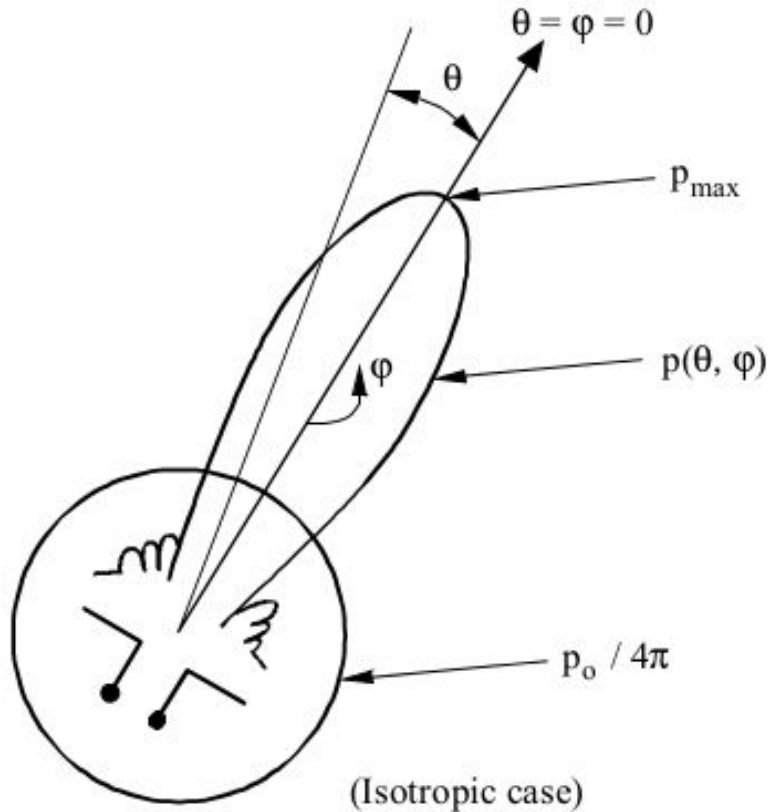


Radiopropagación

Agenda

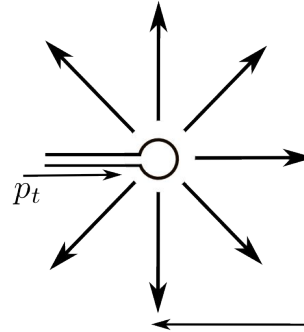
- Introducción, conceptos y definiciones.
- Ecuación de Friis
- Propagación de onda terrestre, ionosférica y troposférica.
- Propagación en muy alta frecuencia.
- Atenuaciones troposféricas y meteoros.
- Centelleo.

Ganancia de antena

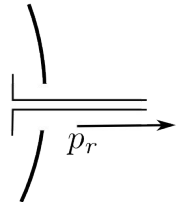


$$G(\theta, \phi) = \frac{p(\theta, \phi)}{p/4\pi}$$

Antena Transmisora



Antena Receptora



d

Densidad de Flujo de Potencia

En el caso de antena omnidireccional:

$$F_d = \frac{p_0}{4\pi r^2} [W/m^2]$$

En el caso de antena directiva y en la dirección de máxima ganancia (boresight):

$$F_d = \frac{p_0 G_T}{4\pi r^2} [W/m^2]$$

la potencia isotrópica radiada efectiva (PIRE)

$$\text{PIRE} = p_0 G_T [W]$$

que en decibeles es

$$\text{PIRE}_{dB} = 10 \log_{10}(p_0) + 10 \log_{10}(G_T) [dBW]$$

Atenuación por Espacio Libre

La potencia del frente de onda capturada por una antena de área efectiva A_{ef} es:

$$(F_d)(A_{ef}) [W] = \frac{p_0 G_T}{4\pi r^2} A_{ef} [W]$$

considerando que la
es:

antena de apertura

$$G_R = \eta \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \frac{4\pi A_{ef}}{\lambda^2}$$

donde A es el área física, λ es la longitud de onda a la frecuencia de trabajo. η es la eficiencia.

Atenuación por Espacio Libre

Entonces la potencia recibida es:

$$C = (\text{PIRE}) G_R \left(\frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2} \right) [W]$$

donde la atenuación por espacio libre se define como:

$$L_{loss} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 .$$

Entonces la potencia recibida en decibeles es

$$C = \text{PIRE}_{dBW} + (G_R)_{dBi} - (L_{loss})_{dB} [dBW]$$

Atenuación por Espacio Libre

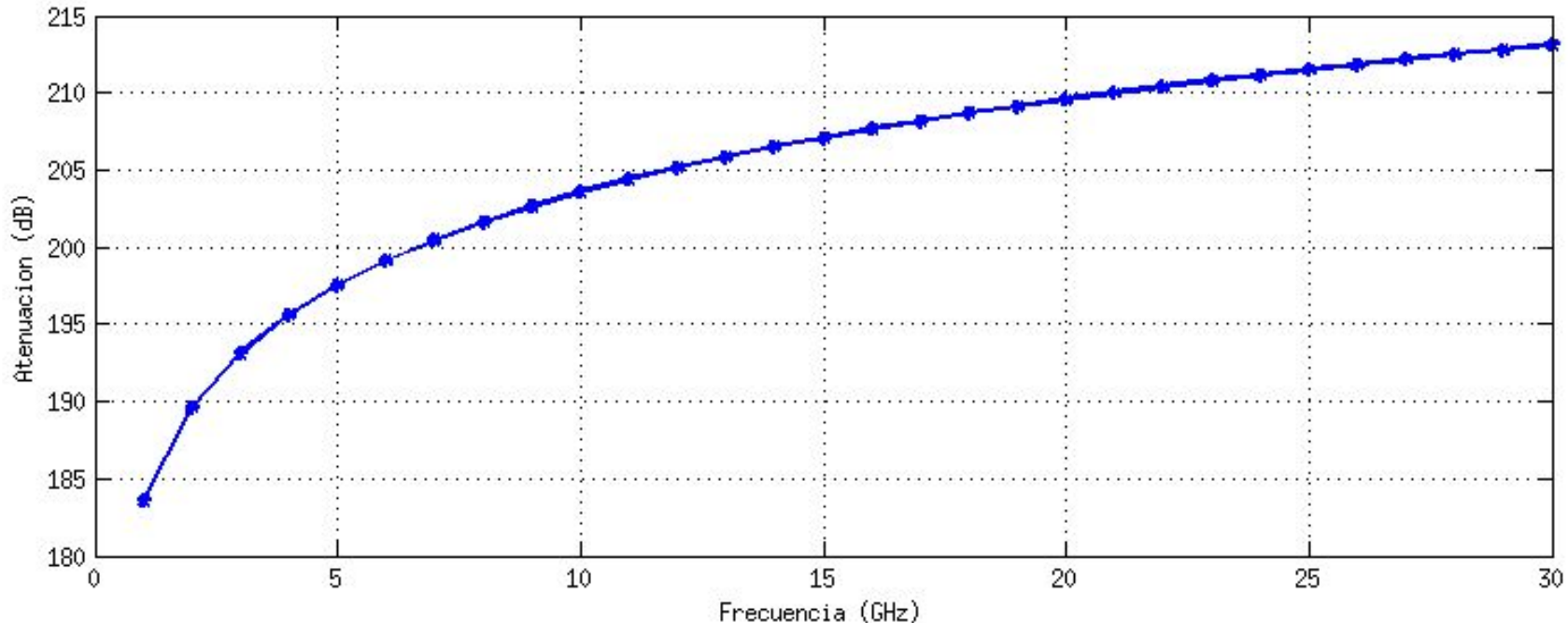
Ejercicio. Calcule la atenuación por propagación en el espacio libre de una señal portadora a 4, 6, 12, 14, 20 y 30 GHz, para un satélite GEO.

$$L_{loss} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 .$$

Atenuación por Espacio Libre

Ejercicio. Calcule la atenuación por propagación en el espacio libre de una señal portadora a 4, 6, 12, 14, 20 y 30 GHz. Para un satélite GEO.

