

Capítulo 1: Radiopropagación por encima de 1GHz

1.1.- Introducción.

Establecida la necesidad de prestar comunicaciones eléctricas con determinadas características (voz, imagen, datos, etc.), se debe emprender la tarea de seleccionar el sistema óptimo para satisfacer el servicio requerido. Para ello se estudiarán comparativamente los posibles sistemas, a fin de escoger aquel que técnica y económicamente resulte mejor, teniendo en cuenta también factores como: madurez de la tecnología, posibilidad de expansión, facilidad de modernización, disponibilidad de la información para modificaciones propias, etc.

Supongamos que luego de ese proceso se eligió instalar radioenlaces en la banda de SHF (Microondas) basados en repetidores de visión directa. Estos *radioenlaces de microondas*, son similares a los de transmisión múltiplex por línea o cable, salvo que el portador no es físico sino radielectrico.

Siguiendo esta analogía, se llamaron en un principio sistemas de **Cable Hertziano**. En consecuencia, su diseño en cuanto a múltiplex es muy similar al de los sistemas que empleaban conductores metálicos y ahora emplean fibra óptica. La elección entre una u otra alternativa depende entonces de una serie de factores prácticos y económicos.

Los radioenlaces de microondas funcionan en las bandas del espectro por encima de los 900 MHz y abarcan desde los enlaces más convencionales de visibilidad directa hasta de los que hacen uso de la dispersión troposférica e incluso de la propagación extraterrestre.

De un modo general, los clasificaremos en radioenlaces *Analógicos* y *Digitales*, atendiendo a la naturaleza a la naturaleza de la señal de la banda base moduladora.

En un *Radioenlace Analógico Típico*, la señal moduladora es un **múltiplex telefónico MDF** que modula a la portadora en frecuencia *MF*, un conjunto de señales **radiofónicas** o una señal de **TV**. La gama de capacidades de los radioenlaces para telefonía se extiende de 12 a 10800 canales telefónicos. Para TV, la carga típica del radioenlace es la señal de video frecuencia (banda base de 0 - 5.5 MHz).

En un **radioenlace digital**, la señal moduladora es un **múltiplex digital MIC (PCM)** que modula la portadora en fase (*PSK*) o fase diferencial (*DPSK*), en forma **binaria ó multinivel (polivalente)**, o hace uso de una modulación combinada en amplitud y en fase (*QAM*).

Numerosas administraciones han puesto en explotación, radioenlaces digitales que transmiten señales MCI procedentes del múltiplex primario de **2 Mb/s** o de los múltiplex digitales de 1º, 2º, 3º nivel, **8, 34 y 140/155 Mb/s**, respectivamente.

Los radioenlaces de microondas fueron desarrollados ya antes de la 2^{da} Guerra Mundial, y aunque durante ésta, su evolución se interrumpió por la prioridad que se dio a los sistemas de radar, se beneficiaron de la aparición de dispositivos destinados a tales sistemas como el Klystron, el tubo de ondas progresivas, el magnetrón, etc.; así como de la tecnología de guías de ondas y de antenas muy directivas.

Subsiguientemente, fue la TV el primer usuario de los radioenlaces para la conexión entre estudios y centros transmisores y redes de transmisión de TV. En esta aplicación se apreció la ventaja de utilizar MF y la experiencia adquirida facilitó la aplicación a la transmisión telefónica múltiplex.

La red de radioenlaces de microondas ha registrado una expansión notable en todos los países, estimulada, en parte por la automatización progresiva de la red telefónica y por la necesidad de disponer de más canales de TV de color.

Esta expansión ha venido acompañada de una importante evolución tecnológica que utiliza los nuevos componentes de microondas, lo que conduce a equipos que presentan dimensiones mínimas, gran facilidad de montaje, comodidad en el control particular de los

equipos y general de los sistemas y emplea tecnologías modernas con circuitos de *microlínea* (*Microstrip*) sustituyendo con ellas gran parte o bien la totalidad de grupos y componentes realizados hasta la actualidad en guíasondas, consiguiéndose mayor *fiabilidad, fluidez y rapidez en el mantenimiento*.

Ventajas e inconvenientes de los radioenlaces:

Seguidamente, se resumen las *ventajas generales de los radioenlaces*, en comparación con los sistemas de línea física:

- Volumen de inversión inicialmente más reducido.
- Instalación más rápida y sencilla.
- Conservación generalmente más económica y de actuación rápida.
- Pueden superarse las irregularidades del terreno.
- La regulación solo debe aplicarse al equipo, puesto que las características del medio de transmisión son esencialmente constantes en la anchura de banda de trabajo.
- Puede aumentarse la separación entre repetidores, incrementando la altura de las torres.

Por otra parte, estos sistemas presentan inconvenientes al compararlos con los de línea:

- Explotación restringida a tramos con visibilidad directa para los enlaces convencionales.
- Necesidad de acceso adecuado a las estaciones repetidoras en las que hay que disponer de energía y acondicionamiento para los equipos y servicio de conservación. Sin embargo crece el uso de generadores autónomos y baterías de celdas solares.
- La segregación, aunque es posible y se realiza, no es tan flexible como en los sistemas por cable.
- Las condiciones atmosféricas adversas puedan ocasionar desvanecimientos intensos y desviaciones del haz, lo que implica usar sistemas de diversidad con equipo auxiliar de conmutación.
- La gran linealidad requerida en los repetidores, supone un importante problema de diseño.

Estructura General de un Radioenlace:

Equipos:

Un radioenlace está constituido por equipos *terminales* y *repetidores* intermedios, en la siguiente figura se da una representación esquemática:

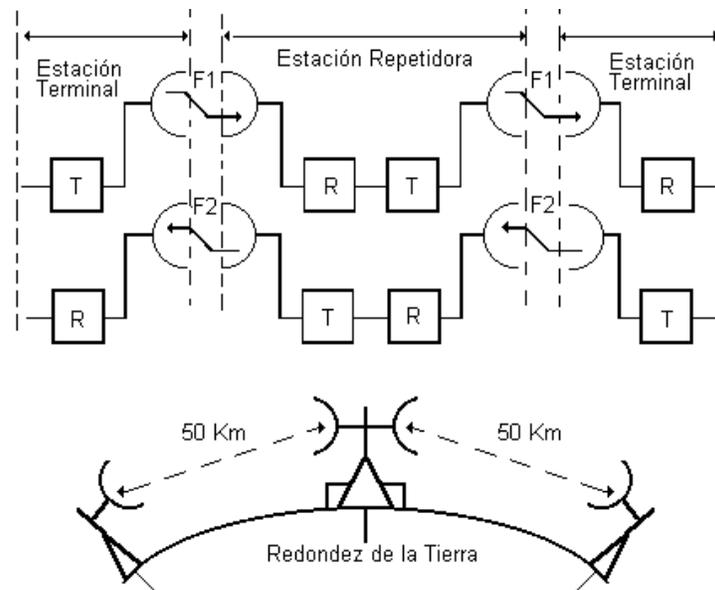


Fig. 1.1a.- Estructura General de un Radioenlace

La función de los repetidores es salvar la falta de visibilidad impuesta por la curvatura terrestre y conseguir así enlaces que superen al horizonte óptico. La distancia entre repetidores se llama *vano*.

