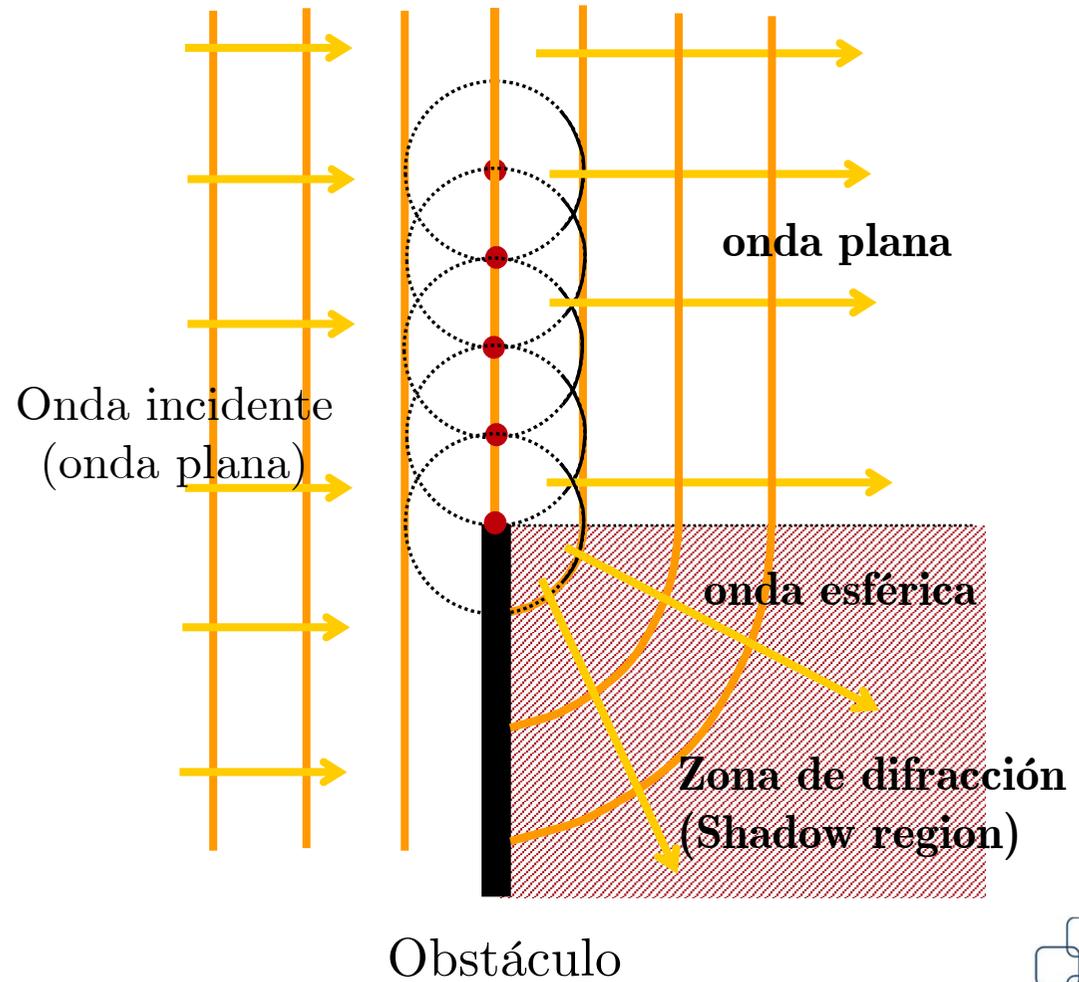


8. El efecto de los obstáculos: difracción.

Principio de Huygens



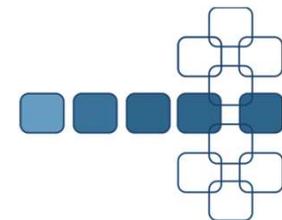
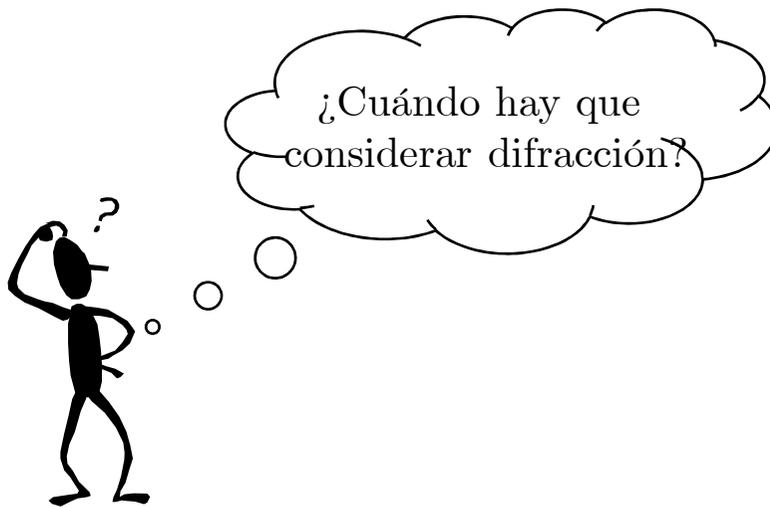
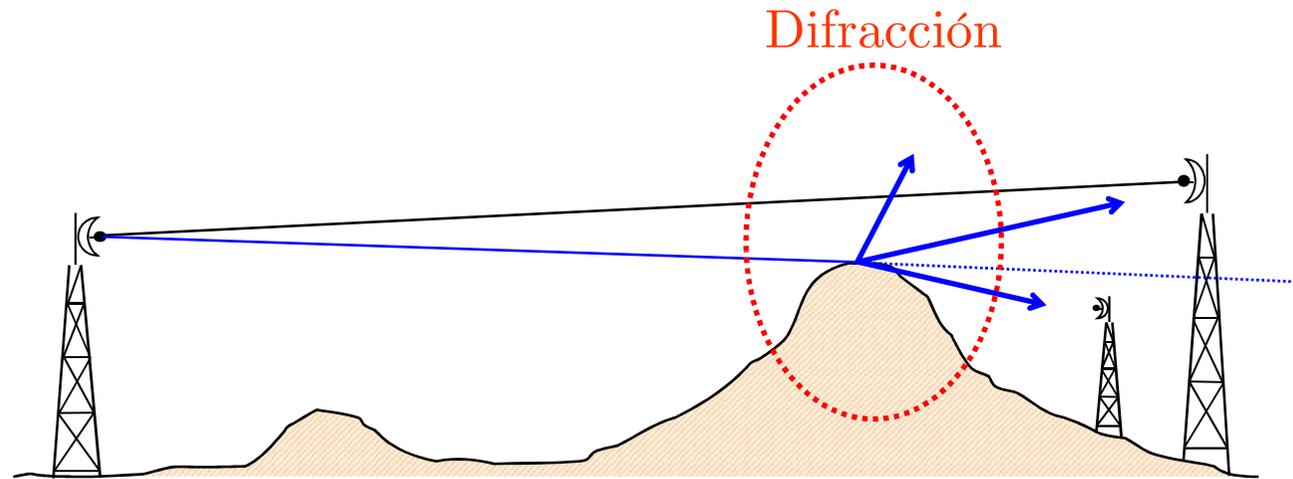
Difracción



8. El efecto de los obstáculos: difracción.

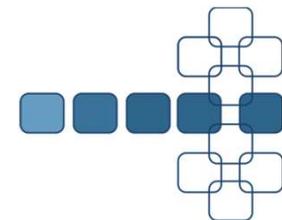
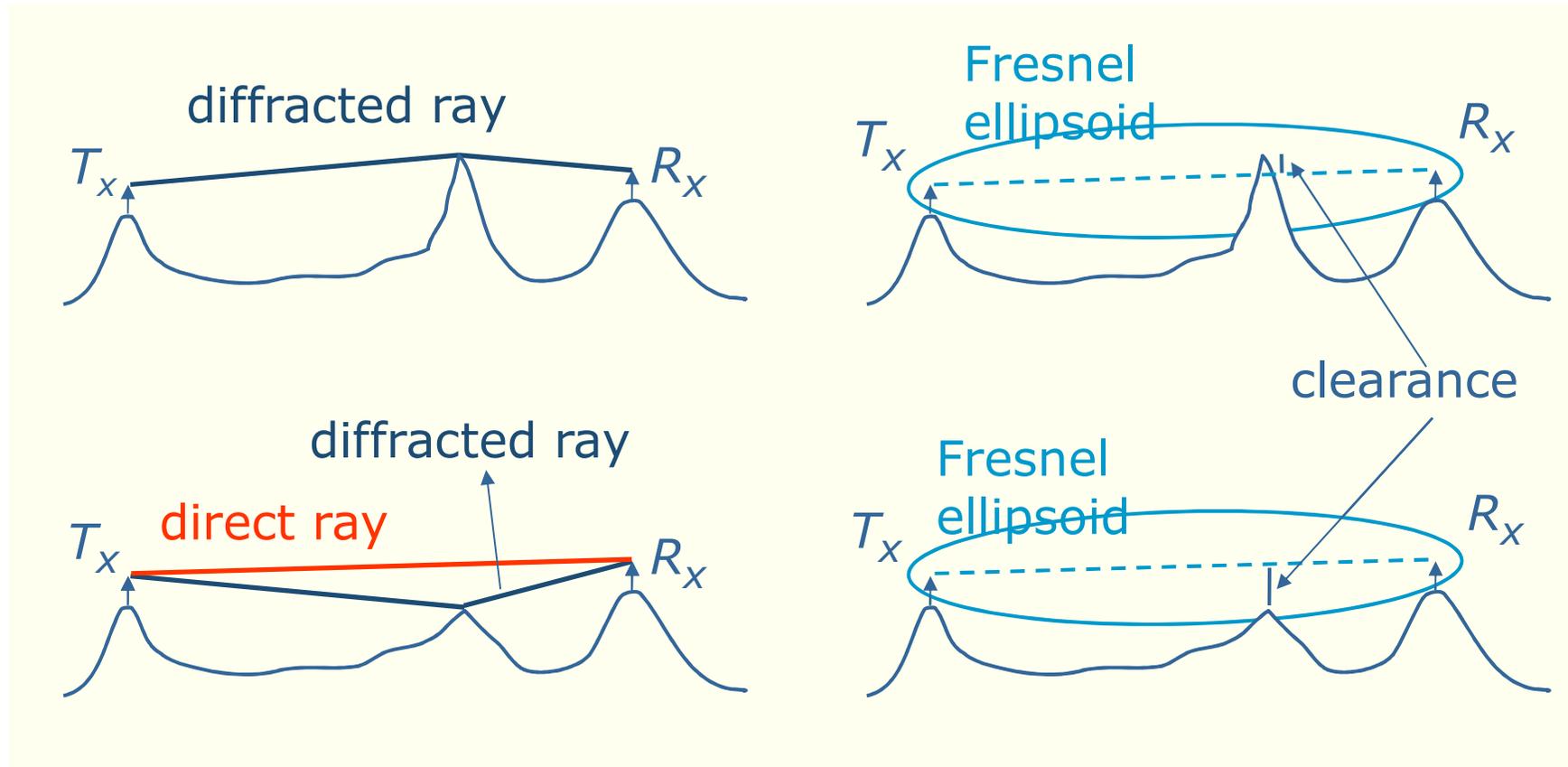


