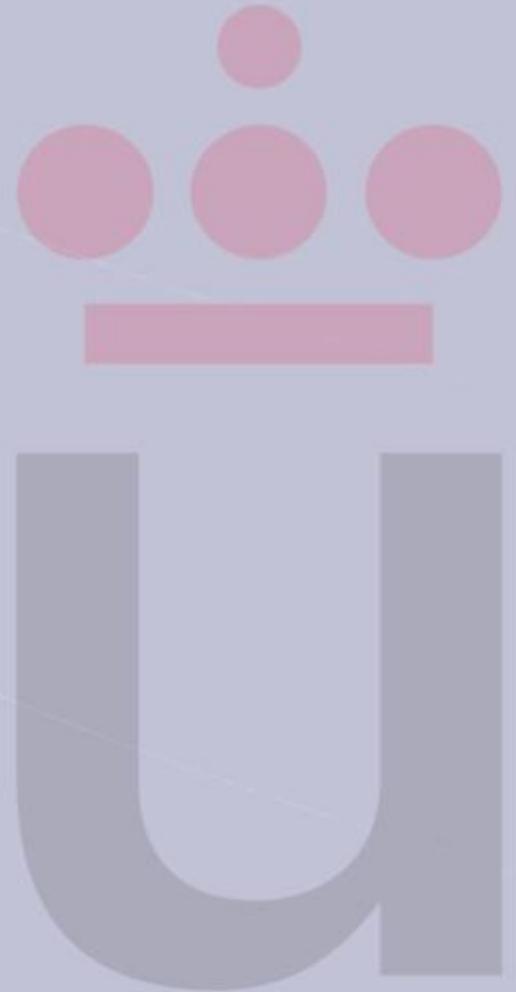


Tema 3

Radiopropagación

Tema - **R**ADIOPROPAGACIÓN

- **F**órmula de **F**riis y **P**érdida **B**ásica
- **M**ecanismos de **P**ropagación
- **P**ropagación por **O**nda de **S**uperficie
- **P**ropagación por **O**nda **I**onosférica
- **P**ropagación **T**roposférica
 - **P**ropagación por **D**ifracción
 - **D**ifracción en **O**bstáculos
 - **A**tenuación
- **M**étodos **E**mpíricos de **P**ropagación
- **D**esvanecimientos



Introducción

- El estudio de la propagación de las ondas EM en medios reales mediante las ecuaciones de Maxwell suele ser inviable.
- Se recurre a distintas alternativas:
 - Modelos simplificados basados en óptica geométrica.
 - Expresiones empíricas o curvas de propagación normalizadas y obtenidas a partir de mediciones.
- Las características de propagación dependen de:
 - Los obstáculos (colinas, suelo, edificios, vegetación).
 - Las características dieléctricas del terreno (cte dieléctrica, conduct.).
 - Propiedades físicas del medio (precipitaciones, absorción).
 - Frecuencia y polarización.

Introducción

- El suelo y su orografía, la troposfera y la ionosfera entre otros, son responsables de que el modelo ideal de propagación de ondas electromagnéticas en espacio libre, descrito en la ecuación de Friis, no sea correcto en la mayoría de los casos reales.

Introducción

La orografía del suelo y sus características morfológicas, que condicionan las propiedades eléctricas, afectan a la propagación de las ondas electromagnéticas.

Introducción

La concentración no uniforme de gases en la troposfera, produce una curvatura de los rayos debido al cambio del índice de refracción del medio con la altura.

Introducción

En las bandas de microondas se produce una atenuación adicional en las moléculas de los gases que constituyen la atmósfera

Introducción

El agua en forma de vapor de agua, o de hidrometeoros como lluvia, niebla, nieve, etc, producen atenuaciones adicionales en la propagación y cierta despolarización

Introducción

La presencia de la ionosfera refleja las ondas de frecuencias bajas (VLF y LF), refracta a frecuencias de MF y HF, y despolariza la onda en las bandas de VHF y UHF.

Modelo de Friis y corrección

En el modelo de propagación en espacio libre, la densidad de potencia incidente sobre la antena receptora es

$$\langle S \rangle = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi d^2}$$

En condiciones de propagación en un entorno real hay que incluir un factor de potencia F_p , que multiplica a la potencia recibida,

$$\langle S \rangle = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi d^2} F_p \Rightarrow F_p = |F_e|^2$$

Pérdida Básica

- Un enlace se caracteriza por su balance de potencia.
- Se estudia la propagación en espacio libre como referencia (mínima pérdida esperable). Se añaden correcciones en función del medio: obstáculos, desvanecimientos, lluvia, gases atmosféricos, etc.
- Pérdida básica de propagación:

$$p_r = S \frac{\lambda^2}{4\pi}; \quad S = \frac{p_t}{4\pi d^2}; \quad l_{bf} = \frac{p_t}{p_r} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

$$L_{bf} (dB) = 32.45 + 20 \log f (MHz) + 20 \log d (km)$$

- Atenuación de campo por otras causas:

$$a_e = \left(\frac{e_0}{e} \right)^2 \Rightarrow p_r = \frac{1}{a_e} p_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad l_b = l_{bf} a_e \Rightarrow L_b = L_{bf} + A_e$$

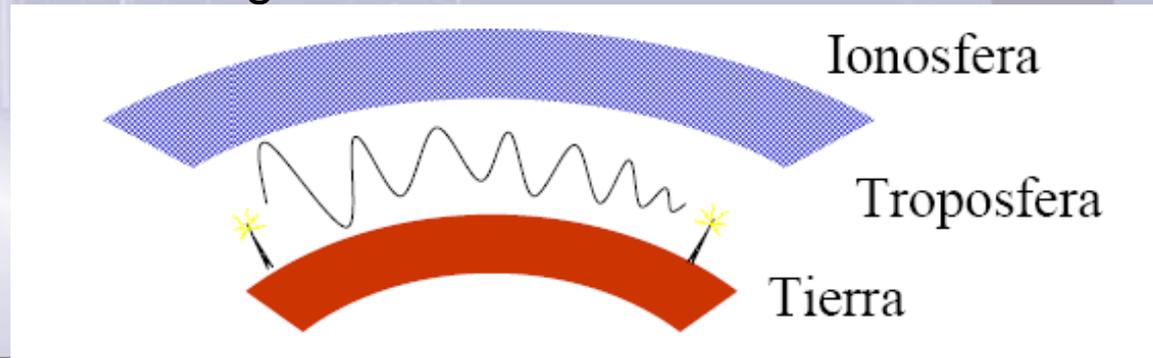
Mecanismos de Propagación

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

Los anchos de las bandas van aumentando

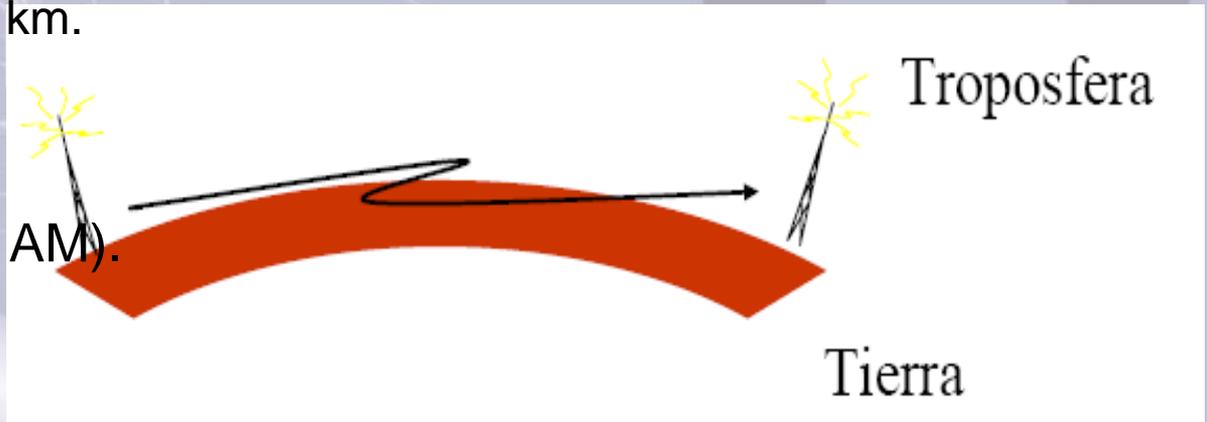
Mecanismos de Propagación: VLF

- Onda guiada Tierra-Ionosfera
 - En VLF (3kHz-30kHz), el suelo y la ionosfera se comportan como buenos conductores.
 - Como la distancia que los separa (60-100km) es comparable a la longitud de onda (100 km-10km), la propagación se modela como una guía esférica con pérdidas.
 - Las antenas son verticales y eléctricamente pequeñas, aunque de dimensiones físicas muy grandes.
 - Aplicaciones: telegrafía naval y submarina, ayudas a la navegación. Poseen cobertura global.



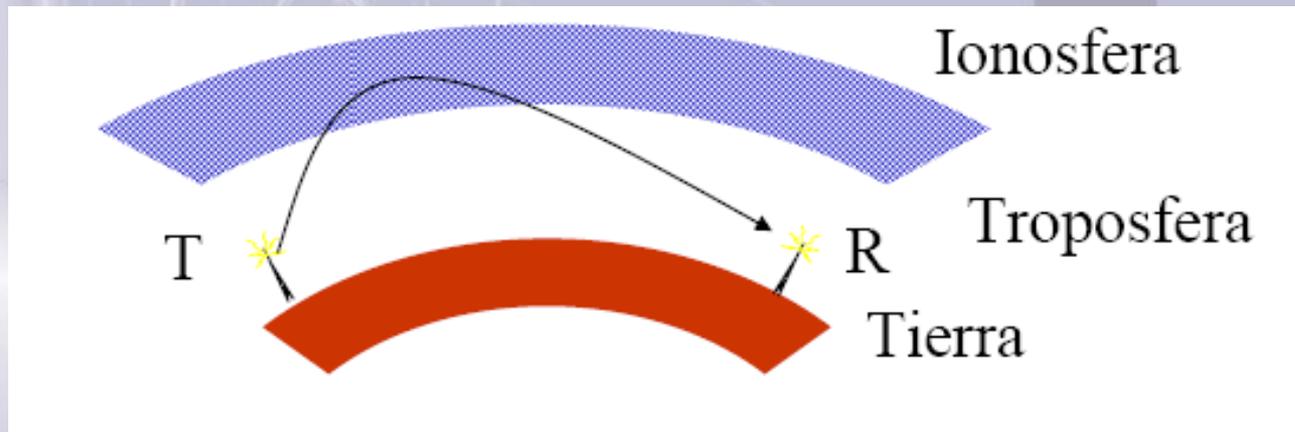
Mecanismos de Propagación: LF, MF

- Onda de Tierra o de Superficie.
 - En las bandas LF (30kHz-300kHz) y MF(300kHz-3 MHz) aparece una onda de superficie que se propaga en la discontinuidad tierra-aire.
 - Las antenas suelen ser monopolos verticales con alturas entre 50 y 200 m que producen polarización vertical.
 - El alcance es función de la potencia transmitida y la frecuencia:
 - LF: 1000 a 5000 km.
 - MF: 100 a 1000 km.
 - HF: menor de 100 km.
 - Sistemas navales y radiodifusión (LF y onda media en AM).



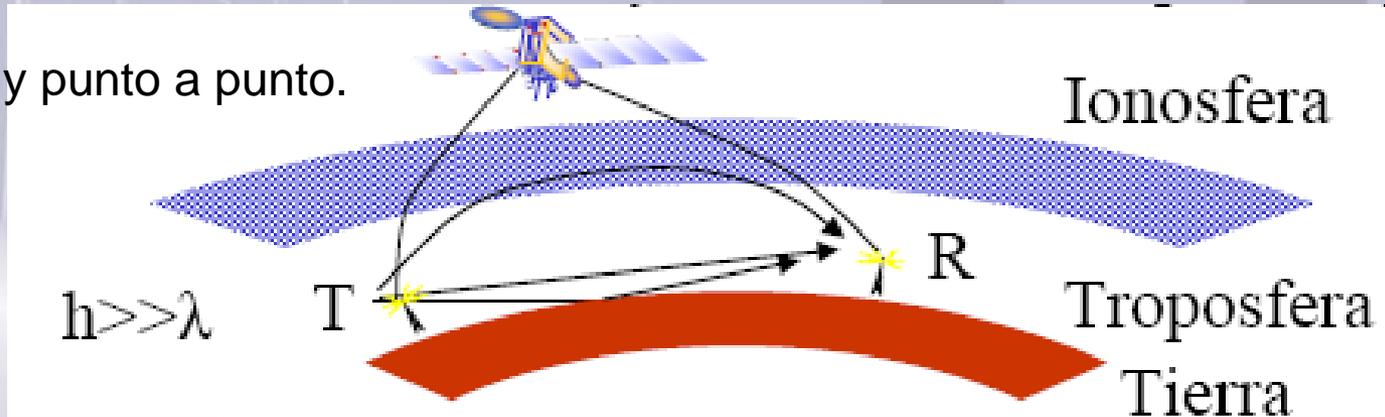
Mecanismos de Propagación: MF y HF

- Onda ionosférica.
 - Las reflexiones ionosféricas (realmente son refracciones) se producen en MF y HF (0.3-30 MHz).
 - En HF se usan antenas elevadas con polarizaciones hor. y vert. (logperiódicas, rómbicas...)
 - El alcance de un solo salto varía:
 - MF (noche): 2000 km.
 - HF(día o noche): 50 a 4000 km.
 - Radiodifusión, comunicaciones punto a punto, com. navales.

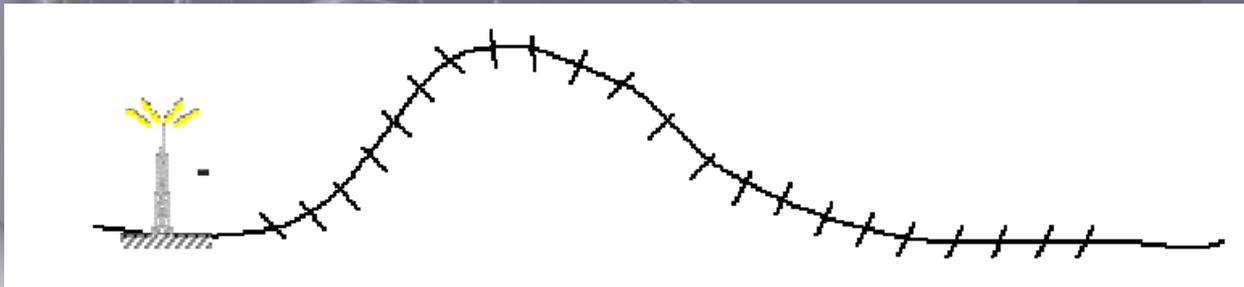


Mecanismos de Propagación: VHF y Más

- Onda de espacio o troposférica.
 - Para VHF y frecuencias superiores, la ionosfera se hace transparente: propagación de espacio libre, modificada por el suelo (reflexión y difracción) y por la troposfera (refracción, atenuación, dispersión).
 - Antenas elevadas y directivas.
 - Alcance variable:
 - VHF,UHF poco más del horizonte visible. Mayor frecuencia → visión directa (decenas de kms)
 - decenas de km a 40 000 km en satélite, millones de km en comunicaciones de espacio profundo.
 - Radiodifusión de FM y TV, telefonía móvil, enlaces fijos, radar, com.satélite.
 - Radiodifusión y punto a punto.



Propagación por Onda de Superficie



Onda de superficie

Los primeros modelos de onda de superficie fueron propuestos en 1909

Este modelo supone una tierra lisa y de características eléctricas uniformes, lo que implica una longitud de onda mucho mayor que las posibles discontinuidades. Además se supone que tanto la antena transmisora como la antena receptora se encuentran muy próximas a la superficie terrestre

Onda de superficie

Una onda de superficie se propaga en la discontinuidad tierra – aire.

La componente vertical se propaga sobre la superficie sin apenas pérdidas, mientras que la componente horizontal se atenúa por el efecto de la conductividad del suelo.

La atenuación por absorción es tanto mayor cuanto menor sea la conductividad del suelo

La onda de espacio compuesta por el rayo directo y del rayo reflejado en el suelo se anula a nivel del suelo, ya que el coeficiente de reflexión en el suelo es prácticamente igual a -1 y los caminos de ambos rayos son prácticamente iguales.