$$L_{loss} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 .$$



Pérdida por desapuntamiento

Es la atenuación que se produce en una dirección desviada α grados con relación al eje principal (boresight) de radiación:

$$[L_{\alpha}]_{dB} = 12 \left(\frac{\alpha}{\theta_{-3dB}} \right)^2 [dB]$$

$$\theta_{-3dB} = 75 \frac{\lambda}{D} [deg]$$

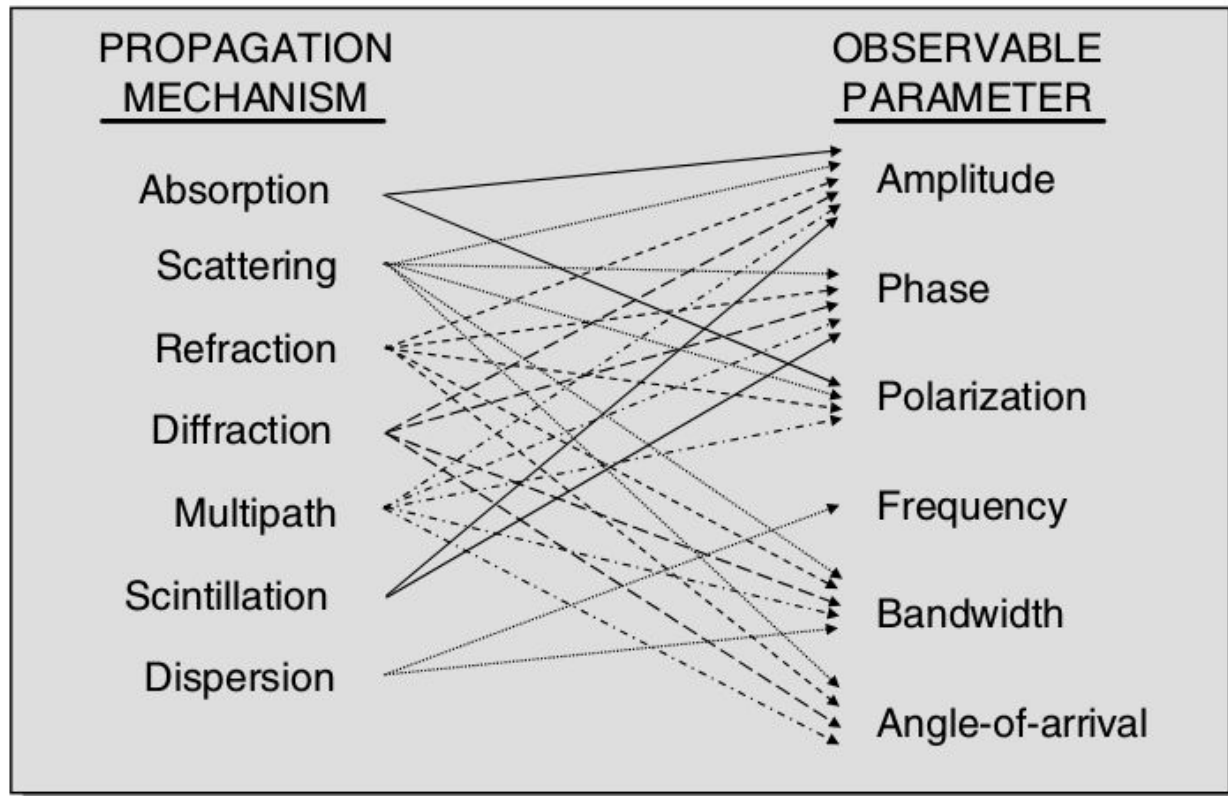
donde D es el diámetro del reflector (pensado en parabólicas).

Sumario parte 1

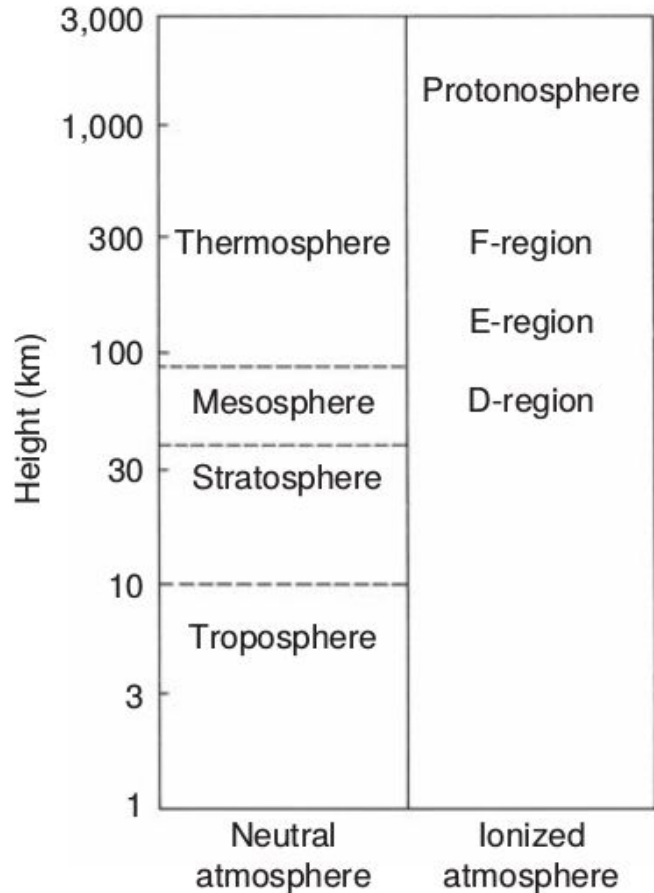
- Concepto de ecuación de FRIs
- Atenuación por espacio libre
- Atenuación por desapuntamiento

Atenuaciones atmosféricas

Mecanismos de propagación



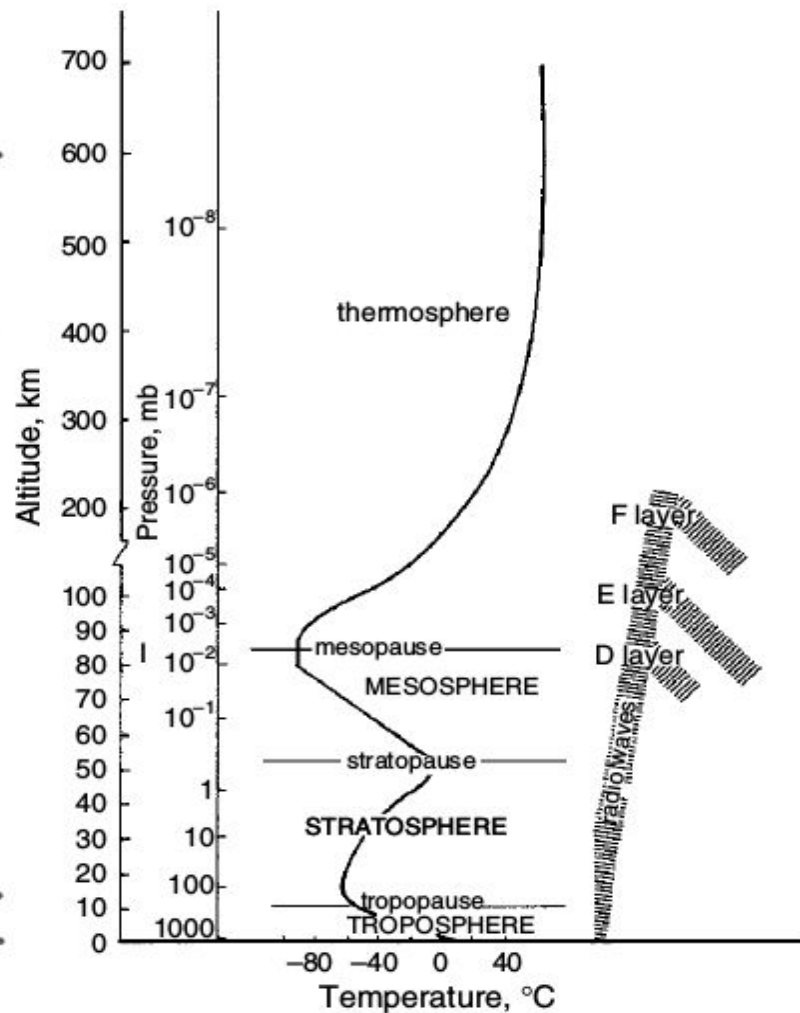
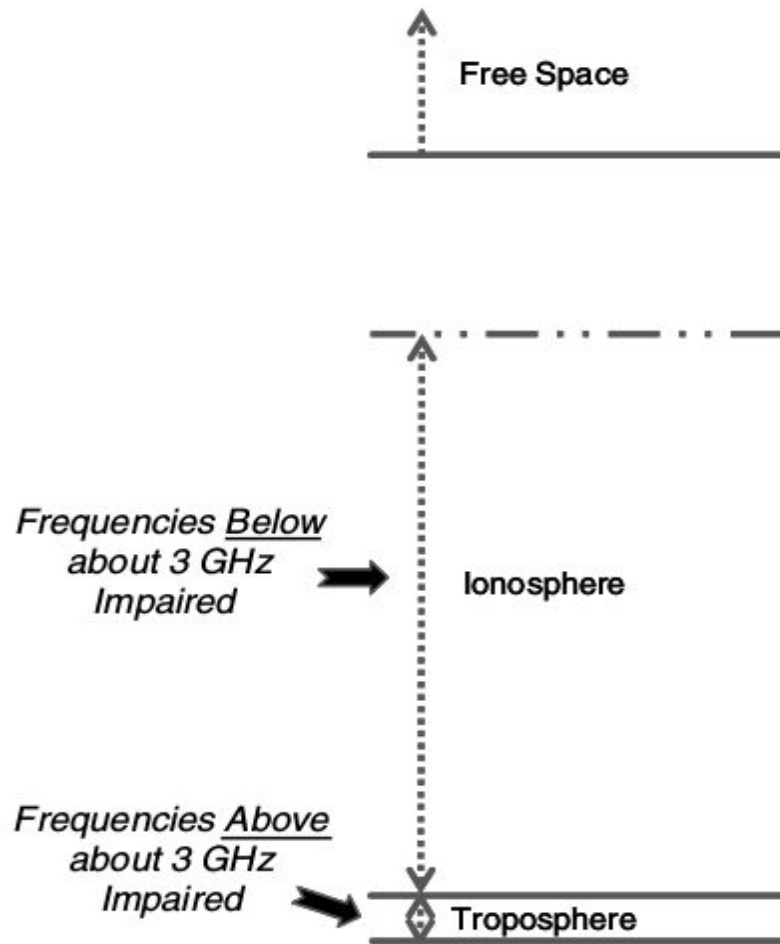
● Propagación Ionosférica y troposférica.