8. El efecto de los obstáculos: difracción.



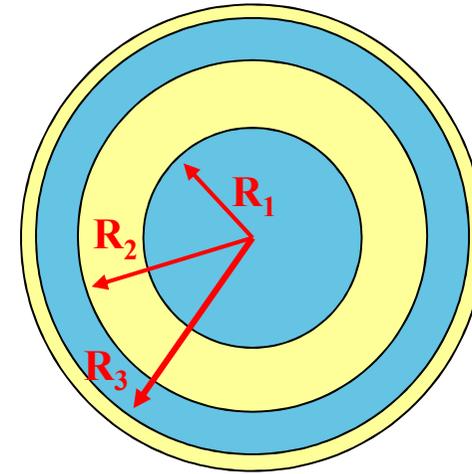
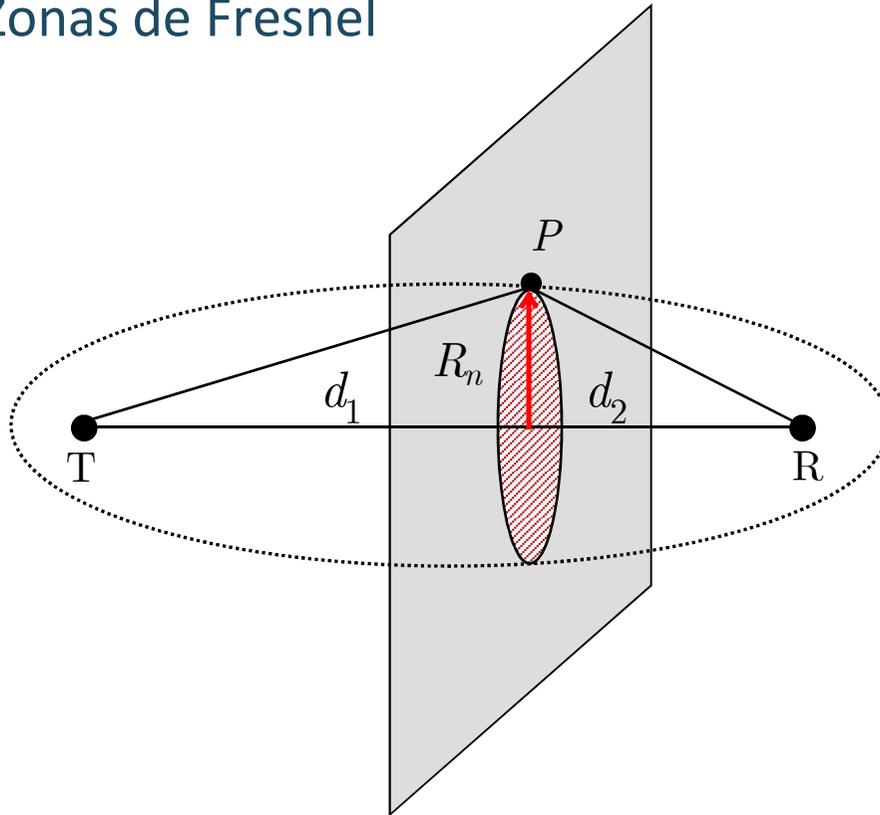
8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Modelo de rayo difractado versus Elipsoide de Fresnel



8. El efecto de los obstáculos: difracción.

■ Zonas de Fresnel



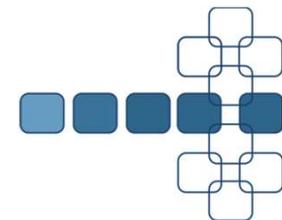
- Contribución en fase
- Contribución en contrafase

$$R_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

Elipsoides de Fresnel

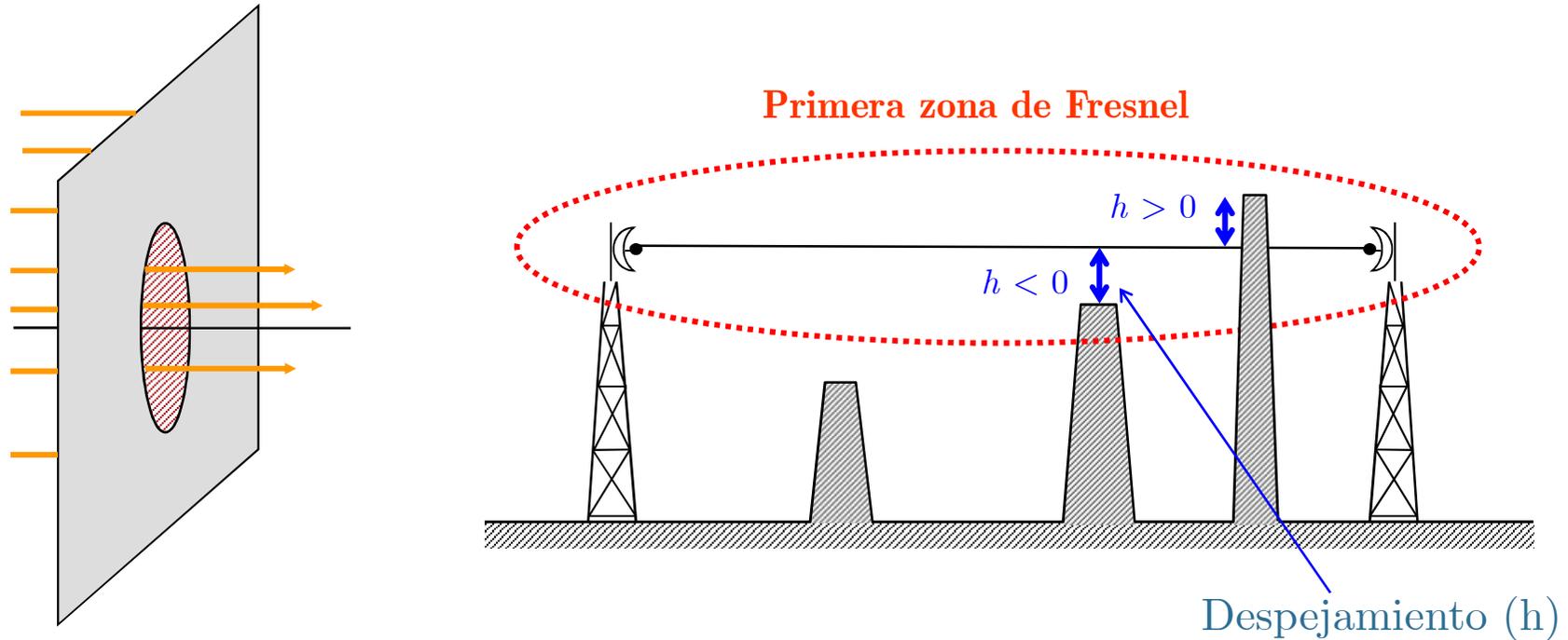
Lugar geométrico de los puntos cuya diferencia de caminos entre la señal directa y la reflejada es múltiplo de $\lambda/2$

$$TR = TP + PR - n \frac{\lambda}{2}$$

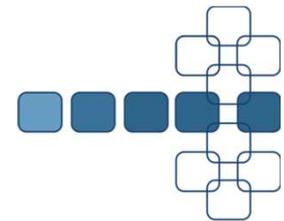


8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Para $r = 0.577R_1$ el campo recibido es igual al de espacio libre

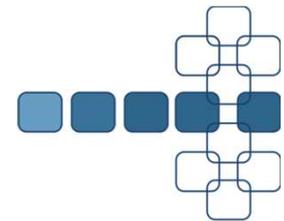


En la práctica se considera espacio libre si $h < -0.6R_1$



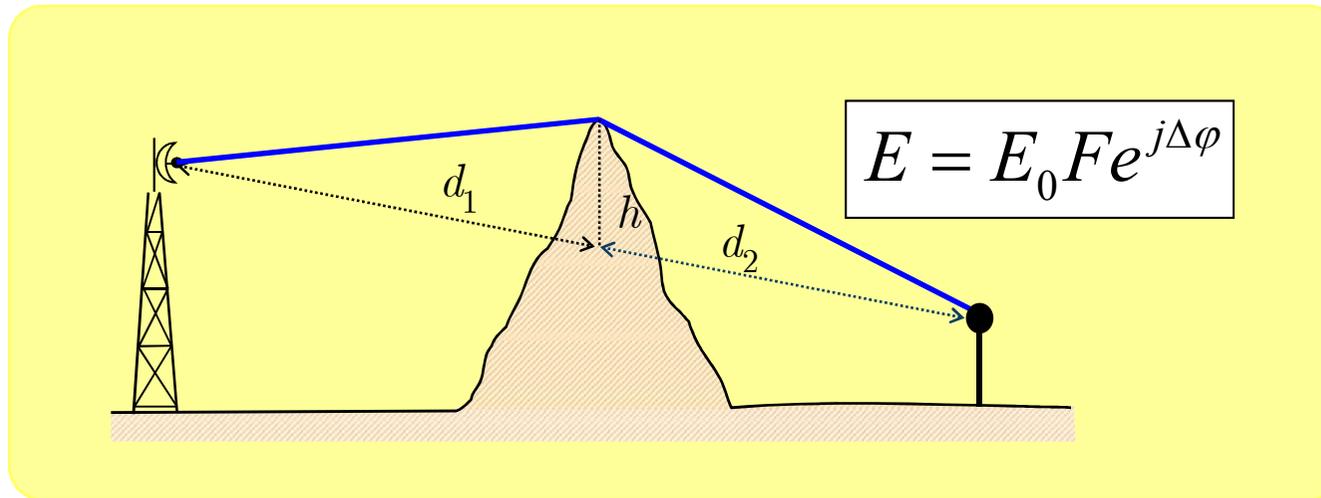
8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- El cálculo teórico de la pérdida por difracción es muy complejo. Para aplicaciones prácticas se han desarrollado una serie de modelos o procedimientos simplificados que proporcionan un grado de exactitud suficiente (UIT-R P.526)
 - Difracción en obstáculo agudo
 - Difracción en obstáculo redondeado
 - Difracción por varios obstáculos
-



