

Capítulo 3: Propagación

Parte 1: Fenómeno físico y modelos de propagación

Con Propagación nos referimos a todo lo que ocurre en la Transmisión de energía entre Transmisor y Receptor.

Repaso de Pérdidas en el Espacio Libre:

- Fórmula en el Espacio Libre: Revisión del concepto básico
 - **Pérdidas en el Espacio Libre:** empleadas para poder predecir la fuerza de la señal recibida cuando el camino entre Transmisor y Receptor es un LOS (Trayecto de Visibilidad Directa) libre de obstáculos. SIEMPRE habrá mecanismos de espacio libre.
 - Representa una comunicación ideal entre antenas en el espacio libre, sin ninguna otra interacción.
 - Conceptos necesarios:
 - Densidad de Flujo de Potencia por una cierta fuente, en coordenadas polares: W/m^2
 - Antena (radiador) Isótropa (isotrópica): radia por igual en todas las direcciones (teórico y sólo depende de la distancia, considerando pérdidas de propagación en espacio libre y no las pérdidas asociadas a la red de trabajo donde se distribuye la antena.

$$\phi_i = \frac{P_{TX}}{4\pi d^2}$$

Aquí se aprecia que las pérdidas aumentan con la distancia, ya que dependen de ella. Es decir, pierde señal según aumenta la distancia, según aumenta la frecuencia. Aunque, cabe destacar que también habrá pérdidas adicionales, variando las componentes según el tipo de propagación.

- Ganancia Directiva: función que describe la capacidad de la antena para crear diferentes valores de Densidad de Flujo de Potencia en las diferentes direcciones en las que radia.

$$g(\theta, \phi) = \frac{\Phi(\theta, \phi)}{\Phi_i} \quad \Phi(\theta, \phi) = \frac{P_{TX} \cdot g}{4\pi d^2}$$

- Directividad: máximo valor de la Ganancia Directiva. Generalmente referido a la Ganancia de la Antena.
- PIRE (/ERP): Capacidad de un lugar transmisor de radiar (puede ser constante o una función 3D):

$$EIRP(dB) = P_{TX} + G_{ANT} - L_{BRANCHING}$$

La PIRE (dBm) de una dirección dada: nivel de potencia disponible a la entrada de la antena (dBm) + la Ganancia Directiva de la Antena Transmisora (dBi) asumiendo despreciables las pérdidas en la antena, en dicha dirección:

$$EIRP(dBm)(\theta, \phi) = P_{TX}(dBm) - L_{BRANCHING}(dB) + G_{ANT}(\theta, \phi)(dBi)$$

Donde:

- $P_{TX}(dBm)$ es la potencia que el Transmisor suministra a la red de distribución de la antena.
- Las pérdidas asociadas a la distribución de la red de trabajo de la antena sí son consideradas ($L_{BRANCHING}$).

Cabe mencionar que se da una PIRE por cada dirección. Siempre se mide en unidades de potencia (W). Éstas, pueden medirse, a su vez, en unidades logarítmicas, dBw o dBm (mW).

- Área Efectiva: en la Antena Receptora:

$$A_{e_{isotropic}} = \lambda^2/4\pi$$

$$g = 4\pi A_e / \lambda^2 \text{ for any antenna with gain } g$$

$$P_{rx} = \phi A_e$$

- Pérdidas por Espacio Libre (en decibelios):

$$L_{FSL} = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

- Considerando los valores de ganancia de las antena transmisora y receptora (lineales):

$$P_{RX}(d) = (P_{TX} G_{TX} G_{RX} \lambda^2) / (4\pi d)^2$$

- P_{TX} , es la potencia transmitida.
- $P_{RX}(d)$, es la potencia recibida.
- G_{TX} , es la ganancia de la antena transmisora.
- G_{RX} , ganancia de la antena receptora.
- d , separación entre Tx y Rx en metros.
- λ , es la longitud de onda en metros.
- Algunas figuras:
 - Usando antenas isotropas L_{FSL} y una separación entre Tx y Rx de λ metros, la atenuación es aproximadamente de 22 dB.
 - Las Pérdidas por Enlace del Satélite Geoestacionario son cercanas a 180-200 dB (dependiendo de la frecuencia).
 - Las pérdidas son logarítmicas: 20 km o 22 km de distancia no es una diferencia muy relevante en muchos caso ($20 \log(22/20)$).
 - Por ejemplo, 6 dB ocurren a 40 km.

Fenómeno Físico y Modos de Propagación:

- Las OEM se propagan a una velocidad similar a la de la luz (influenciada por las características electromagnéticas del medio).
- Para simplificar, se asume en muchas ocasiones que las señales se propagan a la velocidad de la luz: $3 \cdot 10^8$ m/s.
- El medio y los diferentes objetos que interactúan con el frente de onda afectan a la propagación.
- Los fenómenos más destacado relacionado con la propagación son:
 - Refracción.

- Reflexión.
- Difracción.
- Dispersión.
- Absorción.
- El impacto de este fenómeno depende significativamente de la frecuencia.
- En muchos casos, se da una combinación de efectos de los efectos que influirían en el camino por donde la energía se propaga, aparecen los Modos de Propagación.
- Modos de Propagación:
 - Propagación de ondas en la guía Tierra-Ionosfera
 - VLF (3 kHz- 30 kHz): En esta banda la superficie de la tierra y la ionosfera se comportan como un buen medio conductor. La distancia entre ellas (60-100 km) se encuentra en el rango de la longitud de onda y, por consiguiente, la propagación puede ser descrita como guía de ondas de pérdidas esféricas.
 - Las antenas usadas en estos sistemas son eléctricamente pequeñas y físicamente grandes.
 - En sistemas de Radionavegación (old Omega) y Telegrafía Móvil Marítima (submarinos).
 - El alcance es la tierra entera.

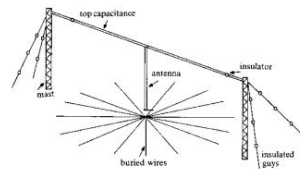
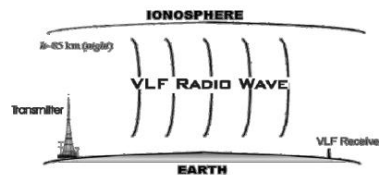
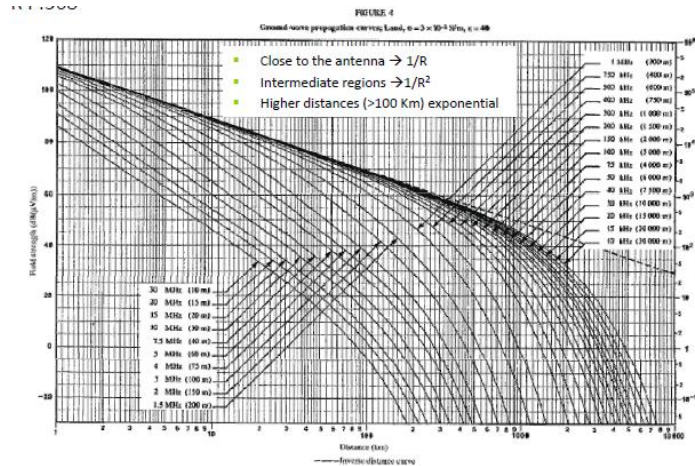
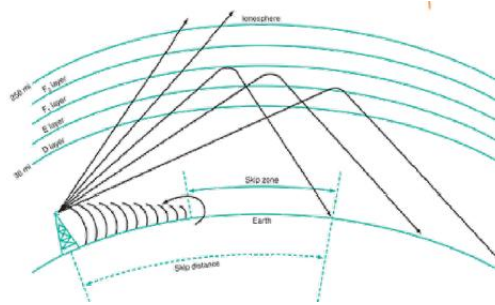


Fig. 2.14 A short vertical monopole transmitting antenna with buried conductors to reduce ground losses and top capacitance to increase the effective height.

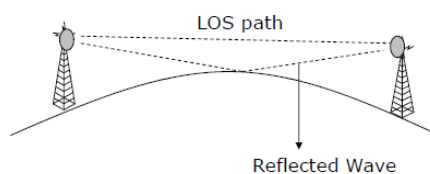
- Ondas de superficie (superficiales) (Surface Wave):
 - Mayor relevancia para frecuencias bajas (<30 MHz) MF, HF
 - Pueden propagarse sobre largas distancias (30-200 km), aún más altas en VLF.
 - Dependen de las constantes de la tierra (conductividad, permitividad):
 - El mejor medio de propagación es el mar.
 - El peor caso se da en los desiertos y áreas urbanas (baja conductividad y baja permitividad).
 - La ITU-R maneja un mapa de Conductividades para ello.
 - Las ondas polarizadas horizontalmente son atenuadas significativamente.
 - Los sistemas prácticos están polarizados verticalmente.
 - Las antenas transmisoras son dipolos $\lambda/4$ dispuestos verticalmente.
 - Referencia de la ITU-R (P.368):



- Ondas de cielo (sky waves).
 - Se dan en las bandas HF (3-30 MHz), donde las ondas de superficie tienden a ser absorbidas por la Tierra.
 - Las ondas que alcanzan la Ionosfera (100-500 km sobre la superficie de la Tierra) son refractadas y enviadas de vuelta a la Tierra.
 - La propagación no es estable y es difícil de predecir.
 - Se usan para radiodifusión y servicios aeronáuticos.