Los efectos de las atenuaciones atmosféricas sobre la radiopropagación , se dividen en dos grandes categorías:

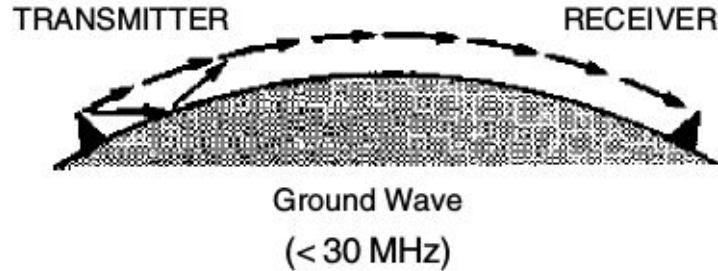
- Efectos Troposféricos
- Efectos Ionosféricos

Componentes de la atmósfera que afectan enlaces

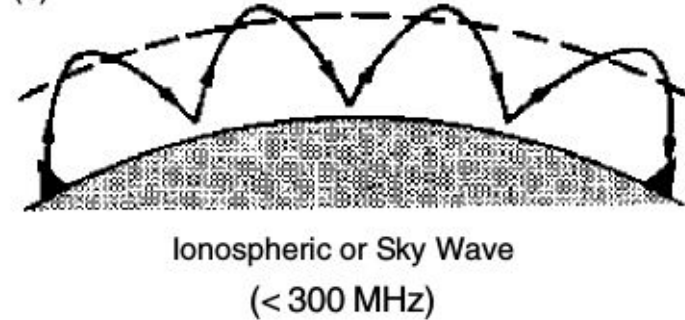


Radiopropagación

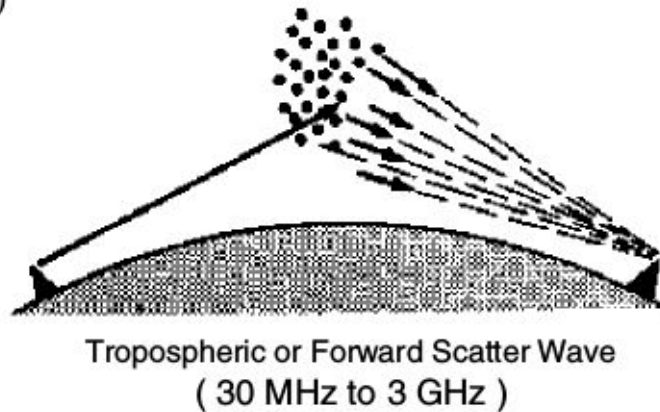
(a)



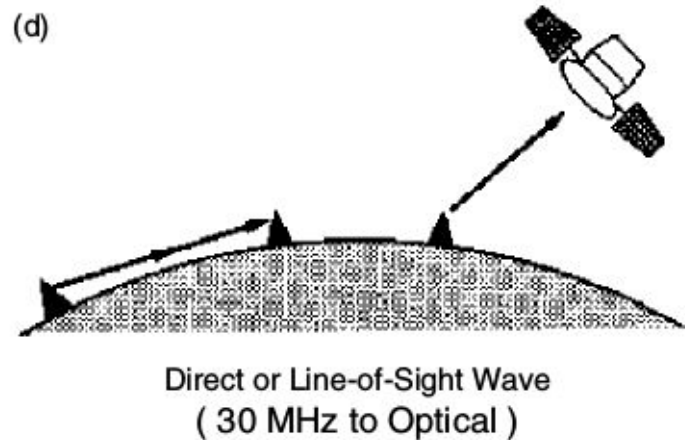
(b)



(c)



(d)



Simulation Parameters:

Surface Pressure: 1013 hPa

Surface temperature: 15°C

Surface water vapour density: 7.58 g/m³

Efectos Troposféricos

- Gases Atmosféricos
- Precipitaciones
- Depolarización por lluvias
- Atenuación por nubes
- Atenuación por centelleo

Gases Atmosféricos

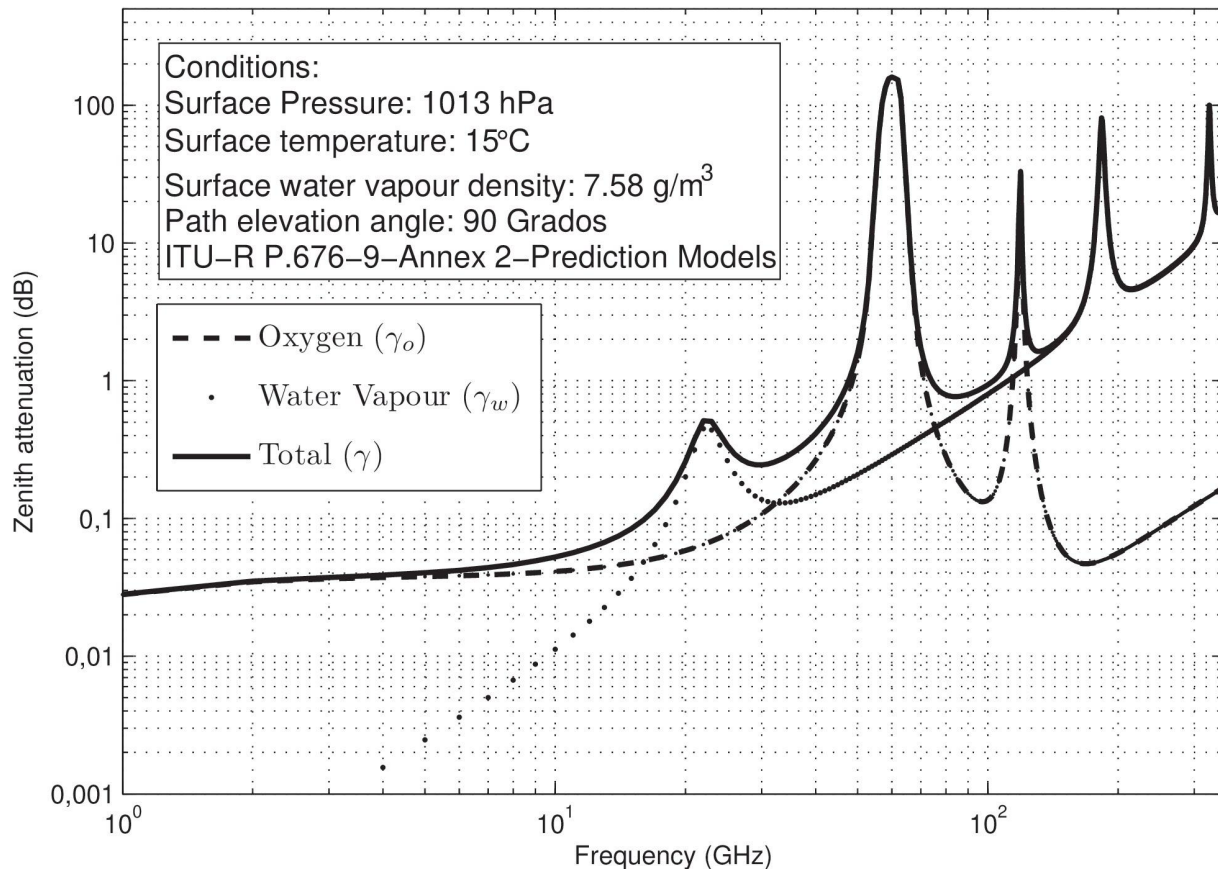
- La atenuación que experimenta un frente de onda electromagnético por gases atmosféricos es enteramente generada por mecanismos de absorción.
- El mecanismo de interacción es la absorción molecular y resulta en la reducción de la amplitud de la onda electromagnética.
- La absorción de energía electromagnética resulta en un cambio cuántico del nivel de energía rotacional de la molécula y ocurre sólo a frecuencias específicas o bandas angostas de frecuencias, éstas son conocidas como líneas resonantes espectrales.
- Muchos de los gases constituyentes de la atmósfera pueden interactuar con el frente de onda incidente. Los principales componentes que afectan las comunicaciones tierra-espacio son el oxígeno y el vapor de agua.