Onda de superficie

La propagación de estas señales depende fundamentalmente de la frecuencia y del tipo de suelo, que puede presentar un comportamiento dieléctrico o conductor

Tipo de suelo	ϵ_r	σ (mS/m)
Agua de mar	80	4000
Agua dulce	80	5
Tierra húmeda	15-30	5-20
Suelo rocoso	7	1-5
Tierra seca	4	1-10

Onda de superficie

Para el cálculo del alcance mediante este mecanismo de propagación se emplea un:

modelo aproximado de tierra plana, válido para distancias cortas,

modelo de tierra esférica para distancias largas.

Ondas de superficie. Modelo de Tierra Plana

Este modelo simple supone una propagación de espacio libre afectada por un factor de atenuación de campo eléctrico F_e ,

$$F_e = \frac{2 + 0.3p}{2 + p + 0.6p^2}$$

$$p \approx \frac{\pi d}{60\lambda^2 \sigma}$$

$$\langle S \rangle = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi d^2} F_p \Rightarrow F_p = |F_e|^2$$

La validez de este modelo se extiende hasta la distancia en la que la difracción asociada a la curvatura de la Tierra cobra importancia, es decir a una distancia máxima de:

$$d_{\max} \text{ (km)} = \frac{100}{\sqrt[3]{f \text{ (MHz)}}$$

Para distancias mayores es necesario contar con los fenómenos asociados a la difracción que produce la curvatura de la Tierra

Ondas de superficie. Modelo de Tierra Plana

Modelo de Propagación en Espacio Libre (antenas aisladas situadas en el vacío)

- Densidad de Potencia Incidente: $\langle S \rangle = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2}$
- Campo Incidente sobre la Antena Receptora: $\langle S \rangle = \frac{|E|^2}{240\pi} \Rightarrow |E| = \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{d}$
- Potencia Recibida: Fórmula de Friis $\frac{P_R}{P_T} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R = \frac{A_{eT} A_{eR}}{\lambda^2 d^2}$

Modelo de Propagación en Espacio Real, con factor de atenuación que modela la influencia del medio.

- Campo incidente: $|E| = \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{d} F_e$
- Densidad de Potencia: $\langle S \rangle = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} F_p \Rightarrow F_p = |F_e|^2$
- Potencia Recibida: $\frac{P_R}{P_T} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R F_p$

Ondas de superficie. Modelo de Tierra Curva

Para contar con los fenómenos asociados a la difracción que produce la curvatura de la Tierra, la UIT-R proporciona gráficas que modelan la intensidad de campo producida por una antena transmisora, de tipo monopolo corto con potencia radiada de 1 kW, en función de la frecuencia, la distancia y el tipo de terreno.

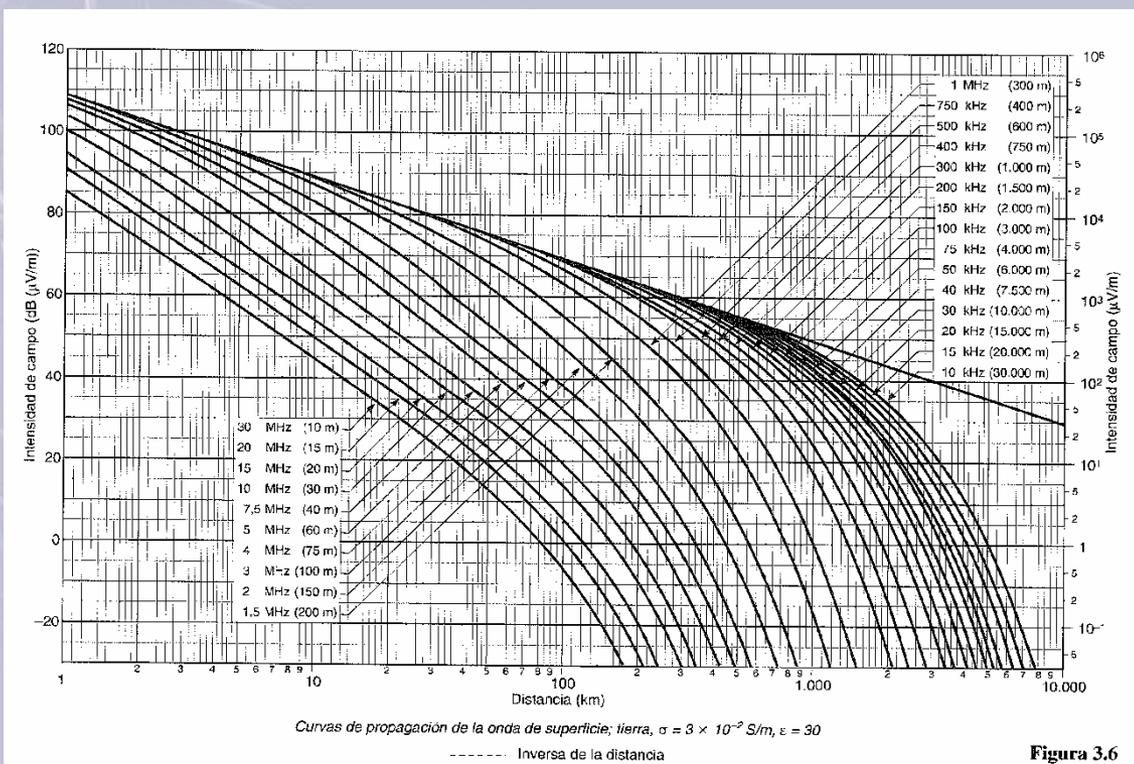
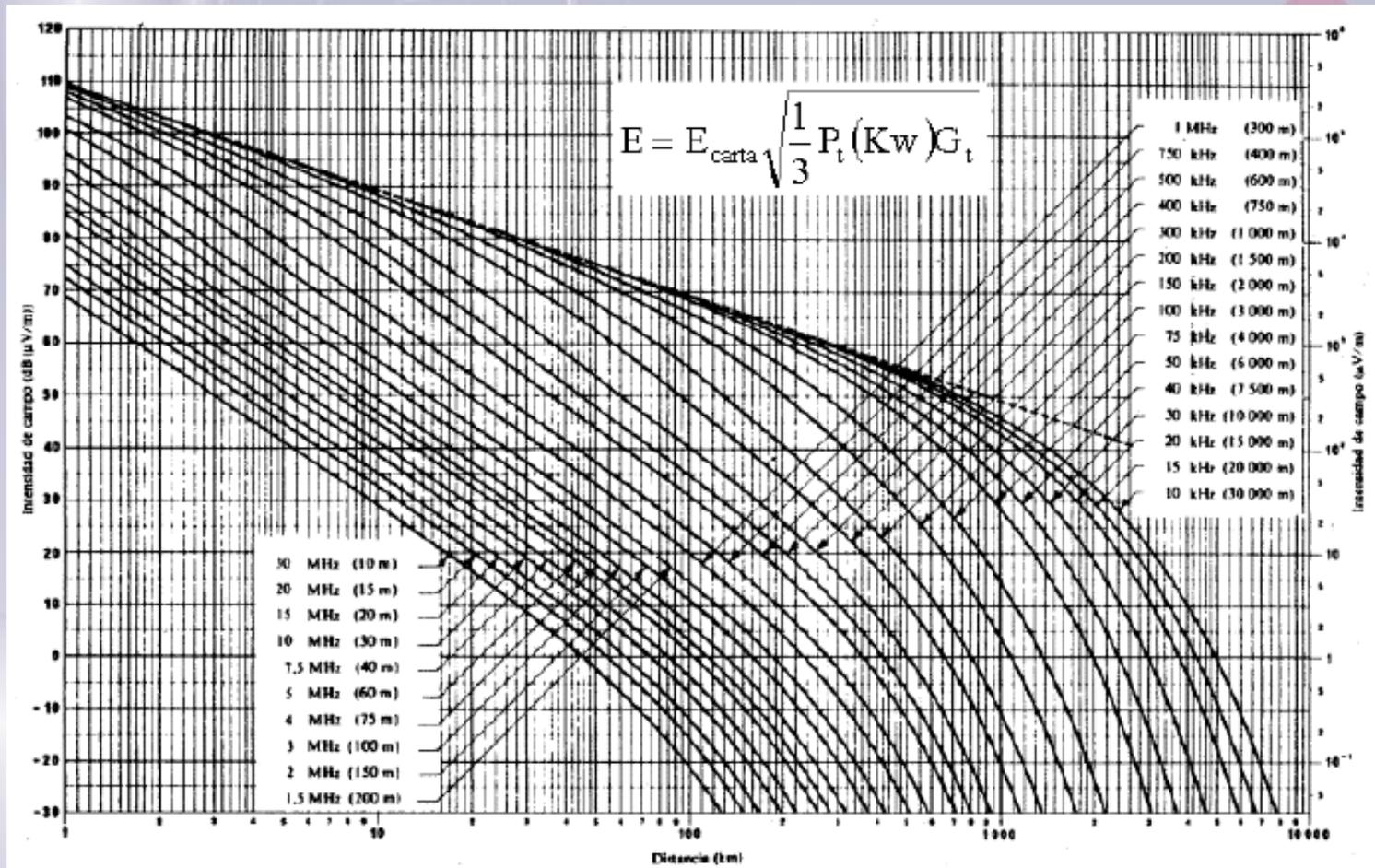


Figura 3.6

Ondas de superficie. Modelo de Tierra Curva



Ondas de superficie. Modelo de Tierra Curva

Para otro tipo de antenas u otra potencia de transmisión hay que realizar una transformación de los valores leídos en la carta a valores reales de campo. Esta transformación pasa por la relación entre la PIRE realmente utilizada y la *PIRE* del caso de referencia. Este valor de *PIRE* de referencia es 3 kW (1 kW de potencia radiada por un monopolo corto, con directividad igual a 3).

$$E = E_{\text{carta}} \sqrt{\frac{P_{\text{rad}} (\text{kW}) \cdot D_0}{3}}$$

Ondas de superficie. Ejemplo

Ejemplo 3.1: Propagación por onda de superficie

Empleando las cartas de la UIT-R, obtenga la distancia a la que se alcanza un campo de $100 \mu\text{V/m}$ eficaces transmitiendo con un mástil de 75 m que a 1 MHz radia una potencia de 91.5 kW.

- Sobre la superficie del mar
- Sobre tierra seca

Para resolver el ejercicio se utilizan las gráficas UIT-R para la frecuencia de 1MHz. Conocemos que el campo eléctrico de $100 \mu\text{V/m}$, se consigue radiando 91.5 kW con una antena de longitud igual a 75 metros, que corresponde a un monopolo de longitud $\lambda/4$. Para dicha longitud, la directividad del monopolo es 3.28, con lo que la *PIRE* es:

$$\text{PIRE} = P_{\text{rad}} \cdot D_o = 91.5 \cdot 3.28 = 300 \text{ kW}$$

- En la gráfica de **tierra seca un alcance de 100 km**
- En la gráfica de **mar un alcance de 1100 km**

Y buscando el valor de ordenadas en las cartas de:

$$20 \log E_{\text{carta}} = 20 \log \frac{100 \mu\text{V/m}}{\sqrt{\frac{300}{3}}} = 20 \text{ dB}(\mu\text{V/m})$$

Ondas de superficie. Modelo de Tierra Curva

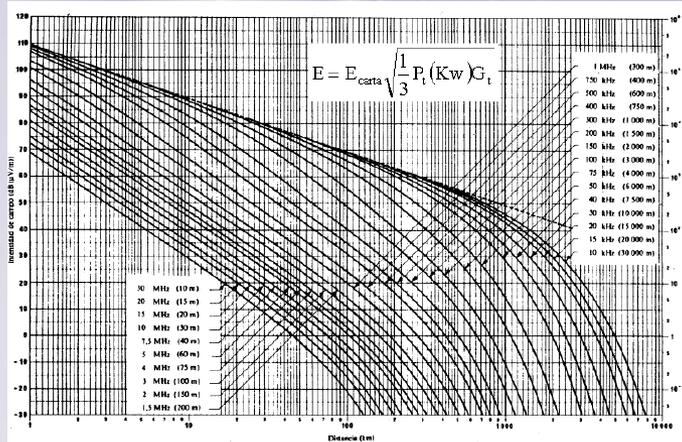


Figura 3.5: Intensidad de la onda de superficie en tierra seca. $P_{radiada} = 1 \text{ kW}$. Monopolo corto

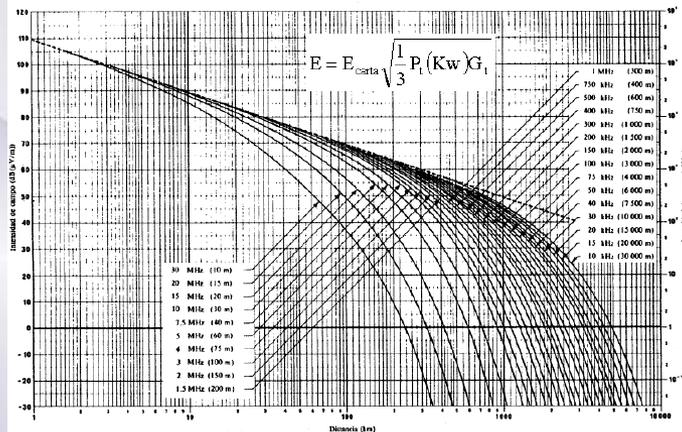
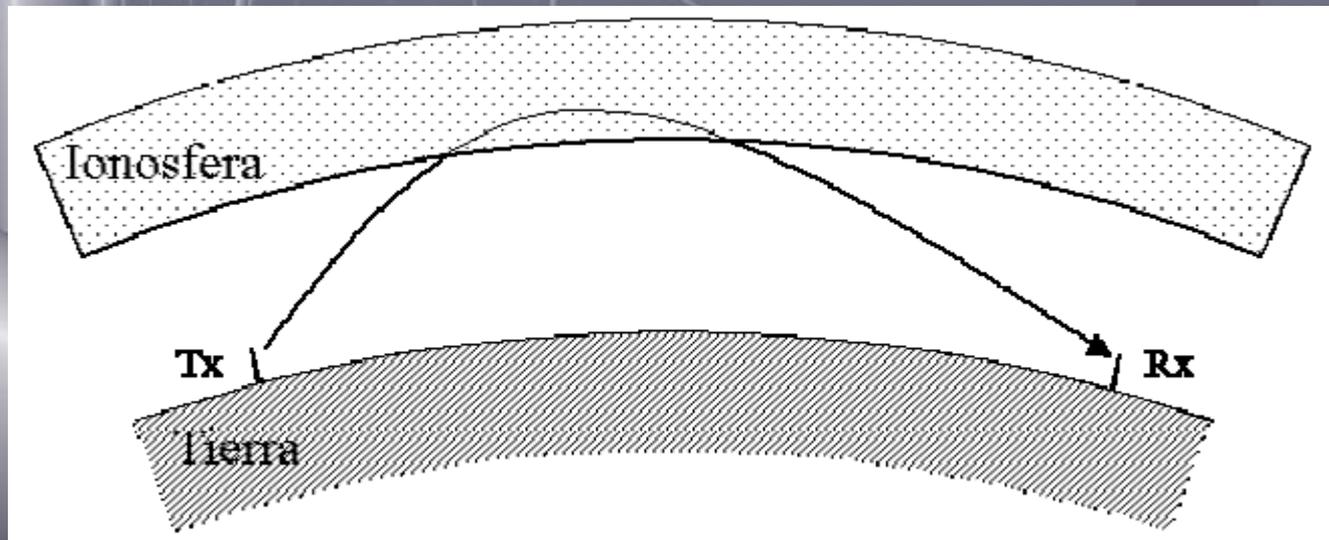


Figura 3.6: Intensidad de la onda de superficie en mar. $P_{radiada} = 1 \text{ kW}$. Monopolo corto.