Los repetidores pueden ser *activos* o *pasivos*. En estos últimos no hay ganancia y se limitan a cambiar la dirección del haz radioeléctrico por lo que comúnmente se les llaman *reflectores*. El equipo terminal comprende el múltiplex telefónico y el sistema de radio.

Los sistemas de radioenlaces se caracterizan por el número de *radiocanales principales* y *de reserva* con los que están equipados. Se entiende por **radiocanal una portadora de ida y retorno con su señal moduladora**. En consecuencia, un radioenlace con n radiocanales principales, con una capacidad C canales telefónicos cada uno de ellos, se comportan como radioenlaces de C canales yuxtapuestos sobre el mismo trayecto. *La capacidad total es $n \cdot C$ canales telefónicos*.

Los radioenlaces utilizados en telefonía, son *sistemas de transmisión a 4 hilos, equivalentes*, por lo que *cada radiocanal con capacidad de "C" canales telefónicos ha de constituir un enlace bidireccional*.

En lo que sigue consideraremos esos tipos de radioenlaces en forma general y cuando sea necesario presentaremos el material propio de los radioenlaces analógicos ó de los digitales.

1.2.- Propagación en el Espacio Libre:

En todo sistema de comunicaciones hay una *relación señal a ruido (S/N)* deseable.

El cociente se compone de la señal (S), que es el nivel de potencia en el receptor (ya veremos en que parte de este) y del ruido (N) en ese mismo punto.

Comenzaremos por determinar el caso más simple, el de espacio libre, el valor de S . Posteriormente tendremos en cuenta dos factores que modifican el **valor de espacio libre**, *la presencia de atmósfera y suelo*.

La **Figura 1.1b** muestra un transmisor T y un receptor R sin ningún tipo de medio y/u obstáculo entre ellos, eso será **espacio libre**.

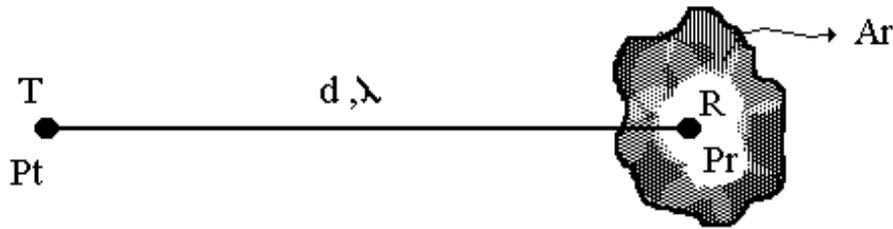


Fig. 1.1b Espacio Libre

Si en **T** tenemos un radiador isotrópico de potencia **P_t** (en Watts) siendo **d** (en metros) la distancia **T => R**, la potencia por unidad de área (módulo del vector de Poynting en el punto de recepción) será:

$$p_R = \frac{P_t}{4\pi d^2} \quad (1.1)$$

Si la antena receptora tiene un área efectiva de **A_R** (m²), la potencia recibida será:

$$P_R = p_R A_R = \frac{P_t A_R}{4\pi d^2} \quad (1.2)$$

Si colocamos en **T** una antena de ganancia **G_t** será:

$$P_R = p_R A_R G_t = \frac{P_t A_R G_t}{4\pi d^2} \quad (1.3)$$

$$\text{Pero como: } G_R = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_R \text{ es: } A_R = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R \quad (1.4)$$

Además: $A_R = \eta A_g$ donde **A_g** es el área física de la apertura y η es el rendimiento.

Para antenas de radioenlaces terrenos, de diámetros de 3 m, el valor de η es .55 (55%), si se usan iluminadores “fuera de foco” (offset) se logran rendimientos del 73%, en satélites se usan antenas con iluminadores tipo bocina próximos (*físicamente*) a sub-refletores Gregorianos y reflectores especialmente diseñados por computadoras con lo que se logran η del 83%.

Entonces la potencia recibida en condiciones de espacio libre es:

$$P_R = \frac{(P_t G_t G_R \lambda^2)}{16\pi d^2} \quad (1.5)$$

o bien utilizando los decibeles:

$$P_r(\text{dBm}) = P_t(\text{dBm}) + G_t(\text{dB}) + G_R(\text{dB}) - [20\log d(\text{m}) - 20\log \lambda(\text{m}) + 10\log 16\pi^2] \quad (1.6)$$

El último sumando (*entre los corchetes*) se llama **Pérdida o atenuación de espacio libre PEL**, que si se da **d** en Km y **f** en MHz (en vez de λ) resulta:

$$\text{PEL}(\text{dB}) = 20\log d(\text{Km}) + 20\log f(\text{MHz}) + 32.46 \quad (1.7)$$

Ejemplos:

Radioenlace terrestre: $d = 60 \text{ Km}$, $f = 2000 \text{ MHz}$, da un $PEL = 134.04 \text{ dB}$.

Satélite: $d = 36000 \text{ Km}$, $f = 4 \text{ GHz}$, resulta $PEL = 195.63 \text{ dB}$.

El valor de la potencia recibida P_r debe ser aún modificado para tener en cuenta otros factores, la **Figura 1.2** muestra que:

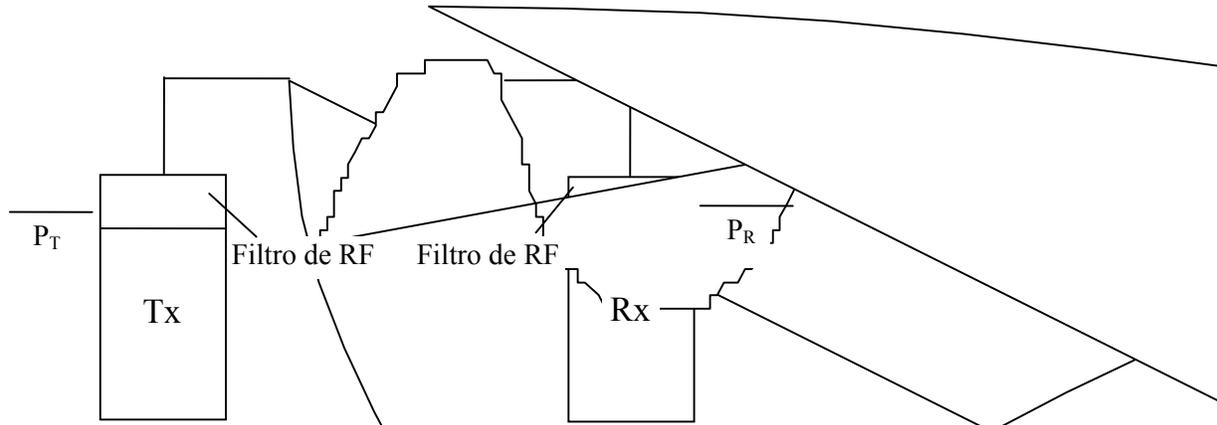


Fig. 1.2.- R

Entre el transmisor y la antena hay un **filtro** para asegurar la **pureza espectral requerida**, y una línea de transmisión entre los equipos y la antena; en el extremo receptor la función principal del filtro es **limitar ruido e interferencias**.

En muchos casos: La antena se utiliza simultáneamente para transmisión y recepción, utilizando un **DUPLEXER** (algunos libros lo llaman *Duplexor*) para separar las referencias (1) y (2).