Gases Atmosféricos

- La UIT dispone de dos modelos para la predicción de la atenuación por gases. Ambos modelos estiman la atenuación en base al producto de la atenuación específica por la longitud del recorrido del frente de onda en la atmósfera.
- El primero, considera a la atmósfera de manera estratificada con un grosor que crece exponencialmente con la altura.
- El segundo modelo, es un aproximación, con una diferencia absoluta menor a 0.1 dB/km con respecto al primer modelo.

Gases Atmosféricos

Total, Oxygen and Water-Vapour attenuation from sea level



Trayectoria en dirección al cenit; de modo que si el ángulo del enlace es otro hay que aplicar Corrección.

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \operatorname{cosec}(\theta)$$

donde θ es el ángulo de elevación de la antena.

Precipitaciones

- La atenuación por precipitaciones es el mayor efecto troposférico que impacta en las comunicaciones, particularmente para los sistemas que operan en las bandas de frecuencias de 10 GHz en adelante.
- Las gotas de lluvia absorben y dispersan energía electromagnética del frente de onda, resultando en una reducción de la amplitud de la señal, la cual, degrada el desempeño del enlace de comunicaciones.



Precipitaciones

- El impacto de las condiciones de lluvia depende de la estructura espacial de la misma.
- Tres tipos de estructuras son importantes en la evaluación de los efectos de la lluvia sobre los enlaces de comunicaciones, principalmente los tierra-espacio,
 - **estructuras estratificadas,**
 - **convectivas,**
 - **tormentas ciclónicas.**



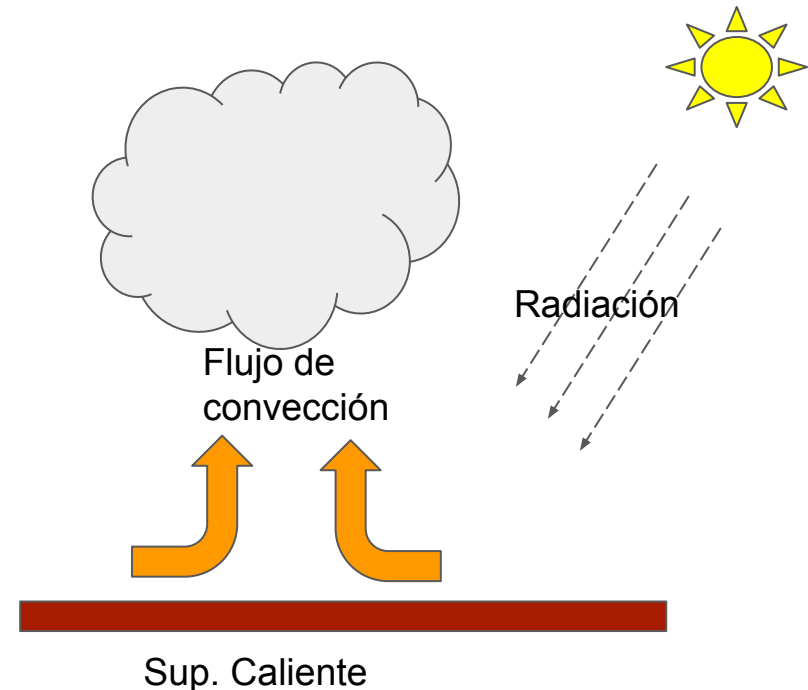
Precipitaciones-Tipos de lluvia

- **Estructura Estratificada.** Presenta estratificación horizontal con cientos de kilómetros de extensión, durante tiempos que sobrepasan la hora de duración y con intensidades de hasta 25 mm/h. Son frecuentes en latitudes medias del globo y mayormente en otoño y primavera, ubicándose en alturas verticales de 4 a 6 km del suelo.
- Para aplicaciones en comunicaciones, este tipo de lluvia tiene una duración suficientemente larga en tiempo para considerar un margen de potencia adicional debido a la atenuación asociada a la intensidad de 25 mm/h. Área geográfica extensa y distribución espacial uniforme.

Precipitaciones-Tipos de lluvia

Precipitaciones convectivas. Surge de los movimientos verticales de gases atmosféricos.

El flujo convectivo ocurre en celdas, cuya extensión horizontal suele tener varios kilómetros. Debido al mismo efecto, la altura de estas celdas superan la capa de congelamiento. Esta estructura dinámica genera lluvias de gran intensidad pero de poca duración. Las estructuras convectivas, son generalmente localizadas y presentan una distribución geográfica no uniforme.



Precipitaciones-Tipos de lluvia

Tormentas ciclónicas . Este tipo de condiciones conocidas como huracanes, presentan una estructura circular de 50 a 200 km de diámetro, con una altura de hasta 8km y se mueven a una velocidad de 10 a 20km/h.

La intensidad de lluvia de esta estructura supera los 25 mm/h. Área geográfica extensa y distribución espacial uniforme.



Propagación y antenas

Dr. Ing Horacio Mendoza

Precipitaciones - Mec. Atenuación

La determinación de la atenuación de la lluvia está basado en tres consideraciones que describen la naturaleza de la radiopropagación y las precipitaciones.

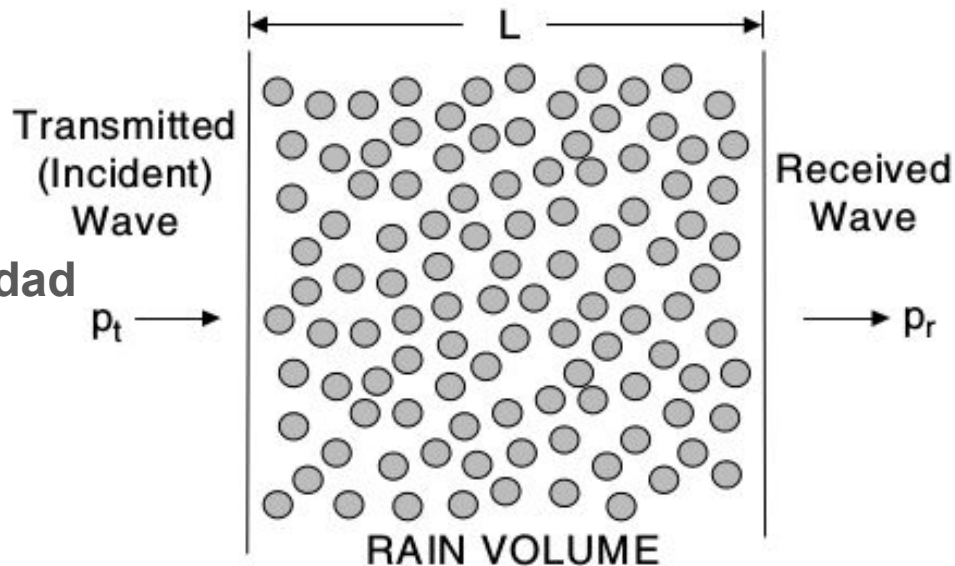
- La intensidad de la onda electromagnética tiene un comportamiento exponencial decreciente y se propaga a través del volumen de lluvia.
- La estructura de la gota de lluvia es perfectamente esférica, la cual dispersa y absorbe energía de la onda incidente.
- La contribución de cada gota es considerada aditiva y estadísticamente independiente de otras gotas.

Precipitaciones - Mec. Atenuación

Estas consideraciones lleva a que la atenuación dependa

- **del tamaño de la gota,**
- **su distribución espacial,**
- **la intensidad de la lluvia (densidad de gotas),**
- **y el grosor del volúmen de la estructura considerada.**

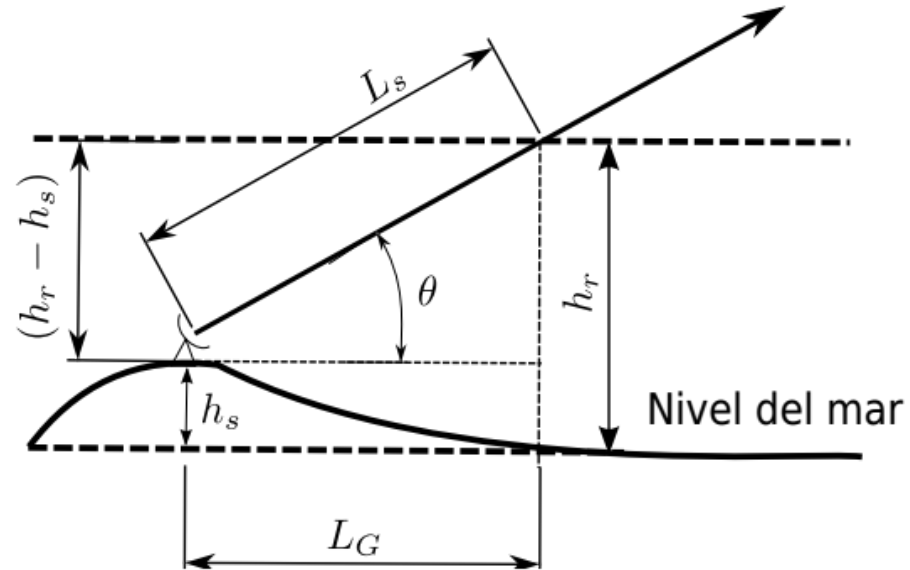
Los tres primeros parámetros dependen de la característica de la lluvia solamente. El último parámetro presenta dependencia de la frecuencia y la temperatura.