CONCLUSIONES

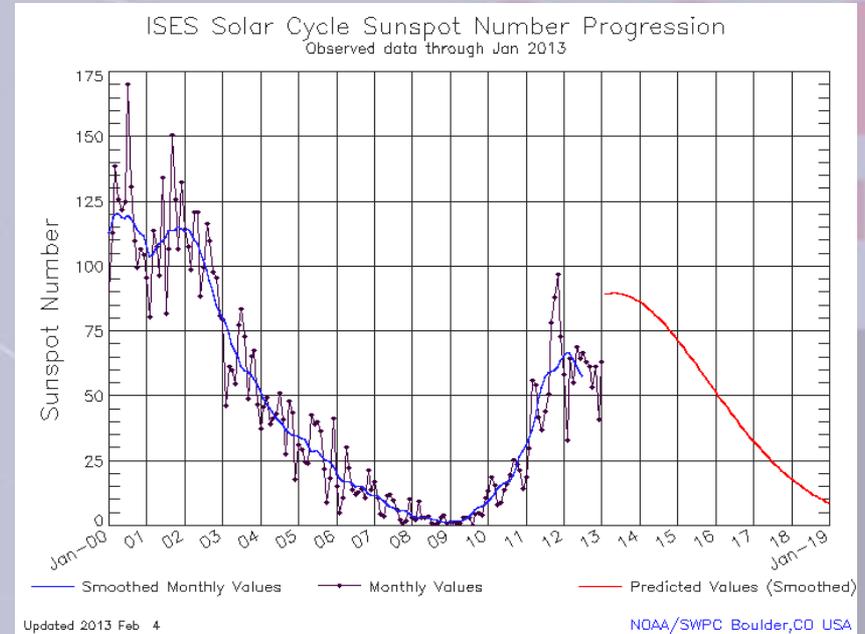
- Mientras la antena transmisora sea eléctricamente corta (monopolo corto) la amplitud de los campos no depende de la altura real de la antena.
- En regiones próximas a la antena el campo decae como $1/d$.
- En regiones intermedias el campo decrece como $1/d^2$
- A grandes distancias de la antena transmisora, donde la curvatura de la Tierra se hace importante, el campo decrece de forma exponencial.
- El alcance depende del tipo de terreno, siendo mayor en zonas húmedas que en secas.
- El alcance, para una sensibilidad dada, es menor cuanto mayor es la frecuencia. Por encima de MF el alcance sobre tierra es muy reducido.

Propagación Ionosférica



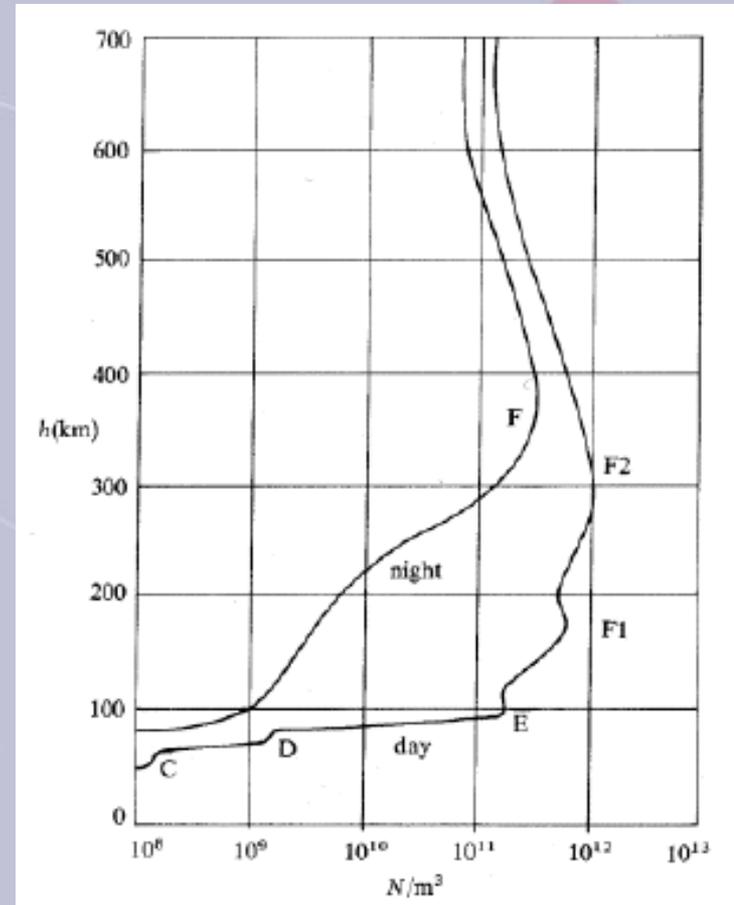
Propagación Ionosférica

La ionización, o presencia de electrones libres, se produce fundamentalmente por las radiaciones solares en las bandas de ultravioletas y de rayos X, por los rayos cósmicos y por los meteoritos. Esto hace que la densidad de electrones varíe según la hora del día, la estación del año y los ciclos de manchas solares (con periodicidad de 11 años).



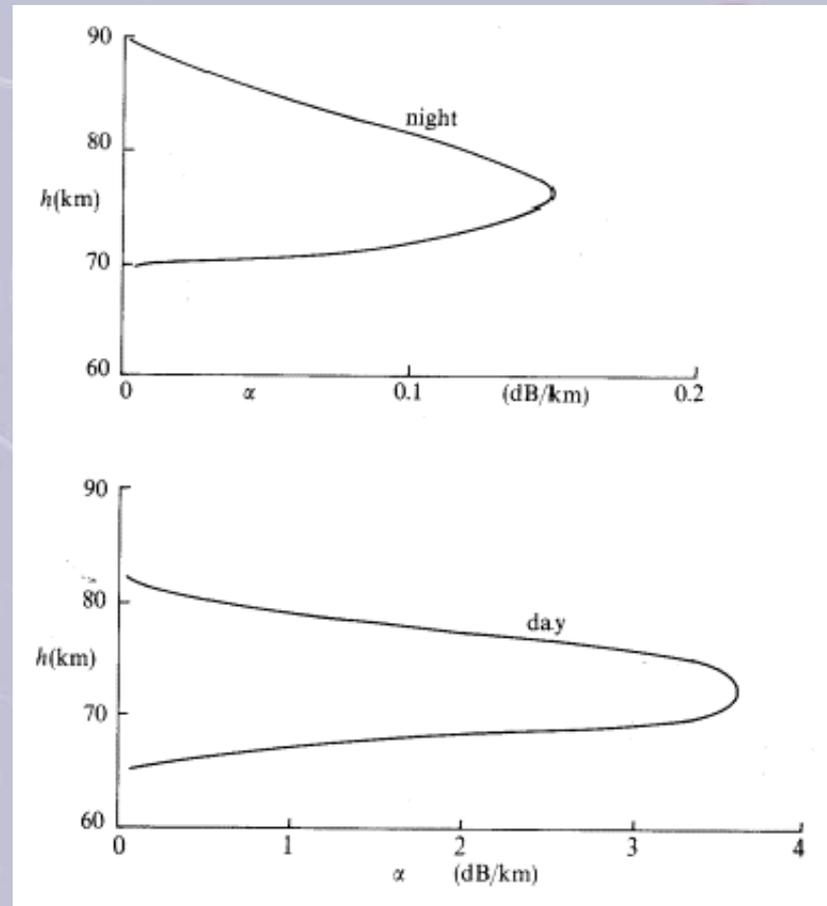
Propagación Ionosférica

La densidad de electrones también varía con la altura al suelo, presentando una serie de máximos relativos que permiten dividir la ionosfera en una serie de capas (C, D, E y F).



Propagación Ionosférica. Capas

La primera capa es la **capa D**. Es una zona de baja densidad electrónica comparada con la molecular, que se produce entre los 60 y los 90 km. Esta capa decrece rápidamente tras la puesta de sol y su **efecto más importante es la atenuación en la banda MF**



Atenuación de la capa D a 1 MHz de noche y de día

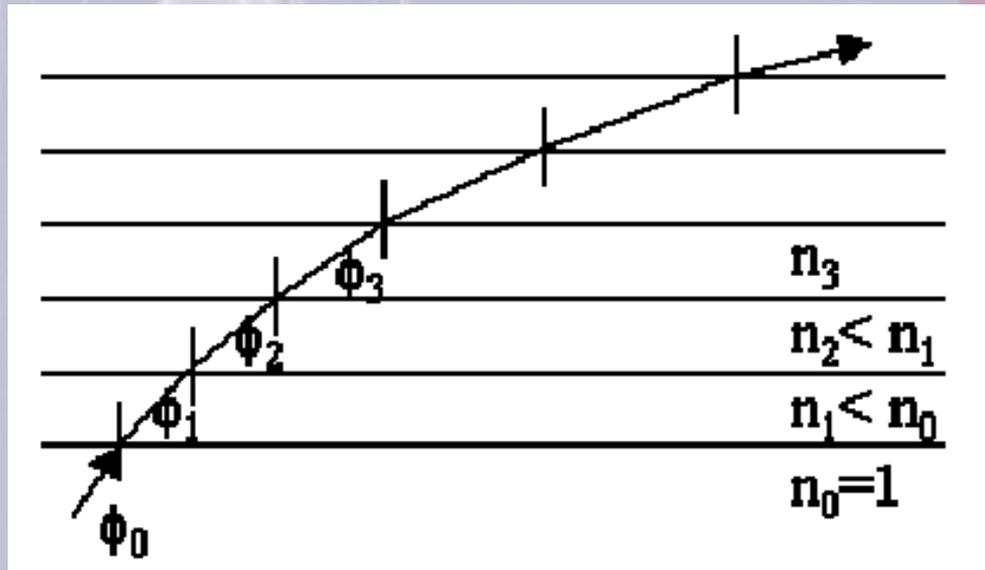
Propagación Ionosférica. Capas

La **capa E** está localizada entre 90 y 130 km. Aparece fundamentalmente de día, y muy tenuemente por la noche, reflejando las frecuencias de MF. En determinadas situaciones y de día, aparece una capa E esporádica, situada entre 90 y 150 km, haciendo que la atenuación sea mayor.

La capa más importante, donde se produce principalmente la reflexión ionosférica, es la **capa F**. Se extiende desde los 150 hasta los 400 km, y de día se desdobra en dos **capas F1 y F2**.

Propagación Ionosférica

En la ionosfera el índice de refracción disminuye con la altura, puesto que la densidad de electrones aumenta.



$$n_0 \text{sen} \phi_0 = n_1 \text{sen} \phi = \dots = n_i \text{sen} \phi_i$$

Propagación Ionosférica. Frecuencia de corte

La frecuencia más elevada que retorna a la Tierra, reflejándose en la capa de F2 se obtiene calculando el valor de la MUF para una onda radiada rasante con la Tierra (elevación $\Delta=0^\circ$).

Este valor es aproximadamente **30 MHz**

por encima de esta frecuencia el mecanismo de propagación ionosférica ya no se puede utilizar. La energía incidente con cualquier ángulo se escapa hacia el espacio exterior.

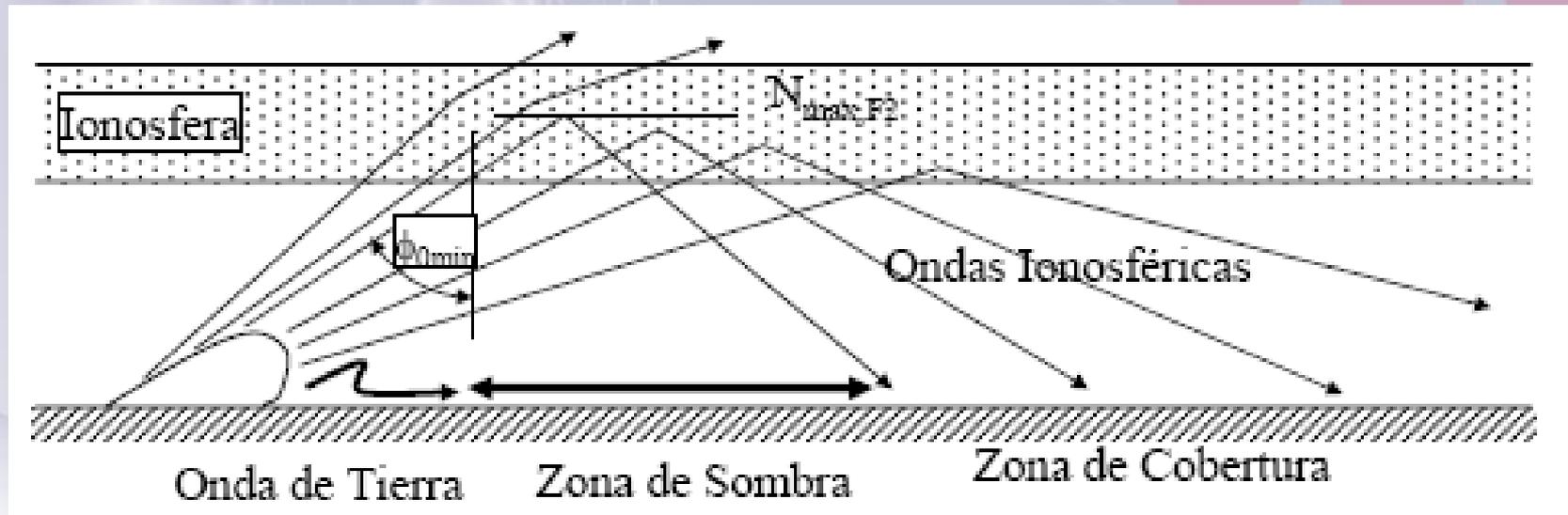
Propagación Ionosférica. Frecuencia de corte

Para una densidad de electrones dada, la permitividad equivalente hace que la constante de propagación presente una frecuencia de corte (f_c), por debajo de la cual la onda se hace evanescente reflejándose su energía.

$$f_c = \sqrt{80,8 \cdot N}$$

Además, la ionosfera se comporta como un medio dispersivo: las velocidades de fase y de grupo son funciones de la frecuencia y la altura, desde el momento en que el índice de refracción n lo es. Esto implica que sólo se pueda utilizar este mecanismos de propagación para la transmisión de señales de banda estrecha (telegrafía, telefonía, radiodifusión AM ...) **¿POR QUÉ?**

Propagación Ionosférica



Propagación Ionosférica. Cálculo del Alcance

Para realizar estudios de alcance aproximado se consideran la Tierra y la ionosfera estratificadas en capas planas.

Aplicando la Ley de la secante, se puede calcular el alcance, definiendo una **altura virtual** h_v de una emisión a una frecuencia f y con un ángulo de incidencia Φ_0 como aquella que le correspondería a una frecuencia f_v con incidencia vertical:

El límite de este modelo se encuentra para un ángulo máximo de incidencia de 74° , que corresponde al ángulo de elevación $\Delta=0^\circ$, rasante con la Tierra.

$$f = f_v \sec(\phi_0)$$

$$h_v(f, \phi_0) = h_v(f / \sec(\phi_0), 0) = h_{v, \text{ionograma}}(f / \sec(\phi_0))$$

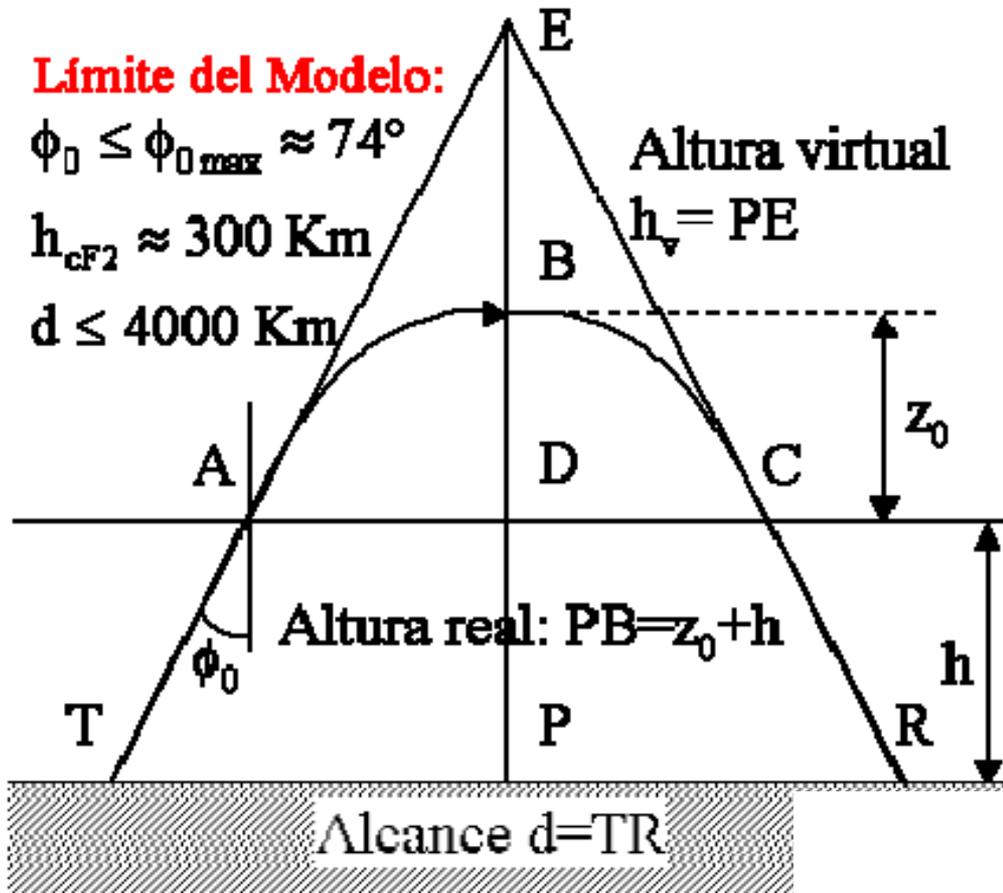
Propagación Ionosférica. Cálculo del Alcance