8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Difracción producida por 1 obstáculo (agudo)



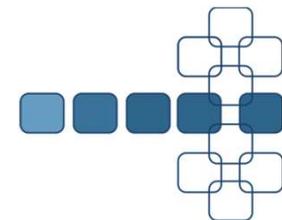
$$F = \frac{S(\nu) + 0.5}{\sqrt{2} \operatorname{sen}(\Delta\varphi + \pi/4)}$$

$$\Delta\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{S(\nu) + 0.5}{C(\nu) + 0.5} \right] - \frac{\pi}{4}$$

$$C(\nu) = \int_0^\nu \cos\left(\frac{\pi}{2} u^2\right) du \quad S(\nu) = \int_0^\nu \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2} u^2\right) du$$

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

$$S(-x) = S(x); C(-x) = C(x); S(\infty) = C(\infty) = 0.5; S(0) = C(0) = 0$$

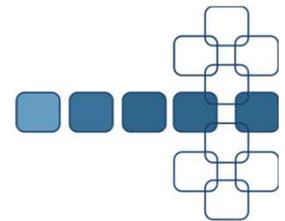


8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Evaluación de las integrales seno y coseno de Fresnel

$$S(\nu) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+2} \frac{\left(\sqrt{\pi/2\nu}\right)^{3+4n}}{(1+2n)!(3+4n)}$$

$$C(\nu) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+2} \frac{\left(\sqrt{\pi/2\nu}\right)^{1+4n}}{(2n)!(1+4n)}$$



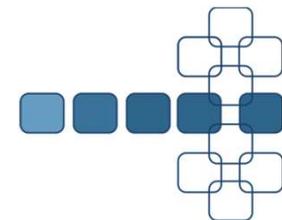
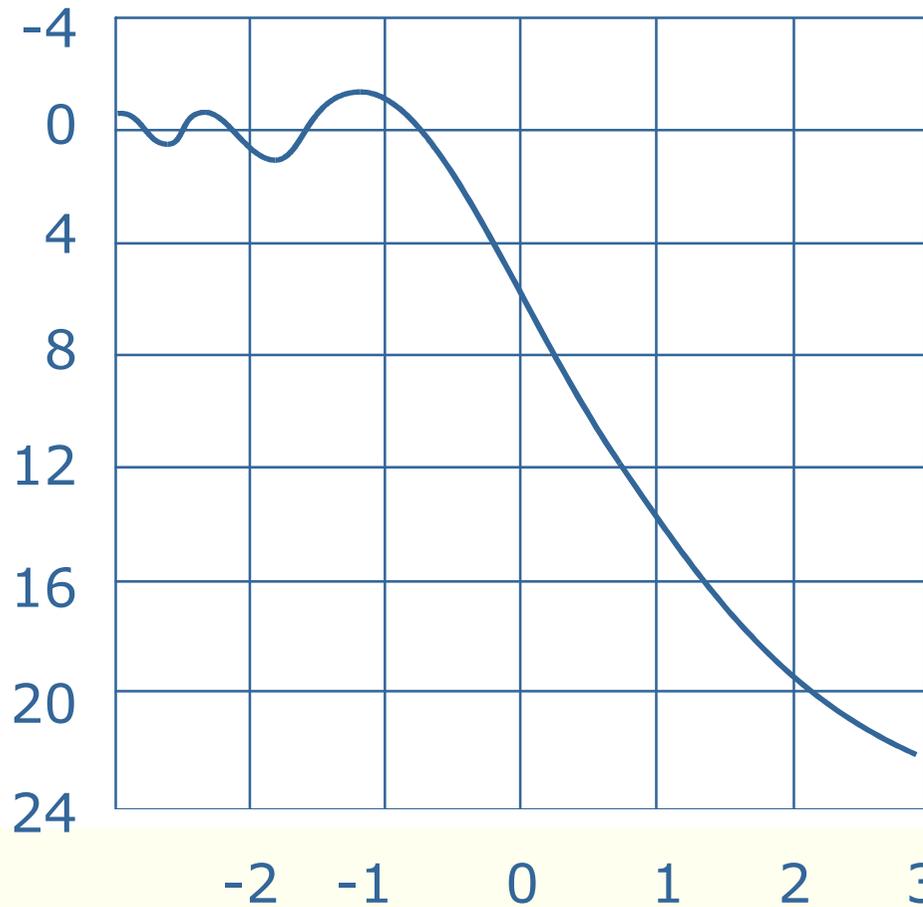
8. El efecto de los obstáculos: difracción.

$$L(\nu) = 6.9 + 20 \log\left(\sqrt{(\nu - 0.1)^2 + 1} + \nu - 0.1\right), \quad dB$$

$$-0.7 \leq \nu \leq \infty$$

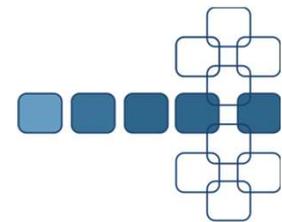
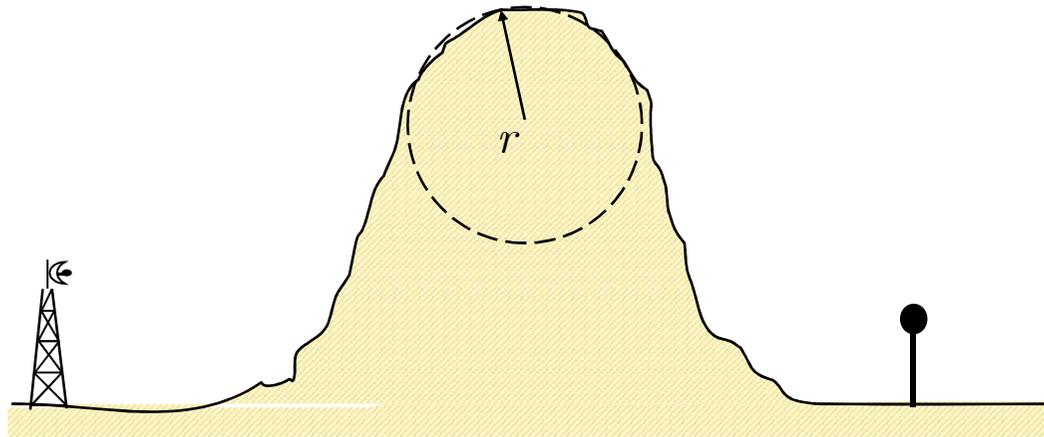
$$L = 10 \log \left| \frac{E}{E_0} \right|^2$$

Path loss relative
to free space (dB)



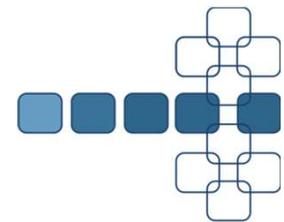
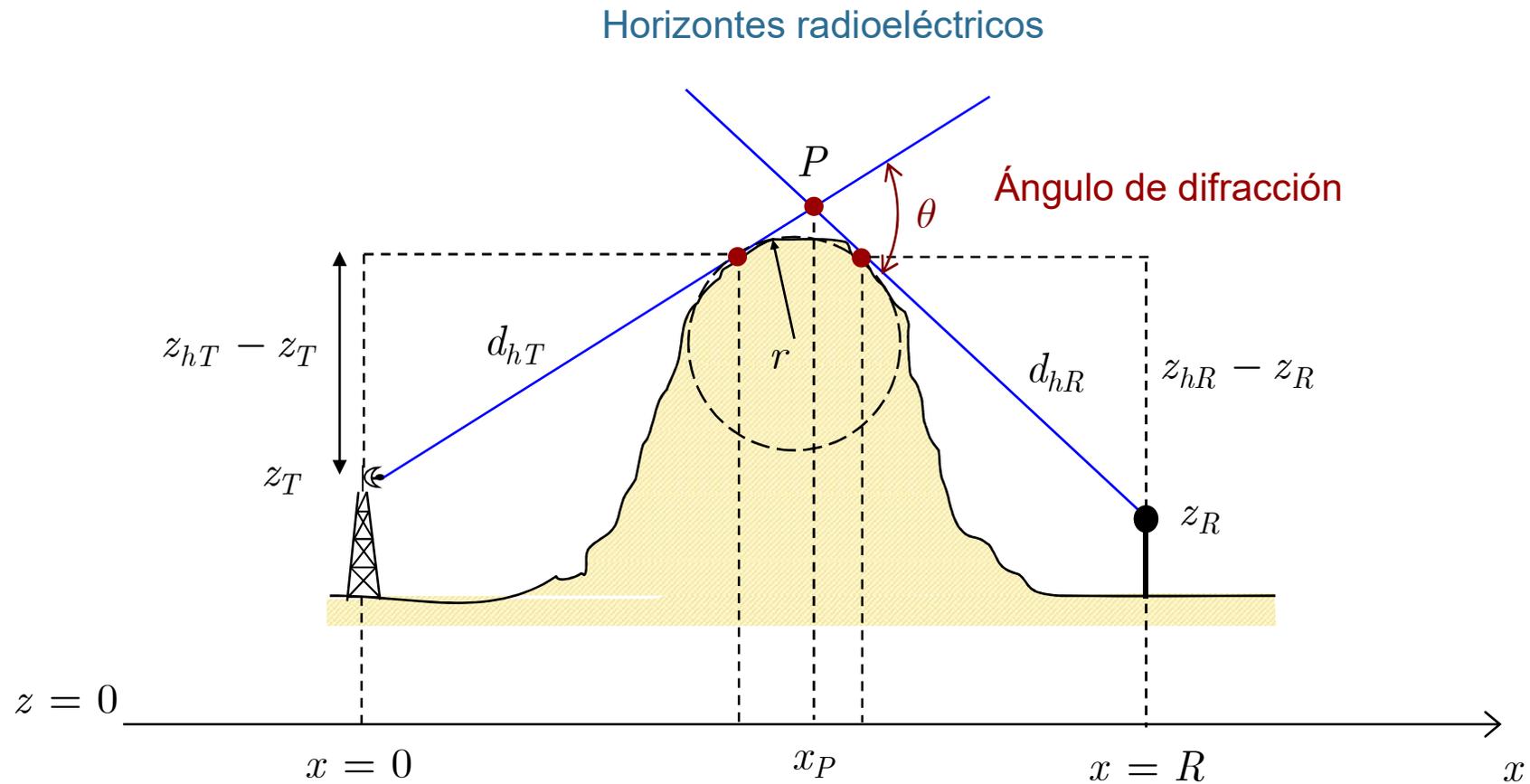
8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Difracción producida por 1 obstáculo redondeado