Precipitaciones - Mec. Atenuación

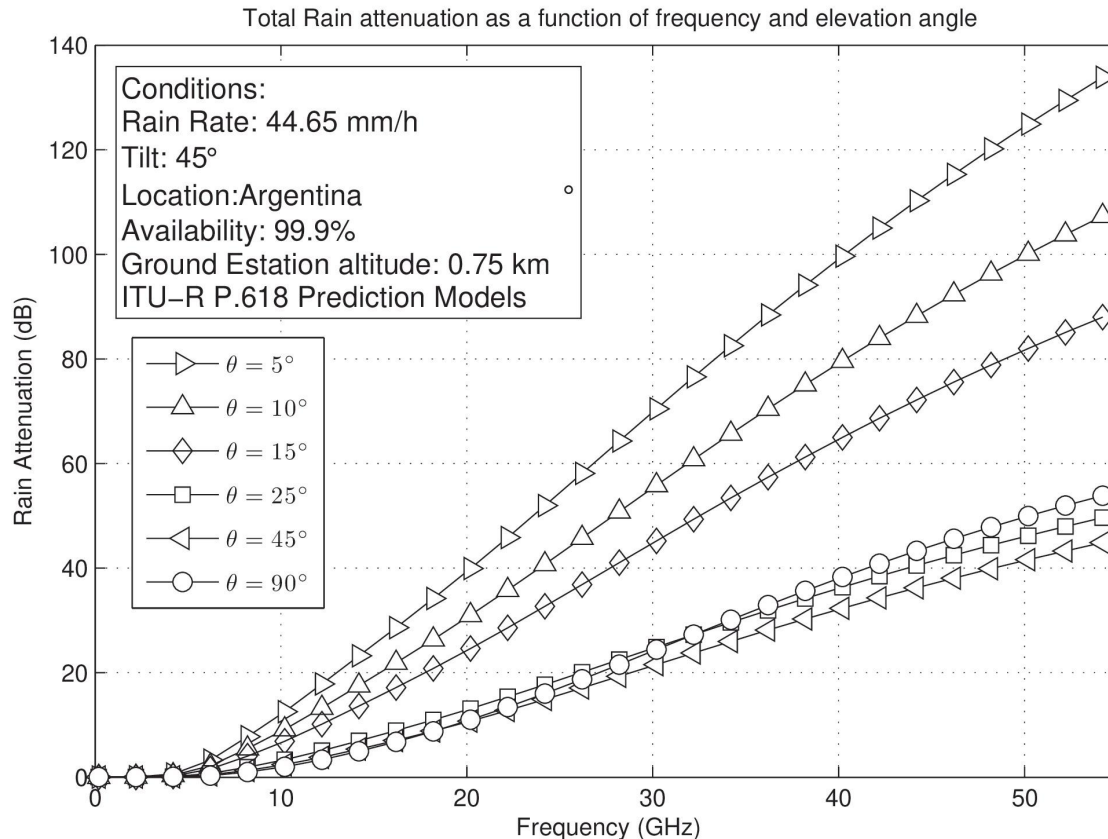
Existen varios modelos de predicción de la atenuación por lluvias, siendo la principal diferencia entre ellos la determinación de la proporción de trayecto del frente de onda con lluvia.

El método más ampliamente aceptado es el que ofrece la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-P.837 / 838 y 839).



Precipitaciones - Mec. Atenuación

Simulación de la atenuación de lluvia para distintos ángulos de elevación.



Depolarización por lluvias

En el diseño de enlaces tierra-espacio se suele considerar la reutilización de frecuencia a través de canales independientes polarizados ortogonalmente con el fin de incrementar la eficiencia del enlace.

Las técnicas de reutilización de frecuencias, utilizan polarización lineal o circular para las transmisiones.

Estas transmisiones, pueden verse afectadas en el camino de propagación debido a transferencias de energía de un estado de polarización a otro estado ortogonal, resultando en un incremento de la interferencia mutua.

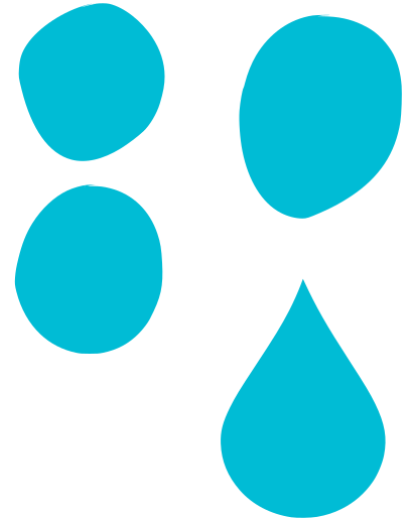
Este efecto es observado en trayectos de propagación con lluvia y es conocido como depolarización por lluvia.

Depolarización por lluvias

La depolarización inducida por la lluvia es generada por atenuaciones diferenciales y corrimientos de fase causado por cambios en la forma de la gota.

A medida que la gota se incrementa en tamaño, su forma pasa de esférica a oblata esferoide con una base cóncava, producida por las fuerzas aerodinámicas actuando en sentido contrario a su desplazamiento.

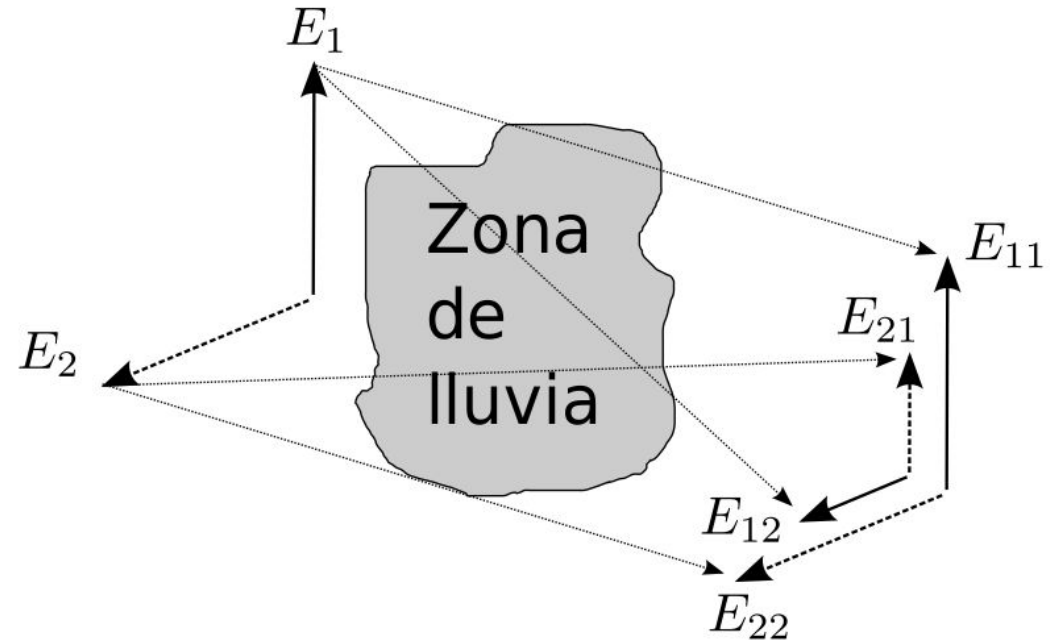
Además, en la caída, las gotas pueden desplazarse inclinadas con respecto a la vertical debido a los gradientes del viento. De esta manera, las características de depolarización de un frente de onda polarizado linealmente depende del ángulo de polarización con que fué transmitida la señal.