Límite del Modelo:

$$\phi_0 \leq \phi_{0\text{max}} \approx 74^\circ$$

$$h_{\text{cf}2} \approx 300 \text{ Km}$$

$$d \leq 4000 \text{ Km}$$



- Para incidencia vertical se define la ALTURA VIRTUAL (h_v) como:

La del punto ideal en que se produciría la reflexión para el mismo tiempo de propagación, si la velocidad fuese constante e igual a la de la luz en el vacío

- Se mide utilizando radares pulsados (sondas radioeléctricas) de frecuencia (f) variable, que miden el tiempo de propagación (τ), de ida y vuelta, de emisiones verticales.

$$h_v(f) = \frac{\tau(f)c}{2}$$

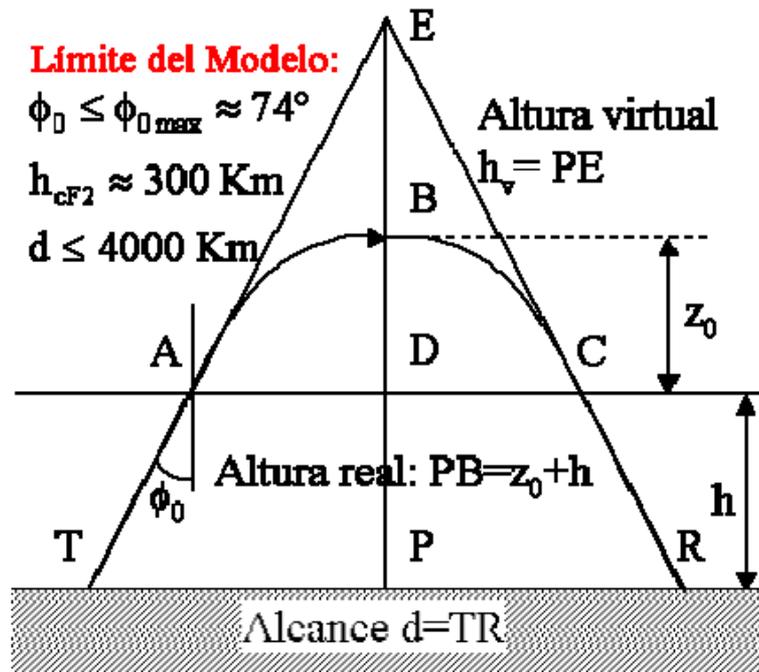
$$f = f_v \sec(\phi_0)$$

$$h_v(f, \phi_0) = h_v(f / \sec(\phi_0), 0) = h_{v,\text{ionograma}}(f / \sec(\phi_0))$$

Propagación Ionosférica. Cálculo del Alcance

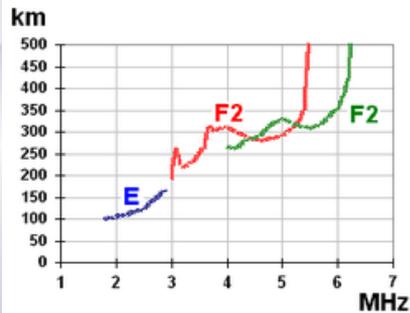
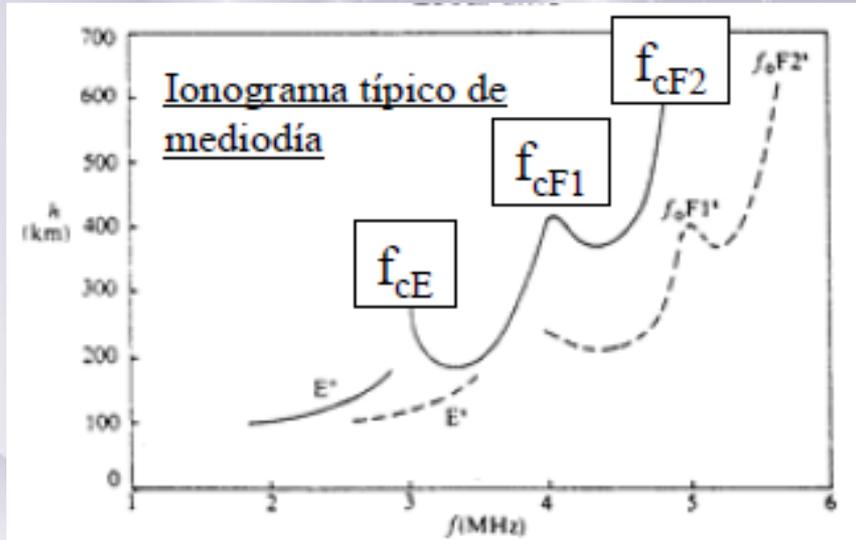
La relación entre el alcance (d) y la máxima frecuencia utilizable (MUF) se obtiene aplicando la Ley de la secante

$$MUF_i(\phi_o) = f_{c,i} \sec(\phi_o) \Rightarrow MUF(d) = f_{c,i} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2h_v}\right)^2}$$



Ionogramas

Se denomina Ionograma, a la representación de la altura virtual en función de la frecuencia



Station YYYY DAY DDD HHMMSS P1 FFS S AXN PPS IGA PS
Roquetes 2013 Feb18 049 094000 RSF 005 2 712 100 03+ A5

foF2	7.913
foF1	4.18
foF1p	N/A
foE	2.98
foEp	2.87
fxI	8.47
foEs	2.95
fmin	1.38

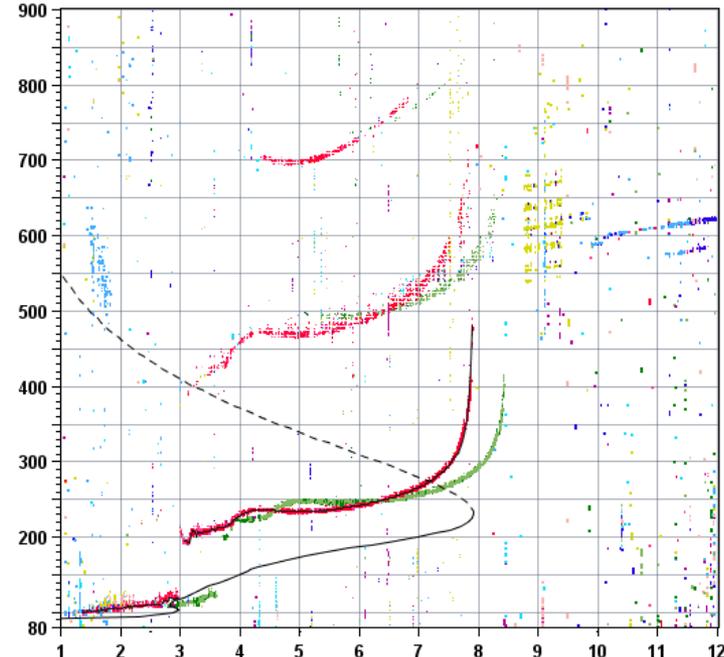
MUF(D)	27.70
M(D)	3.51
D	N/A

h'F	193.0
h'F2	234.0
h'E	99.0
h'Es	108.1

hmF2	230.4
hmF1	156.4
hmE	103.2
yF2	64.8
yF1	28.6
yE	12.9
B0	73.7
B1	1.98

C-level 11

Auto:
Artist5
500200



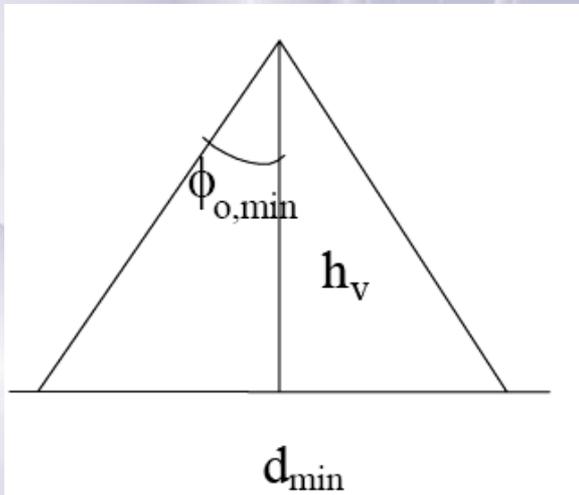
D	100	200	400	600	800	1000	1500	3000	[km]
MUF	8.5	8.6	9.0	9.8	10.8	12.3	16.6	27.7	[MHz]
EB040_2012045094000.RSF / 440fx512h 25 kHz 2.5 km / DPS-4D EB040 041 / 40.8 N 0.5 E IonCPng v. 1.3.17									

Propagación Ionosférica. Ejemplo Cálculo del Alcance

Ejemplo: Propagación por onda ionosférica: alcance

Calcule el alcance mínimo a 10 MHz de un enlace ionosférico a través de la capa F, cuya frecuencia crítica es de 6 MHz y la altura virtual es de 350 km.

Conocida la frecuencia de emisión y la frecuencia crítica de la capa, se puede calcular el ángulo mínimo de transmisión, que se corresponde con el alcance mínimo.

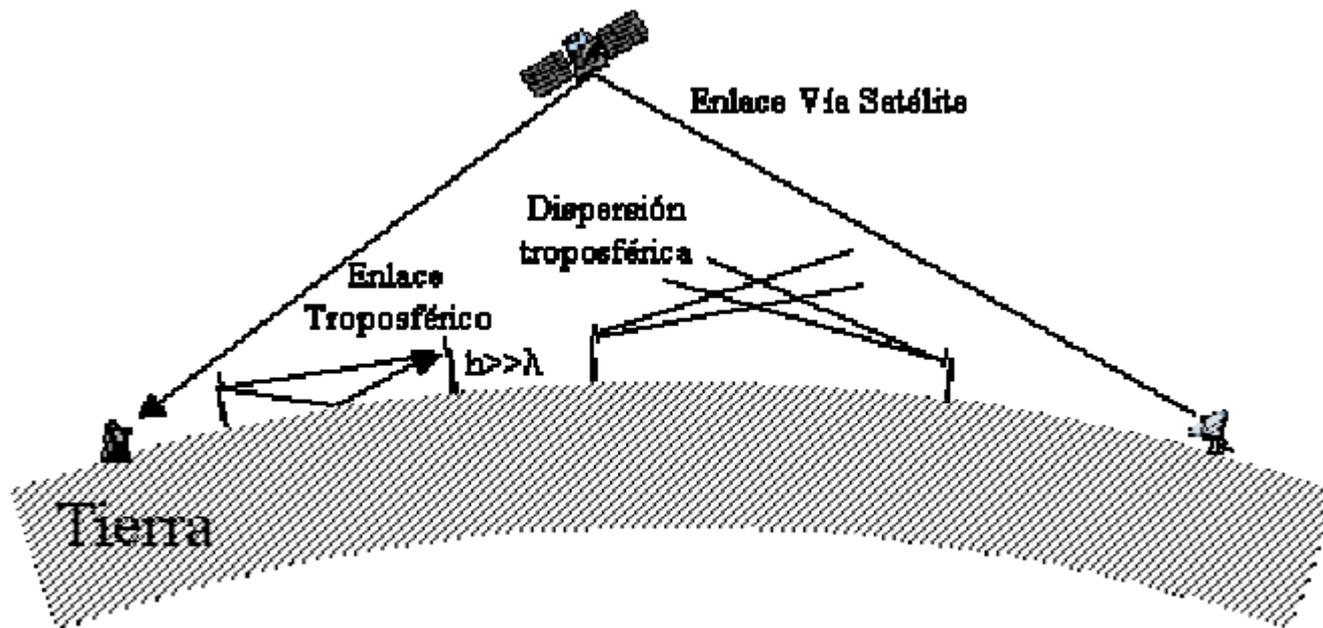


$$f_{\text{emision}} = f_{c,F2} \sec(\phi_{o,\min}) \Rightarrow \sec(\phi_{o,\min}) = \frac{f_{\text{emision}}}{f_c} = 1.67 \Rightarrow \phi_{o,\min} = 53.13^\circ$$

A partir de dicho ángulo $\phi_{o,\min}$ se puede calcular el alcance mínimo

$$\tan \phi_{o,\min} = \frac{d_{\min} / 2}{h_v} \Rightarrow d = 2h_v \tan \phi_{o,\min} = 933 \text{ km}$$

Propagación Troposférica



Propagación Troposférica

- Para $f > 30\text{MHz}$ dejan de ser utilizables la onda de superficie y la propagación ionosférica. Se utilizan las capas bajas de la atmósfera (troposfera) con antenas elevadas varias longitudes de onda.
- Puede producirse atenuación por accidentes del terreno, y trayectos múltiples por suelo o por capas atmosféricas estratificadas: pueden producirse conductos troposféricos, con mayor alcance del previsto que causan interferencias.
- Cambio del índice de refracción con la altura \rightarrow trayectoria curvilínea.
- Por encima de 10 GHz ciertos gases producen atenuación adicional. También la lluvia, nubes y niebla.
- Puede aprovecharse la dispersión en la troposfera, de forma que “iluminando” una zona con radiación potente puede establecerse enlace.
- El alcance típico de enlaces por troposfera es del orden del horizonte óptico. Pueden cubrirse distancias mayores con dispersión troposférica (no se utiliza mucho hoy pero se tiene en cuenta para interferencias).

Propagación Troposférica

En frecuencias de VHF y superiores se consideran aquellos mecanismos de propagación en los que la contribución más importante proviene de una combinación de

1. el rayo de visión directa (propagación en espacio libre),
2. el rayo reflejado en la superficie terrestre
3. el rayo difractado por las irregularidades del terreno, o por la propia curvatura de la Tierra.

En la mayoría de los casos, sobre todo en las bandas de microondas, se requiere enlace visual entre las antenas con lo que se limita el alcance a la línea del horizonte

Efecto del suelo: reflexión en la Tierra

Efecto del suelo: reflexión en la Tierra

El modelo más simple para calcular los coeficientes de reflexión considera una tierra plana, unos rayos ideales y una superficie de reflexión caracterizada por su permitividad relativa ϵ_r y su conductividad σ .

Los coeficientes de reflexión dependen del tipo de suelo, del ángulo de incidencia y de la polarización de la onda.

Cuando la distancia entre las antenas es muy grande comparada con la altura de las mismas (situación habitual) el ángulo de incidencia ψ tiende a 0° . En ese caso los coeficientes de reflexión para ambas polarizaciones tiende a -1 , que es el valor usual en tierra plana.

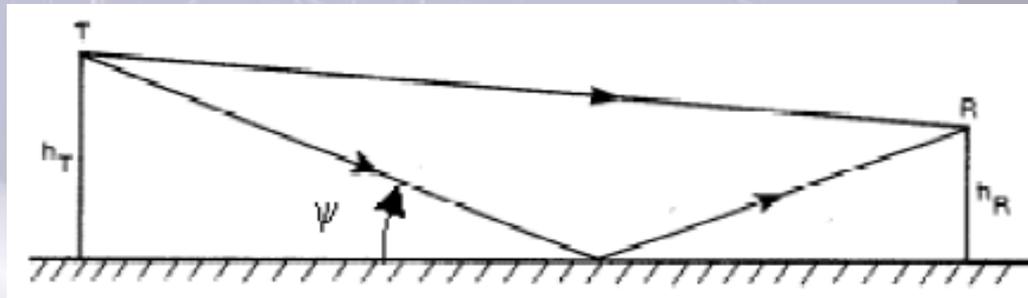
En situaciones donde no se puede considerar tierra plana, como en reflexiones suelos irregulares y rugosos, se aplican factores de corrección que dependen de la altura eléctrica de los mismos y del ángulo de incidencia.

Efecto del suelo: reflexión en la Tierra

En radioenlaces terrestres la señal que llega al receptor es la suma del rayo directo y del rayo reflejado.

La atenuación de ambos caminos va a ser prácticamente la misma, existiendo únicamente una variación en la fase entre las señales que llegan al receptor.