8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Difracción producida por 1 obstáculo redondeado



8. El efecto de los obstáculos: difracción.

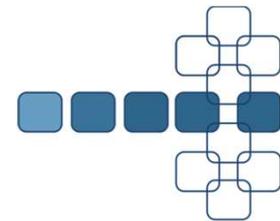
- Difracción producida por 1 obstáculo redondeado

$$A_{\text{Redondeado}} (dB) = A_{\text{Agudo}} (dB) + T(m, n)|_{dB}$$

$$T(m, n)|_{dB} = \begin{cases} 7.3m^{1/2} - (2 - 12.5n)m + 3.6m^{3/2} - 0.8m^2, & m \cdot n < 4 \\ -6 - 20 \log(mn) + 7.2m^{1/2} - (2 - 17n)m + \\ + 3.6m^{3/2} - 0.8m^2, & m \cdot n > 4 \end{cases}$$

$$m = 0.457 \frac{d_{hT} + d_{hR}}{d_{hT}d_{hR}} r^{2/3} f^{-1/3}$$

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



8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Difracción producida por 1 obstáculo redondeado

$$d_1 \approx x_P, d_2 \approx R - x_P, x_P = (R\beta) / \theta$$

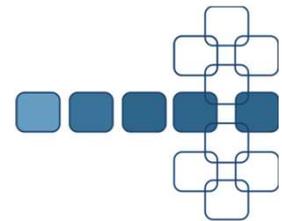
$$\beta(\text{mrad}) = \frac{z_R - z_T}{R} - \frac{z_R - z_{hR}}{d_{hR}}$$

$$h_P = \frac{R\beta}{\theta} \left(\frac{z_{hT} - z_T}{d_{hT}} - \frac{z_R - z_T}{R} \right)$$

$$\theta(\text{mrad}) = \frac{z_{hT} - z_T}{d_{hT}} - \frac{z_{hR} - z_R}{d_{hR}}$$

$$r(\text{km}) \approx \frac{R - d_{hT} - d_{hR}}{\theta} 10^{-3}$$

Nota: alturas en m, distancias y r en km y ángulos en mrad



8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Caso práctico: Radioenlace con los siguientes datos

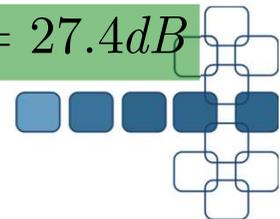
$$R = 30 \text{ km}, f = 900 \text{ MHz}, h_T \equiv z_T = 950 \text{ m}, h_R \equiv z_R = 965 \text{ m}$$
$$d_{hT} = 9.3 \text{ km}, d_{hR} = 17.2 \text{ km}, z_{hT} = 974.5 \text{ m}, z_{hR} = 980 \text{ m}$$

Solución

$$\theta = 3.51 \text{ mrad}, r = 997 \text{ km}, \beta = 1.37 \text{ mrad}, x_P = 11.7 \text{ km}, h_P = 25 \text{ m}$$

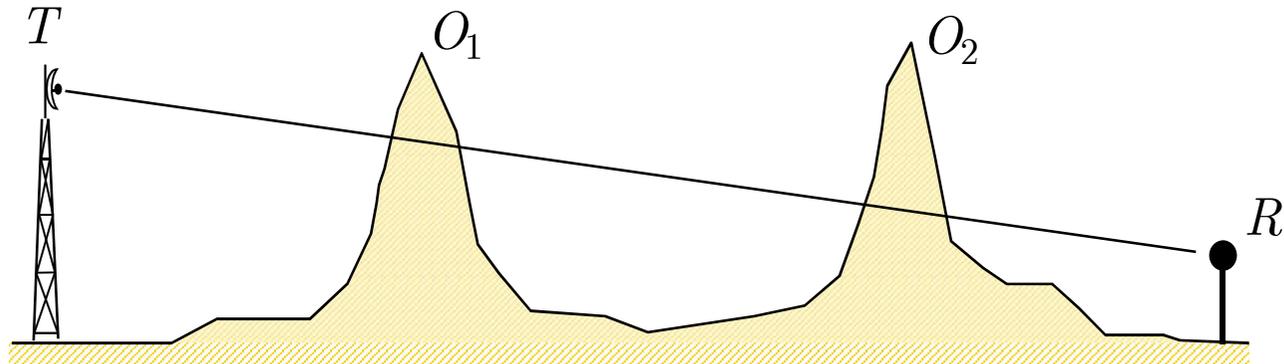
$$\left. \begin{array}{l} m = 0.662 \\ n = 1.117 \end{array} \right\} \Rightarrow T(m, n)|_{dB} = 15.4$$

$$A_{\text{redondeado}}(dB) = A_{\text{agudo}}(dB) + T(m, n)|_{dB} = 12dB + 15.4dB = 27.4dB$$

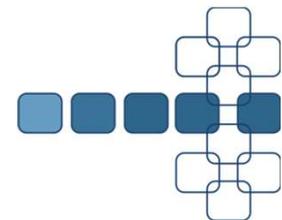


8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Difracción producida por dos obstáculos



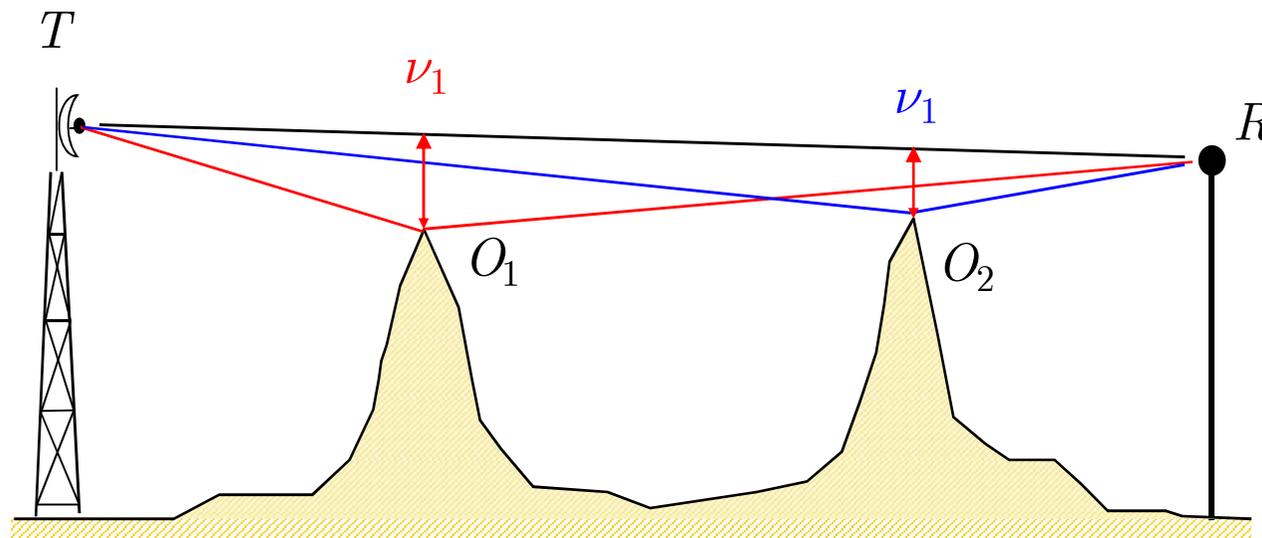
- El cálculo riguroso se haría mediante una integral doble de Fresnel, expresable mediante desarrollos en serie. En la práctica se utilizan métodos pseudoempíricos simples y con una aproximación suficiente para las aplicaciones de radiocomunicaciones.
- Entre los métodos más utilizados destacan:
 - Método EMP
 - Método Epstein-Peterson
 - Método Recomendación UIT-R P.526



8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Método EMP (2 Obstáculos)

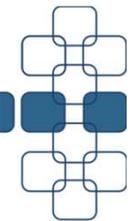
- Se aplica este método cuando el rayo no corta ningún obstáculo pero existe despejamiento insuficiente en ambos ($-0.7 \leq v \leq 0$)