Despolarización por lluvias

La XPD se define como la relación entre la magnitud del campo eléctrico antes y después de atravesar la porción de trayecto con lluvia (ITU-P.618-10). Esto es:

$$XPD_{lluvia} = \frac{|E_{11}|}{|E_{12}|}$$



Depolarización por lluvias

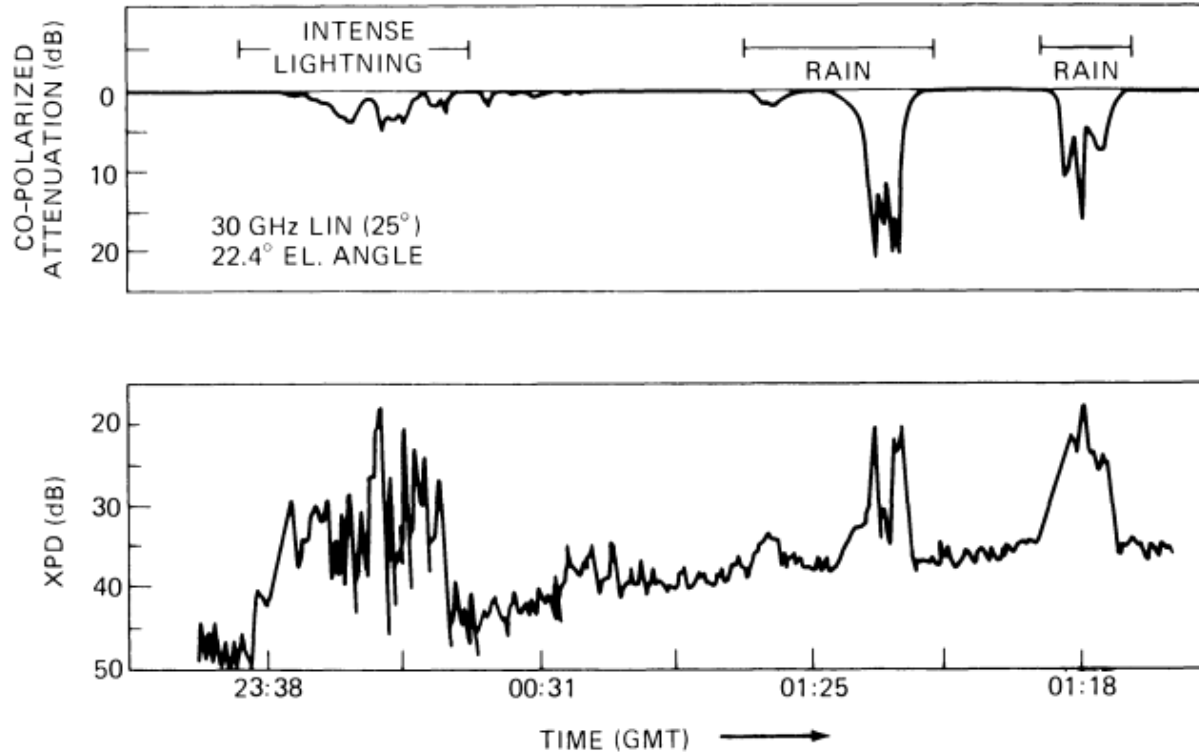
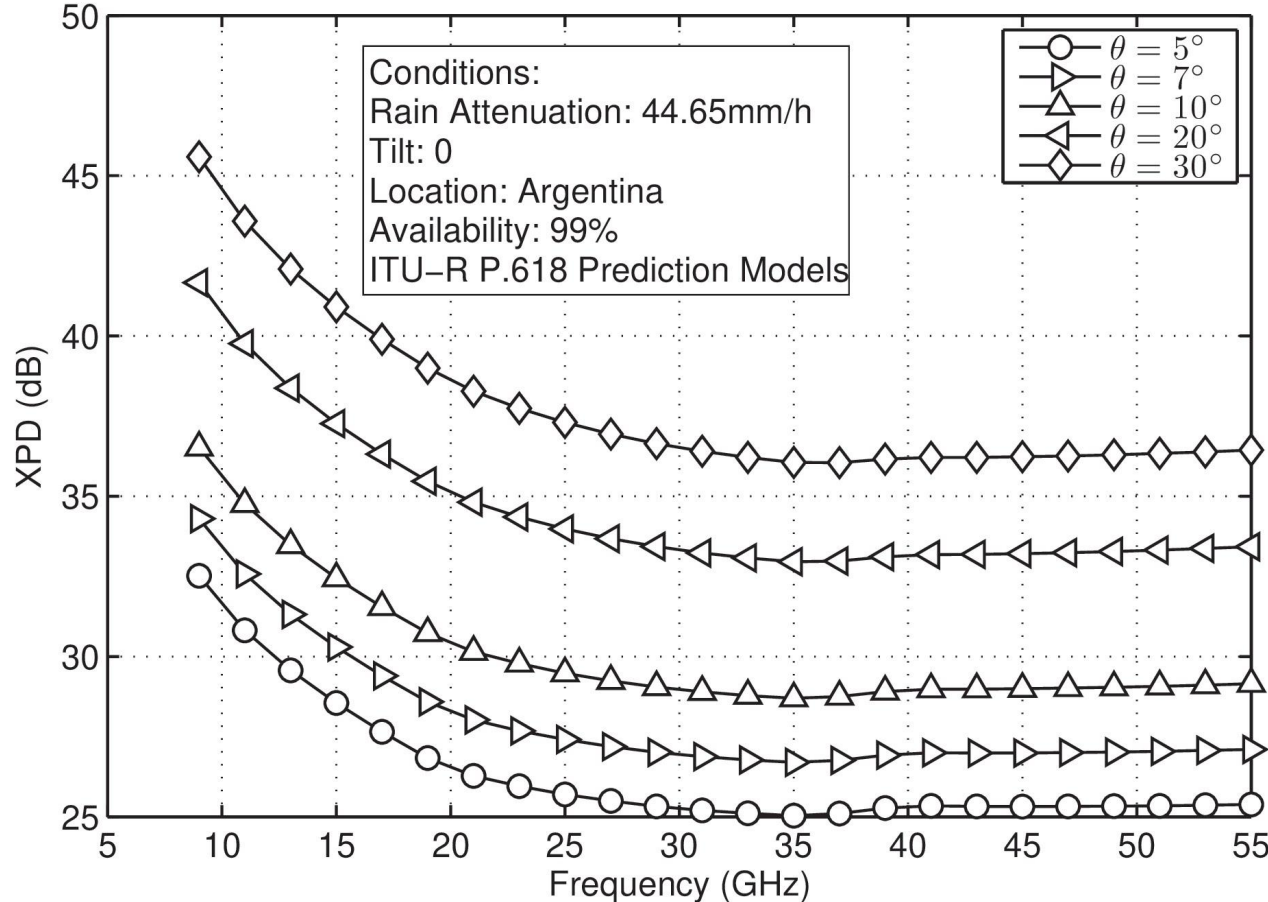


Figure 6-14. Ice depolarization observed at Slough, England, 30 GHz, 22.4° elevation angle, July 15–16, 1976.

Rain Depolarization XPD as a function of frequency and elevation angle



Simulación de la
atenuación generada
por este efecto para
distintas elevaciones
de apuntamiento.

Atenuación por Nubes

La influencia de las nubes y las neblinas pueden estar presentes en los enlaces tierra-espacio.

Las nubes y neblinas, están constituidas por pequeñas gotas de agua del orden de los $50 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$ de diámetro, mientras que las gotas de lluvia están típicamente en el orden de los 0.1 mm a los 10 mm de diámetro.