Según la fase con la que se sumen ambas señales (asumiendo un coeficiente de reflexión igual a -1) tendremos una ganancia de 6 dB (suma en fase) con respecto a la propagación del rayo directo, o un nulo de campo (suma en oposición de fase),



Efecto del suelo: reflexión en la Tierra

Para un coeficiente de reflexión cualquiera tendremos la siguiente expresión del campo en el receptor (considerando solo rayo directo y reflejado, **sin considerar la aportación por onda de superficie**),

$$E_{rx} = E_d + E_r = E_d(1 + \rho \cdot \exp(-j\Delta\phi)) = E_d \left(1 + \rho \cdot \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda} \Delta R\right) \right)$$

donde se ha considerado que la atenuación por caminos es la misma para ambos rayos, y las variaciones se encuentran en el coeficiente de reflexión ρ y en la fase debida a la diferencia de caminos $\Delta\phi$. Esta fase depende de la diferencia de caminos $\Delta R = R_2 - R_1$, y de la longitud de onda

$$|E_{rx}| = 2|E_d| \operatorname{sen}\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) = 2|E_d| \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta R}{2}\right) = 2|E_d| \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d}\right)$$

donde se ha aplicado $\Delta R = 2h_T h_R / d$,

Efecto del suelo: reflexión en la Tierra

En la Fórmula de Friis la potencia variará de forma inversamente proporcional a la distancia elevado a cuatro, en lugar de la distancia al cuadrado tal como lo hace el rayo directo (espacio libre).

$$\frac{P_{rx}}{P_{tx}} \approx \frac{(h_T h_R)^2}{d^4} G_T G_R$$

Se ve que elevar las antenas lo más posible, además de aumentar la visibilidad, reduce las pérdidas de propagación

Ejemplo. Reflexión en el suelo

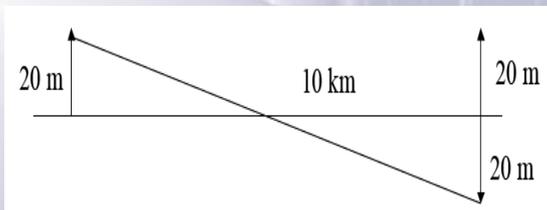
Ejemplo: Reflexión en el suelo

Considere un radioenlace a 5.625 GHz de corto alcance ($d = 10 \text{ Km}$) sobre una llanura que utiliza como antenas pequeños reflectores, de unas 20λ de diámetro, situados sobre sendas torres de 20 metros de alto. Considerando que el coeficiente de reflexión es igual a $\rho = -0.5$, calcule en cuánto cambia la amplitud del campo incidente sobre la antena receptora respecto al caso en que la propagación fuera en espacio libre.

El campo total será la suma del campo directo y el campo reflejado en el suelo. Para antenas de este tamaño, y con esta distancia y alturas de antenas la ganancia de las antenas es igual para el rayo directo que para el rayo reflejado. Del mismo modo la amplitud del campo de ambos rayos no varía, variando únicamente la fase. Por lo tanto el campo será:

$$\vec{E} = \vec{E}_d + \vec{E}_r = \vec{E}_d \left(1 + \rho \cdot e^{-jk_o \Delta R} \right)$$

ΔR es la diferencia de caminos entre los dos rayos



$$\Delta R(\text{m}) = \sqrt{10000^2 + 40^2} - 10000 \quad \text{y} \quad \lambda = c/f$$

Operando se tiene: $\vec{E} = \vec{E}_d \left(1 - 0.5 \cdot e^{-j3\pi} \right) = 1.5\vec{E}_d$, por lo que la amplitud del campo varía:

$$20 \log 1.5 = 3.5 \text{ dB} \text{ (ganancia con respecto a espacio libre)}$$

Efecto del Suelo: difracción en obstáculos

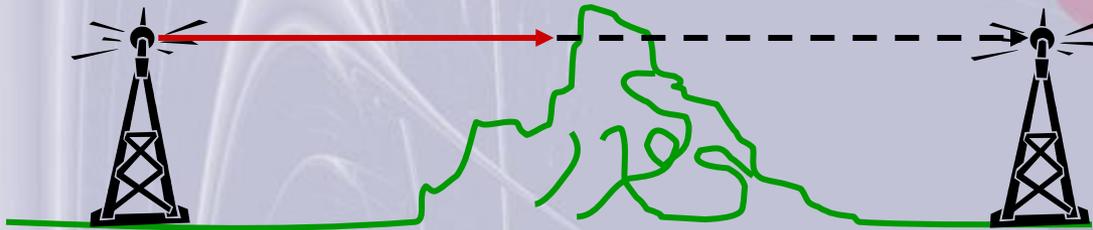
Cuando las ondas electromagnéticas inciden sobre un obstáculo, se difractan.

Este fenómeno permite explicar la presencia de ondas electromagnéticas detrás de irregularidades del terreno, como montañas, edificios, la propia curvatura de la Tierra..., aunque no exista estrictamente visibilidad directa entre transmisor y receptor.

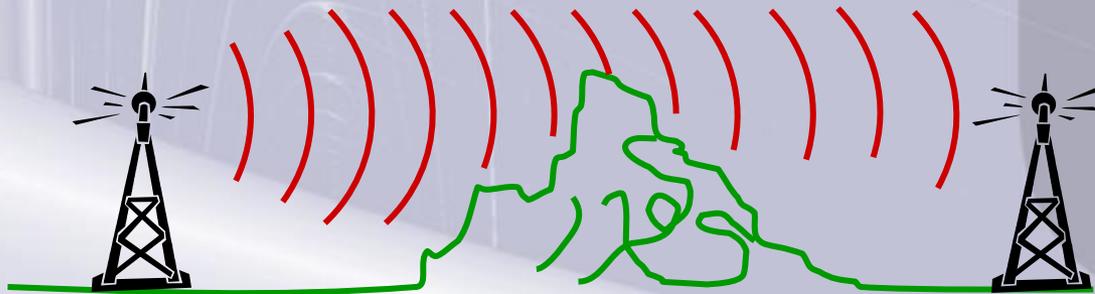
Sin embargo, las atenuaciones son muy superiores a las propias de espacio libre, con lo que la señal que llega al receptor es más débil.

Efecto del Suelo: difracción en obstáculos

- ¿Qué sucede cuando la propagación se encuentra un obstáculo?
 - Desde el punto de vista de la óptica geométrica no hay propagación.

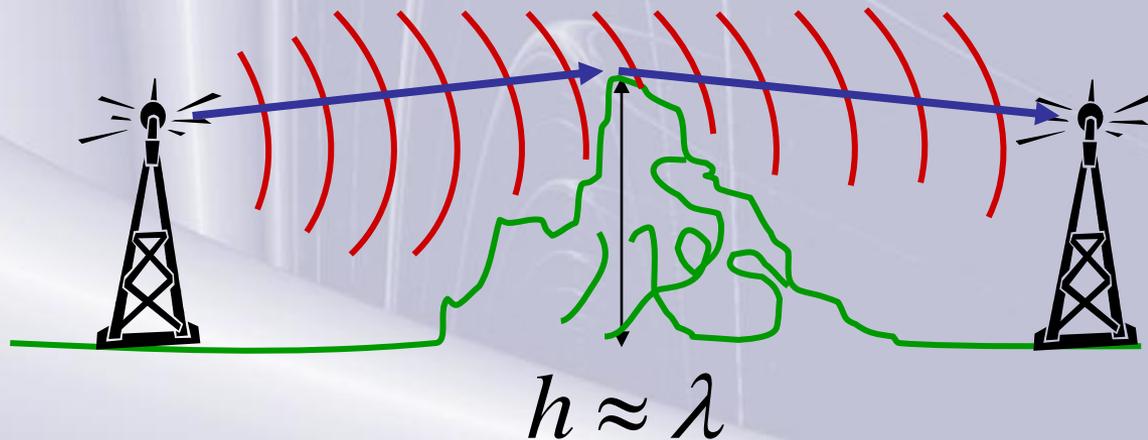


- Para un modelo más exacto se comprueba que sí hay propagación (a pesar de no tener visión directa).



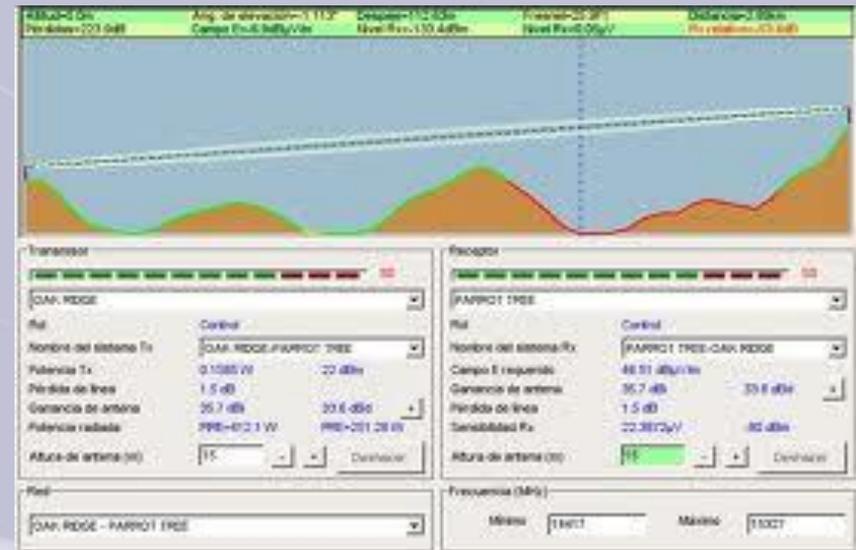
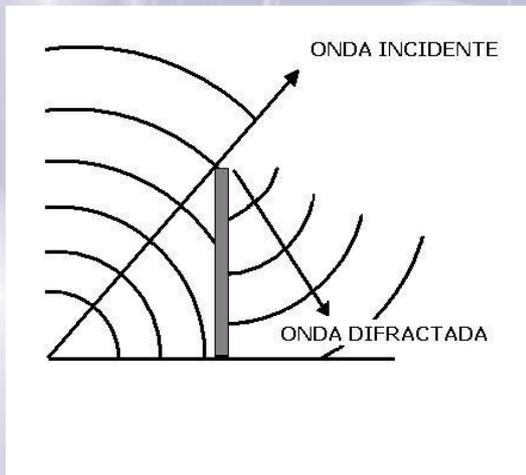
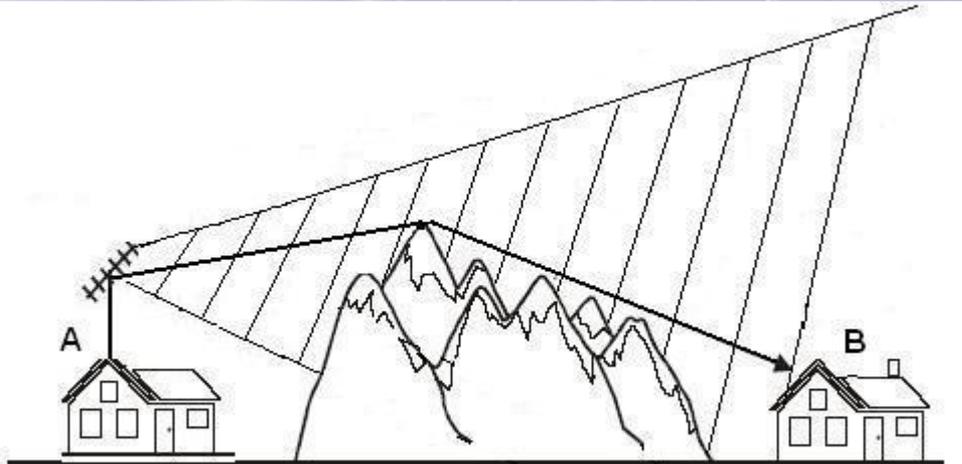
Efecto del Suelo: difracción en obstáculos

- Difracción: distorsión (**dispersión y curvado**) de una onda **debido a un obstáculo** cuyas dimensiones son comparables a la longitud de onda.
- Cuando el objeto tiene dimensiones mayores a la longitud de onda, la propagación sigue siendo rectilínea.



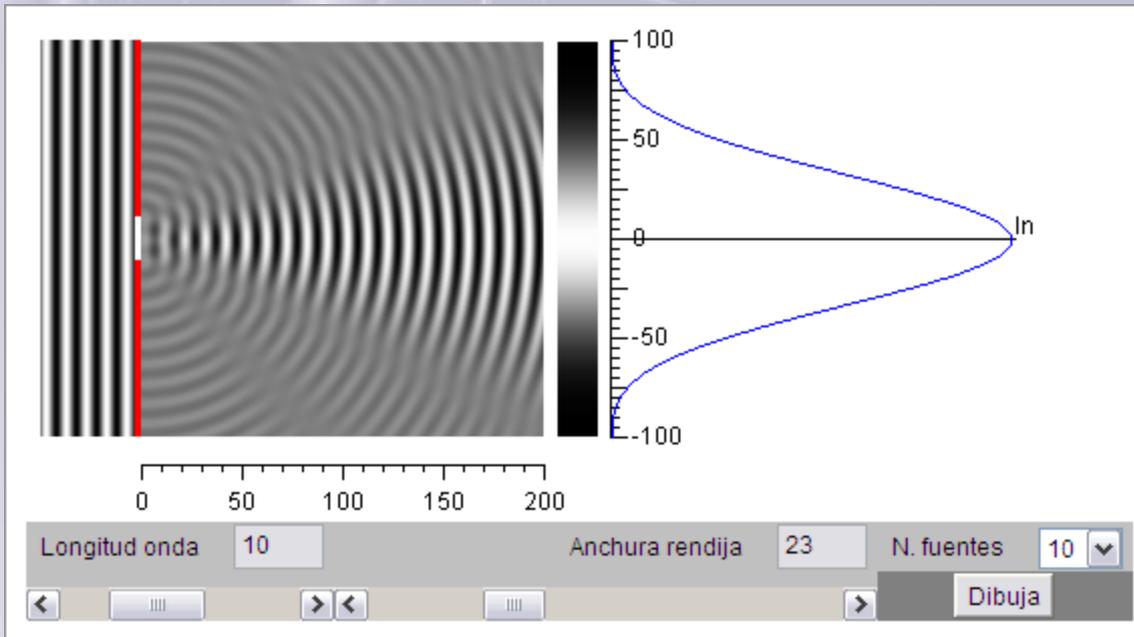
A pesar de que no existe línea de visión directa, la señal llega de una antena a otra a través de la difracción en los obstáculos

Difracción en obstáculos. Cobertura.



Difracción

- Iluminación en una rendija



<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/difraccion/difraccion.html>

Zonas de Fresnel

El fenómeno de difracción de las ondas electromagnéticas es el mismo que se produce con las ondas de luz.

En el análisis de la difracción hay que tener en cuenta el volumen que ocupa la onda, definiendo los elipsoides de Fresnel, con aquellos puntos C del espacio que cumplen que: $TC+CR=TOR+n\lambda/2$, siendo n un número natural ($n=1,2, \dots$)

Las intersecciones de estos elipsoides con un plano P , situado sobre el obstáculo, definen las llamadas **zonas de Fresnel**.

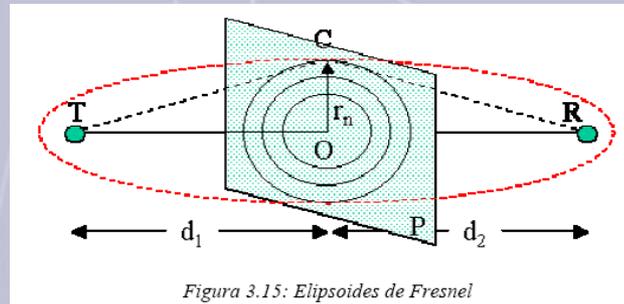


Figura 3.15: Elipsoides de Fresnel

En sistemas de radiocomunicaciones es suficiente con dejar visible una zona de Fresnel sobre cada obstáculo para que el efecto de la difracción sea despreciable.

