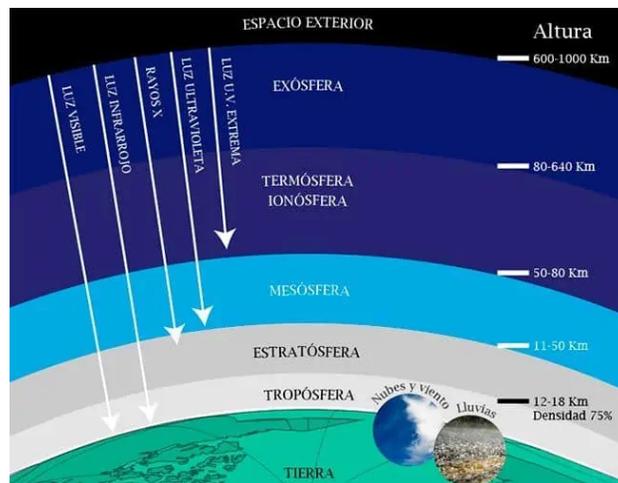


# Chapter 1

## Efecto de la troposfera

La troposfera es la capa inferior de la atmósfera terrestre y escenario de todos los procesos meteorológicos, ya que es aquí donde se encuentran las nubes, tormentas, vientos, frentes de diferente presión, temperaturas variables, etc. Esta se extiende desde la superficie terrestre hasta una altura de 8 a 10 km en las latitudes polares, de 10 a 12 km en las latitudes moderadas y de 16 a 18 km en el Ecuador.



### 1.1 Atenuación

Causado principalmente por la absorción molecular de los gases de la atmósfera y la misma atenuación producida por los hidrometeoros. Esta se debe principalmente a las moléculas de oxígeno y vapor de agua. Para frecuencias menores a 10 GHz, la atenuación por moléculas de oxígeno y por vapor de agua es despreciable, mientras que a frecuencias mayores presentan rayas de atenuación.

La atenuación generada por el oxígeno es de las principales, pues a nivel de mar las pérdidas están en los 15 dB/km, lo que imposibilita la comunicación a grandes distancias con altas frecuencias.

La atenuación generada por el vapor de agua (niebla o nubes) presenta mayor impacto en frecuencias de infrarrojo y luz visible.

*Imagina que estás caminando en una calle llena de personas. Si hay muchas personas (moléculas) bloqueando el paso, te moverás más lento y con dificultad. Así le pasa a la señal: si hay más vapor de agua o oxígeno, y si su frecuencia coincide con su 'modo de vibrar', la señal se frena más y se debilita.*

### 1.1.1 Atenuación por hidrometeoros

Principalmente causada por la lluvia, ya que depende de la intensidad y de factores como el tipo de lluvia, el tamaño y la velocidad de las gotas, afecta principalmente a frecuencias superiores a GHz.

La atenuación específica de la lluvia puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$\gamma_r = KR^\alpha \quad (1.1)$$

Donde:

- R es la intensidad de la lluvia en mm/h K y  $\alpha$  son función de la frecuencia y difieren para polarización vertical y horizontal.

La relación entre la atenuación específica oscila entre 1,05 y 1,35 dB para cada polarización en el margen de frecuencias entre 10 y 80 GHz.

FRECUENCIA (GHz)	K <sub>H</sub>	K <sub>V</sub>	$\alpha_H$	$\alpha_V$
1	0,0000387	0,0000352	0,912	0,880
10	0,0101	0,00887	1,276	1,264
20	0,0751	0,0691	1,099	1,065
30	0,187	0,167	1,021	1,000
40	0,350	0,310	0,939	0,929

En los trayectos inclinados, o trayectos tierra-espacio, los valores de atenuación específica por absorción molecular varían, ya que, en función de la altura, disminuyen las concentraciones de gases y, por tanto, la atenuación. El contenido de vapor de agua en la atmósfera decrece rápidamente en función de la altura, mientras que el contenido de oxígeno lo hace de forma gradual. La atenuación específica para trayectos inclinados y que no estén muy alejados de lo vertical se calcula con la siguiente fórmula:

$$A(\psi) = \frac{A(90)}{\text{sen}\psi} \quad (1.2)$$

*Es como mirar el fondo de una piscina: si miras desde arriba (vertical), ves claro. Pero si miras de lado (ángulo bajo), la luz se dispersa y no ves bien. Igual pasa con la señal: cuanto más inclinado el trayecto, más atmósfera atraviesa y más se debilita.*

### 1.1.2 Ejercicio 1

Se desea calcular la atenuación total que sufre una señal de microondas que atraviesa la troposfera con lluvia. La señal tiene una frecuencia de 30 GHz, la intensidad de la lluvia es de 35 mm/h, el espesor vertical de la capa de lluvia es de 4 km, y el ángulo de elevación de la antena es de 40°. Se pide calcular la atenuación total  $A(\psi)$  en dB considerando el trayecto inclinado.