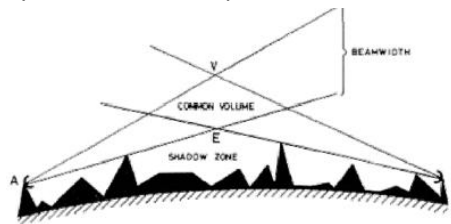


- Ondas espaciales.
 - Según crece la frecuencia (VHF), las ondas de radio se propagan como “rayos”.
 - En realidad, dichos rayos no son infinitesimales, sino una zona alrededor de la Línea de Visión Directa entre Transmisor y Receptor (elipsoides Fresnel).
 - A frecuencias mayores que UHF, el elipsoide es insignificante para enlaces cortos (unos pocos kilómetros).
 - La energía que alcanza el Receptor tiene dos componentes:
 - Onda directa: sigue la línea de visión.
 - Onda reflejada: reflejada en la tierra.
 - La refracción, difracción, dispersión y absorción son fenómenos relevantes.



- Resulta mejor si las antenas directivas están situadas en lugares elevados sobre la altura media.

- El rango es muy variable y tiene diversas aplicaciones:
 - Comunicaciones personales, a unos pocos metros.
 - Sistema de radio móvil terrestre, 1 km, aproximadamente.
 - Enlaces de líneas de visión directa (LOS), 50 km.
 - Comunicaciones vía Satélite-Tierra, 40000 km.
- El modo de propagación más común actualmente (muchos sistemas se dan sobre VHF hoy en día):
 - Radiodifusión.
 - Servicios móviles.
 - Radio-determinación.
 - Servicios fijos.
 - Comunicaciones vía satélite.
- **Dispersión troposférica.**
 - Normalmente UHF.
 - Antenas de apertura.
 - Alta potencia de Transmisión y sensibilidad en el Receptor.
 - Baja disponibilidad (sólo en comunicaciones de datos).
 - Hoy en día sólo en aplicaciones militares.



- **Dispersión meteórica (ráfaga).**
- **Modos de Propagación: Resumen:**

Band	Propagation Mode	Range	Availability	Use
VLF (3-30 kHz)	Waveguide Earth-Ionosphere	--	Continuous	Radionavigation Mobile Maritime
LF (30-300 kHz)	Surface Wave	<1000 km (water)	Continuous	Reference Freq.
MF (300-3000 kHz)	Surface Wave	<100 km	Continuous	Broadcasting
	Sky Wave (Ionosphere)	100 < d < 500 km	Night	Broadcasting
HF (3-30 MHz)	Sky Wave (3-8MHz) (3-12 MHz) (6-25 MHz)	<300 km >500 km >500km	Day Night Day	Fixed Service Mobile Service Broadcasting
	Surface Wave	<100 km	Continuous	Broadcasting

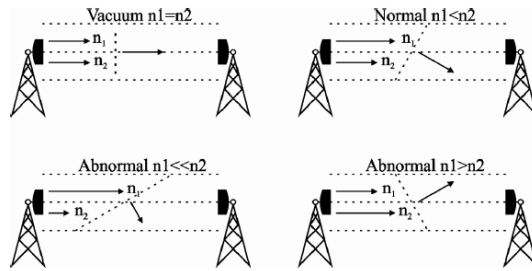
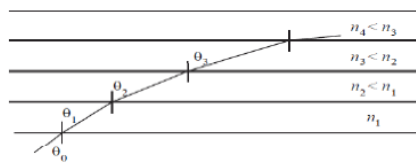
Band	Propagation Mode	Range	Availability	Use
VHF (30-300 MHz)	Space Wave	LOS (50 km)	Continuous	Mobile //Broadcast. Radio Navigation
	Ionosphere Scattering (f<50 MHz)	2000 km	Continuous (Low)	Fixed Service
UHF (300-3000 MHz)	Sky Wave	LOS (40 km)	Continuous	Fixed Service Mobile //Broadcast.
	Troposphere Scattering (f<500 MHz)	600 km	Continuous (low)	Fixed Service
SHF (3-30 GHz) EHF (above 30 GHz)	Space Wave	LOS (40 km)	Continuous	Fixed Service Satellite Services Mobile Services

Refracción:

Definición: Variación de la dirección de propagación de un rayo cuando no se encuentra en el vacío y atraviesa un cuerpo que cambia el índice de refracción.

- Refracción en la Troposfera:

- El índice de refracción de la atmósfera cambia en función de la altura sobre la superficie.
- A grandes alturas, la atmósfera es menos densa, resultando un índice de refracción menor.
- Esto provoca que los rayos se curven hacia abajo mientras se propagan por la atmósfera.
- El efecto puede entenderse al considerar que la atmósfera está dividida en capas, con valores constantes del índice de refracción en cada capa.



En el vacío cte. No cambios de dirección

- Radio-Refractividad (Sp. "Coíndice") según la ITU-R, p.453:

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

$$N = N_{dry} + N_{wet} = \frac{77.6}{T} \cdot \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right)$$

- Donde, N_{dry} es conocido como el "término seco" (dry term).
- Donde, N_{wet} es conocido como el "término húmedo" (wet term).
- P, es la presión atmosférica en milibares.
- T, es la temperatura en °K.
- e, es la presión del vapor de agua en milibares.ç

Por tanto, N será el coíndice de Refracción, y depende de estas 3 últimas magnitudes, directamente con el vapor de agua e, inversamente, con la temperatura. N suele ser de 39 unidades, y n= 1,000032 normalmente.

- La Atmósfera Estándar se define como el valor medio de las propiedades de la Troposfera.
- Varios modelos:

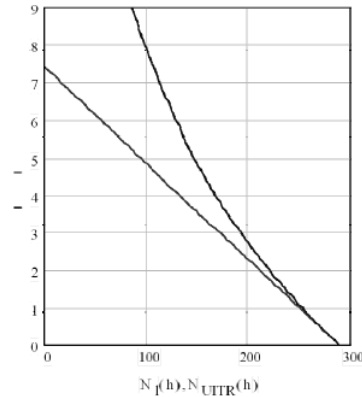
- Lineal (al alza a alturas menores de 1 km):

$$N(h) = 315 - 43 \cdot h$$

- Exponencial (en otros casos):

$$N(h) = N_0 \exp\left(\frac{-h}{h_0}\right) \text{ (Expresión empírica)}$$

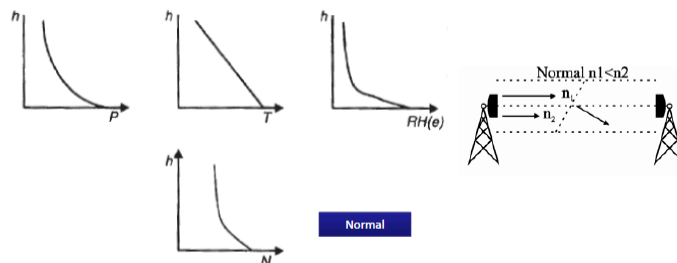
- Donde, N_0 es el valor medio de la refractividad de la atmósfera extrapolada al nivel del mar.
- h_0 , escala de altura para la normalización de los propósitos.
- h , altura sobre el nivel del mar.



$$N(h) = 315 \cdot \exp(-0.135 \cdot h)$$

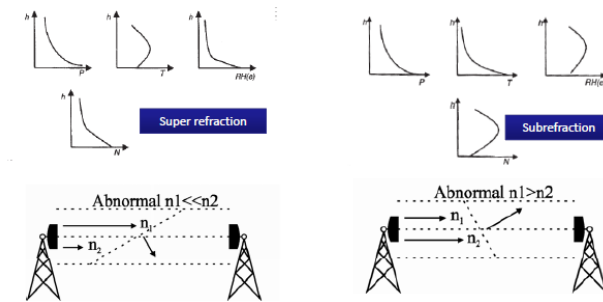
Aquí se observa que el gradiente del coíndice es negativo, es decir, depende inversamente de la altura.

- Gradiente de Radio-Refractividad:
 - El valor exacto de la radio-refractividad no es relevante.
 - La causa del impacto de la refractividad: el gradiente de refractividad.
- Modelos empleados:
 - Ubicaciones geográficas específicas.
 - Meses del año.
 - Condiciones meteorológicas específicas.
 - Altura sobre el nivel del mar
 - Para los propósitos de diseño de sistemas de radiocomunicación, las estadísticas de N_0 y del gradiente de refractividad ΔN son dadas por la ITU-R (P.453).
- El gradiente de radio-refractividad ΔN depende de T, P y e (RH).
- Condiciones estándar y anómalas de Refracción.
 - En la Troposfera **Normal** se asocia un gradiente de -39 unidades/km.



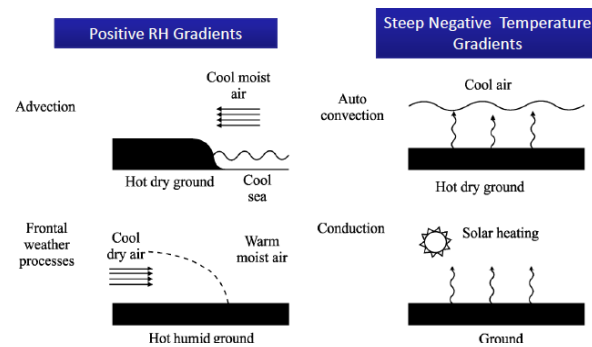
Por ejemplo, en los despegues la temperatura asciende, mientras que en los aterrizajes desciende. Por su parte, en los satélites geoestacionarios se dan altas temperaturas.