Los obstáculos se modelan como aristas agudas

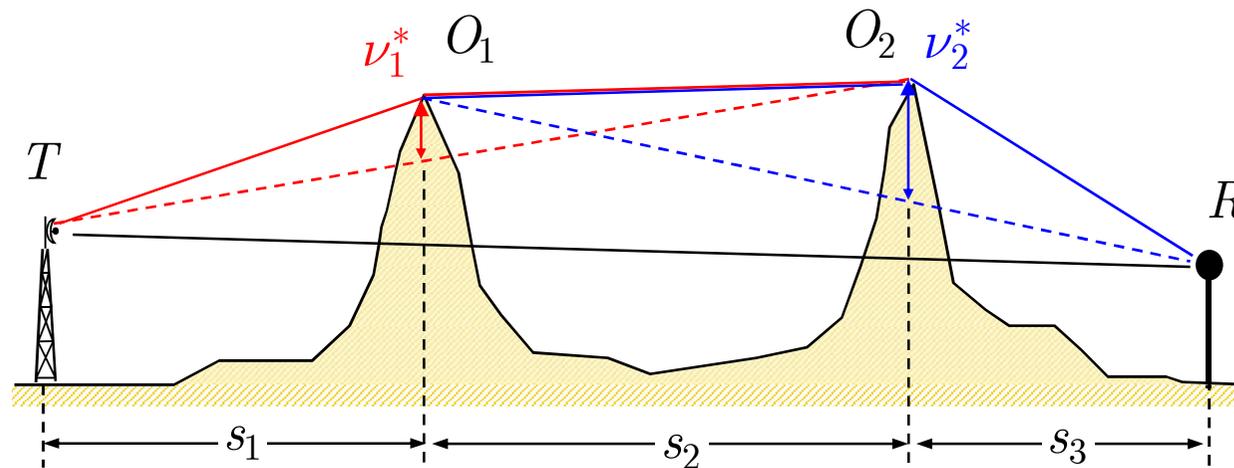
Superposición: suma de atenuaciones de cada obstáculo por separado

$$A_D (dB) = A_D (TO_1R)|_{dB} + A_D (TO_2R)|_{dB}$$



8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Método Epstein-Peterson (2 Obstáculos)
 - Se aplica este método cuando el rayo corta los dos obstáculos y éstos tienen alturas similares



Los obstáculos se modelan como aristas agudas

$$A_D (dB) = A_D (TO_1O_2)|_{dB} + A_D (O_1O_2R)|_{dB} + A_{Corrector}(dB)$$

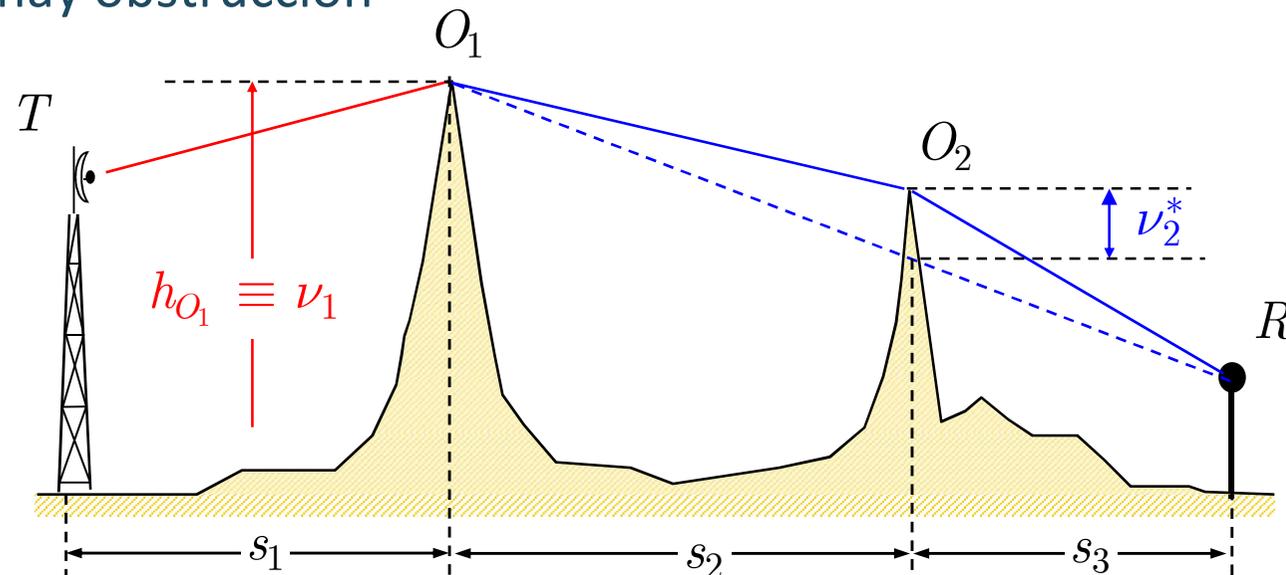
$$A_{Corrector}(dB) = 10 \log \frac{(s_1 + s_2)(s_2 + s_3)}{s_2(s_1 + s_2 + s_3)}$$

Término propuesto por
Millington



8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Método Recomendación UIT-R P.526 (2 Obstáculos)
 - Se aplica este método cuando uno de los obstáculos es dominante en altura y hay obstrucción



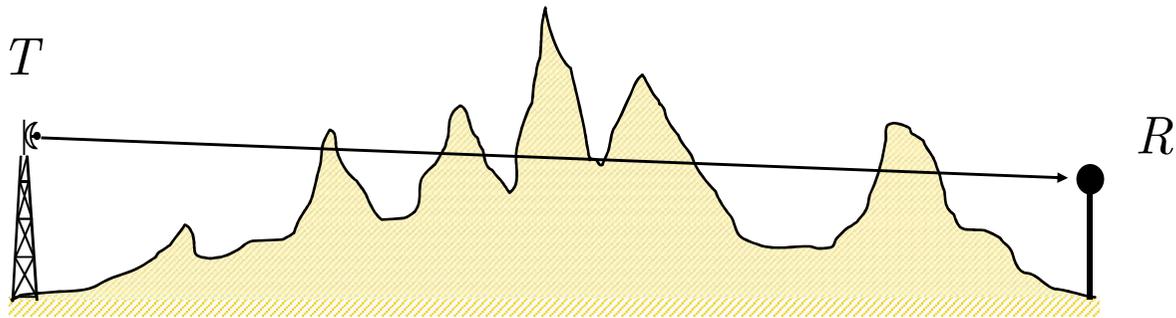
Los obstáculos se modelan como aristas agudas

$$A_D (dB) = A_D (TO_1R)|_{dB} + A_D (O_1O_2R)|_{dB} - A_{Corrector} (dB)$$

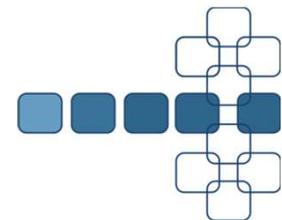
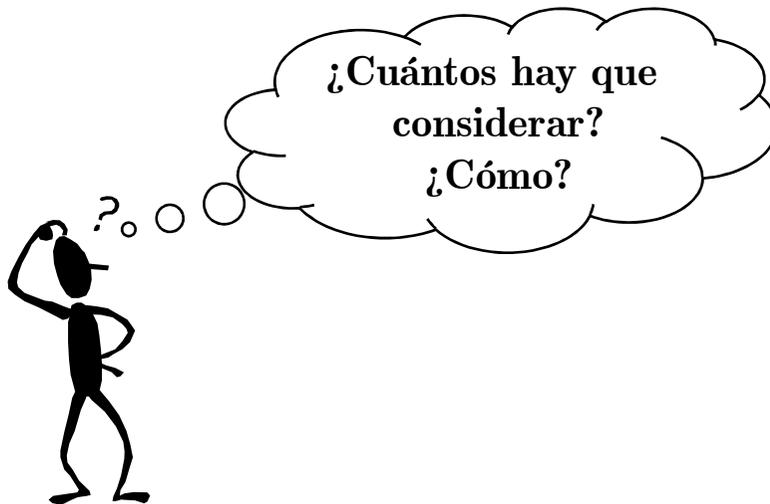
$$A_{Corrector} (dB) = \left[12 - 20 \log \left(\frac{2}{1 - \alpha / \pi} \right) \right] \left(\frac{\nu_2}{\nu_1} \right)^{2\nu_1} \quad \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{s_2 (s_1 + s_2 + s_3)}{s_1 s_3} \right)^{1/2}$$

8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Difracción producida por múltiples obstáculos

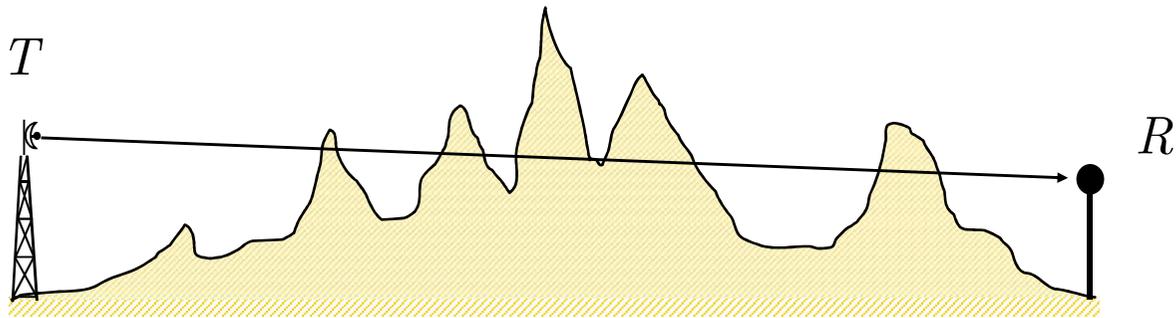


En ocasiones el rayo TR puede llegar a cortar más de dos obstáculos o zonas montañosas



8. El efecto de los obstáculos: difracción.

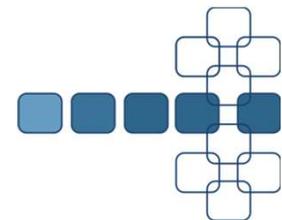
- Difracción producida por múltiples obstáculos



En ocasiones el rayo TR puede llegar a cortar más de dos obstáculos o zonas montañosas



UIT-R P.526



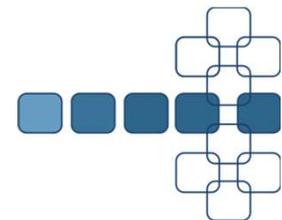
8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Difracción multiobstáculo. Modelo UIT-R P.526
 - Se emplea cuando hay obstrucción y aconseja el método Deygot modificado como sigue:
 1. Se determina el obstáculo dominante (mayores pérdidas). Este obstáculo, con parámetro ν_P , divide el vano en dos subvanos.
 2. Para cada subvano se determina el obstáculo dominante. Sean ν_T y ν_R los parámetros para los subvanos del lado del transmisor y receptor respectivamente
 3. La atenuación del vano en su conjunto se estima mediante la expresión

$$A_D(dB) = \begin{cases} A_D(\nu_P) + T(A_D(\nu_T) + A_D(\nu_R) + C), & \nu_P \geq -0.78 \\ 0 & \nu_P < -0.78 \end{cases}$$