Por lo tanto, teniendo en cuenta que los filtros introducen pérdidas y líneas de transmisión atenuación, la potencia recibida será:

$$P_r(\text{dBm}) = P_t(\text{dBm}) + G_t(\text{dB}) + G_r(\text{dB}) - L_{\text{línea}}(\text{dB}) - L_{\text{filtro}}(\text{dB}) \tag{1.8}$$

valores típicos son a: 450 MHz $P_f = 6 \text{ dB}$
 6 GHz $P_f = 10 \text{ dB}$

Ejemplo:

Radioenlace $d = 60 \text{ Km}$, $f = 900 \text{ MHz}$, $P_t = 1 \text{ W}$, $G_t = 10 \text{ dB}$, $G_r = 10 \text{ dB}$, $L_{\text{línea}} = 90 \text{ metros de línea de transmisión de } 0.5 \text{ dB/metro con } \eta = 55\%$.

Se desea conocer la potencia de recepción P_r .

Resultados: $PEL = 127.11 \text{ dB}$ y $P_r = 43.35 \text{ dBm}$.

Ejercicio:

Si $d = 70 \text{ Km}$, $f = 2000 \text{ MHz}$, $P_t = 1 \text{ W}$, $G_t = 10 \text{ dB}$, $P_f = 4 \text{ dB}$ y $P = 5 \text{ W}$. ¿Cuál es la potencia de recepción P_r en las antenas para tener $P_r = -40 \text{ dBm}$?

Es oportuno mencionar algo respecto a la **Directividad** de las antenas. Se define:

$D(\theta, \phi) = \text{DIRECTIVIDAD}$.

$$\text{DIRECTIVIDAD} = \frac{\text{Intensidad de radiación}}{\text{Intensidad de radiación media (radiador isotrópico sin pérdida.)}} \quad (1.9)$$

$G(\theta, \phi) = \text{GANANCIA}$.

$$\text{GANANCIA} = \frac{\text{Intensidad de radiación}}{\text{Intensidad de irrad. del rad. de referencia alimentado con la misma potencia}} \quad (1.10)$$

$G = G_0$ si el radiador de referencia es el radiador isotrópico.

$G_0 = kD$. Donde; $k = \text{Eficiencia de la antena en estudio } 0 \leq k \leq 1$

La **figura 1.3** muestra un diagrama de irradiación típico:

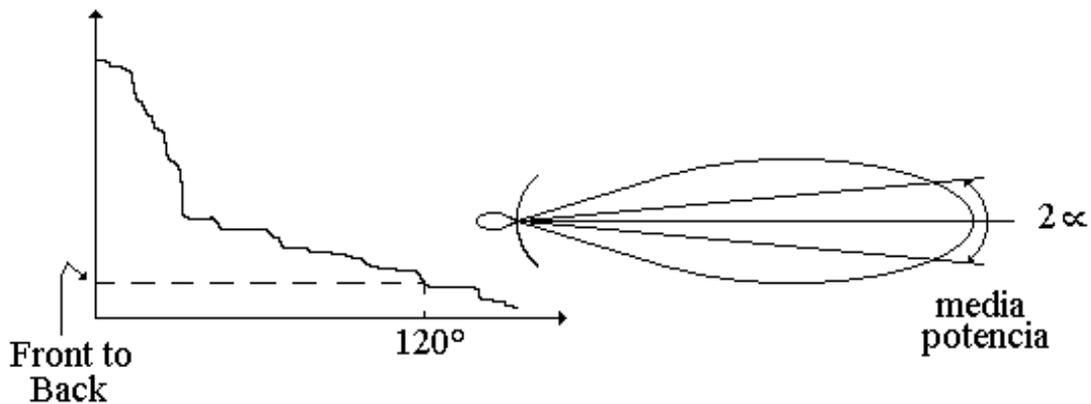


Fig. 1.3.- Diagramas Cartesiano y Polar de la Ganancia

El ángulo 2α correspondiente a los puntos de media potencia es de gran importancia (fórmulas para 2α : Entre 50 y $70 \lambda/D$ con λ y D en metros ó $68700/fD$ con f en MHz y D en pies [$D = \text{diámetro de la antena}$]), ya que si el ángulo es muy pequeño se requerirá que la torre que sostiene la antena sea muy rígida (a la torsión y a flexión). Algunos valores típicos para 2α son: 450MHz 11.17° , 6GHz 0.83° , 11GHz 0.46° .

Por lo tanto a bajas frecuencias se utilizarán torres metálicas y a las altas frecuencias estructuras metálicas mucho más rígidas (y por lo tanto más costosas). ó estructuras de cemento como las de los centros de comunicación de las grandes urbes. (**Figura 1.4**).

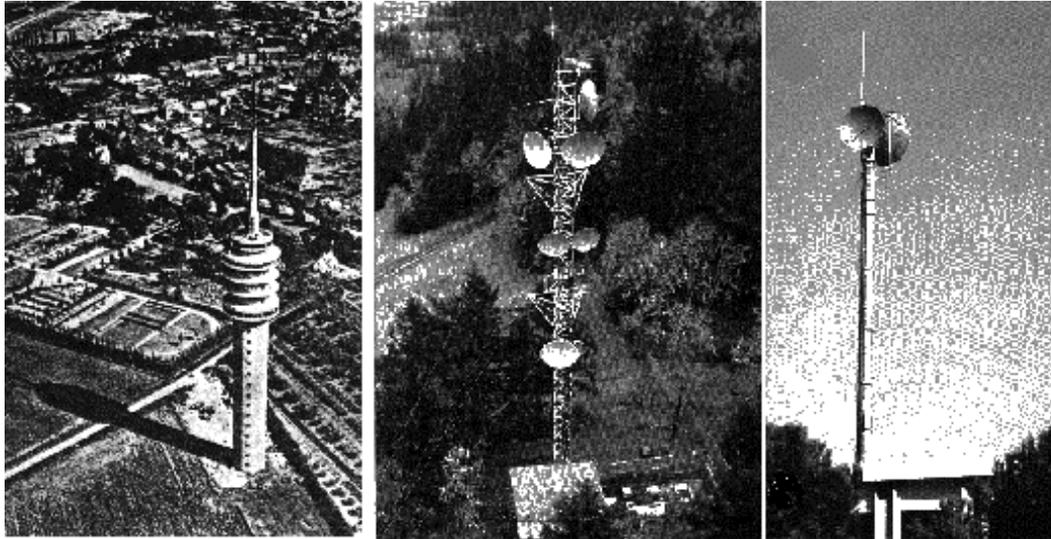


Figura 1.4. Distintas estructuras de soporte de antenas.

1.3.- Modificaciones al espacio Libre:

Como ya se dijo el espacio libre es una idealización muy difícil de encontrar en la realidad, en los casos más corrientes las antenas están en presencia de la **atmósfera** y el **suelo**.