- Hay que destacar otras condiciones más allá de la normal para el gradiente de radio-refractividad, como la Sub-Refracción o la Super-Refracción.



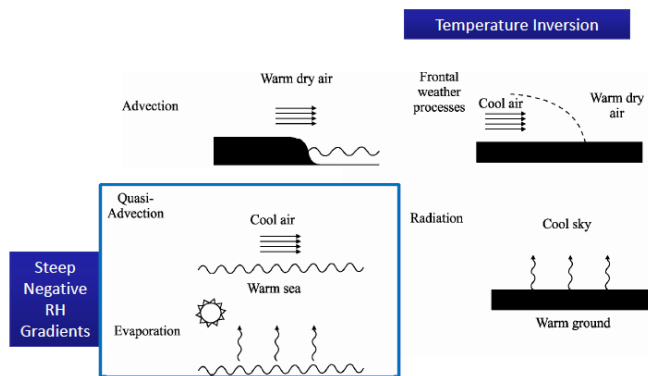
- Condiciones de **Sub-Refracción**:

- Las condiciones de Sub-Refracción en la Troposfera están asociadas a valores del gradiente de radio-refractividad cercanos a cero o incluso positivos.
- La Sub-Refracción es posible en prácticamente cualquier área geográfica para un porcentaje menor del 10% de la media anual.
- Las condiciones atmosféricas que causan la Sub-Refracción son cualquier gradiente de temperatura elevado y negativo o cualquier gradiente de presión de vapor de agua positivo, o que se den ambas condiciones a la vez.

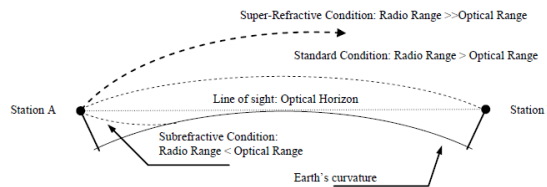


- Condiciones de **Súper-Refracción**:

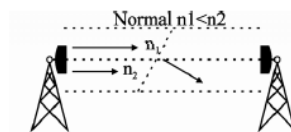
- Se consideran condiciones de Súper-Refracción si el gradiente de radio-refractividad es menor que $-100 \text{ N unidades/km}$.
- Normalmente se relaciona con el fenómeno de inversión de la temperatura y gradientes muy negativos de vapor agua.
- Asociado a la advección (penetración de una masa de aire frío o cálido en un territorio), subsidencia (hundimiento paulatino del suelo originado por cavidades subterráneas) y al fenómeno de radiación, tanto como a la formación de amplias capas de evaporación sobre grandes volúmenes de agua.



- Influencia de la refracción en la propagación en la Troposfera.
- Causas: índice de refracción y radio-refractividad n .
- Efectos principales:
 - **Curvatura del rayo: radio efectivo de la Tierra.**
 - Fijar unos caminos de propagación curvados no es útil.



Nos encontraremos bajo condiciones atmosféricas estándar si el gradiente de radio-refractividad es cercano a $-39 \text{ N unidades/km}$.



De la Ley de Snell:

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{\cos\varphi}{n} \frac{dn}{dh}; \text{ En la práctica (enlaces terrestres), se asume que es:}$$

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{dn}{dh}, \text{ considerando, con ese signo menos, el gradiente positivo.}$$

ρ , es el radio de curvatura de la trayectoria de la onda.

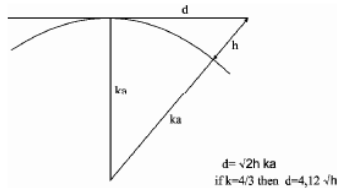
N , es el índice de radio-refracción.

dn/dh , es el gradiente vertical del índice de refracción.

H , es la altura sobre el nivel de tierra (sobre la superficie).

φ , es el ángulo medido con respecto a la trayectoria horizontal.

- Por tanto como fijar trayectorias curvadas de propagación no es útil, la solución es el Radio (alcance) Efectivo de la Tierra: Así, con rayos rectos, se cambia la curvatura de la Tierra para adaptarlos y no la curvatura de los rayos.



$R = kR_0$ R_0 is the real Earth's Radius
 k is the fictitious radius factor

$$\frac{1}{kR_0} = \frac{1}{R_0} + \frac{dn(h)}{dh} \quad \frac{1}{kR_0} = \frac{1}{R_0} + \Delta N \cdot 10^{-6}$$

$$k = \frac{1}{1 + R_0 \Delta N \cdot 10^{-6}} = \frac{157}{157 + \Delta N}$$

Troposphere Condition	ΔN (N units/km)	k
Normal	$0 \leq \Delta N < -39$	$1 \leq k < 4/3$
Sub-refractive	$\Delta N > 0$	$0 \leq k < 1$
Super-refractive	$\Delta N < -39$	$k > 4/3$
Ducting Conditions	$\Delta N \leq -157$	$k \infty$ (1)

Representación conceptual de la formación de conductos.

Ejemplo:

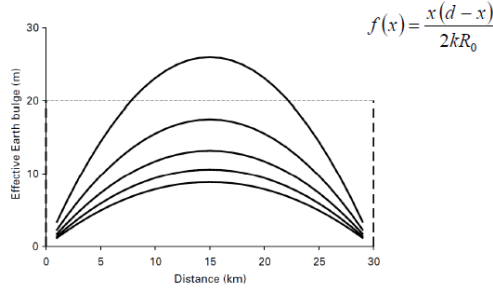
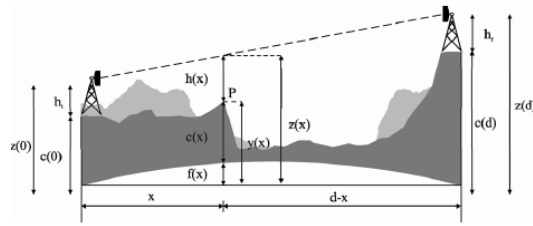


Figure 6.3 The variation in effective Earth bulge for k -factors of 0.67, 1.0, 1.33, 1.67 and 2. The dashed line at a height of 20 metres is shown for guidance.

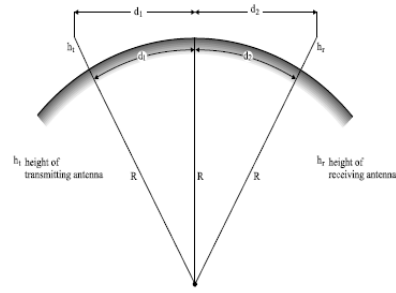
- Cálculo del saliente o protuberancia de la Tierra:
 - A practicar en el Trazado de Perfiles. Donde, la altura efectiva de la Tierra ($Z(x)$), en P , es la elevación geográfica, más el saliente de tierra en esa localización P . Por ejemplo:



$$Y(x) = C(x) + f(x); \quad f(x) = \frac{x(d-x)}{2kR_0}$$

Donde, R_0 es el radio real de la Tierra y k es el factor ficticio de radio.

- Horizonte de radio (Radio Horizon):
 - Debido a la curvatura de la Tierra, hay una distancia límite en la que la antena receptora tiene una vista libre de obstáculos (LOS) de la antena transmisora.
 - Se da desde que $h_t, h_r \ll R$:



$$d_1^2 = (R - h_t)^2 - R^2 = h_t^2 + 2h_t R \approx 2h_t R$$

$$d_2^2 = (R - h_r)^2 - R^2 = h_r^2 + 2h_r R \approx 2h_r R$$

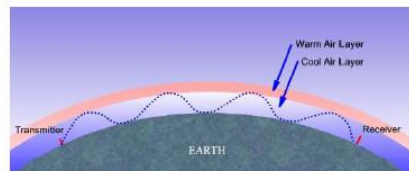
$$d = d_1 + d_2 \approx \sqrt{2R}(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r})$$

- Para un factor k en condiciones normales de refracción:

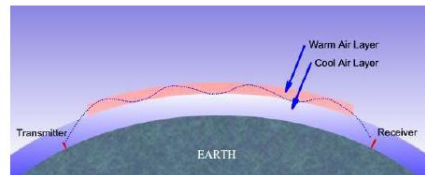
$$d(\text{km}) = 4.126(\sqrt{h_t(\text{m})} + \sqrt{h_r(\text{m})})$$

- **Conductos.**

- Se da en condiciones muy negativas, con $k \leq -157$ N unidades/km.
- Los conductos son un fenómeno asociado a la refracción en condiciones anormales.
- Un conducto es una región de la troposfera que, debido a valores del gradiente de radio-refractividad anómalos, mantiene la propagación de una cierta señal confinada entre dos capas de la troposfera.



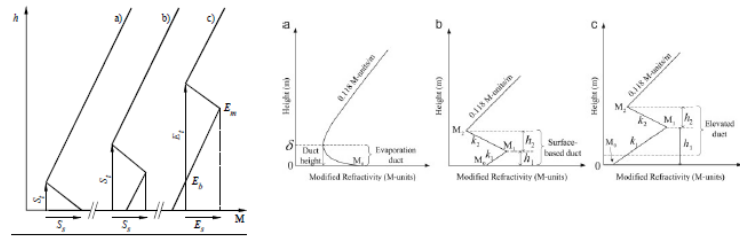
- O entre una capa de la Troposfera y la superficie de la Tierra:



- Los conductos son creados en condiciones de Super-Refracción cuando los gradientes de radio-refractividad son menores que 157 N unidades / km.
- Es difícil de caracterizar cuantitativamente la propagación en conductos.
- Según la ITU-R (P. 453):
Los conductos se dan para proveer un modelo simple de refracción en los casos donde el gradiente es menor que 157 N unidades/ km. Aparece un nuevo parámetro, referido como la radio-refractividad modificada (M). Los conductos pueden describirse en términos de esta refractividad modificada: $M(h) = N(h) + 157 h$ (km) (M-units).