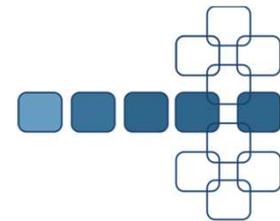
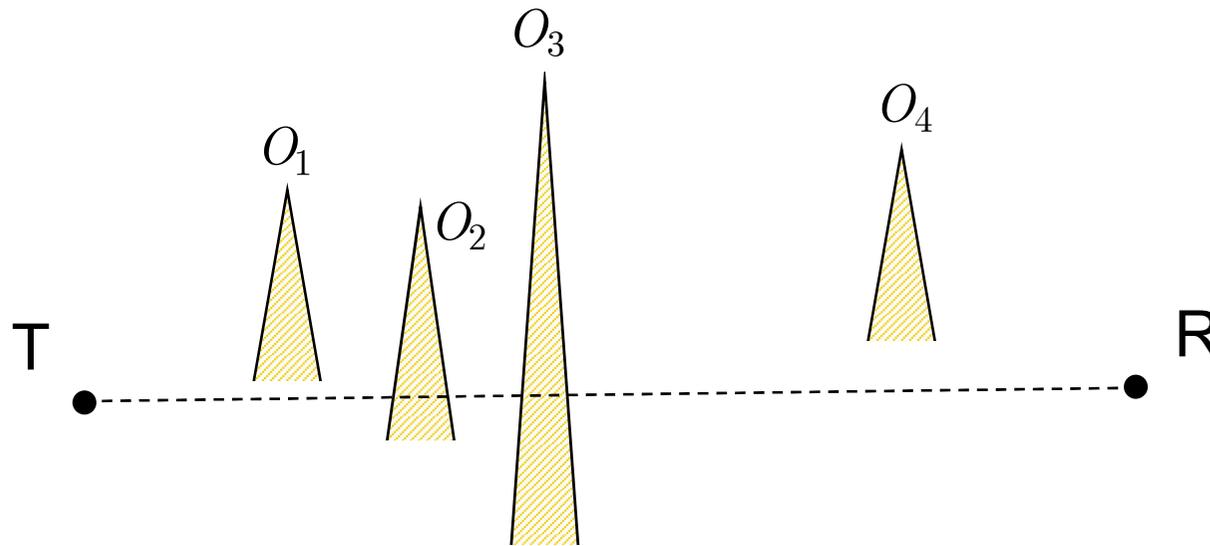
$$T = 1 - \exp(-A_D(\nu_P)/6)$$

$$C = 10 + 0.04R(\text{km})$$



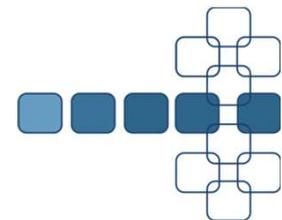
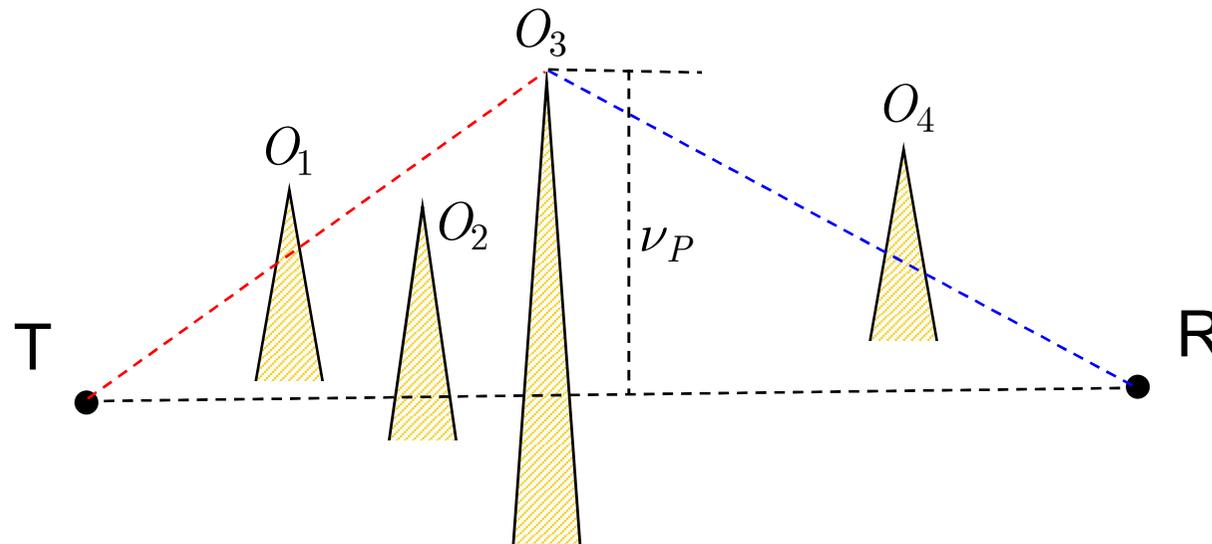
8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Difracción multiobstáculo. Modelo UIT-R P.526
 - Ejemplo de aplicación



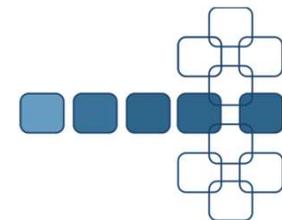
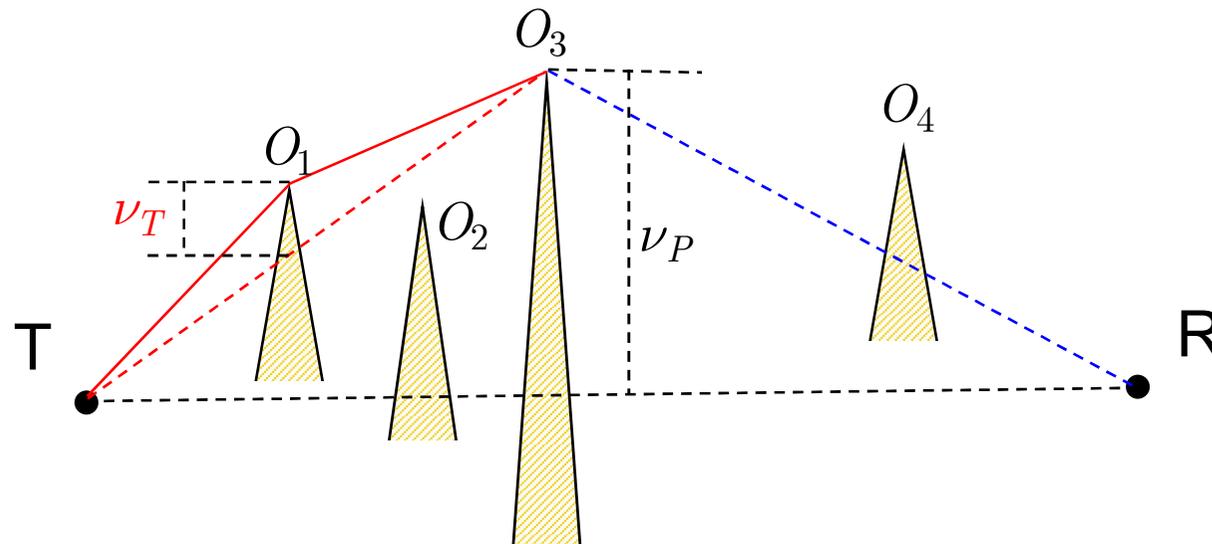
8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Difracción multiobstáculo. Modelo UIT-R P.526
 - Ejemplo de aplicación



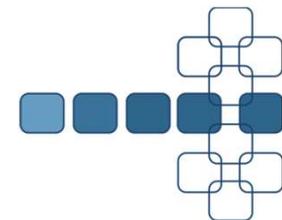
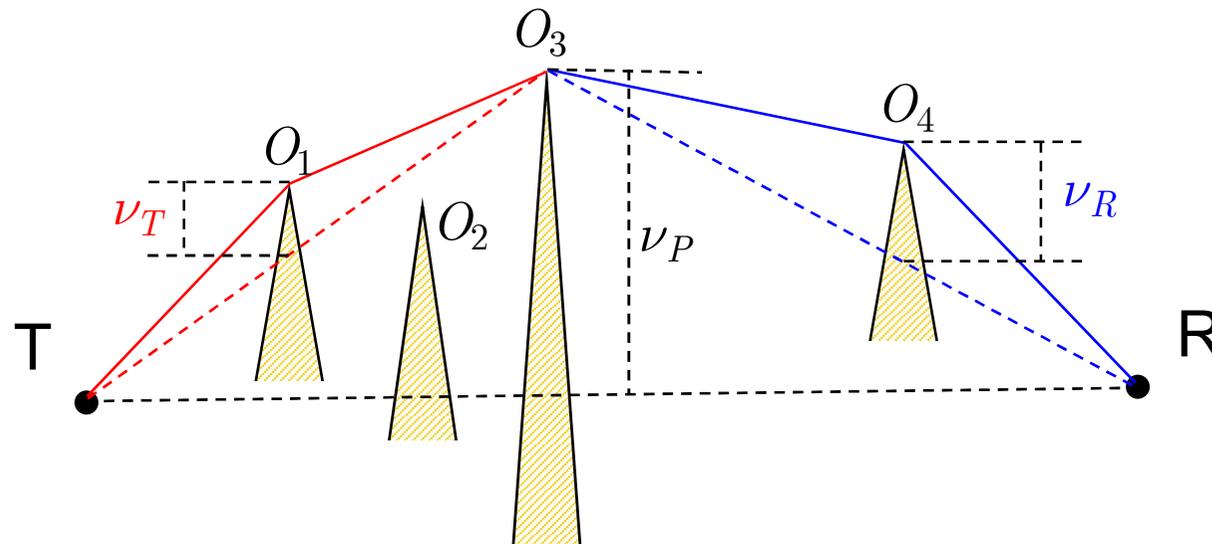
8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Difracción multiobstáculo. Modelo UIT-R P.526
 - Ejemplo de aplicación