Estos dos elementos modifican los niveles de señal de espacio libre a través de varios mecanismos, la **figura 1.5** muestra las diversas zonas de la atmósfera y en esa zona, con la presencia del suelo, pueden presentarse 6 modos de propagación:

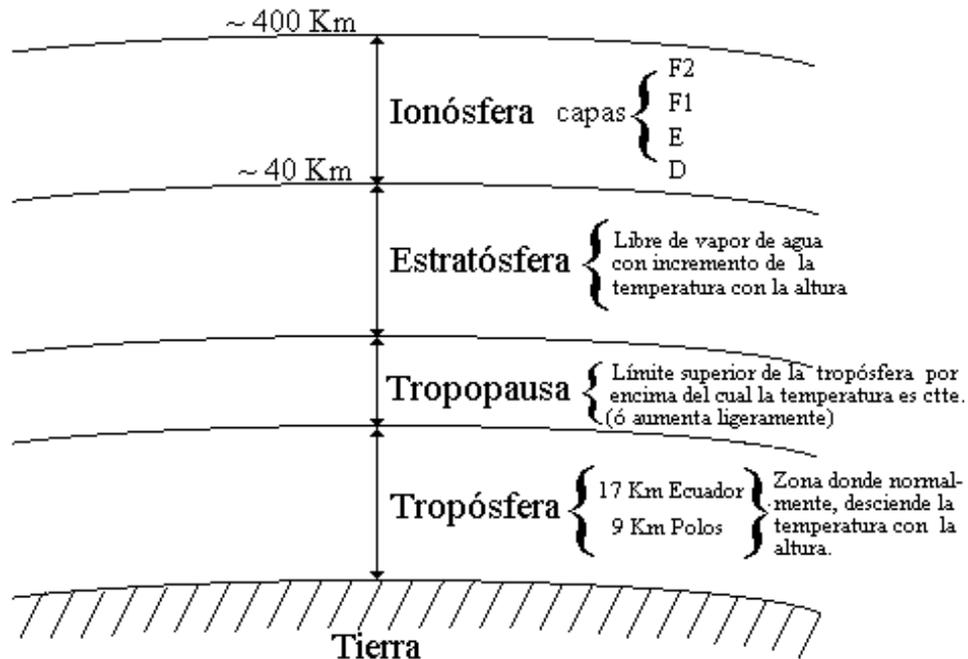


Fig. 1.5.- Zonas de la Atmósfera

1. Espacio Libre. (ideal).
2. Propagación a lo largo de un haz curvado por refracción en la tropósfera.

3. Propagación más allá del horizonte por difracción de la tierra.
4. Propagación más allá del horizonte por reflexión ionosférica.
5. Propagación más allá del horizonte por irregularidades en la tropósfera.
6. Propagación más allá del horizonte por repetidores. (En tierra o satélite).

Otra clasificación de las ondas de radio por su modo de propagación es la siguiente:

a) Propagación por onda terrestre:

a.1) **Onda superficial ú onda de tierra**

a.2) **Onda espacial**, compuesta de:

a.2.1) Onda directa, que es refractada por la tropósfera

a.2.2) Onda reflejada por la tierra ó agua

b) Propagación por onda troposférica dispersa

c) Propagación por onda de cielo ú onda ionosférica

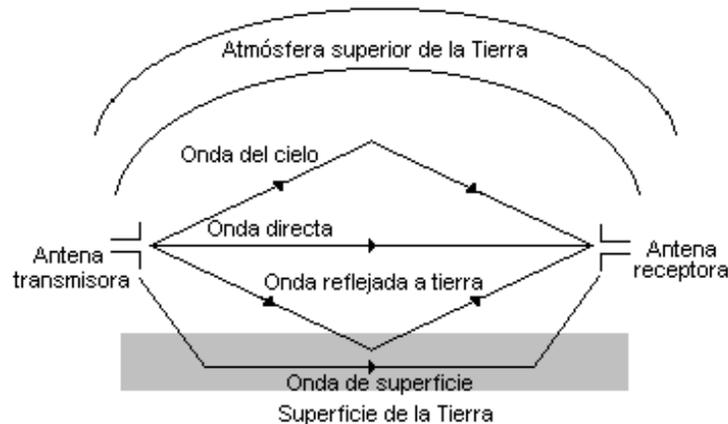


Fig. 1.6.- Modos normales de la propagación de ondas

La Figura 1.6 ilustra lo antes mencionado. Sin embargo es oportuno, sin entrar en demasiados detalles propios de un curso de Radiopropagación, describir un poco cada uno de ellos, así:

Onda superficial ó de tierra:

Esta **onda** se llama **superficial ó de tierra** porque viaja por la superficie de la tierra, deben estar polarizadas **verticalmente**, pues si lo estuviesen horizontalmente el campo eléctrico se atenuaría rápidamente al generar intensas corrientes en la tierra que es conductora. La polarización vertical no impide las corrientes en la tierra pero las minimiza. Por lo tanto, estas ondas de tierra polarizadas verticalmente se atenúan a medida que se propagan y lo hacen mejor cuanto mayor sea la conductividad de la superficie, tal es el caso del agua salada y áreas desérticas muy áridas. Las pérdidas de las ondas de tierra se incrementan con la frecuencia lo que las limita generalmente a frecuencias por debajo de 2 MHz.

La onda de tierra se usan en radiodifusión de AM (modulación de amplitud), en comunicaciones marítimas (barco a barco y barco a tierra), para la radionavegación y difusión de estándares de tiempo. Su utilización tiene algunas desventajas:

1. Requieren de potencias de transmisión relativamente altas.
2. Están limitadas a frecuencias muy bajas, bajas y medias (VLF, LF y HF).

3. Las pérdidas por tierra varían considerablemente con las características de la superficie.

Dos ventajas importantes:

1. Con suficiente potencia de transmisión, la onda de tierra puede comunicar dos ubicaciones cualesquiera en el mundo salvando las irregularidades del terreno.
2. Las ondas de tierra no son muy afectadas por los cambios atmosféricos.

La Figura 1.7 ilustra esta onda de tierra y las componentes de la espacial que se describe en lo que sigue.

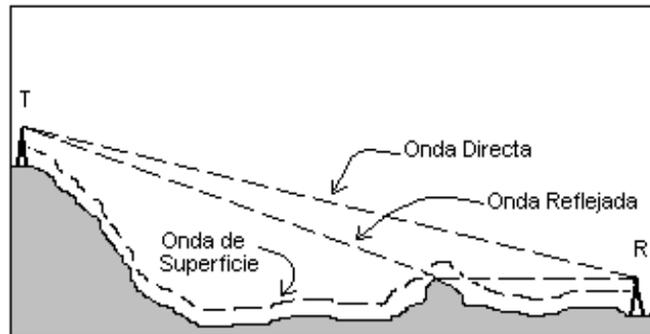


Fig. 1.7.- Ondas Terrestres

Onda espacial:

La **onda espacial** se compone la **onda directa**, que viaja esencialmente en línea recta entre la antena transmisora y la receptora por lo que se la llama *transmisión de línea de vista (LOS) ó de visión directa*, lo que limita su alcance debido a la curvatura de la tierra, y la **onda reflejada**, cuyo efecto de concurrir al punto de recepción conjuntamente con la onda directa puede ser aditivo o substractivo, dependiendo del camino que recorra la onda reflejada, de su polarización, de las características de la superficie en el punto de reflexión, etc.

Tanto la onda directa como la reflejada transitan por la tropósfera y son muy afectadas por esta como se verá dentro de poco.

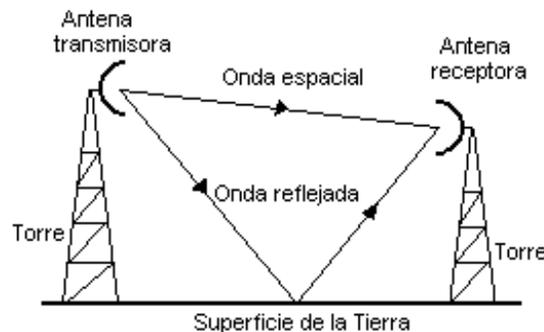


Fig. 1.8.- Propagación de ondas espaciales

La Figura 1.8 ilustra este mecanismo, muy común en frecuencias altas, muy altas, ultra altas y de microondas (HF, VHF, UHF y SHF).