➤ Tipos de conductos y parámetros asociados M y S:

FIGURE 17
Definition of parameters describing a) surface, b) elevated surface and c) elevated ducts



Duct Parametres (Surface/Elevated)	Elevated Duct Parametres
Duct strength, S_s (M-units)/ E_s (M-units)	Base height E_b (m)
Thickness S_s (m)/ E_s (m)	Height within the duct of maximum M E_m (m)

➤ Conductos en las regiones mundiales:

Country/Region	Area	Season
North America	USA. North East Coast	Summer
North America	USA. Florida	Winter
North America	USA. West Coast	Indifferent
East Europe	British Islands and North Sea	Summer
Europe	Mediterranean Sea	Summer
East Africa	Arabic Peninsula and Indian Ocean	Dry Season (October - May)
Bay of Bengal	India/Sri Lanka/Myanmar-Birmania/Bangladesh	Dry Season (October - May)
Pacific Ocean	Korea	Indifferent
Pacific Ocean	West Coast of Australia	Indifferent
Pacific Ocean	Japan Sea	Summer
Pacific Ocean	South China Sea	Winter

▪ Centelleo/Destello.

- Se caracteriza por una variación aleatoria del nivel de señal recibida sobre el valor medio.
- Hay variaciones rápidas y bajas de intensidad por debajo de los 40 GHz.
 - Centelleo en la Troposfera: índice de refracción. Se asocia a irregularidades de baja escala en la Troposfera, que están cambiando sus rasgos muy rápidamente.
 - Centelleo en la Ionosfera: Contenido Total de Electrones (TEC), es una medida del nivel de ionización de la Ionosfera.
- Depende de la banda de frecuencia y de la aplicación que se tenga como propósito: puede tener una relevancia importante en comunicaciones satélite (Centelleo en la Ionosfera).

▪ Resumen:

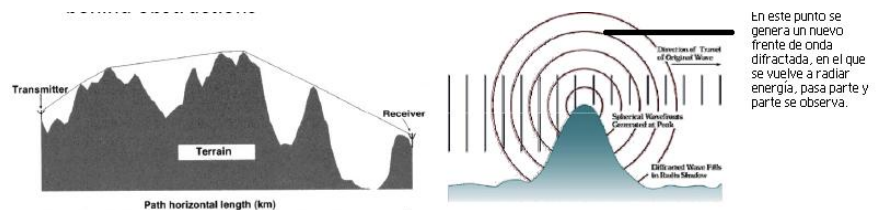
- Índice de refracción y radio-refractividad n .
- Curvatura de los rayos: radio efectivo de la Tierra.
- Conductos.
- Centelleo.
- Extensión de rayos.
- Variación en los ángulos de despegue y aterrizaje (lanzamiento y llegada).
- Propagación multicamino en la Troposfera.

Estas tres últimas específicas de Sistemas de Enlaces Fijos Punto-a-punto.

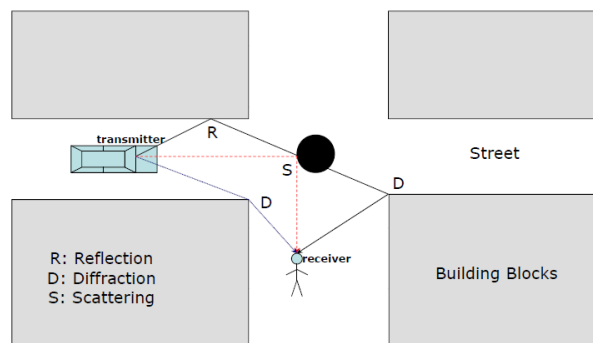
Difracción:

- Concepto:

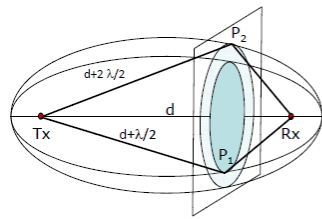
- La energía en el lugar de recepción es la contribución de los infinitos caminos que están contenidos en el plano perpendicular al vector de Poynting.
- La base teórica es el Principio de Huygens, por el cual se dice que una onda que difracta generaría progresivas ondas en un plan perpendicular a la dirección de propagación, y habría que estudiar el conjunto de todas sus contribuciones.
- Permite a las señales de radiofrecuencia propagarse por regiones obstruidas o sombrías.
 - Sobre el horizonte (directamente sobre la superficie curvada de la tierra).
 - Detrás de obstrucciones. Es decir, no hay visión directa entre el Tx y el Rx, pero parte de la energía puede llegar sin haber seguido ese camino.
- Difracción sobre la Tierra Lisa: se curva la Tierra sobre sí misma sobre un camino en el horizonte (por debajo de 10 MHz).
- Obstáculos singulares: aproximados como un filo de cuchillo o un cilindro desarrollado.



- En este caso, la difracción se da en las aristas o picos que obstruyen a la señal:

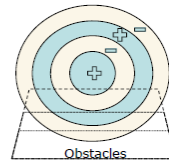


- Por tanto, habrá un infinito número de caminos de propagación seguidos por la energía desde el Tx hasta el Rx.
- La contribución de cada camino al total de potencia recibida depende de la fase de cada componente asociada al plano del frente de onda.
- La energía estaría concentrada en distintos volúmenes alrededor de esa línea, siendo sus focos el Transmisor y el Receptor.



Constructive Paths:

$$T_x P_n + P_n R_x = T_x R_x + n \cdot \frac{\lambda}{2}$$



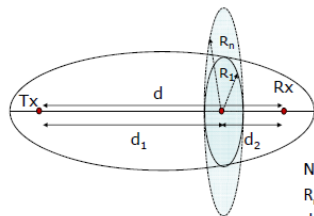
N-th Ellipsoid Radius

$$R_n = \left[\frac{n \lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2} \right]^{1/2}$$

2º dibujo: corte del elipsoide.

• Zonas de Fresnel:

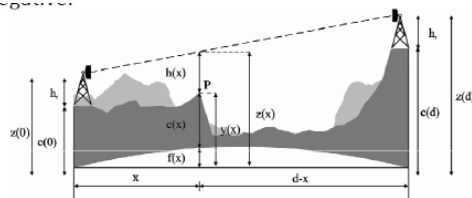
- Las elipses impares contribuyen a la energía total de forma positiva.
- Las elipses pares representan contribuciones negativas.
- El orden más bajo es el de mayor relevancia para la contribución total.
- Para el diseño y dimensionamiento de los diseños prácticos únicamente se considera la primera zona.
- Según nos separamos del eje de Visión Directa llega menos potencia.



$$R_n = 548 \sqrt{\frac{n \cdot d_1 \cdot d_2}{f \cdot d}} \quad (m)$$

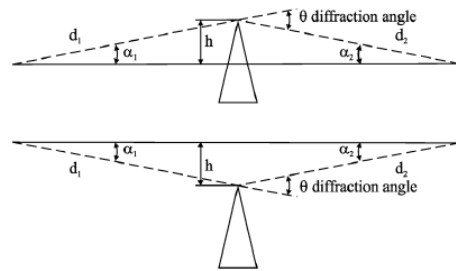
N order of the ellipsoid
 R_n radius of the n-th order ellipsoid
 d₁ distance to the transmitter (km)
 d₂ distance to the receiver (km)
 d Transmitter- receiver distance (d₁+d₂) (km)
 f frequency (MHz)

- La altura h(x), de punto P arbitrario en el perfil con una abscisa x, es la diferencia entre el valor de la ordenada de la línea de Transmisión en el punto P y la altura efectiva del terreno en ese punto.
 $H(x)=z(x)-y(x)$; siendo, z(x) la altura del obstáculo e y(x) la del rayo.
- La altura representa la distancia entre el camino de la señal y los obstáculos del terreno en el punto P.
- La altura es el camino de la señal sobre la altura efectiva del terreno, sino, es negativa.
- Altura radioeléctrica: altura sobre el nivel del mar, más lo que la Tierra se curva ficticiamente.



• Difracción el modelo de “filo de cuchillo”:

- La difracción en el modelo de un obstáculo aislado en “Filo de Cuchillo” se basa en el modelo geométrico de la siguiente figura:



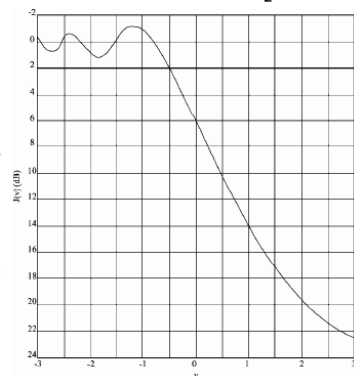
- El ancho del obstáculo aislado se asume como infinitesimal.
- Las pérdidas dependen del parámetro h y son calculadas usando el parámetro “ v ” adimensional:

$$V = h \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}$$

*El despejamiento no será suficiente para dejar pasar toda la energía si $h < 0,5777$.