Zonas de Fresnel

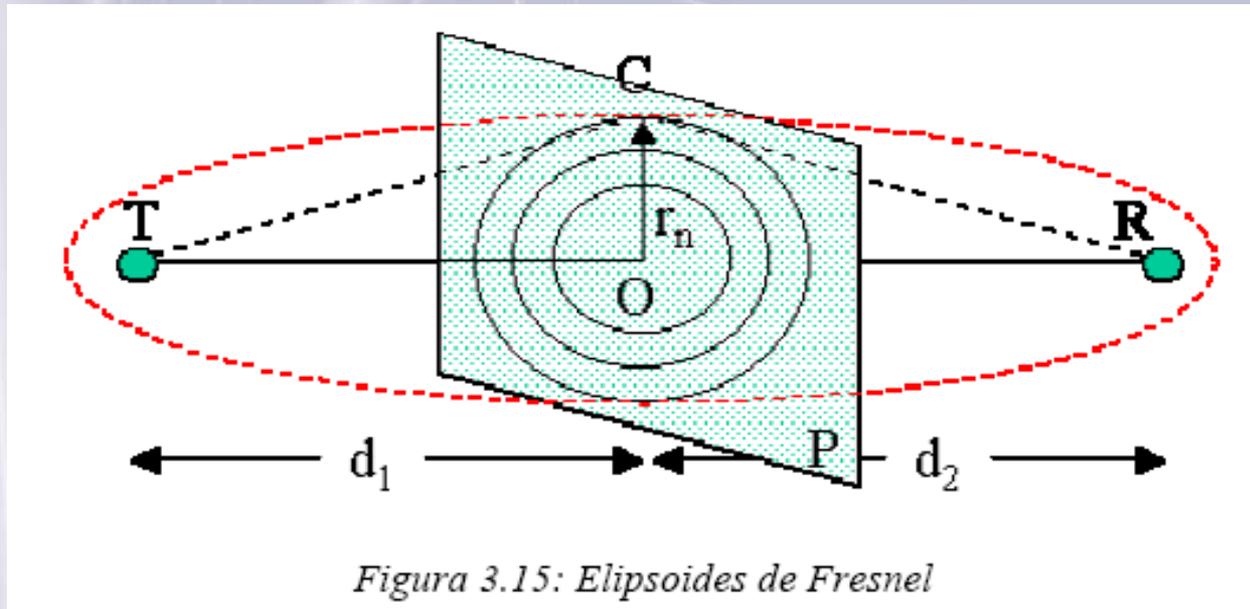
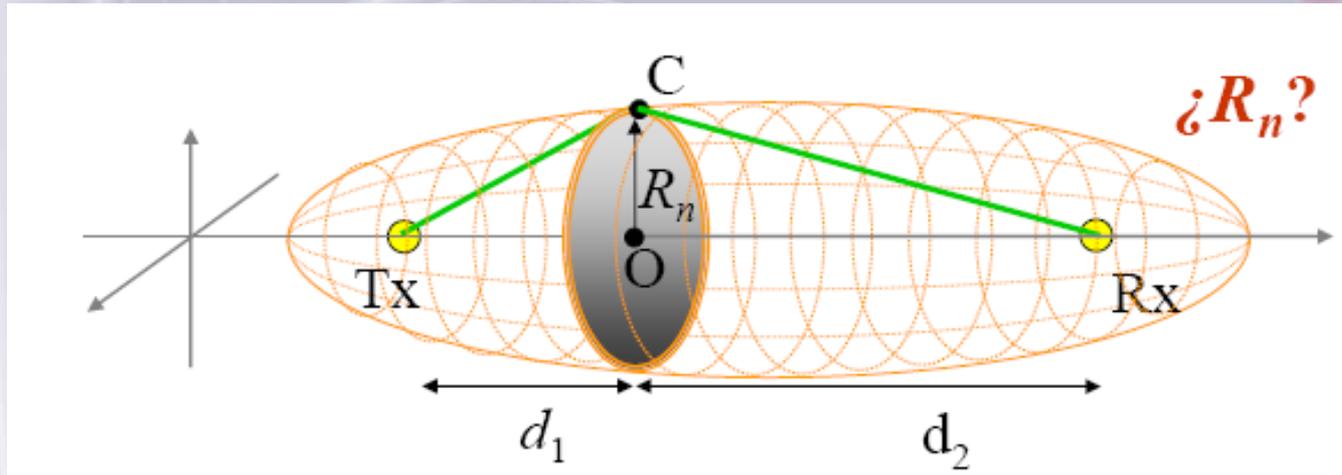


Figura 3.15: Elipsoides de Fresnel

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

Difracción: Zonas de Fresnel

- Cálculo de las zonas de Fresnel

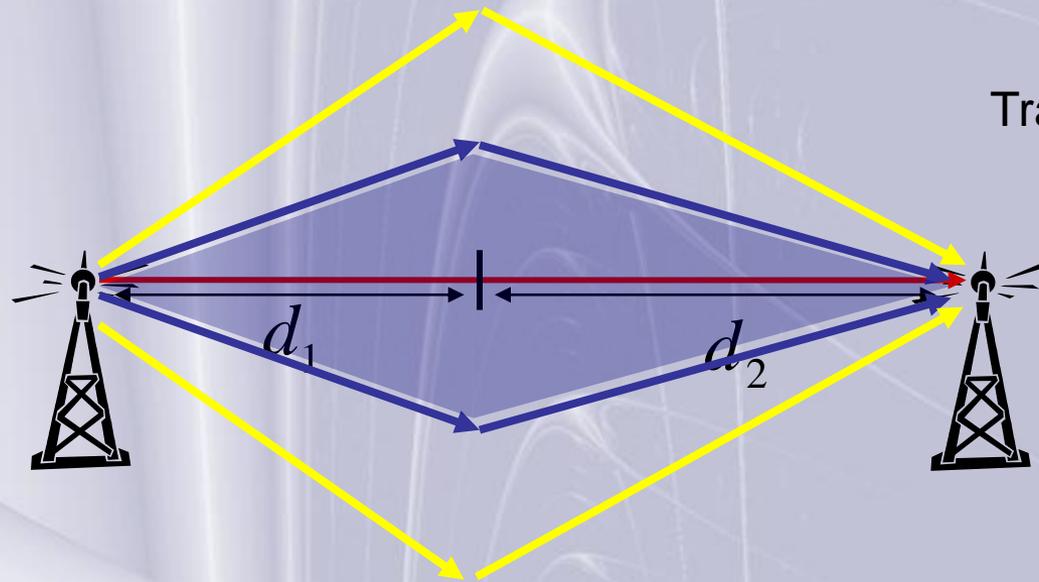


- Desfase: $T_x C R_x - T_x R_x = n\pi = n \frac{\lambda}{2}$

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

Efecto del Suelo: difracción en obstáculos

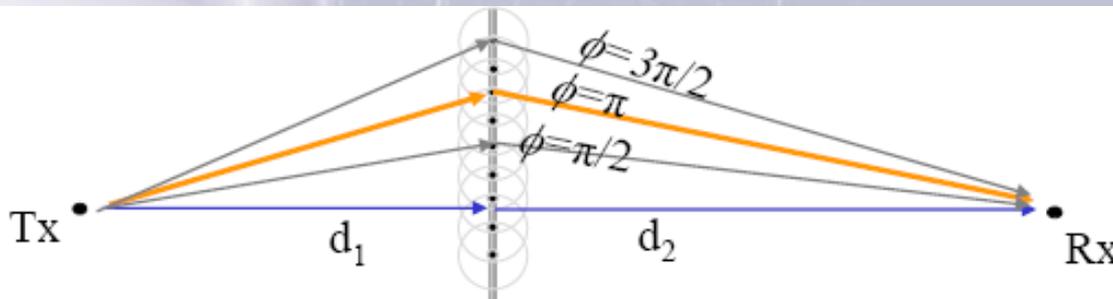
- Zonas de fresnel:** sucesión de máximos (interferencia constructiva) y mínimos (interferencia destructiva).



Trayectorias con **fases opuestas** marcan las distintas zonas

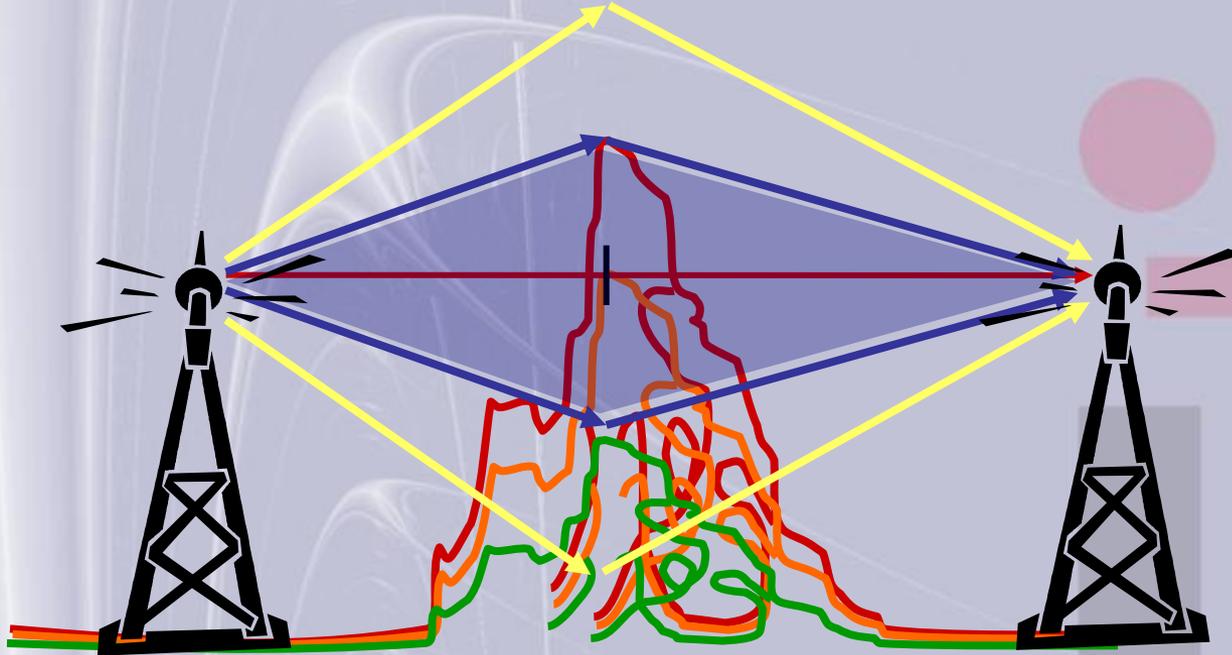
1ª Zona de Fresnel:
Constructiva
(desfase $< \pi$)

2ª Zona de Fresnel:
Destructiva
($\pi < \text{desfase} < 2\pi$)



Efecto del Suelo: difracción en obstáculos

- ¿Cómo afecta un obstáculo?



EFEECTO POSITIVO: eliminación contribución destructiva

EFEECTO NEGATIVO: enlace viable

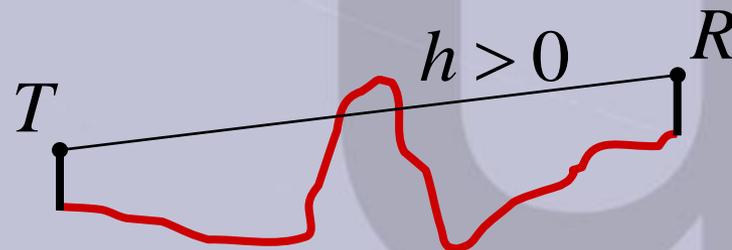
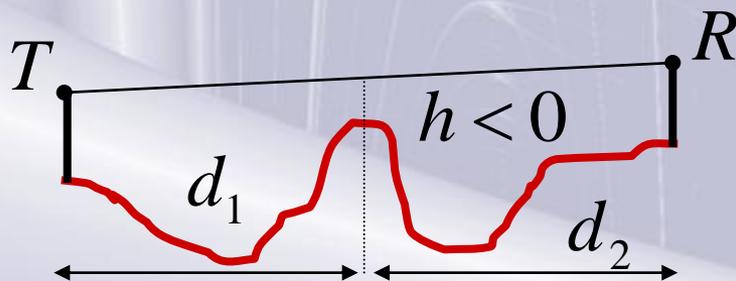
EFEECTO MUY NEGATIVO

Efecto del Suelo: difracción en obstáculos

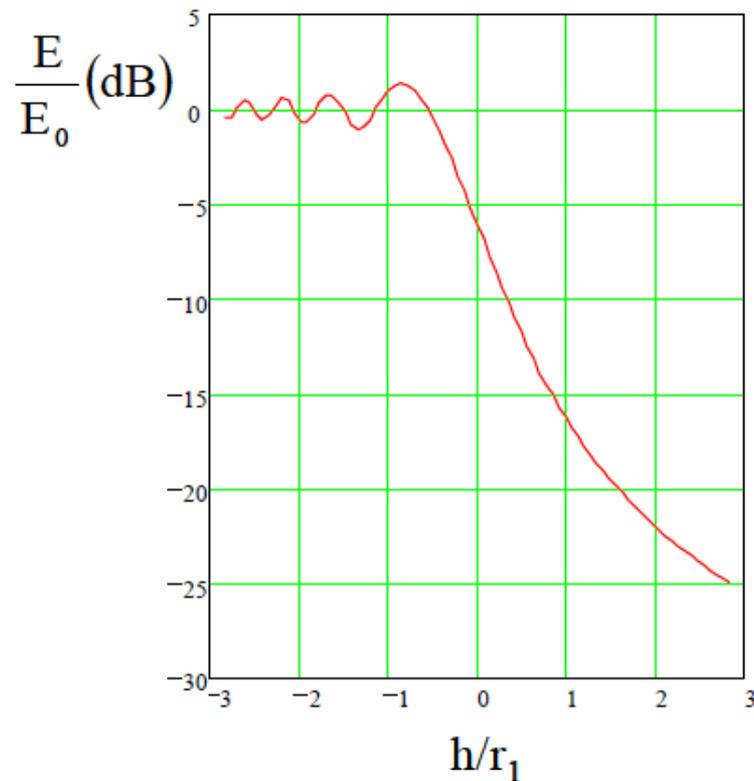
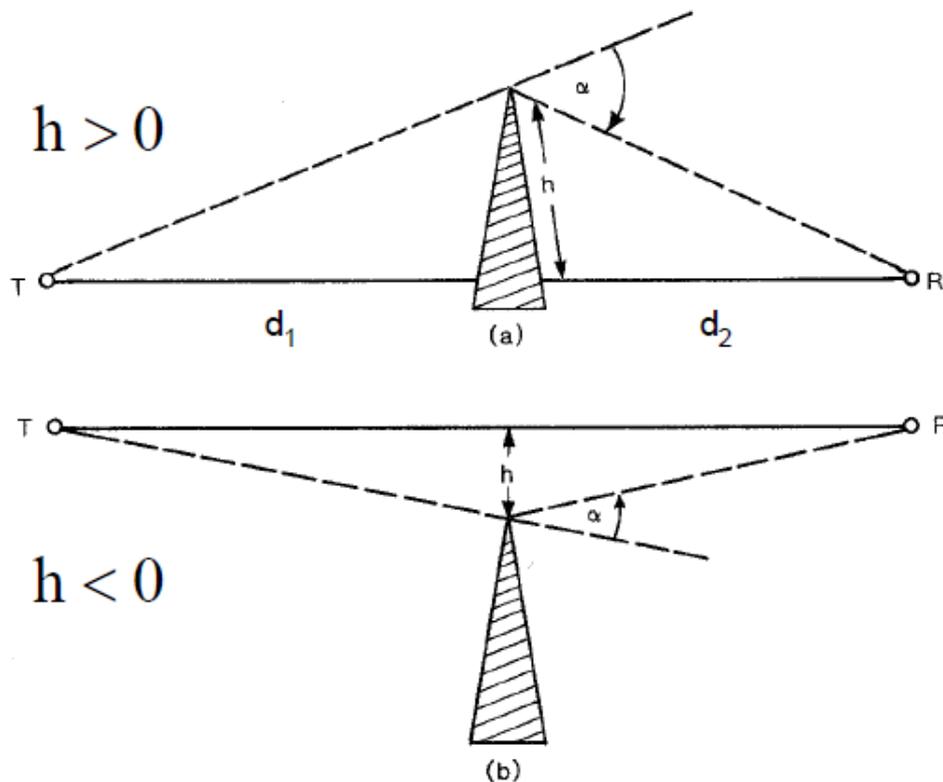
- Basta **trabajar** en el entorno de la **primera zona de Fresnel**
 - Se considera visibilidad directa si no existe ningún obstáculo en la primera zona de Fresnel

$$R_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d}}$$

- Cuando el rayo pasa cerca del obstáculo o es interceptado por éste, experimenta una pérdida debida a la difracción.
 - **Despejamiento**: distancia h entre el rayo y el obstáculo

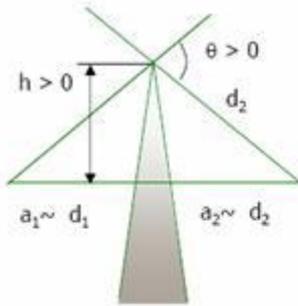


Efecto del Suelo: difracción en obstáculos



En cuanto se libera una zona de Fresnel ($h/r_1 = -1$) el efecto de la difracción es despreciable. De igual modo, en cuanto se oculta una zona de Fresnel ($h/r_1 = 1$) el campo recibido está atenuado en más de 16 dB con respecto al de espacio libre. En la parte izquierda de la gráfica, el rizado del campo con respecto al espacio libre se debe a las contribuciones en fase o en oposición de fase de cada una de las zonas de Fresnel.