Atenuación por Nubes

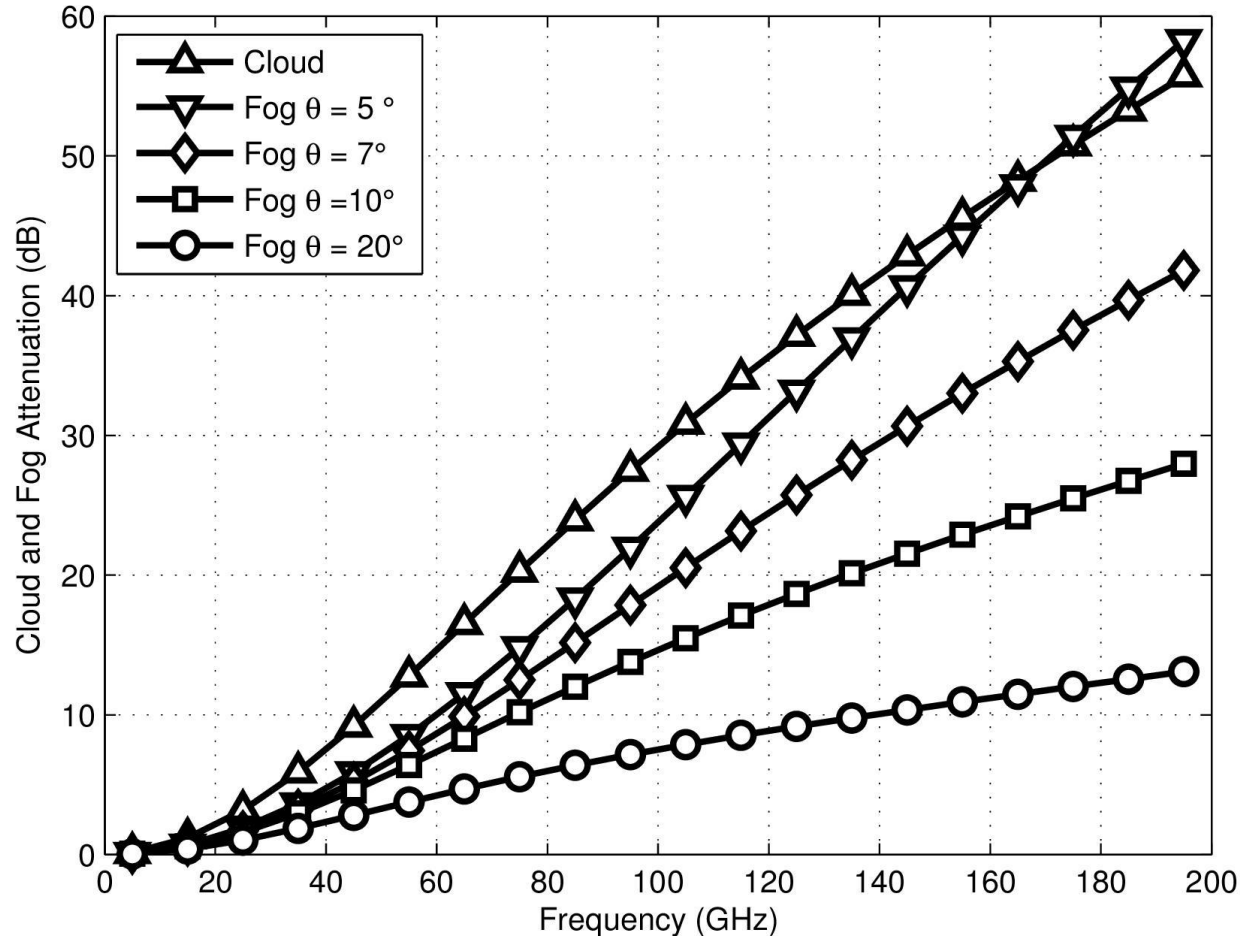
Estas diminutas gotas son las que forman las nubes y no son consideradas como vapor de agua, aunque, la humedad relativa dentro de la nube esté cercana al 100 % .

La densidad volumétrica del agua en una neblina es típicamente del orden de 0.05 g/m^3 (correspondiente a una visibilidad del orden de los 300 m) hasta 0.5 g/m^3 (visibilidad de 50 m).

La atenuación debido a la neblina empieza a ser importante por encima de los 100 GHz (ITU-P.840-5(2012)) .



Attenuation by Hydrosols



Simulación de la
atenuación por nube
o neblina.

*Hydrosols: suspended droplets
of liquid water.*

Atenuación por Centelleo

El Centelleo Troposférico describe fluctuaciones de los parámetros de señal de radio causada por irregularidades dependientes del tiempo en el trayecto de la misma.

Los parámetros afectados de la señal incluyen:

- la amplitud,
- fase,
- ángulo de arribo y
- polarización.



Atenuación por Centelleo

Este tipo de fluctuaciones aparece tanto en troposfera como en la ionósfera.

Los mecanismos que caracterizan el comportamiento en la ionósfera como en la troposfera son distintos.

El Centelleo Troposférico es generado por las variaciones de los índices de refracción en los primeros kilómetros de altitud, además de gradientes de humedad y variaciones de temperatura en función de la altura (decrece con la altura).



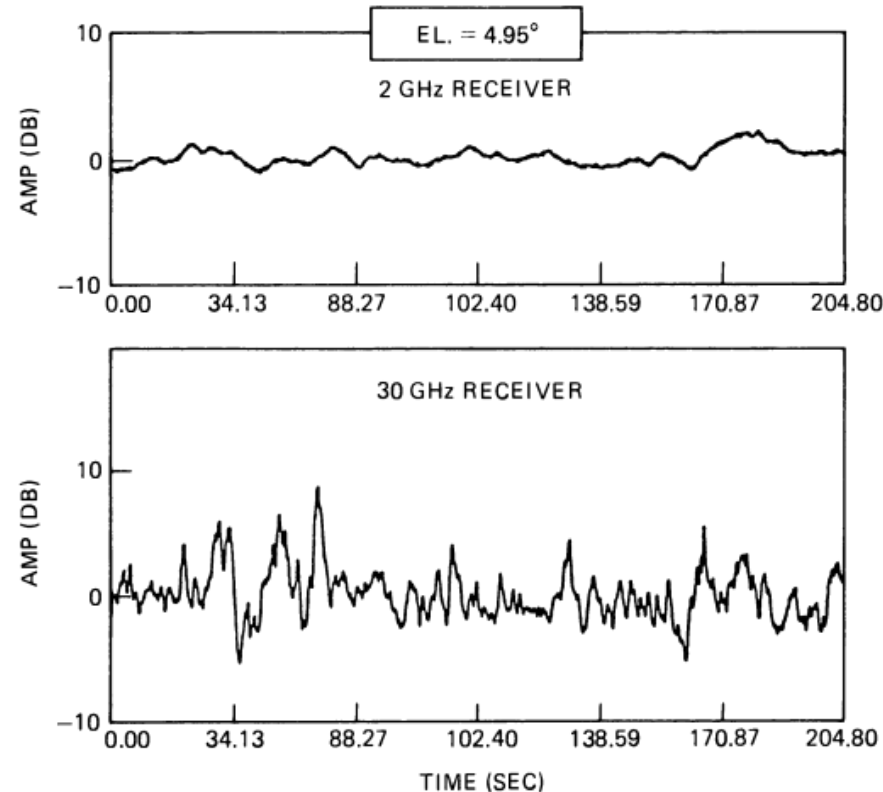
Foto de [Alex Andrews](#) en [Pexels](#)

Atenuación por Centelleo

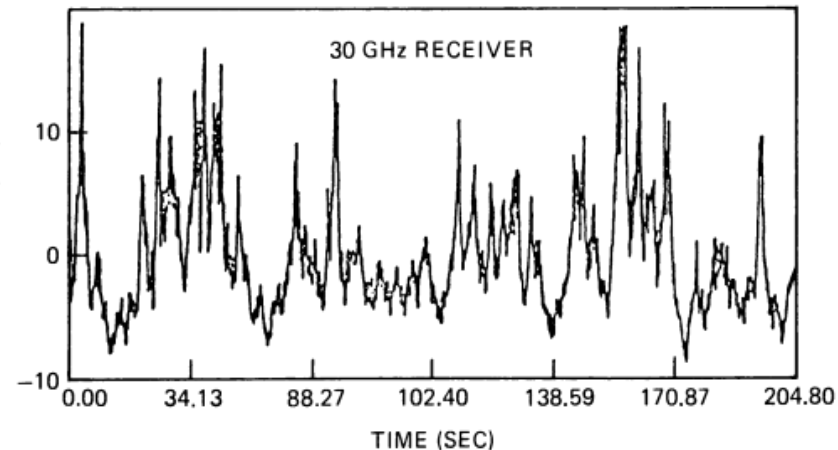
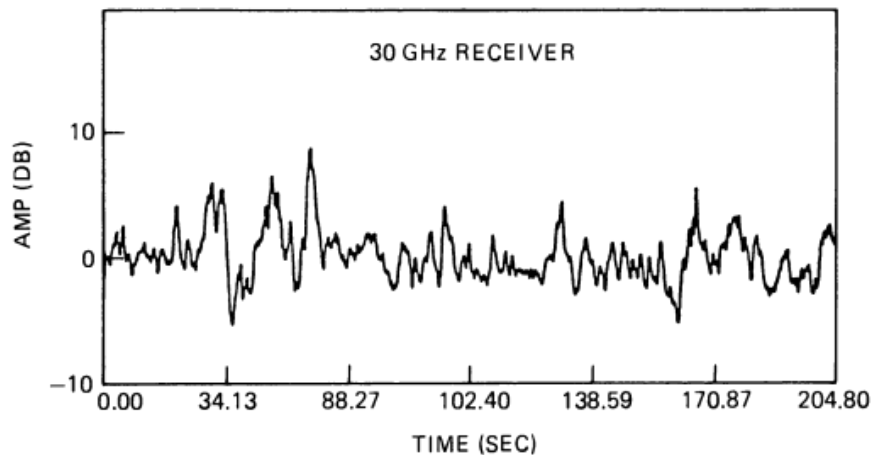
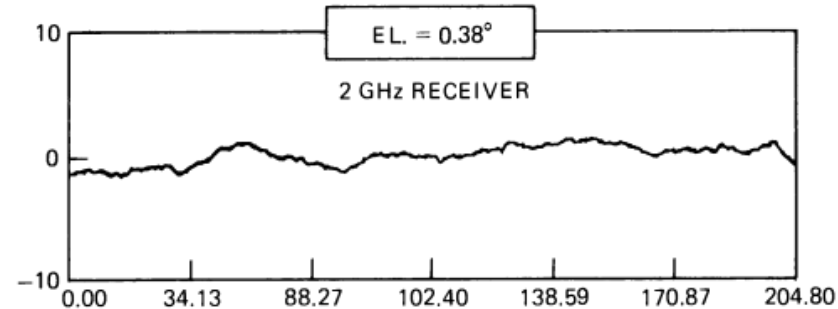
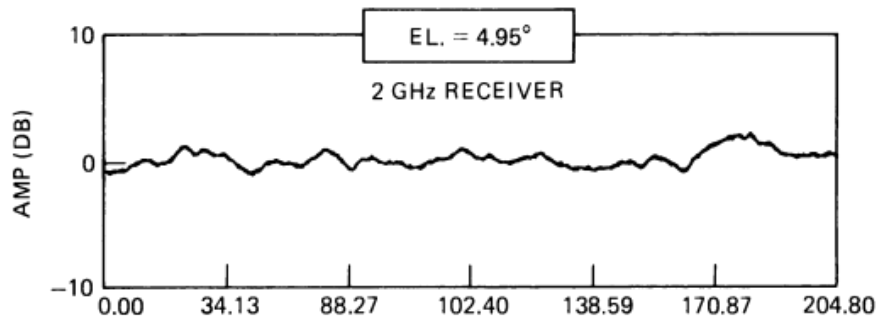
El fenómeno es muy variante y depende de la estación del año que se observa como de su ubicación geográfica.