- Para calcular las pérdidas:

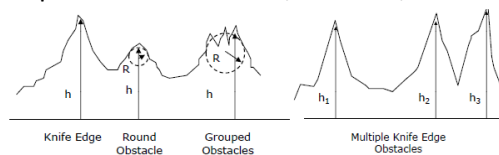
$$L_D(v) = 6.9 + 20 \log \left[\sqrt{(v-1)^2 + 1} + v - 0.1 \right], \text{ para } -0.7 \leq v \leq \infty$$



- Algunas consecuencias:
 - Es posible obtener valores de Recepción mayores en presencia de obstáculos ideales (no reales en la práctica).
 - El exceso de pérdidas se incrementa rápidamente una vez que el 60% (57.7) del elipsoide está bloqueado.
 - La potencia recibida para una altura de $0.6R$ y el valor en ausencia de obstáculos es el mismo (criterio práctico para el diseño de sistemas).
- A pesar de la simplicidad del modelo, para cálculos reales de difracción se basa en:
 - Irregularidades de terrenos aislados.
 - Irregularidades de terrenos redondeados.
 - Obstáculos en múltiples terrenos.

• Casos de estudio prácticos:

- En realidad, los obstáculos necesitan aproximarse a las formas geométricas simples: filos de cuchillo, cilindros, formas gaussianas...



- Suele ser usual que existan varios obstáculos cercanos a otro.

- Éstos pueden agruparse de la siguiente forma:

$$x_2 - x_1 \leq 0.5 \text{ Km}$$

$\frac{x_1(d-x_2)}{x_2(d-x_1)} \geq 0.91$ donde, x_1 y x_2 son las distancias de cada obstáculo al transmisor y, d , es la distancia del camino entre Tx y Rx.

- Dos obstáculos:

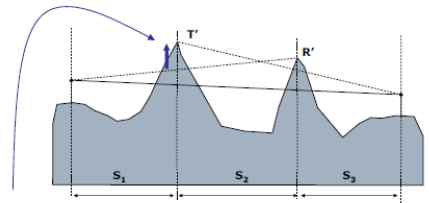
- Epstein-Peterson:

- Ambos obstáculos bloquean los caminos de Visión Directa.
- Dos sub-caminos.
 - ❖ Tx y R' (Receptor Ficticio).
 - ❖ T' (Transmisor Ficticio) y Rx.

$$L_{diff} = L_d(v_1') + L_d(v_2') + L_C$$

$$L_C = 10 \log \frac{(s_1 + s_2)(s_2 + s_3)}{s_2(s_1 + s_2 + s_3)}$$

The clearance values v_i' are calculated taking the hypothetical subpaths as reference



En este caso, se suma un coeficiente que depende de las distancias.

- Obstáculo redondeado:

- Las colinas redondeadas son a menudo obstrucciones más comunes a la propagación de ondas de radio que los objetos en forma de filo de cuchillo.
- Las pérdidas por difracción alrededor de los obstáculos curvados son mayores que las pérdidas debidas a los objetos en filo de cuchillo.
- En los casos prácticos se emplea la fórmula para calcular el exceso de pérdidas $T(m,n)$, que debe ser añadido al de filo de cuchillo para obtener la pérdida total:

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

$$T(m, n) = 7.2m^{1/2} - (2 - 12.5n)m + 3.6m^{3/2} - 0.8m \quad \text{if } mn \leq 4$$

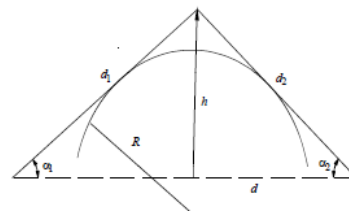
$$T(m, n) = -6 - 20 \log(mn) + 7.2m^{1/2} - (2 - 17n)m + 3.6m^{3/2} - 0.8m^2 \quad \text{if } mn > 4$$

$$m = R \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \left/ \left(\frac{\pi R}{\lambda} \right)^{1/3} \right.$$

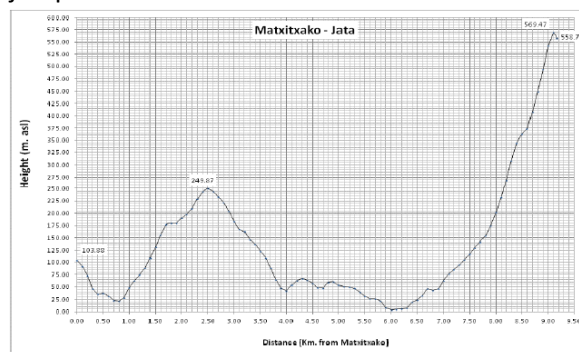
$$n = h \left(\frac{\pi R}{\lambda} \right)^{2/3} / R$$

R equivalent obstacle radius

h height over Tx - Rx reference plane

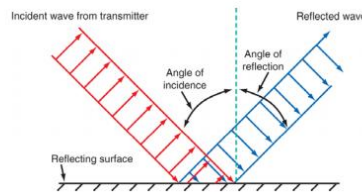


Ejemplo:

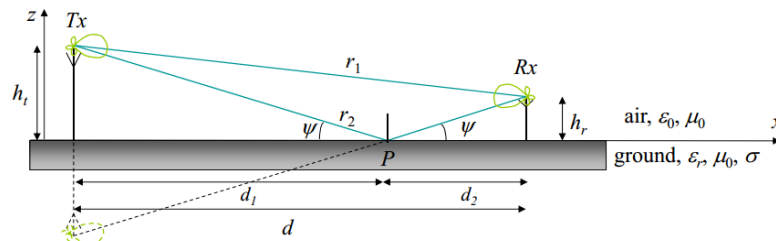


Reflexión:

- Modelo y Factores involucrados:
 - Cuando una onda de radio se propaga en un medio e infringe sobre otro medio de características eléctricas diferentes la onda es:
 - Parcialmente reflejada.
 - Parcialmente transmitida.
 - El Coeficiente de Reflexión Γ muestra la relación entre:
 - Las ondas Reflejada y Transmitida.
 - La onda incidente en el medio de origen.
 - El Coeficiente de Reflexión es una función de las propiedades de los materiales, dependiendo de:
 - Polarización de la Onda (dirección de la vibración de propagación: orientación).
 - Ángulo de incidencia.
 - Frecuencia de la onda de propagación.



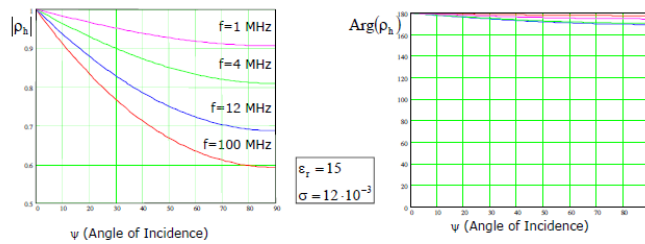
- Los Coeficientes de Reflexión son calculados asumiendo incidencia oblicua en un plano de pérdidas dieléctrico (ϵ_r permitividad del dieléctrico, σ conductividad).
- Modelo del plano de la Tierra:



- Polarización Horizontal:

$$\rho_h = \frac{\sin \psi - \sqrt{(\epsilon_r - j\chi) - \cos^2 \psi}}{\sin \psi + \sqrt{(\epsilon_r - j\chi) - \cos^2 \psi}} \quad \chi = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_c}$$

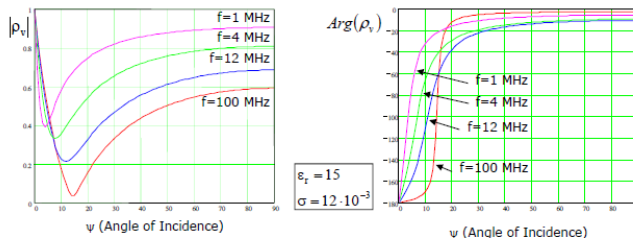
- Para ángulos de incidencia cercanos a cero ($\psi=0$): $\rho_h = -1$
- En otros casos:
 - El cambio de fase permanece cercano a los 180°.
 - El módulo varía significativamente para altas frecuencias y bajos valores de conductividad.
- Si la frecuencia es $f > 100$ MHz se usa la curva de 100 MHz:



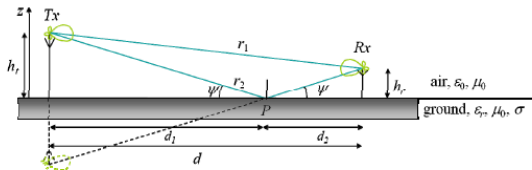
■ Polarización Vertical:

$$\rho_v = \frac{(\epsilon_r - j\chi) \sin \psi - \sqrt{(\epsilon_r - j\chi) - \cos^2 \psi}}{(\epsilon_r - j\chi) \sin \psi + \sqrt{(\epsilon_r - j\chi) - \cos^2 \psi}} \quad \chi = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$$

- Para ángulos de incidencia cercanos a cero ($\psi=0$): $\rho_v = -1$
- Ángulos mayores producen rápidas variaciones de fase y módulo.
- Cada frecuencia su propio ángulo pseudo-Brewster.
- Si la frecuencia $f > 100$ MHz se usa la curva 100 MHz:



- La reflexión es considerada en ocasiones como una corrección a las FSL para estimar la fuerza del campo recibido.
- Esto se conoce como el Modelo de 2 Rayos (Two Ray Model):
 - E directo.
 - Camino de reflexión de E.
 - Cada campo con su amplitud y fase.
 - La fuerza total del campo podría tener diferentes amplitudes dependiendo sobre qué geometría se trabaje.



$$|E| = |E_0 [1 + |\rho| \exp(-j(\Delta + \beta))]| = |E_0| [1 + |\rho|^2 + 2|\rho| \cos(\Delta + \beta)]^{1/2}$$

- Dos casos:
 - Caminos cortos: Modelo de Tierra Plana (Flat Earth Model).
 - Caminos largos: Modelo de Tierra Esférica (Spherical Earth Model).