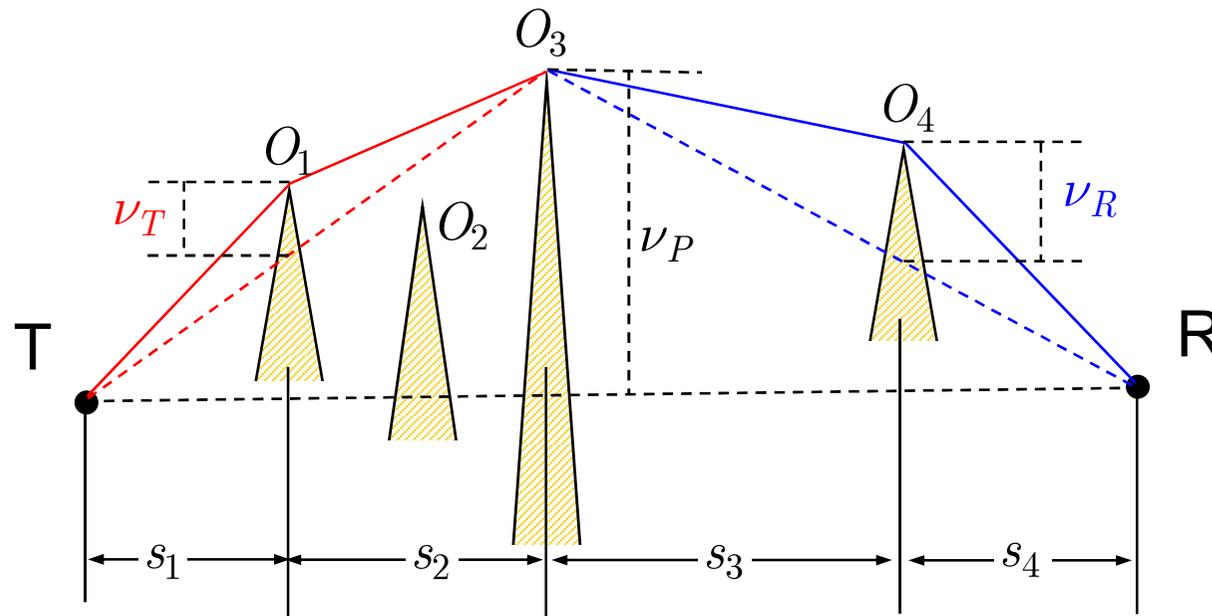
8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Difracción multiobstáculo. Modelo UIT-R P.526
 - Ejemplo de aplicación



8. El efecto de los obstáculos: difracción.

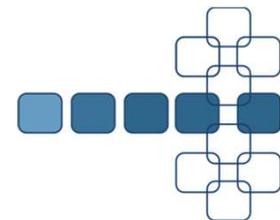
- Difracción multiobstáculo. Modelo UIT-R P.526
 - Ejemplo de aplicación



$$A_D(\nu_P) = A_D(TO_3R)$$

$$A_D(\nu_T) = A_D(TO_1O_3)$$

$$A_D(\nu_R) = A_D(O_3O_4R)$$



8. El efecto de los obstáculos: difracción.

- Difracción multiobstáculo. Modelo UIT-R P.526
 - Ejemplo de aplicación

Considerar un enlace con T(0,30), R(30,10), O₁(3,60), O₂(12,90) y O₃(18,70).
(x,y)=(km,m)
150 MHz

Solución Obstáculo principal O₂. Subvanos TO₂ y O₂R

$$\nu_P = 0.8, \nu_T = 0.012, \nu_R = 0.11$$

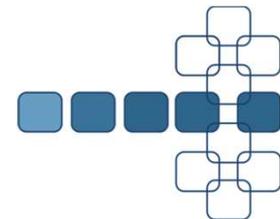
$$A_D(\nu_P) = A_D(-0.8) = 12.57dB$$

$$A_D(\nu_T) = A_D(-0.012) = 6.83dB$$

$$A_D(\nu_R) = A_D(-0.11) = 6.98dB$$

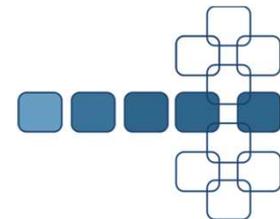
$$T = 0.877, \quad C = 11.2$$

$$A_D = 12.57 + 0.877(6.83 + 6.98 + 11.2) = 34.5dB$$



Bibliografía

- Básica
 - [Car02] A. Cardama y otros, Antenas, SPUPC, 2ª Edición 2002 (Cap.3)
 - [Her98] J.M. Hernando, Transmisión por radio, Centro de Estudios Ramón Areces, 1998 (Cap.3)
 - [San99] S.R. Saunders, Antennas and propagation for wireless communications, Wiley, 1999 (Cap.3-5)
- Complementaria
 - Hristo D. Hristov, Fresnel Zones in wireless links, zone plates, lenses and antennas. Artech House, 2000
 - [Par00] J.D. Parsons, Mobile radio propagation channel, Wiley, 2ª Edición, 2000 (Cap.2-5)
 - [Ste99] R. Steele y L. Hanzo, Mobile radio communications, Wiley, 1999 (Cap.1,2)
 - [Stü01] G.L. Stüber, Mobile communications, Kluwer, 2ª Edición, 2001 (Cap.1,2)



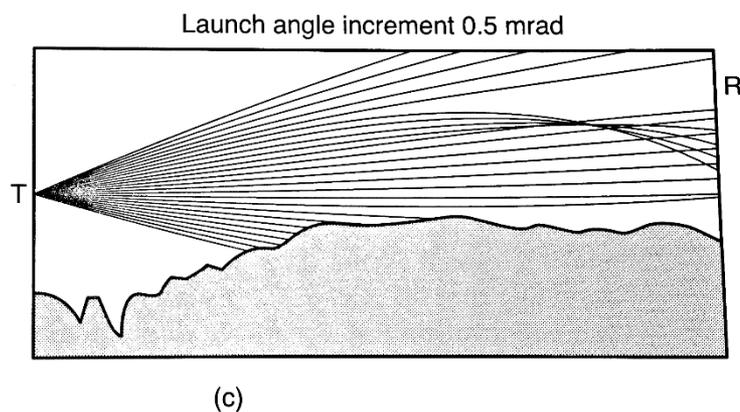
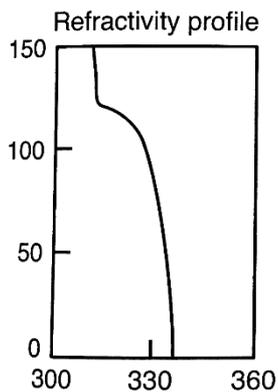
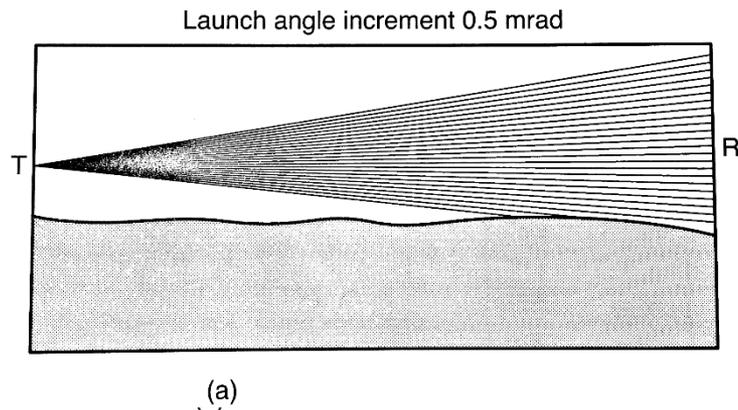
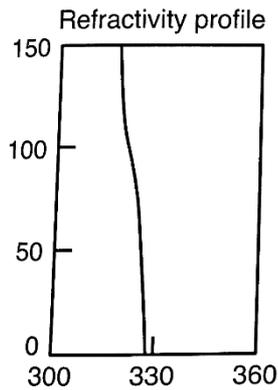
Radioenlaces

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación
Sistemas y servicios de transmisión por radio

9. Calidad y disponibilidad.

9.1 Desvanecimientos debidos a la refracción (I)

- Las variaciones esporádicas en el índice de refracción provocan multitrayectoria que da lugar a desvanecimientos en la señal recibida:



9.1 Desvanecimientos debidos a la refracción (II)

- Los desvanecimientos multirayecto no ocurren continuamente, por ello se define el “factor de actividad de multirayecto” η , que mide el porcentaje de tiempo en que se produce el fenómeno.
- Si asumimos que la estadística de los desvanecimientos es de tipo Rayleigh, se verifica que la probabilidad de ocurrencia de desvanecimientos de profundidad F (dB) por debajo del nivel mediano de potencia es

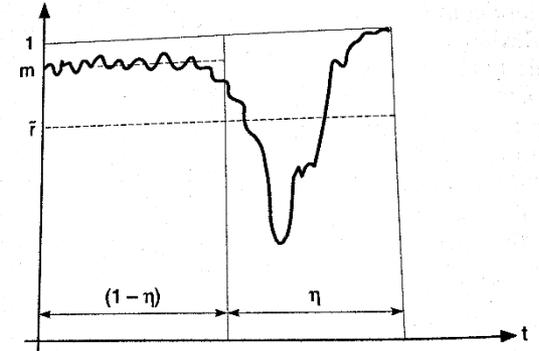


Figura 3.64.

$$P(F) = P_o 10^{-\frac{F}{10}}$$

- P_o** es el llamado “factor de aparición de desvanecimientos” y está relacionado con η .
- La forma de calcular η y P_o se recogen en la recomendación **UIT-R P.530**



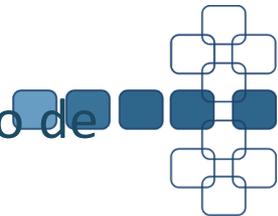
9.2 Calidad y disponibilidad de un radioenlace (III)

- La calidad de un radioenlace representa el grado en que éste está en condiciones de proporcionar el servicio para el que se ha diseñado.
- Se distinguen dos aspectos de calidad relacionados entre sí:
 - Disponibilidad.
 - Calidad de fidelidad.
- La indisponibilidad de un radioenlace es el porcentaje de tiempo (normalmente sobre un año) en que el sistema está totalmente inoperativo (interrupción de la comunicación) o por debajo de un umbral que consideramos degradado.
- Aun estando disponible el sistema puede sufrir microinterrupciones o degradaciones de su calidad, afectando a la fidelidad de la transmisión.