## Datos

- Frecuencia:  $f = 30$  GHz
- Intensidad de lluvia:  $R = 35$  mm/h
- Altura vertical del trayecto:  $H = 4$  km
- Ángulo de elevación:  $\psi = 40^\circ$
- Constantes para 30 GHz y polarización horizontal:

$$K = 0.0981, \quad \alpha = 1.095$$

## Solución

### Paso 1: Calcular la atenuación específica

Aplicamos la fórmula de atenuación por lluvia:

$$\gamma_r = KR^\alpha$$

Sustituimos los valores:

$$\gamma_r = 0.0981 \cdot (35)^{1.095} \approx 0.0981 \cdot 41.91 \approx 4.112 \text{ dB/km}$$

### Paso 2: Calcular la atenuación vertical

Multiplicamos por el espesor vertical:

$$A(90^\circ) = \gamma_r \cdot H = 4.112 \cdot 4 = 16.45 \text{ dB}$$

### Paso 3: Corregir por ángulo de trayectoria

Usamos la fórmula:

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

$$A(40^\circ) = \frac{16.45}{\sin(40^\circ)} = \frac{16.45}{0.6428} \approx 25.6 \text{ dB}$$

## Resultado Final

La atenuación total que sufre la señal en un trayecto inclinado de  $40^\circ$  es:

$$\boxed{25.6 \text{ dB}}$$

## 1.2 Refracción

El índice de refracción de la atmósfera varía en función de la concentración de gases. El índice de refracción del aire es muy próximo a la unidad. Para facilitar los cálculos, se define el coíndice de refracción o refractividad  $N$  como:

$$N = (n - 1) * 10^6 \text{unidades} N \quad (1.3)$$

Si se supone la atmósfera como un gas ideal con una cierta concentración de vapor de agua, la refractividad puede obtenerse como:

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 * 10^5 \frac{\epsilon}{T^2} \quad (1.4)$$

Donde:

- P: presión atmosférica en mbar.
- T: temperatura absoluta en K.
- e: presión parcial del vapor de agua en mbar.

La principal consecuencia de la variación del índice de refracción atmosférico es la refracción de las ondas, es decir, que las ondas no se propagan en línea recta. El radio de curvatura  $r$  de la trayectoria está dado por:

$$\frac{1}{r} = -\frac{1}{n(h)} \frac{dn}{dh} \cos \psi \quad (1.5)$$

Como el índice de refracción es muy próximo a 1, y dado que en general las antenas se encuentran a alturas semejantes, es decir, el ángulo  $w$  se aproxima a cero, la expresión anterior puede escribirse como:

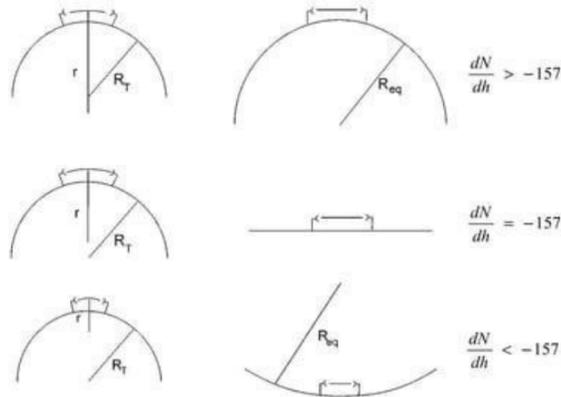
$$\frac{1}{r} = -\frac{dn}{dh} \quad (1.6)$$

Para simplificar el análisis de la propagación de ondas cerca de la superficie terrestre, se supone que el gradiente de refractividad permanece constante. Esta suposición hace que la trayectoria de las ondas adopte una forma circular con radio fijo. Así, se introduce un radio terrestre equivalente que permite representar la propagación como si fuera en línea recta. La condición que debe cumplir este radio equivalente es:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_T} - \frac{1}{r} = (157 + \frac{dN}{dh}) * 10^{-6} \quad (1.7)$$