Propagación por onda troposférica dispersa:

Esta propagación llamada también **por dispersión troposférica**, se basa en que cuando se hacen incidir potencias grandes (del orden de KW) en la tropósfera, las irregularidades de ésta hacen que una parte muy pequeña de esa potencia regrese a la tierra y pueda

establecerse así una comunicación. Este mecanismo muy en uso en los 50 y 60, cayó en desuso con las técnicas satelitales.

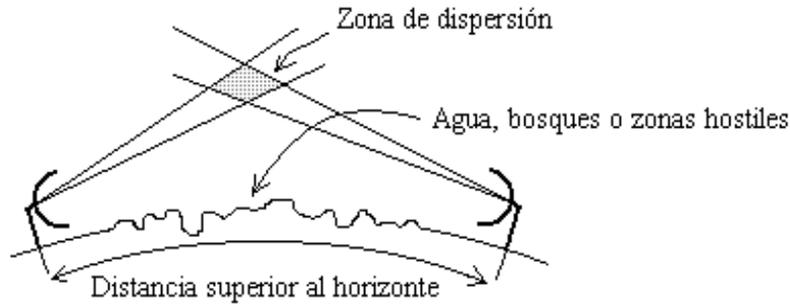


Fig. 1.9.- Propagación por onda troposférica dispersa

Propagación por onda de cielo ú onda ionosférica:

A alturas entre 50 y 400 Km se encuentra una región con niveles de ionización suficientes para curvar la trayectoria de ondas electromagnéticas de frecuencia entre 3 y 30 MHz regresándolas a la tierra tal como ilustra la Figura 1.10.

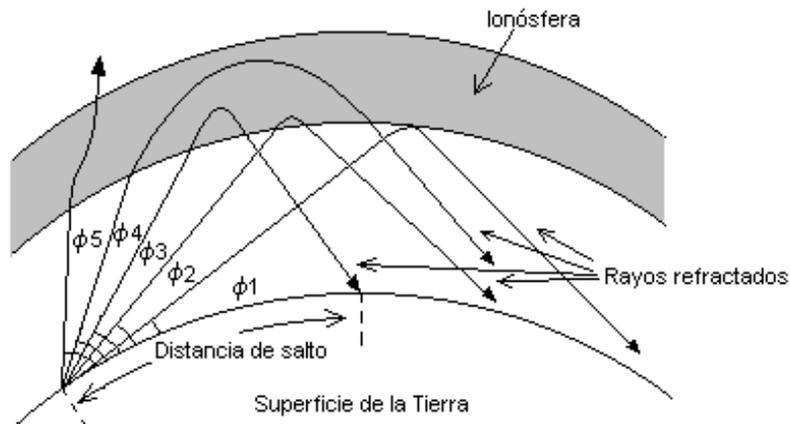


Fig. 1.10.- Propagación por Onda de Cielo

La ionósfera esta lejos de ser un medio estable. Se compone de diversas **capas** o zonas de intensa ionización: existen las capas D, E y F (con una subdivisión F_1 y F_2) cuyo agente ionizante es el sol, de manera que varían notablemente según las horas del día, las épocas del año y la actividad solar.

El estudio de la comunicación por este medio fué de gran importancia a principios de este siglo dado que era el único medio de establecer comunicaciones transatlánticas, por ello conceptos como el de **frecuencia crítica**, **altura virtual**, **frecuencia máxima utilizable (MUF)**, etc. y los **estudios ionosféricos** cobraron gran importancia y son sumamente interesantes.

El advenimiento de cables transatlánticos y satélites redujo su importancia y actualmente tiene usos militares, de comunicación con zonas muy aisladas y de radioaficionados.

Cada factor modificante tiene importancia a distintas frecuencias, así hablamos de propagación de:

- Ondas Hectométricas y Kilométricas.
- Ondas Decamétricas.
- Ondas Métricas.

- Ondas Decimétricas y Centimétricas.
- Ondas Milimétricas.

ONDAS HECTOMÉTRICAS Y KILOMÉTRICAS.-

Ondas Largas (VLF y LF)

Su rango de frecuencia está comprendido entre 3 KHz y 300 KHz con una longitud de onda comprendida entre 100.000m a 1.000m.

Necesitan usar antenas de grandes dimensiones la propagación es casi exclusivamente superficial. El ancho de banda es naturalmente muy pequeño, por lo que tienen baja capacidad de información. Fácilmente puede lograrse comunicaciones a 300 Km sobre tierra y 900 Km sobre el mar.

Es una banda muy usada en Sistemas de Navegación como LORAN, DECCA y OMEGA.

Ondas Medias (MF)

Su rango de frecuencia está comprendido entre 300 KHz y 3 MHz, oscilando su longitud de onda entre 1.000m y 100m.

La propagación predominante es la superficial permitiendo una señal estable a distancias relativamente grandes, pero inferior a las ondas Largas. La estabilidad se debe a la escasa influencia que a esas frecuencias ejercen las condiciones meteorológicas de la Tropósfera.

Es una banda apta para cubrir con radiodifusión zonas de gran extensión, como una gran capital y sus alrededores.

Existe también radiación hacia las capas atmosféricas, donde podrían reflejarse las ondas y alcanzar grandes distancias. Esto sólo sucede de noche.

ONDAS DECAMÉTRICAS.-

Ondas Cortas (HF)

Su rango de frecuencia está comprendido entre 3 MHz y 30 MHz y su longitud de onda oscila entre 100m y 10m.

La radiación superficial que pudiera existir es atenuada rápidamente llegando a ser despreciable aún a pequeñas distancias.

A estas frecuencias la Ionósfera actúa como una capa reflectora de ondas electromagnéticas, por lo cual esta parte del espectro se ha reservado para comunicaciones a distancia. La siguiente figura nos muestra el fundamento de la transmisión por el modo de onda ionosférica.

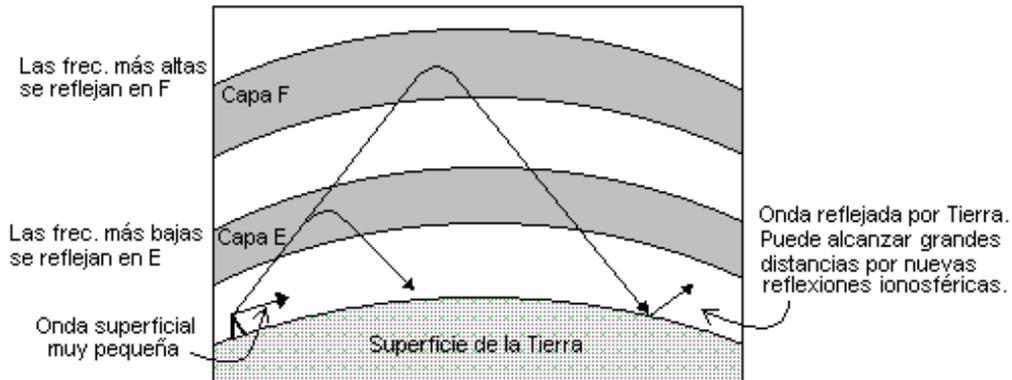


Fig. 1.11.- Propagación de Ondas Cortas

El ancho de banda no es muy grande: unos 16 KHz como máximo. Las ondas cortas se utilizan principalmente para comunicaciones internacionales, radiodifusión a grandes distancias y comunicaciones del servicio aeronáutico y marino.