9.2 Calidad y disponibilidad de un radioenlace (IV)

- Para cuantificar la disponibilidad y calidad de un radioenlace se definen una serie de parámetros básicos:
- **Segundo con errores (ES):** intervalo de un segundo en el que hay uno o más errores de bit.
- **Segundo con muchos errores (SES):** intervalo de un segundo donde se producen muchos errores ($BER > 10^{-3}$), o una situación de pérdida de señal.
- Tasa de segundo con errores (**ESR**) y tasa de segundos con muchos errores (**SESR**)
- Se define la **relación de disponibilidad (AR)** como la proporción de tiempo en que el enlace está disponible.
- **La relación de indisponibilidad (UR)** es la proporción en el que está indisponible. **$AR + UR = 1$**
- M_0 es el tiempo medio entre interrupciones
- OI (outage Intensity) es el inverso de M_0 y nos ofrece el número de interrupciones por año (si M_0 se ha evaluado sobre un año).

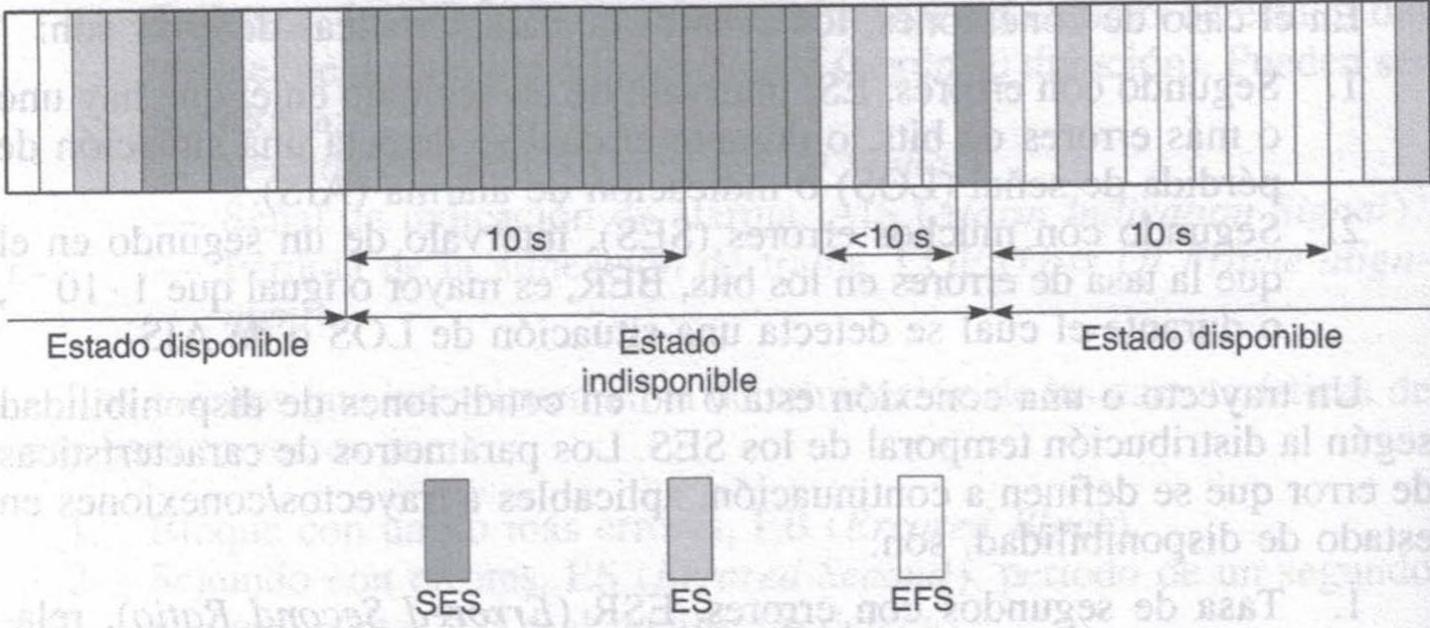


9.2 Calidad y disponibilidad de un radioenlace (V)

- **Criterios de indisponibilidad:** La recomendación UIT-T G.826 establece los criterios de entrada y salida de un periodo de indisponibilidad:
 - Un periodo de indisponibilidad comienza con el primero de 10 eventos SES consecutivos.
 - Un periodo de disponibilidad comienza con el primero de 10 eventos **NO** SES consecutivos.
 - Los periodos de tiempo con eventos SES inferiores a 10 segundos no se consideran indisponibilidad aunque intervienen en el cálculo de la calidad de fidelidad.
- **La relación de indisponibilidad** vendrá dada por la suma de los intervalos de indisponibilidad frente al tiempo de observación:

$$UR = \frac{\sum T_{ind}}{T_{ob}}$$

9.2 Calidad y disponibilidad de un radioenlace (VI)



9.2 Calidad y disponibilidad de un radioenlace (VII)

- La recomendación UIT-R F.1703 establece los **objetivos de indisponibilidad** para radioenlaces digitales. Valores de referencia son los siguientes:
 - UR = 0.05 %, se corresponde a 263 min/año
 - OI = 100, Mo=1/100, se corresponde con 5256 min/año.
- Los objetivos de calidad de fidelidad se proponen en la recomendación UIT-R F.1668-1. Dichos objetivos fijan la degradación máxima admisible.
 - Para enlaces de un solo tramo podemos establecer un objetivo simplificado: SESR < 0,015% (80 min/año)
 - La dificultad al planificar el enlace radica en predecir la aparición de eventos SES. En la práctica se suele asumir una alta probabilidad de ocurrencia de SES cuando la BER se mayor a un determinado valor, típicamente: **BER > 10⁻³**

9.3 Cálculo de la indisponibilidad de un radioenlace (I)

- La indisponibilidad se puede deber a fallos en el equipo o a factores relacionados con la propagación.
- **Indisponibilidad debida al equipo:**
 - La fiabilidad de un equipo se mide mediante el tiempo que transcurre entre dos fallos sucesivos de éste. Se suele modelar mediante una distribución de probabilidad exponencial negativa de valor medio τ .

$$P(t) = \frac{1}{\tau} \exp(-t / \tau)$$

- Al parámetro τ se le denomina MTBF (Mean Time Between Failures)
- Se define también el parámetro MTTR (Mean Time To Repair)
- La indisponibilidad del por fallos del equipo viene dada por

$$U_E = \frac{MTTR}{MTBF + MTTR} 100 (\%) \approx \frac{MTTR}{MTBF} 100 (\%)$$

9.3 Cálculo de la indisponibilidad de un radioenlace (II)

- Indisponibilidad debida a la propagación:
 - Se considera que su única causa es la debida a la lluvia por ser un fenómeno lento que da lugar a desvanecimientos de duración larga lo cual provoca **SES**.
 - Para calcular la probabilidad de ocurrencia de SES se calcula el **margen del radioenlace** definido como:

$$M = P_{r0} - P_{th} \text{ (dB)}$$

- Donde **Pro** es la **potencia nominal** de recepción en condiciones normales de propagación, es decir sólo consideramos las pérdidas de propagación en espacio libre más las de difracción y gases si las hubiera.
- **Pth** es el **umbral** de recepción para una BER objetivo, normalmente $BER = 10^{-3}$

9.3 Cálculo de la indisponibilidad de un radioenlace (III)

- Una vez calculado M obtenemos la **probabilidad** de aparición de desvanecimientos mayores o iguales a M mediante la expresión:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = C_1 p^{-(C_2 + C_3 \log_{10} p)} \quad \text{donde } A_p = M$$

- Se considera entonces que: $U_P = p$

- Finalmente la indisponibilidad final vendrá dada por:

$$U = U_E + U_P \quad (\%)$$

9.4 Cálculo de la calidad de fidelidad de un radioenlace (I)

- Durante el tiempo de disponibilidad del radioenlace se asume que la aparición de SES es esporádica (no alcanza 10 segundos consecutivos).
- La causa de los desvanecimientos que causan SES esporádica es el multitrayecto, por tanto su probabilidad de ocurrencia coincide con la de **desvanecimientos por debajo del umbral M**.
- En los sistemas de banda ancha los desvanecimientos pueden ser planos o selectivos en frecuencia. En este caso se considera que el porcentaje de tiempo total P_{TT} se debe a la suma del debido a los **desvanecimientos planos** P_{TP} más el porcentaje de tiempo en que aparece SES debido a los **desvanecimientos selectivos** P_{TS} .
- Para enlaces de baja capacidad (< 34 Mbit/s) se consideran solo los desvanecimientos planos:

$$P_{TT} = P_{TP} = P_0 10^{-M/10} 100 \text{ (\%)}$$

9.4 Cálculo de la calidad de fidelidad de un radioenlace (II)

- Para radioenlaces de capacidad medio y alta hay que calcular también el porcentaje de tiempo de interrupción debido a los desvanecimientos selectivos. Para calcularlo hay dos métodos:
 - **El método de la signatura:** la signatura de un receptor es una característica del equipo que indica la medida en que éste introducirá errores cuando se produzcan desvanecimientos selectivos.
 - **El método del margen neto de desvanecimientos:** el margen neto se obtiene como combinación del margen bruto, M , con un margen de desvanecimiento selectivo M_s , este dato es característico de cada equipo y debe facilitarlo el fabricante:

$$M_n = 10 \log \left(10^{-M/10} + 10^{-M_s/10} \right)$$

$$P_{TT} = P_0 10^{-M_n/10} 100 \quad (\%)$$

- José María Hernando Rábanos, José Manuel Riera Solís, Luis Mendo Tomás. “Transmisión por Radio”. Séptima Edición (2013), Editorial Universitaria Ramón Areces. (Capítulos 3 y 5).
- Les Barcley (Editor). “Propagation of Radiowaves” 2nd Edition. The Institution of Electrical Engineers. (IEE), 2003.
- Recomendaciones de la UIT:
 - **UIT-R P.530**
 - **UIT-T G.826**
 - **UIT-R F.1703**
 - **UIT-R 784**