Para la atmósfera de referencia al nivel del mar se obtiene que:

$$R_{eq} = \frac{4}{3} R_T = 8.500 km \quad (1.8)$$



- Un gradiente de refractividad de  $-157$  N/km marca un punto crítico: el radio de curvatura del rayo iguala al de la Tierra y el radio equivalente terrestre es infinito.
- Si el gradiente es más suave que  $-157$  N/km (como el valor típico de  $-39$  N/km), el radio de curvatura del rayo es mayor, y las ondas se propagan más allá del horizonte.
- Si el gradiente es más fuerte que  $-157$  N/km, el rayo se curva hacia la Tierra y puede quedar atrapado, originando la propagación por conductos.
- La propagación por conductos ocurre cuando las ondas quedan guiadas entre la superficie terrestre y una capa atmosférica, con muy baja atenuación comparada con el espacio libre.
- Este fenómeno afecta principalmente las bandas VHF, UHF y SHF, siendo más relevante en VHF y UHF por su menor atenuación atmosférica.
- Los conductos se forman por grandes variaciones del índice de refracción, asociadas a cambios en la humedad, y son más comunes sobre mares cálidos.
- Aunque impredecible, la propagación por conductos puede causar interferencias a larga distancia, especialmente en verano sobre el mar Mediterráneo, afectando servicios como FM y TV.

### 1.2.1 Ejercicio 2

A nivel del mar, se tienen las siguientes condiciones atmosféricas:

- Presión atmosférica:  $P = 1013$  mbar
- Temperatura:  $T = 293$  K
- Presión parcial de vapor de agua:  $e = 20$  mbar
- Gradiente de refractividad:  $\frac{dN}{dh} = -39$  N/km
- Radio terrestre real:  $R_T = 6370$  km

Se pide:

1. Calcular la **refractividad N** del aire.
2. Calcular el **radio de curvatura r** de la onda.
3. Determinar el **radio terrestre equivalente  $R_{eq}$** .

## Solución

### 1. Cálculo de la refractividad $N$

Usamos la fórmula:

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2}$$

Sustituimos los valores:

$$N = 77.6 \cdot \frac{1013}{293} + 3.73 \times 10^5 \cdot \frac{20}{293^2}$$

$$N \approx 77.6 \cdot 3.4567 + 3.73 \times 10^5 \cdot \frac{20}{85849}$$

$$N \approx 268.39 + 86.91 \approx 355.3 \text{ unidades N}$$

### 2. Cálculo del radio de curvatura $r$

Sabemos que:

$$\frac{1}{r} = -\frac{dn}{dh} \approx -\frac{dN}{dh} \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{1}{r} = -(-39) \cdot 10^{-6} = 39 \cdot 10^{-6} \Rightarrow r = \frac{1}{39 \cdot 10^{-6}} \approx 25641 \text{ km}$$

### 3. Cálculo del radio terrestre equivalente

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_T} - \frac{1}{r} = \frac{1}{6370} - \frac{1}{25641}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} \approx 1.569 \times 10^{-4} - 3.9 \times 10^{-5} = 1.179 \times 10^{-4} \Rightarrow R_{eq} \approx 8482 \text{ km}$$

## Resultado Final

- Refractividad:  $N \approx 355.3$  unidades N
- Radio de curvatura de la onda:  $r \approx 25,641$  km
- Radio terrestre equivalente:  $R_{eq} \approx 8482$  km

### 1.3 Difusión troposférica

La **difusión troposférica** es un tipo de propagación de ondas que ocurre cuando las señales de radio se dispersan en la *troposfera*, la parte más baja de la atmósfera (hasta unos 10–15 km de altura). Aunque normalmente se asume que esta capa es uniforme, en realidad contiene irregularidades o heterogeneidades que causan cambios en el índice de refracción.

Si una antena transmisora envía una señal con suficiente energía hacia una de estas irregularidades, parte de esa energía se dispersa y puede ser captada por una antena receptora a largas distancias, incluso de 300 a 500 km, sin necesidad de que haya línea de vista directa.

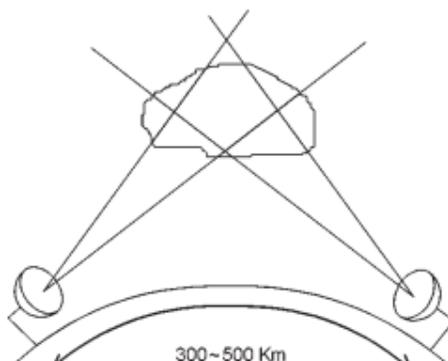


Figure 1.1: Propagación por difusión troposférica

#### Ejemplo ilustrativo:

*Imagina que lanzas una piedra al agua y se forman ondas. Si hay un objeto flotando más lejos, las ondas pequeñas pueden llegar a él aunque no lo veas directamente. Así funciona la difusión troposférica: las señales no viajan en línea recta, sino que se dispersan en la atmósfera y pueden alcanzar lugares lejanos gracias a esas pequeñas “turbulencias del aire”.*