ONDAS MÉTRICAS.-

Ondas muy Cortas (VHF)

Su rango de frecuencia está comprendido entre 30 MHz y 300 MHz y cuya longitud de onda oscila entre 10m y 1m.

Las emisiones de estas ondas no son reflejadas por la Ionósfera y la onda superficial es absolutamente despreciable. La propagación es Troposférica.

La Tropósfera es la parte de la atmósfera terrestre que está sobre la superficie de la Tierra hasta unos 10 Km de altura. Debido a su composición el índice de refracción de este medio no es constante y presenta una variación con la altura, lo que da lugar a un índice de refracción sucesivo que modifica la propagación de las ondas.

En la **figura 1.12** se presenta la forma como se verifica la propagación troposférica; aunque, como se verá más adelante, las rectas representativas de la propagación debieron dibujarse curvas.

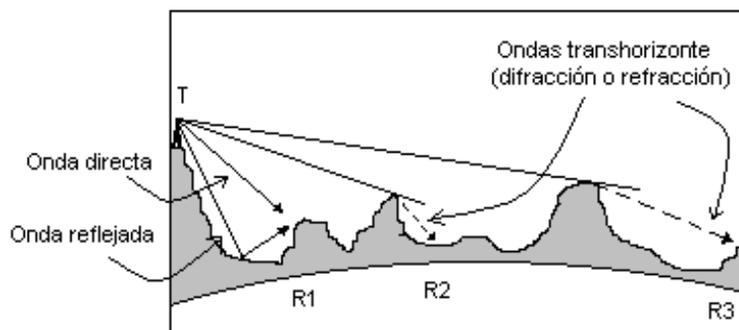


Fig. 1.12.- Propagación Troposférica

Las aplicaciones típicas de las ondas VHF son los radioenlaces con visibilidad óptica y transhorizonte para uno o más canales telefónicos, televisión, radiodifusión en FM y servicios móviles locales.

Ondas Ultracortas (UHF)

Su rango de frecuencia está entre 300 MHz y 3 GHz y su longitud de onda entre 1m y 0.1m.

En el rango de UHF hasta 1 GHz continúan las características de propagación descritas para VHF. Hay aplicaciones en visibilidad, difracción y dispersión troposférica.

A partir de 1 GHz entramos en la zona de ondas denominadas *MICROONDAS*, con longitudes de ondas desde 30cm tomando otras características.

Ondas Decimétricas (SHF)

Su rango de frecuencias está comprendido entre 3 GHz y 30 GHz y su longitud de onda entre 10cm y 1cm.

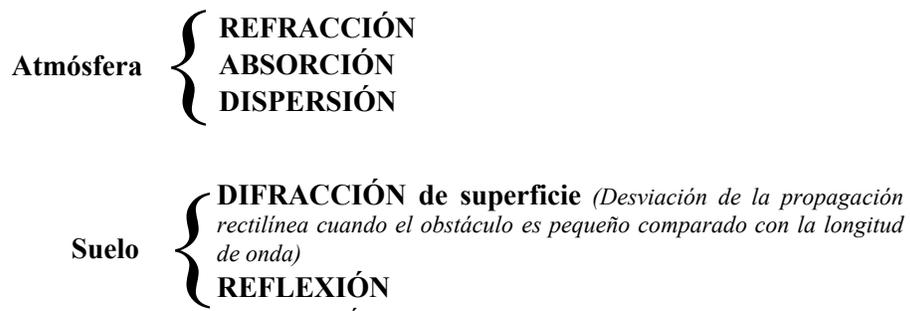
Dada la directividad que es posible imprimir a las antenas a estas frecuencias, es posible discriminar entre la onda directa y la onda reflejada evitando la interferencia entre ellas. En los enlaces con visibilidad, para distancias normales, debe cuidarse mucho la posibilidad de reflexión sobre tierra o sobre agua para evitar la interferencia.

La densidad de la atmósfera, especialmente en los períodos de calma, tiende a formar capas de pequeño espesor que, por la discontinuidad de su índice de refracción, actúan como superficies reflectoras cambiantes en el tiempo a causa de los agentes naturales, produciendo el fenómeno de "ducto".

Porque la longitud de onda es un factor determinante en la propagación y cada rango debe estudiarse especialmente, tema del que se ocupa la rama de la ciencia denominada **Radiopropagación**. Aquí nos ocuparemos solo de las 2da y 6ta que son las utilizadas en radioenlaces en microondas.

1.4.- Caso Particular de la radiopropagación de ondas deci, centi y milimétricas:

La atmósfera y el suelo modifican la propagación de espacio libre debido a los siguientes factores:



Como estos factores no son estables y pueden cambiar tanto lenta como muy rápidamente aparecerá, a consecuencia de esos cambio incontrolables, un factor adicional que denominamos: **Desvanecimiento**.

1.5.- Propagación en la troposfera:

1.5.1.- Refraccion.

La troposfera presenta cambios en la *temperatura, presión y humedad*, a medida que la altura varía, esto produce variaciones en el **índice de refracción n** ($n = v/c$ con c la velocidad de la luz y v la velocidad de la onda en el medio, y también $n = (\epsilon_r \mu_r)^{1/2}$). Las variaciones del índice de refracción producen curvatura de los rayos, que según la óptica geométrica describen la propagación.

El índice de refracción del aire es aproximadamente 1, las variaciones son en la cuarta cifra decimal por ejemplo:

n	1.000360
n	1.000340
n	1.000320

Normalmente (no siempre) n disminuye con la altura.

Como n tiene valores incómodos se utiliza otra unidad **N**:

REFRACTIVIDAD (US) ó *COÍNDICE* (Francés) del aire **N** es:

$$N = (n - 1) * 10^6 \tag{1.11}$$

Tanto n como **N** son función de:

TEMPERATURA ABSOLUTA, **T** (en K°)

PRESION ATMOSFERICA, **p** (en millibar, bar = dina/cm²)

PRESION PARCIAL DE VAPOR DE AGUA, **e** (en millibar, con la humedad relativa (%) en tabla psicométrica obtenemos **e**).

Existen diversas fórmulas que vinculan a **N** con **T**, **p** y **e**, estas fórmulas son de distinta precisión y se utilizan, salvo casos muy especiales, las recomendadas por el CCIR.

En 1937 Debye determinó una fórmula teórica:

$$N = \frac{A}{T} \left(\frac{Bp + Ce}{T} \right) \tag{1.12}$$

En 1953 Smith y Wientraub(7) determinaron las constantes resultando:

$$N = \frac{77,6}{T} \left(p + \frac{4810}{T} e \right) \tag{1.13}$$

T en °K, **p** y **e** en millibares.

Expresión válida hasta 30 GHz según Shuklin(8) y con un error menor ó igual al 0.5% según el CCIR, 563-1.