En radioenlaces suele trabajarse en el rango: $-0.6 < h/r_1 < 0.5$

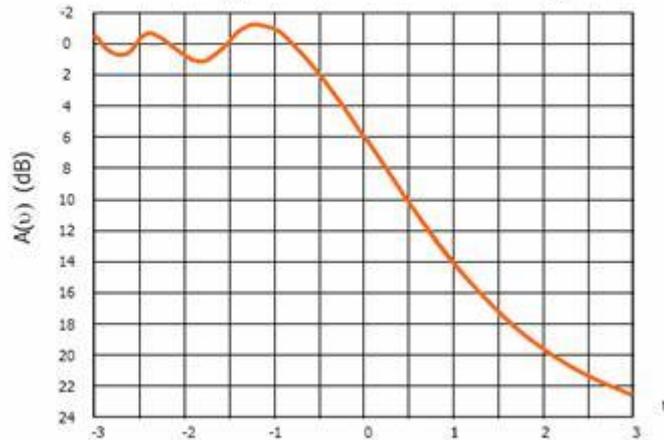
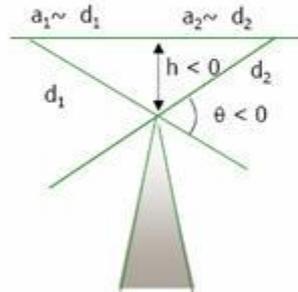


$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$

h : altura de la cima sobre la línea que une los extremos. Si queda debajo $h < 0$.
 d_1, d_2 : distancias de los extremos a la arista

Todo en las mismas unidades

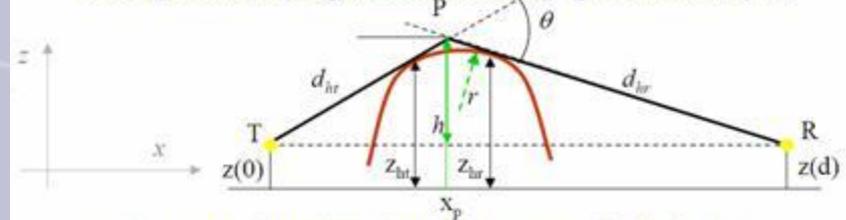
$$A(v) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right); \text{ para } v > -0.7$$



$$L(\nu) = \begin{cases} -20 \log(0.5 - 0.62\nu) & -0.8 < \nu < 0 \\ -20 \log(0.5 \exp(-0.95\nu)) & 0 < \nu < 1 \\ -20 \log(0.4 - \{0.1184 - (0.38 - 0.1\nu)^2\}^{1/2}) & 1 < \nu < 2.4 \\ -20 \log(0.225/\nu) & \nu > 2.4 \end{cases}$$

Cuando los obstáculos son redondeados la atenuación por filo se corrige añadiendo otros factores de pérdidas que tienen en cuenta el ángulo de visión, los radios de redondeo, las distancias del obstáculo a transmisor y receptor

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



- En este caso interviene el radio de curvatura del obstáculo

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

- La altura

$$h = x_p \left(\frac{z_{ht} - z(0)}{d_{ht}} - \frac{z(d) - z(0)}{d} \right) \text{ donde } x_p = \frac{d \cdot \beta}{\theta}$$

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

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

$$A = L_D(v) + T(m, n)$$

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

- Para $mn < 4$:

$$T(m, n) = 7,3m^{1/2} - (2 - 12,5n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \text{ (dB)}$$

- Para $mn > 4$

$$T(m, n) = -6 - 20 \log mn + 7,2m^{1/2} - (2 - 17n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \text{ (dB)}$$

Efecto del Suelo: difracción en obstáculos

- **El cálculo teórico** de las pérdidas debidas a la difracción en obstáculos del terreno es muy **complejo**.
- En la práctica se recurre a **métodos aproximados**, que proporcionan un grado de exactitud suficiente.
- Estos métodos dependen del **tipo de terreno** entre el transmisor y el receptor:
 - **Terreno poco ondulado**: irregularidad pequeña, modelo de tierra curva.
 - **Obstáculos aislados**: unos o más obstáculos, agudos o redondeados.
 - **Terreno ondulado**: pequeñas colinas no dominantes.

***A*tenuación**

La atmósfera apenas presenta atenuaciones por debajo de los 3 GHz.

En frecuencias superiores las atenuaciones son debidas a efectos tales como lluvia, niebla y resonancias moleculares.

Atenuación Troposférica

- Tipos de atenuaciones
 - Absorción atmosférica.
 - Las moléculas de oxígeno y agua absorben EM. Esta atenuación solo tiene importancia a partir de los 10 GHz
 - Hidrometeoros. (Lluvia, nieve, niebla, granizo...)
 - Concentraciones de agua o partículas de hielo que existen en la atmósfera. Provocan atenuación sobre las Ondas pues absorben y dispersan la energía. La atenuación solo es importante a partir de los 6 GHz.
 - Vegetación.

Atenuación por gases moleculares

La atenuación por los gases moleculares (oxígeno y vapor de agua) se debe a la existencia de frecuencias de resonancia en la estructura electrónica de las diversas moléculas de la atmósfera.

En estas frecuencias el gas absorbe energía y produce una fuerte atenuación. El nivel de atenuación dependerá, además de la frecuencia, de la concentración de gases, y por lo tanto de la altura. Por lo tanto, la atmósfera es selectiva en frecuencia, produciendo unos máximos y mínimos de atenuación.

Para aplicaciones de radioenlaces se utilizan las ventanas de atenuación mínima, en torno a 35 GHz y 94 GHz.

Para otras aplicaciones las fuertes atenuaciones permiten utilizar radiocomunicaciones de corto alcance casi indetectables, como el caso de comunicaciones militares seguras.

Atenuación por gases

Atenuación por gases y vapores atmosféricos. Debida a la **absorción de energía electromagnética** por las moléculas de O_2 y H_2O .

- Importante para $f > 10$ GHz.
- En trayectos poco inclinados, próximos al suelo, para una distancia d :

$$A_a = \gamma_a \cdot d$$

donde γ_a es la atenuación específica (dB/m), que se puede desglosar:

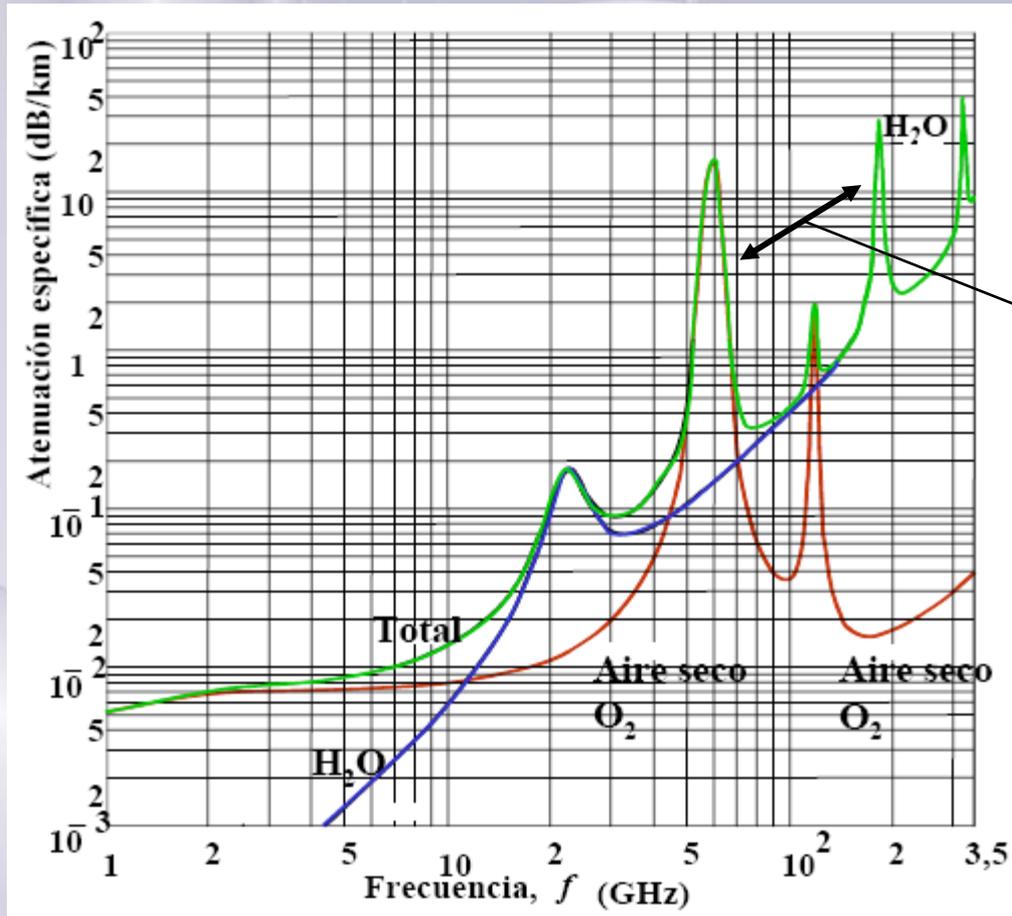
$$\gamma_a = \gamma_o + \gamma_w$$

Oxígeno

Vapor de agua

Atenuación por gases

- Atenuación específica: γ_a

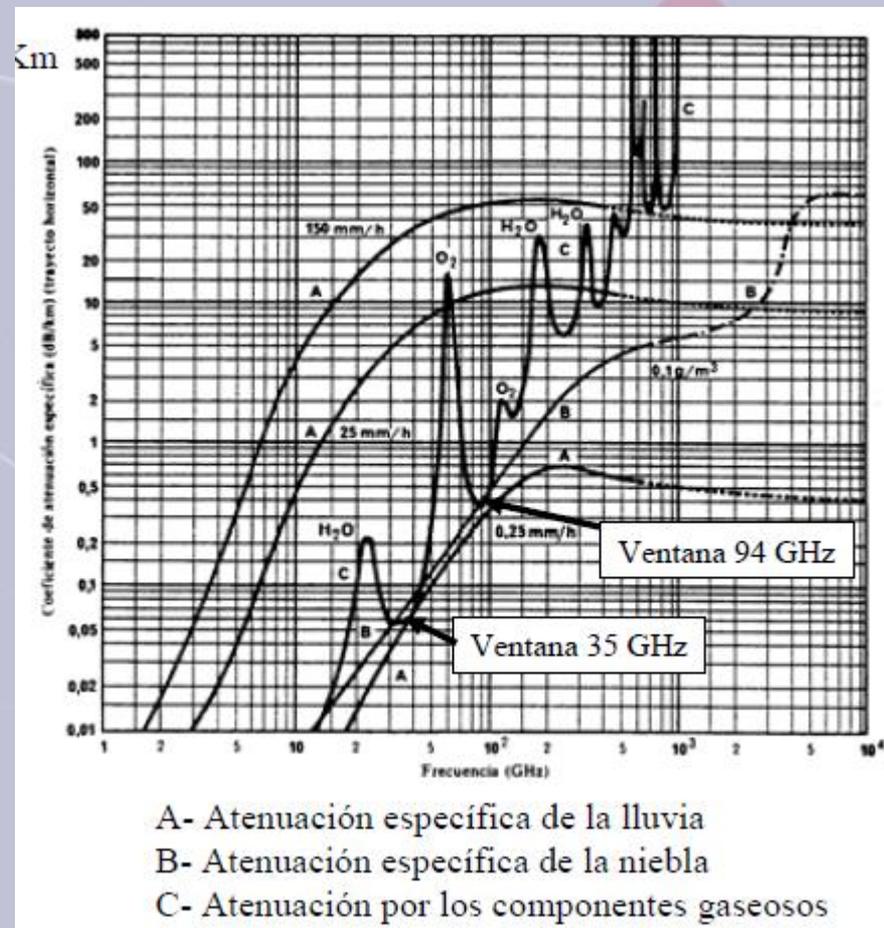


Temperatura: 15°C
Presión: 1023 hPa
Vapor de Agua: 7.5 g/m³

Ventanas espectrales

Atenuación por niebla

La atenuación por niebla se suele medir en función de la intensidad de la misma expresada en g/m³. Presenta gran incidencia en las bandas de milimétricas, infrarrojos y superiores.



Atenuación por lluvia

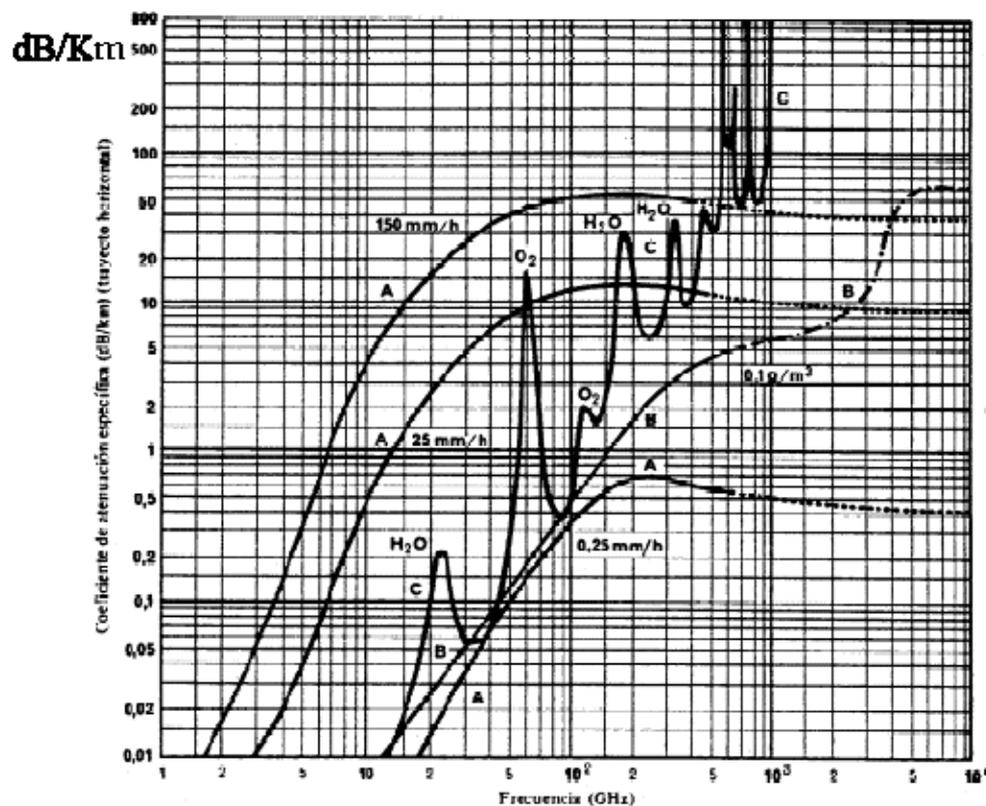
La atenuación por lluvia depende del tamaño de las gotas y de su deformación al caer, pero sobre todo de la cantidad global de agua en el aire.

Debido a la dificultad de medir los primeros parámetros se expresa en función de la intensidad de lluvia medida en mm/h o litros/hora.

La atenuación se produce por la disipación por efecto Joule debida al comportamiento del agua como dieléctrico con pérdidas, y a la dispersión de la energía en direcciones diferentes a la de propagación que producen las propias gotas.

Esta atenuación varía con la frecuencia hasta unos 100 GHz y el UIT-R proporciona gráficas de atenuación en dB/km para distintos niveles de lluvia. A la hora de diseñar un radioenlace se consideran las estadísticas de lluvia en la zona, y se asegura un servicio fiable un porcentaje de tiempo dado (típicamente mayor del 99%).

Atenuaciones: lluvia, niebla y gases



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

Atenuación por lluvia (I)

Atenuación por lluvia. En enlaces troposféricos y satelitales, existe una componente de atenuación por lluvia (UIT-R P.838).