● Modelo de Tierra Plana:

- Válido en la banda VHF y sobre, por ejemplo, $f \geq 30$ MHz cuando los efectos de la onda de superficie son despreciables.
- Válido para la superficie plana, por ejemplo, r.m.s rugosidad (z) debería ser $z < \lambda$, típicamente, frecuencias $f \leq 30$ GHz.
- Válido para rangos cortos donde la curvatura de la tierra es despreciable, por ejemplo, $d < 10-30$ km, dependiendo de las condiciones atmosféricas.

- Esto se encontró razonablemente preciso para predecir la fuerza de la señal a gran escala sobre distancias de varios km en sistemas punto-a-zona.
- Algunas fuentes sugieren un saliente de la tierra máximo equivalente de 5m.

Reflection Point

$$\Psi = \tan^{-1}\left(\frac{h_t + h_r}{d}\right) \quad d_1 = \left(\frac{d \cdot h_t}{h_t + h_r}\right) \quad d_2 = \left(\frac{d \cdot h_r}{h_t + h_r}\right)$$

Direct/Reflected Path Difference

Amplitude $\Delta l = (r_2 - r_1) = \left(\sqrt{d^2 + (h_t + h_r)^2} - \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2}\right) \approx \frac{2h_t h_r}{d}$

Phase $\Delta = \frac{2\pi \Delta l}{\lambda} = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}$

Field Strength

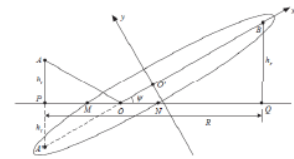
$|E| = |E_0 [1 + |\rho| \exp(-j(\Delta + \beta))]| = |E_0 [1 + |\rho|^2 + 2|\rho| \cos(\Delta + \beta)]|^{1/2}$ Assuming grazing angle, $\Psi \approx 0, d \gg h_t, h_r$, and $\rho = -1$

$$|E| = \left| E_0 \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d} \right|$$

- Reflexión: Divergencia asociada a las zonas de Fresnel:
 - La energía no se concentra sobre un infinitamente delgado rayo.
 - El punto de reflexión es, entonces, una superficie más que un lugar que podría no ser especular (en cuanto a reflexión).
 - Solución: Coeficiente efectivo:

▪ Solution: Effective Coefficient

$$\rho_{\text{effective}} = \rho \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2}\right) \quad \gamma = \left(\frac{4\pi \sigma_c \sin \Psi}{\lambda}\right)$$



Donde, Ψ , es el ángulo de incidencia sobre el terreno.

σ_c , rugosidad del terreno (alejamiento estándar de las muestras del terreno dentro del área relevante).

λ , longitud de onda.

La superficie no se considera especular si $\gamma > 0.3$.

- Modelo de Tierra Esférica:

Relevant Parameters

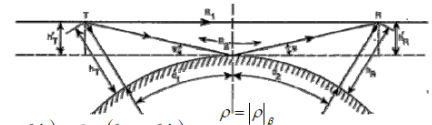
r_e : Earth equivalent radius ($k \cdot a$, $a=6370$ km)
 k : Refraction constant, 4/3 under normal atmosphere conditions
 h_t : Transmitter height
 h_r : Receiver height
 h'_t : Transmitter height over the reflection point
 h'_r : Receiver height over the reflection point
 d_1 : Distance from transmitter to reflection point
 d_2 : Distance from receiver to reflection point
 ψ : Grazing Angle

- La teoría de la reflexión óptica tiene un límite:

$$\Psi_{\text{umbral}}(\text{mrad}) = \left(\frac{5400}{f}\right)^{\frac{1}{3}}$$

- Ángulos menores al umbral implican difracción causada por la curvatura de la Tierra.

Reflection Point, assuming $h_T, h_R \ll r_e$



$$d = d_1 + d_2$$

$$d_1^2 \approx [r_e + (h_T - h'_T)]^2 - r_e^2 = (h_T - h'_T)^2 + 2r_e(h_T - h'_T) \approx 2r_e(h_T - h'_T)$$

$$d_2^2 \approx 2r_e(h_R - h'_R)$$

$$h'_T = h_T - \frac{d_1^2}{2r_e} \quad h'_R = h_R - \frac{d_2^2}{2r_e} \quad \psi = a \tan\left(\frac{h'_T}{d_1}\right) = a \tan\left(\frac{h'_R}{d_2}\right) \Rightarrow \frac{h'_T}{d_1} = \frac{h'_R}{d_2}$$

$$d_1 = \frac{d}{2} + p \cdot \cos\left(\frac{\pi + \phi}{3}\right)$$

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[6.37 \cdot k \cdot (h_T + h_R) + \left(\frac{d}{2}\right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\phi = \arccos \left[12.74 \cdot k \cdot (h_T - h_R) \cdot \frac{d}{p^3} \right]$$

Detailed calculations:
H. Rábanos, Chapter
3, pp 145

Grazing Angle

$$\psi(\text{mrad}) = \frac{h'_T + h'_R}{d} \quad \text{where } h(\text{m}), d(\text{km})$$

Path Difference/Phase Difference $h_T, h_R \ll r_e$

$$|E| = |E_0| \left(1 + |\rho|^2 + 2|\rho| \cos(\Delta + \beta) \right)^{1/2}; \quad \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} (R_2 - R_1)$$

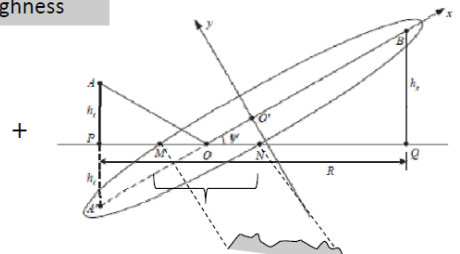
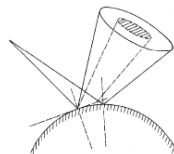
$$R_1 = d \sqrt{1 + \frac{(h'_T - h'_R)^2}{d^2}} \quad \Delta l = R_2 - R_1 = d \left\{ \sqrt{1 + \frac{(h'_T + h'_R)^2}{d^2}} - \sqrt{1 + \frac{(h'_T - h'_R)^2}{d^2}} \right\} \stackrel{d \gg h_T, h_R}{\approx} \frac{2h'_T h'_R}{d}$$

$$R_2 = d \sqrt{1 + \frac{(h'_T + h'_R)^2}{d^2}}$$

$$\Delta(\text{rad}) = \frac{2\pi \cdot f \cdot \Delta l}{c}$$

Fresnel Ellipsoid Divergence and Roughness

$$\rho = |\rho|_{\beta}$$



- Dos efectos:
 - Divergencia debido a la Tierra Esférica: modelada con un coeficiente D efectivo.
 - La superficie de Reflexión podría no ser especular (corrección ya vista en el modelo de Tierra Plana).

$$\rho = |\rho|_{\beta} \cdot D \cdot \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2}\right) = \rho_{\text{effective}} \cdot D$$

$$D = \left[1 + \left(\frac{5}{16 \cdot k} \right) \cdot \frac{d_1^2 \cdot d_2}{d \cdot h'_T} \right]^{-1} \quad \gamma = \frac{4\pi \sigma_c \sin \psi}{\lambda}$$

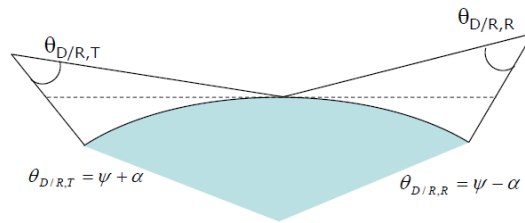
- La fuerza del campo compuesto:

$$|E| = |E_0| \cdot \left[1 + \left(D \cdot |\rho_{\text{effective}}| \right)^2 + 2 \cdot D \cdot |\rho_{\text{effective}}| \cdot \cos(\beta + \Delta) \right]^{1/2}$$

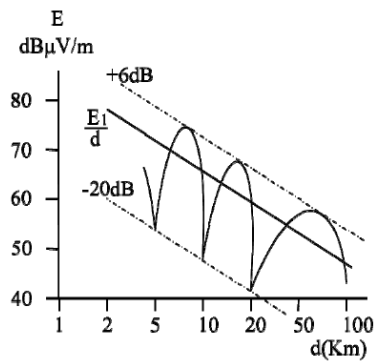
- Si asumimos $\Psi \approx 0$, $d \gg h_T, h_R$, y $\rho = -1$:

$$|E| = 2 \cdot |E_0| \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h_t' \cdot h_r'}{\lambda \cdot d}\right)$$

- Con todas las expresiones anteriores, asumiendo antenas isotrópicas.