Beam y Dutton (1966) en el Radiometeorology Monograph 92, p.4-87.

$$N = 77.6 \frac{p}{T} - 5.6 \frac{e}{T} + 3.75 * 10^5 \frac{e}{T^2} \text{ (Citada por (9))} \tag{1.14}$$

Por otra parte las variaciones de **T**, **p** y **e** con la altura son generalmente como las ilustradas en la **Figura 1.13**, por lo que **N** resulta función de la altura **h**.

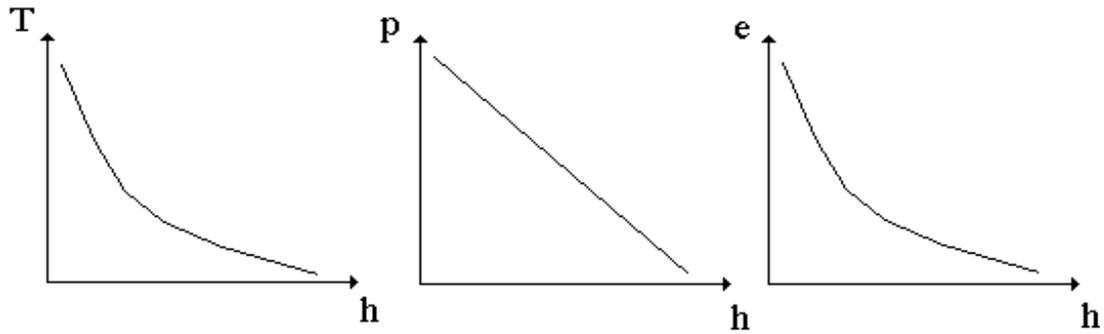


Fig. 1.13 Variación Normal de T, p y e con la altura

Para conocer el tipo de dependencia de **N** con la altura hay que conocer las de **T**, **p** y **e**, esas funciones varían en diversos climas, con la hora, el día, el mes, el año y es necesario hacer estudios de tipo estadístico en base a mediciones tanto en tierra como a diversas alturas por medio de sondas.

Las mediciones a baja altura (< 1 Km) sugieren una variación lineal de **N** con la altura así se estableció **el modelo lineal**.

a- Modelo Lineal:

La variación lineal con la altura se puede expresar así:

$$N(h) = N_s(1 + bh) \tag{1.15}$$

Donde: **N(h)** = refractividad a la altura h.

N_s = Valor de N en la superficie.

h = Altura sobre la superficie en km

b = Constante que depende de la región.

Si **h = 1 Km** será:

$$\frac{N_{1000}}{N_s} = 1 + b \text{ de donde } b = \frac{N_{1000} - N_s}{N_s} \text{ ó bien:}$$

$$b = \frac{\Delta N}{N_s} \quad \text{con: } \Delta N = N_{1000} - N_s$$

Este modelo que da lugar a la idea de **Radio efectivo** de la tierra, no es suficientemente preciso pues conduce a errores en aplicaciones con grandes diferencias de elevación.

Los datos sugieren que el modelo puede cambiarse para mejorarlo, así se escoge el *modelo exponencial* sugerido por el CCIR en 1958.

b- Modelo Exponencial:

Puede expresarse así:

$$N(h) = N_s e^{-ch} = N_s \exp(-ch) \tag{1.16}$$

Donde **N**, **N_s** y **h** tienen el mismo significado que en el modelo lineal y **c** es una constante que depende de la región.

De la definición del modelo exponencial puede obtenerse:

$$c = -\ln\left(\frac{N_{1000}}{N_s}\right) \tag{1.17}$$

Ejemplo:

Ciudad: Maracay

$$N_s = 360$$

$$N_{1000} = 310$$

Aplicando lo descrito anteriormente:

Modelo lineal: $N(h) = 360(1 - 0.1389h)$

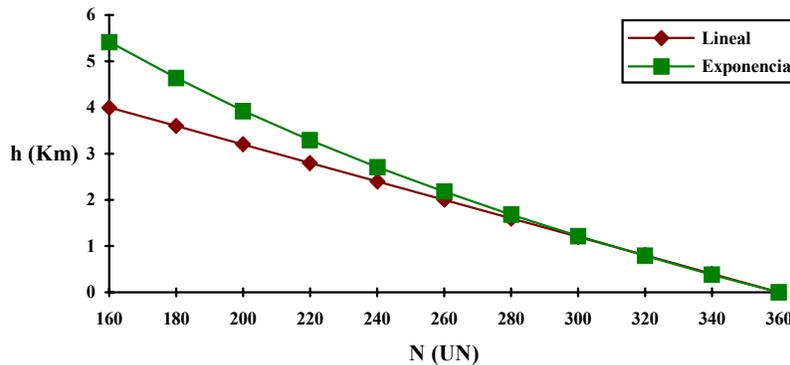
Modelo exponencial: $N(h) = 360 \exp(-0.1495h)$

TABLA DE DATOS

h (Km)	Lineal	Exponencial	Desv. relativa %
Superficie	360	360	0
1	310	310	0
2	260	267	2.69
3	210	230	9.52
4	160	198	23.75

Los valores iniciales del ejemplo provienen de datos meteorológicos cuyo error es del 5%, por lo tanto el modelo lineal se aplicará hasta que la desviación relativa sea de ese orden del 5%.

GRAFICO DE LOS MODELOS



Ejercicios:

- 1.- En el ejemplo anterior, ¿a que altura la desviación relativa es del 5%?
- 2.- Entre 0 y 1 Km ¿cual es la altura para que la diferencia entre ambos modelos es máxima?. Determine esa diferencia.

c.- Determinación de las constantes de los modelos.

Para que el modelo, ya sea lineal o exponencial, esté definido hay que conocer N_s y N_{1000} , o N_s y ΔN .

Luego N_s requiere de la meteorología superficial y N_{1000} la requiere de altura.

En Venezuela ese trabajo lo hace la Fuerza Aérea Venezolana (FAV Servicio de Meteorología y Comunicaciones), se toma velocidad del viento, precipitación, insolación, presión, temperatura y humedad. Existen 23 estaciones de meteorología superficial y 4 (Maracay, San Antonio, Santa Elena de Uairen y San Carlos del Río Negro) que hacen de la altura con radiosondas que entre otros datos dan, **T, p, e, y h.**

d.- Resultados e las mediciones:

Un modelo es validado solamente por las mediciones, de gran número de medidas tomadas en USA a lo largo de 5 Años(7), se encontró que la variación de **N** en función de **h_o** (altura sobre el nivel del mar) es como la muestra la **Figura 1.14.**