- Importante para $f > 6$ GHz.
- Atenuación por lluvia rebasada durante un porcentaje de tiempo $p\%$

$$A(R, p) = \gamma(R, p) \cdot d_{ef} \rightarrow \text{longitud efectiva}$$

atenuación específica (dB/km)
para intensidad de lluvia R_p (mm/h)
y el porcentaje de tiempo $p(\%)$

$$\gamma = k \cdot R_p^\alpha \rightarrow \left. \begin{matrix} k \\ \alpha \end{matrix} \right\} \begin{matrix} \text{dependen de } f \text{ y} \\ \text{de la polarización} \end{matrix}$$

$$d_{ef} = \frac{d}{1 + d / d_0}$$



$$d_0 = 35 \cdot e^{-0.015R_{0.01}}$$

$$R_{0.01} = 100(\text{mm/h})$$

Atenuación por lluvia(II)

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

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

Porcentaje de tiempo p(%)	Valores de R (mm/h) Zona	
	H	K
1	2	1,5
0,3	4	4,2
0,1	10	12
0,03	18	23
0,01	32	42
0,003	55	70
0,001	83	100

Frecuencia (GHz)	k_H	k_v	α_H	α_v
1	0,0000387	0,0000352	0,912	0,880
2	0,000154	0,000138	0,963	0,923
4	0,000650	0,000591	1,121	1,075
6	0,00175	0,00155	1,308	1,265
7	0,00301	0,00265	1,332	1,312
8	0,00454	0,00395	1,327	1,310
10	0,0101	0,00887	1,276	1,264
12	0,01880	0,0168	1,217	1,200
15	0,0367	0,0335	1,154	1,128
20	0,0751	0,0691	1,099	1,065
25	0,124	0,113	1,061	1,030
30	0,187	0,167	1,021	1,000
35	0,263	0,233	0,979	0,963
40	0,350	0,310	0,939	0,929
45	0,442	0,393	0,903	0,897
50	0,536	0,479	0,873	0,868
60	0,707	0,642	0,826	0,824
70	0,851	0,784	0,793	0,793
80	0,975	0,906	0,769	0,769
90	1,06	0,999	0,753	0,754
100	1,12	1,06	0,743	0,744
120	1,18	1,13	0,731	0,732
150	1,31	1,27	0,710	0,711
200	1,45	1,42	0,689	0,690
300	1,36	1,35	0,688	0,689
400	1,32	1,31	0,683	0,684

Atenuación por lluvia (III)

Atenuación por lluvia: despolarización. La lluvia, además de atenuar la señal, produce un efecto de despolarización sobre la misma, que se traduce en un aumento en el **factor de pérdidas por despolarización**.

$$L_{polarización} = \left| \bar{e}_{tx} \cdot \bar{e}_{rx}^* \right|^2$$

Atenuación por lluvia (IV)

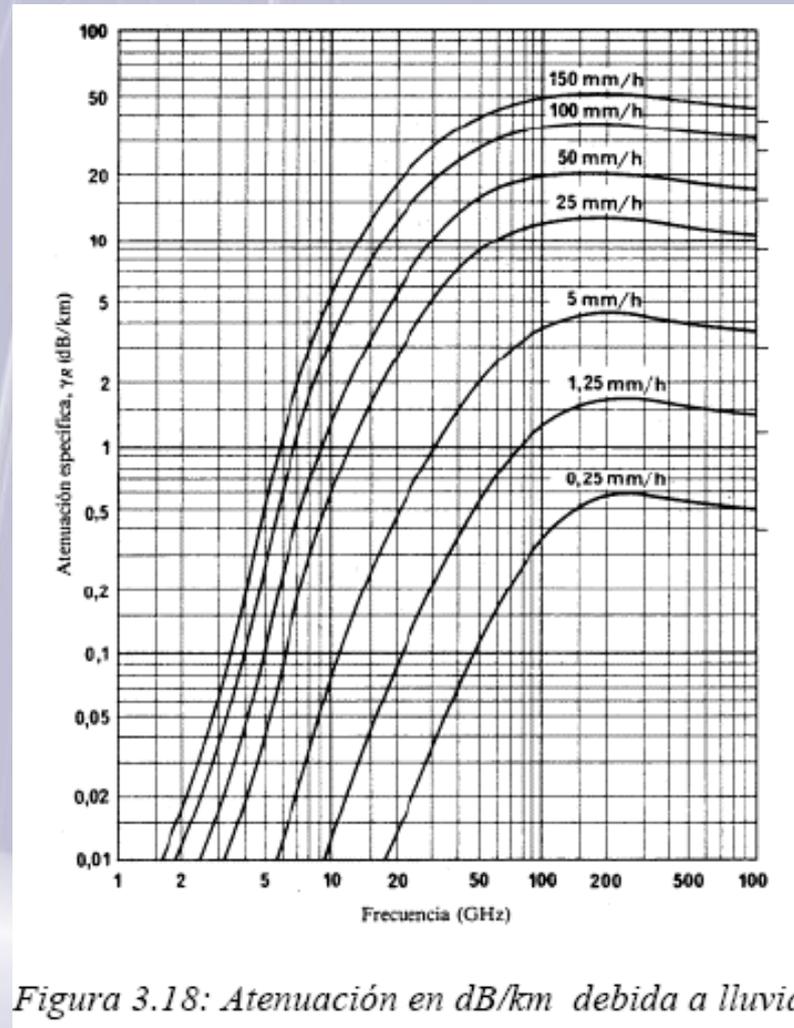


Figura 3.18: Atenuación en dB/km debida a lluvia

Ejemplo: Atenuación por gases y lluvia

Ejemplo: Atenuación por gases e hidrometeoros

Un radioenlace de 1.5 Km a 60 GHz utiliza sendas antenas parabólicas de 1 metro de diámetro, que poseen eficiencias de 0.7. La antena transmisora radia una potencia de 100 W hacia el horizonte.

¿Cuánto valen las pérdidas adicionales respecto del mismo radioenlace en condiciones de vacío (espacio libre) cuando el trayecto de propagación está bajo una lluvia de 25 mm/h de intensidad? Utilice las Figuras anteriores

La atenuación adicional se da por atenuación de gases y atenuación por lluvia en el trayecto de 1.5 km.

En la gráfica de gases a 60 GHz se tiene una atenuación adicional de 15 dB/km.

En la gráfica de lluvia de 25 mm/hora a 60 GHz se tiene una atenuación adicional de 10 dB/km

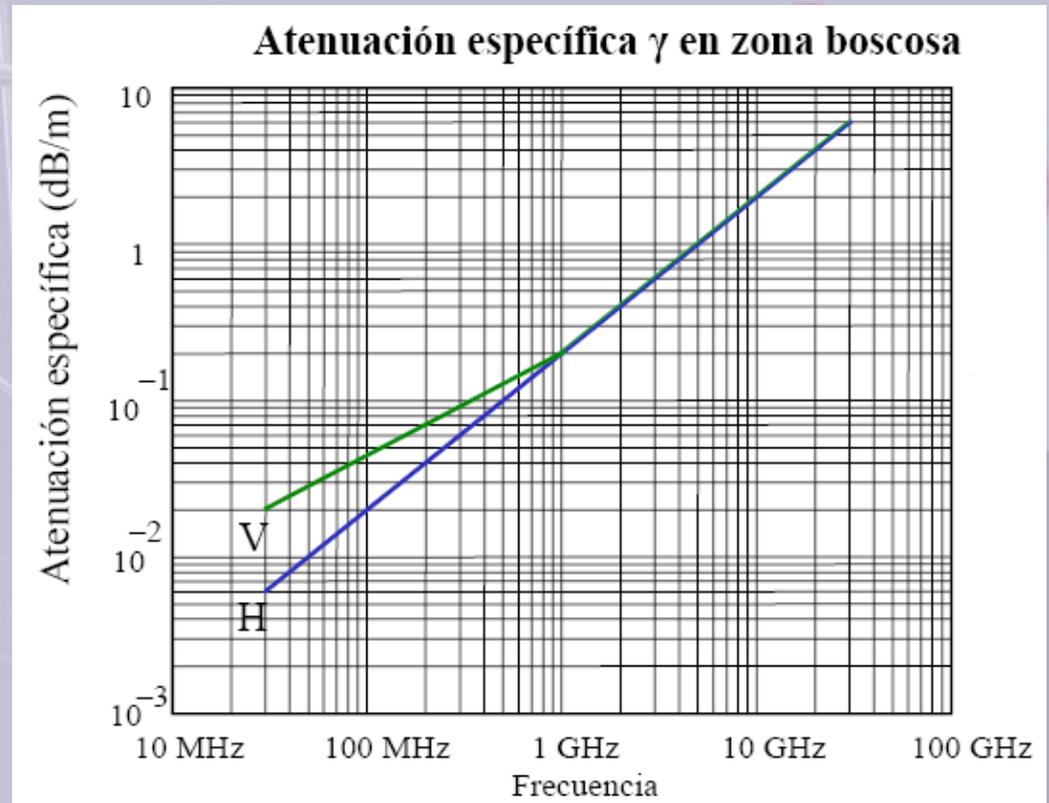
En total se tiene: $(15+10) \text{ dB/km} \times 1.5 \text{ km} = 37.5 \text{ dB}$

Métodos Empíricos de Propagación

- Los **modelos analíticos** presentados anteriormente basados en la óptica geométrica (teoría de rayos) son útiles en **comunicaciones punto a punto**.
- Pero en radiodifusión o comunicaciones móviles (com. punto-zona) la metodología analítica es **muy costosa**.
- Se recurre por ello a **métodos empíricos** para calcular la atenuación de un enlace.
 - A partir de fórmulas o gráficas obtenidas **a base de múltiples mediciones** (empíricas).
 - Proporcionan una **estimación rápida** pero un gran margen de error.
 - Actualmente se emplean programas informáticos.

Atenuación por vegetación (I)

1) Atenuación por vegetación: UIT-R P.833. Si entre el transmisor y el receptor se encuentra una **zona boscosa**, hay una **pérdida adicional** por penetración de las ondas a través de la vegetación



Polarización:

- Vertical

- Horizontal

Atenuación por vegetación (II)

- Cuando **ni el transmisor ni el receptor están en zonas arboladas**
 - pero hay una parte del recorrido (d_{veg}) que sí
 - y la frecuencia es inferior a 1GHz

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

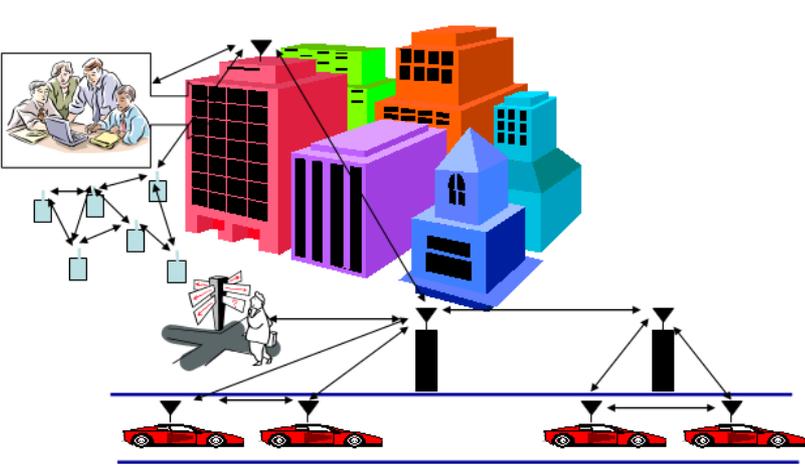
- Cuando el **transmisor o el receptor están en zonas arboladas**
 - y la parte del recorrido en bosque es d
 - si L_m es la pérdida si todo el recorrido fuera en bosque

$$L_{veg} = L_m \left[1 - e^{-\frac{d \cdot \gamma}{L_m}} \right]$$

- Cuando esta **atenuación** es **alta** (ej. frecuencias altas)
 - debe considerarse la posibilidad de difracción
- Cuando $f > 1\text{GHz}$: considerar difracción, dispersión, reflexiones,...

Desvanecimientos (I)

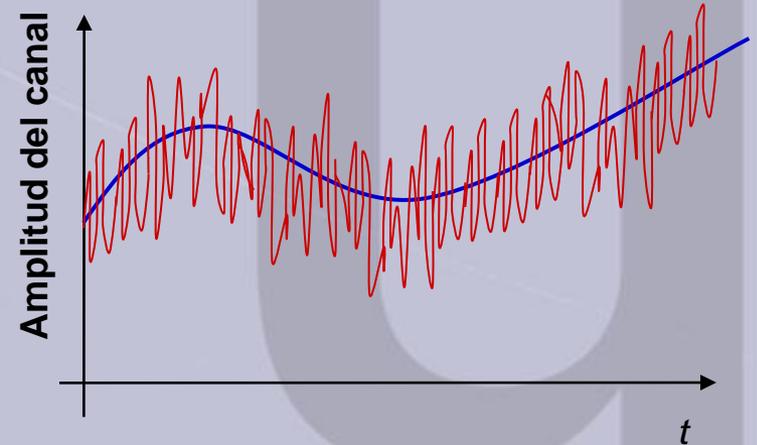
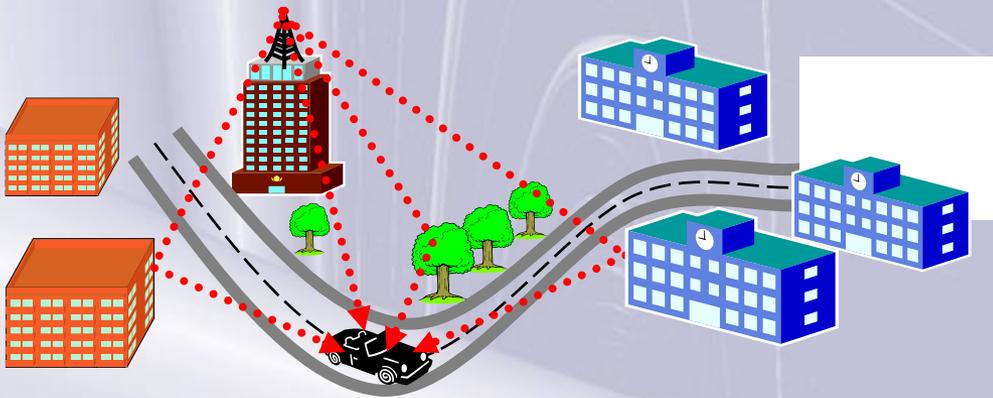
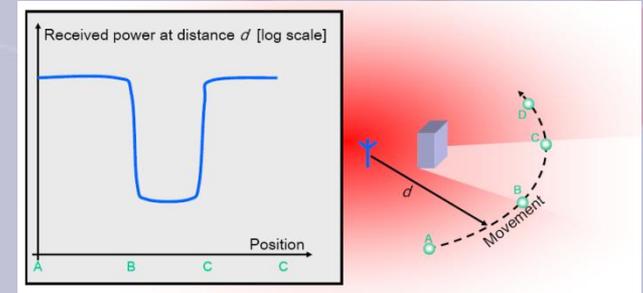
- Cuando la señal transmitida se propaga a través de **canales móviles inalámbricos**:



- Se requiere un **modelado matemático** con suficiente complejidad para recoger la amplia gama de efectos existentes
 - Se degradan las prestaciones de comunicación en relación a la propagación a través de un medio guiado
- Efectos nocivos del canal móvil inalámbrico: **desvanecimientos del canal** (**distancia, reflexiones, obstáculos**), interferencia de otras fuentes, **ruido aditivo...**

Desvanecimientos (II)

- Desvanecimientos de canal inalámbrico: el terminal está en movimiento y recibe múltiples copias de la señal
- La señal recibida sufre variaciones a:
 - Gran escala (línea azul)
 - Pequeña escala (línea roja)



Desvanecimientos (III)

1) Desvanecimiento a Gran Escala (DGE).

- Las variaciones de este tipo de desvanecimientos ocurren a **velocidad humana**: decenas de segundos o minutos
- Determinan la **media de la atenuación** de la transmisión y, por tanto, de la potencia recibida
 - **Refracción y Reflexión**
 - **Difracción**
 - **Dispersión (rugosidad)**
 - **Efecto de guía de ondas**

Desvanecimientos (IV)

2) Desvanecimientos a Pequeña Escala (DPE)

- La amplitud en el receptor tiene **rápidas variaciones** debido a la interferencia constructiva y destructiva de los múltiples rayos.
- La variabilidad depende de **varios factores**:
 - Entornos que dispersan la señal (paredes, obstáculos)
 - Movimiento del transmisor, receptor y/o de los propios obstáculos
- Los DPE son muy **importantes** para el **análisis y diseño** de sistemas de **comunicación inalámbricos**
 - *Propagación multicamino.*
 - *Entornos que dispersan la señal (paredes, obstáculos)*
 - *Movimiento del transmisor, receptor*
 - *Movimiento del entorno de propagación*