NO depende de la frecuencia.

Los trayectos de señal más afectados son aquellos a bajas elevaciones, debido a que deben atravesar gran cantidad de capas.

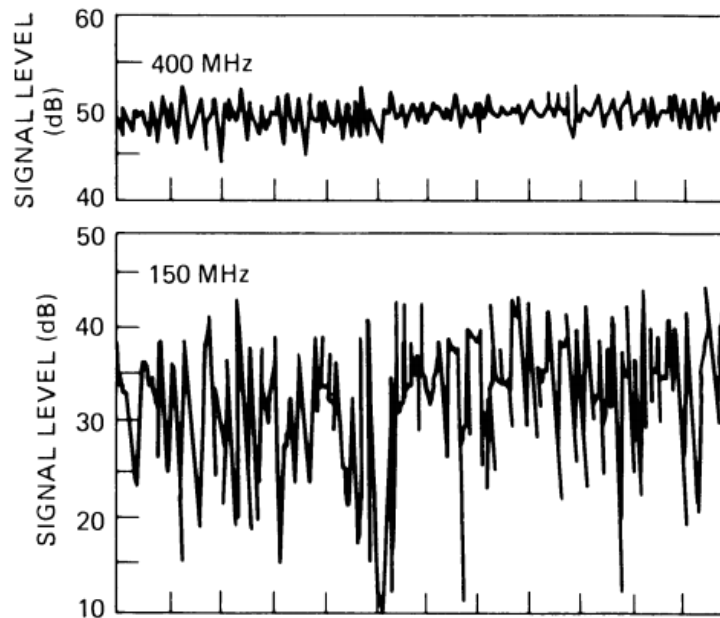


Atenuación por Centelleo



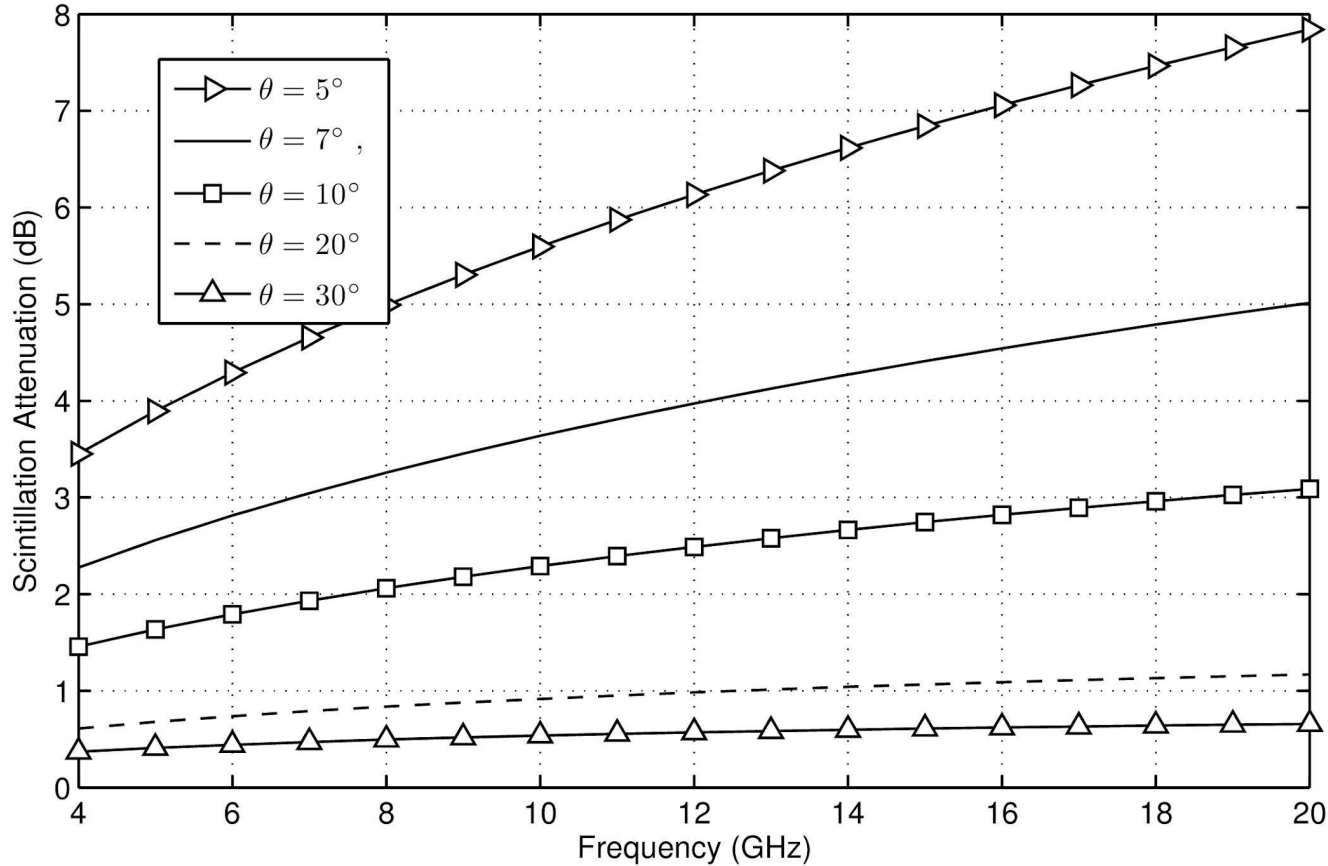
Atenuación por Centelleo

El centelleo ionosférico es producido por las fluctuaciones en la densidad de electrones entre los 200 km y 400 km de altitud. Este fenómeno fue observado entre los 20Mhz y los 6 Ghz. Es una limitación de enlaces para la banda VHF.



Ippolito, Radiowave Propagation in Satellite
Communication - 1986

Tropospheric Scintillation



Simulación de la atenuación esperada por el fenómeno de centelleo.

Efectos Ionosféricos

- Rotación de Faraday

Rotación de Faraday

La ionosfera introduce una rotación en señales polarizadas linealmente.

- Es inversamente proporcional a la frecuencia.
- Es función del contenido de la densidad y distribución de iones en las capas de la ionósfera.
- Varía con el tiempo
- Los planos de rotación son en la misma dirección para uplink como para el downlink.
- No se puede compensar por skew

Efectos Ionosféricos

Los efectos Ionosféricos deben tenerse en cuenta sólo si el trayecto de propagación atraviesa una zona ionizada, como por ejemplo enlaces satelitales.

Si se necesita conocer los retardos de propagación de manera exacta (GPS), en este caso los modelos de atenuación deben ser tenidos en cuenta.

En general los efectos ionosféricos pueden despreciarse para un cálculo de radioenlace satelital.

Sumario

- La atmósfera donde se propaga la señal juega un papel importante.
- Los efectos ionosféricos y troposféricos tienen impacto en los enlaces de comunicaciones. Para aquellas aplicaciones de radiocomunicaciones espacio-tierra ambos efectos son importantes. Para los enlaces terrestres los troposféricos son importantes, especialmente las condiciones de lluvia.
- Algunos efectos son considerados como ruido, por su naturaleza aleatoria.
- Los modelos dependen de datos locales para estimar con mayor precisión las atenuaciones.

Ref: Ippolito, RADIOWAVE PROPAGATION IN SATELLITE COMMUNICATIONS, 1986