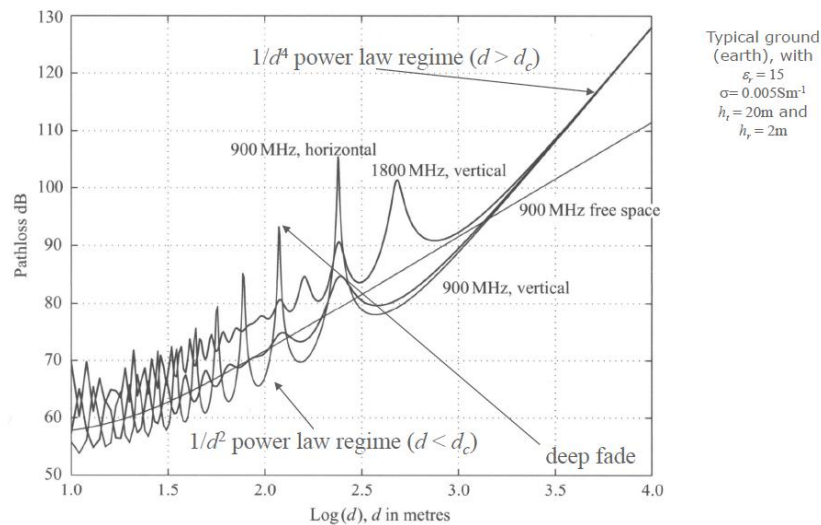


- Fuerza del campo recibido:



- El campo varía con la distancia en presencia de Reflexión.

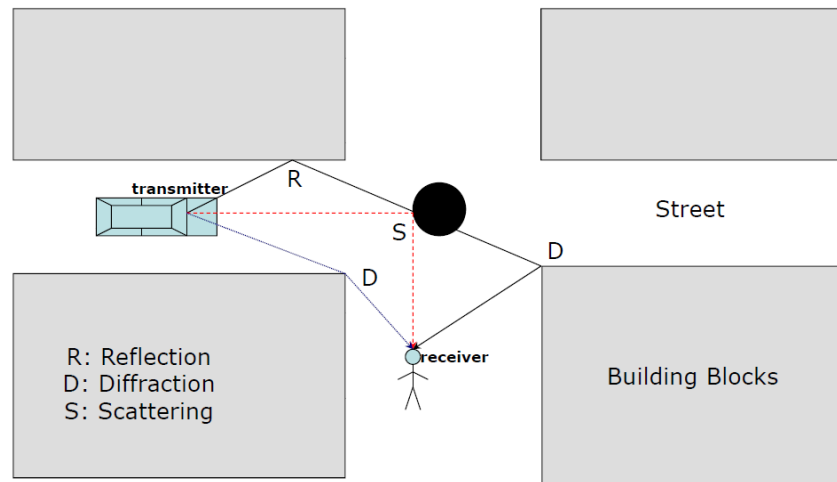
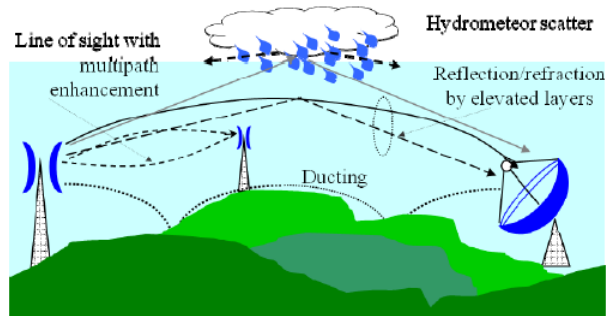
- Potencia Recibida, ejemplo gráfico:



- Dispersión:

- La dispersión es un proceso físico donde la luz, el sonido o partículas móviles son forzadas a desviarse desde una trayectoria recta, por una o más no uniformes (no homogéneas) localizadas, en el medio a través del cual ellas pasan. La energía se difunde (dispersa) en todas las direcciones.
- Los obstáculos o irregularidades del tamaño del orden de la longitud de onda de la señal o menor: follaje, farolas, peatones, terreno irregular...
- La dispersión es generalmente difícil de modelar debido a las complejas condiciones del medio ambiente que la causan (modelar las posiciones de todas las calles no es factible).
 - Superficies rugosas (irregulares):

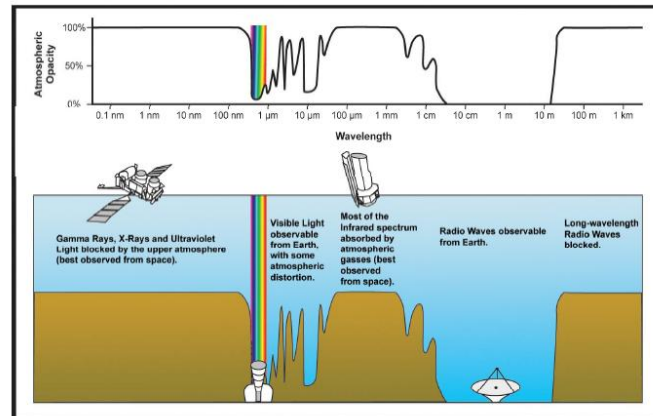
- Altura crítica para protuberancias, que es una función de λ y del ángulo incidente.
- El factor de pérdida por Dispersión modelado con distribución Gaussiana.
- Objetos metálicos cercanos (señales en la calle...): modelos estadísticos.
- Ejemplos de Dispersión en la Propagación:
 - Dispersión troposférica: hace uso de la dispersión de ondas de radio en la Troposfera para propagar señales en el rango de 250 MHz-5 GHz (Comunicaciones de Datos, especialmente en el sector militar).
 - Dispersión por rubia: más que una aplicación, presenta un problema. Puede ser significativo sobre unos 5 GHz.



Absorción Molecular e Hidrometeoros:

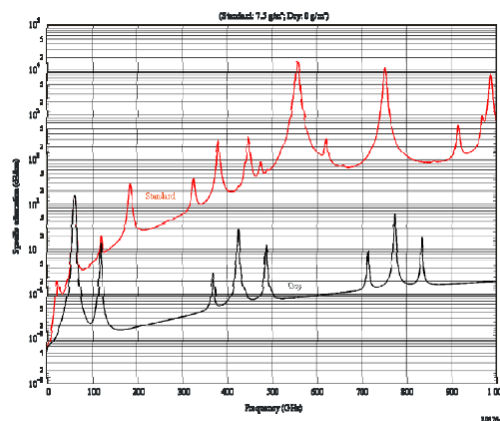
Absorción Molecular

- Resumen de las ventanas de Propagación:
 - Gráficamente:



- Factores que afectan a la Absorción Atmosférica:

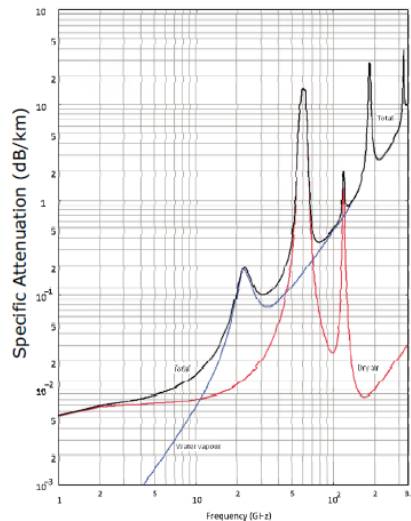
- La atmósfera en los primeros kilómetros está formada por: Oxígeno, Nitrógeno, Dióxido de Carbono y Vapor de Agua.
- Las moléculas de cada gas interactúan de diversas formas con la señal de radio, siendo una interacción específica para cada gas.
- El efecto sólo es relevante para frecuencias mayores de 10 GHz.
- En muchos casos no se considera por debajo de los 20 GHz.
- Para propósitos prácticos se tiene en cuenta: Oxígeno y Vapor de Agua (son los dos principales componentes en la absorción):
 - Vapor de agua: líneas de atenuación: 22,5 y 183 GHz.
 - Oxígeno: líneas de atenuación: 60 y 119 GHz.
- Entre esas frecuencias de resonancia: Ventanas de Transmisión.



- Modelos generales para el cálculo de la Absorción:

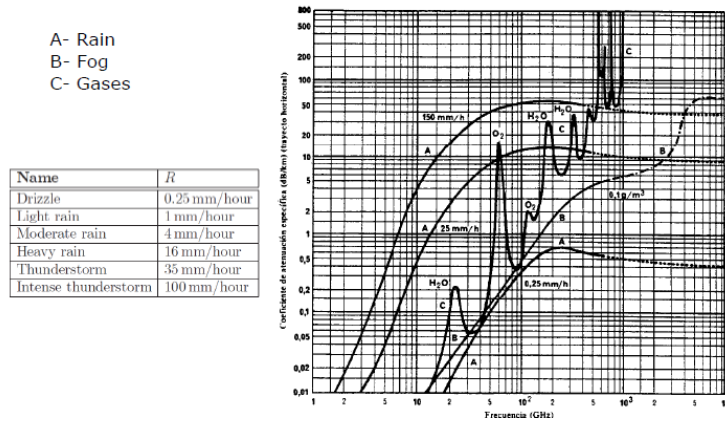
- A frecuencias alrededor de 100 GHz, las pérdidas se vuelven significantes debido al vapor de agua y al oxígeno.
- Útil en la protección de servicios pasivos como en las bandas muy altas.
- Los modelos de cálculo están basados en obtener la atenuación específica y la distancia de absorción.
- Diferente si el trayecto es terrestre o terrestre-satélite:

$$A = \gamma_a d = (\gamma_o + \gamma_w) d$$
- LA gráfica siguiente muestra la atenuación específica a 1013 hPa, 15°C, con una densidad del vapor de agua de 7.5 g/m^3 .



La más negra, es la suma de ambas componentes.

- Comparación con otras fuentes de absorción (db/km):



A partir de 100 GHz, pico de absorción

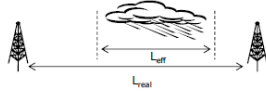
Hidrometeoros

- Resumen: impacto en la propagación:
 - Los hidrometeoros son uno de los más influyentes factores en la Radiocomunicación a partir de los 10 GHz.
 - Lluvia, nubes, niebla, nieve o granizo (Lluvia el principal).
 - La lluvia es el más relevante, debido a sus estadísticas de ocurrencia y también a su impacto.
 - Dos perturbaciones vienen de los hidrometeoros:
 - La energía de la señal de radio es absorbida y dispersada por las gotas de lluvia o las partículas de hielo de las que está compuesta esa lluvia, nieve o granizo.
 - Las partículas de hielo y gotas de agua, debido a su forma no esférica, crean un efecto de rotación en la polarización que se asociará a la forma, tamaño y distribución de las gotas de lluvia o cristales de hielo.
 - Los modelos que describen la lluvia incluyen:
 - Tamaño y distribución de los volúmenes de lluvia (cuantificados en intensidad de precipitación).
 - Forma, tamaño y distribución de las gotas de agua.
 - En cualquier caso, empíricamente: primero se toman mediciones y luego se obtienen modelos.

- Absorción de Lluvia:

- La absorción es calculada empíricamente en muchos caso usando una fórmula similar a:

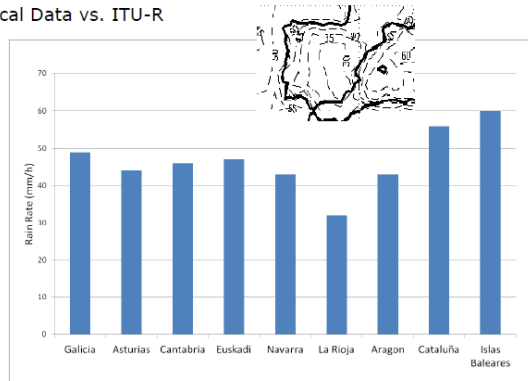
$A(\text{dB}) = \gamma \cdot L_{\text{eff}}$; $\gamma \left(\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right) = k \cdot R^\alpha$; se ve que depende directamente con la intensidad de lluvia.



Donde,

- A: Absorción en dB.
- γ : Atenuación específica (dB/km).
- L_{eff} : longitud del trayecto efectivo (km).
- k y α son constantes empíricas, función de la polarización y de la frecuencia.
- R es la tasa de lluvia (mm/h) asociado a un valor seguro de probabilidad, normalmente 0.01% del tiempo.
- El método se basa en datos de lluvia estadísticos.
- La mejor fuente son siempre los datos locales.
- En otro caso, se emplean las estadísticas de lluvia proporcionadas por la ITU-R, si no se tienen estadísticas locales, se obtiene haciendo interpolaciones.
- Gráficamente:

Local Data vs. ITU-R



En el mapa de la ITU-R se muestran las intensidades de lluvia superadas durante el 0.01% del tiempo. Interesa conocer la atenuación que se supera en un % de tiempo.

- R es la tasa de lluvia asociada a una probabilidad certera, en otras palabras:
 $R_{0.01} = 35 \text{ mm/h}$ ->el valor del 0.01% del tiempo de observación es mayor que 35 mm/h.
- Este hecho nos da la probabilidad para calcular la atenuación causada por la lluvia:

$$A_{0.01}(\text{dB}) = k \cdot R_{0.01}^\alpha L_{\text{eff}}$$

- 0.01 es un valor usual, asociado a la disponibilidad de porcentajes de 99.99%.
- Otros valores de probabilidad dependen del sistema:

$$C_1 = (0.07 C_0) \left[0.12^{(1-C_0)} \right]$$

$$C_2 = 0.855 C_0 + 0.546(1 - C_0)$$

$$C_3 = 0.139 C_0 + 0.043(1 - C_0)$$

$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = C_1 p^{-(C_2 + C_3 \log_{10} p)}$$

$$C_0 = \begin{cases} 0.12 + 0.4 \left[\log_{10}(f/10) \right]^{0.8} & f \geq 10 \text{ GHz} \\ 0.12 & f < 10 \text{ GHz} \end{cases}$$

• Absorción de Lluvia en Sistemas Terrestres:

- El cálculo de la longitud efectiva depende de las especificaciones del Sistema de Radiocomunicación.
- 2 ejemplos: enlaces LOS (de visión directa) y Enlaces Satélite.
- Enlaces LOS:

$$r = \frac{1}{0.477 d^{0.633} R_{0.01}^{0.073} \cdot \alpha f^{0.123} - 10.579 (1 - \exp(-0.024 d))}$$

Donde,

d, es la distancia del enlace (km).

R, es la tasa de lluvia (mm/h).

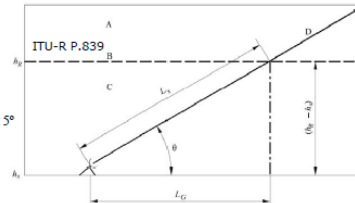
f, es la frecuencia (GHz).

La longitud de la trayectoria efectiva: $L_{eff} = d \cdot r$;

• Absorción de Lluvia en Sistemas Satélite:

- $R_{0.01}$: rainfall rate for 0.01% of an average year (mm/h)
- h_s : height a.s.l. (km)
- θ : elevation angle (degrees)
- φ : latitude of the earth station (degrees)
- f : frequency (GHz)
- R_e : effective radius of the Earth (8 500 km).

Schematic presentation of an Earth-space path giving the parameters to be input into the attenuation prediction process



a) slant-path length, L_s

$$L_s = \frac{(h_k - h_r)}{\sin \theta} \quad \text{if } \theta > 5^\circ \quad L_s = \frac{2(h_k - h_r)}{\left(\sin^2 \theta + \frac{2(h_k - h_r)}{R_e} \right)^{1/2}} + \sin \theta \quad \text{if } \theta < 5^\circ$$

b) horizontal projection, $L_G = L_s \cos \theta$

c) specific attenuation, $\gamma_R \quad \gamma_R = k (R_{0.01})^\alpha$

d) horizontal reduction factor, $r_{0.01} \quad r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38 (1 - e^{-2L_G})}$

e) vertical adjustment factor $v_{0.01}$

$$\zeta(\theta) = \tan^{-1} \left(\frac{h_k - h_r}{L_G v_{0.01}} \right) \quad \text{if } \zeta < 0 \quad L_k = \frac{(h_k - h_r)}{\sin \theta} \quad \text{else } L_k = \frac{(h_k - h_r)}{\sin \theta}$$

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31 \left(1 - e^{-(\theta(1+\zeta))} \right) \sqrt{\frac{L_R \gamma_R}{f^2}} - 0.45 \right)}$$

$$\text{If } |\varphi| < 36^\circ, \quad \chi = 36 - |\varphi| \quad \text{degrees}$$

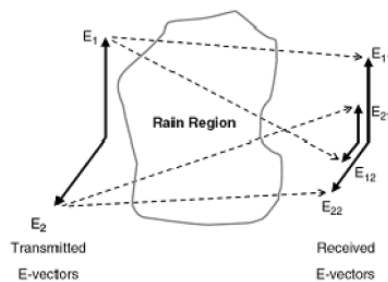
$$\text{Else, } \chi = 0 \quad \text{degrees}$$

The effective path length: $L_E = L_R v_{0.01}$

Línea discontinua: altura a 0°.

• De-Polarización:

- Gráficamente:



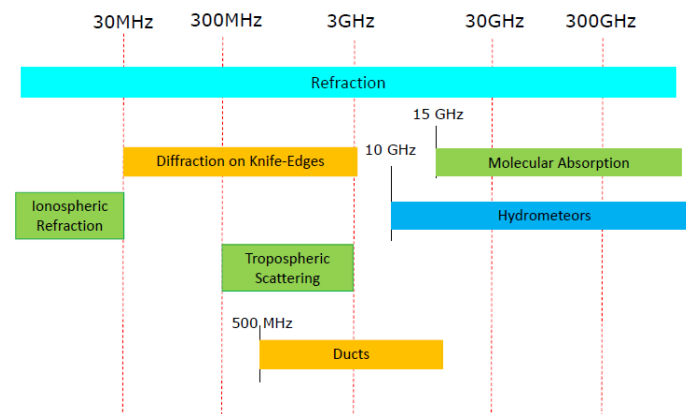
$$XPD = 20 \log \left| \frac{E_{11}}{E_{12}} \right|$$

- E_{11} , es la componente recibida con la polarización original transmitida.
- E_{12} , es la componente recibida con la polarización ortogonal causada por la polarización cruzada.

- Resumen:

Propagation Mode	Components	Physical Phenomena	Frequencies
Surface Wave <i>Onda de superficie</i>	Surface Wave	Absorption Diffraction	< 3 MHz // < 30 MHz (Depends on the Radiating System and Cov. Area)
Space Wave <i>Onda espacial</i>	Direct Wave Reflected Wave	Refraction Reflection Absorption Diffraction Scattering Hydrometeor Absorption De-Polarization	> 100 MHz
Sky Wave <i>Onda de cielo</i>	Ionospheric Wave	Absorption Refraction De-Polarization (Faraday)	3 MHz < f < 30 MHz
Ground Wave <i>Onda de tierra</i>	Surface Wave Direct Wave Reflected Wave	<i>See above</i>	3 MHz < f < 30 MHz (Depends on the Radiating System and Cov. Area)

- Modelos de propagación e influencia con la frecuencia:



A partir de 10-15 GHz los efectos de refracción son menores. Los rayos son más lineales y estrechos. No obstante, según aumenta la frecuencia, la absorción molecular será mayor (aumentando desde los 15 GHz).