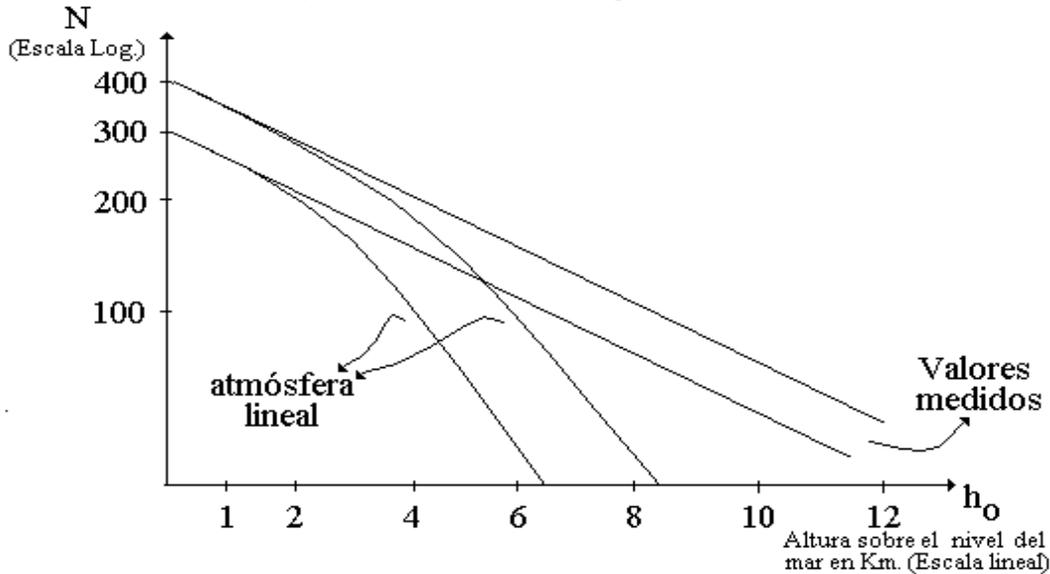


Fig 1.14.- Resultado de mediciones a lo largo de 5 años en diversos lugares de USA

allí se observa que el, modelo lineal solo coincide con la realidad para **h_o < 1km** y que las mediciones sugieren un modelo exponencial, lo que es lógico pues en la expresión:

$$N = 77.6 \frac{p}{T} + 3.73 * 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (\text{Smith y Wientraub}) \quad (1.18)$$

El primer término del aire que es función exponencial de la altura.

Como demuestra la referencia (7, **Figura 2**), el 60 % de la curvatura para un rayo lanzado horizontalmente (tangente a la tierra) ocurre en el primer kilómetro, por lo que solo a grandes alturas y grandes distancias, es que la discrepancia entre el modelo lineal y el exponencial produce errores considerables. (ver Rec 310 - 5 pág. 94 nota 2).

e.- Influencia de la altura de la estación:

Cuando no se tiene un perfil detallado de **N** se pueden estimar los valores de **N_s** de curvas de **N** constante que dan instituciones como el **NBS** (National Bureau of standards, Ground Telecommunications cap. 3), basadas en mediciones tomadas durante 8 años, día y noche, en invierno y verano, u otras del **CCIR** (informe 563-2, que se adjunta). Se ha determinado que si en vez de **N_s** se da **N_o** (o sea el valor de **N_s** llevado al nivel del mar con una fórmula adecuada) los valores de **N_s** que se recuperan al leer en las gráficas **N_o** y al calcular el **N_s** respectivo tienen 5 ó 6 veces más precisión que si se diesen curvas de **N_s**.

La fórmula que permite pasar de **N_o** a **N_s** y viceversa es dada por el CCIR (I563-2):

$$N_s = N_0 \exp(-0.136 h_s) \tag{1.19}$$

Donde **hs** es la altura de la superficie respecto al nivel del mar.

f.- Valores normales y de referencia del CCIR:

El CCIR en su recomendación 310-5 (1982) menciona valores NORMALES para zonas templadas:

Gradiente normal del coíndice: $\Delta N/1 \text{ km} = - 40 \text{ N/Km}$

Atmósfera normal: La que tiene $\Delta N/1 \text{ Km} = - 40 \text{ N/Km}$

Atmósfera de REFERENCIA: $N = 315 \exp(-0.136 h)$ (Dice el CCIR que h es sobre l nivel del mar.)

El informe 563-2 (1982) llama:

Atmósfera exponencial media: a $N = 351 \exp(-0.136 h)$ y dice que h es la altura sobre la superficie de la tierra.

Se adjunta fotocopias de las recomendaciones R310-5, R369-3, R-453 y R563-2.

1.6.- Propagación de ondas electromagnéticas en una atmósfera estratificada según el modelo lineal.

En una atmósfera en la que el índice de refracción no varía con la altura la propagación, desde el punto vista dela teoría de rayos (óptica geométrica), es rectilínea, **Figura 1.15.**

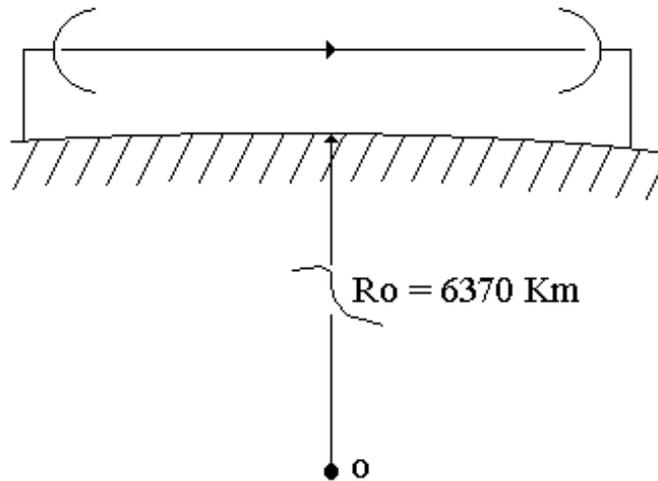


Fig. 1.15.- Propagación en atmósfera homogénea.

En cambio si la atmósfera tiene variaciones en su índice de refracción, y este varía solo con la altura formando *capas* o estratos, el rayo no es rectilíneo sino que resulta quebrado, tal como se ve en la **figura 1.16.**

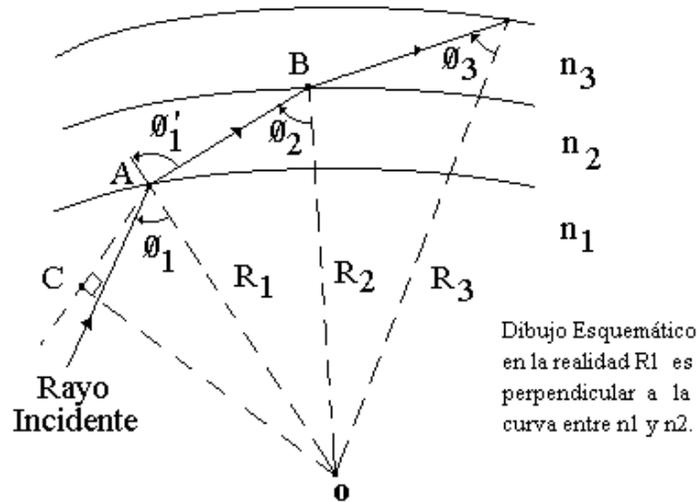


Fig. 1.16 Propagación en atmósfera estratificada

Apliquemos la geometría de la **figura 1.16** la *Ley de Snell*:

$$n_1 \text{ Sen}\phi_1 = n_2 \text{ Sen}\phi'_1 \tag{1.20}$$

En los triángulos OCA y OCB se tiene:

$$n_1 R_1 \text{ Sen}\phi_1 = n_2 R_2 \text{ Sen}\phi_2 \tag{1.21}$$

y en general será:

$$n R \text{ Sen}\phi = \text{Constante} \tag{1.22}$$

lo presente es general para **atmósferas estratificadas**.

Atmósfera homogénea:

Como caso particular si la atmósfera es homogénea, es sencillo demostrar, con la última ecuación y geometría simple, que la propagación es rectilínea, además podemos escribir:

$$\text{Sen}\phi_0 = \frac{R_0 + h}{R_0} \text{ Sen}\phi_1 \tag{1.23}$$

Donde ϕ_0 es el ángulo a R_0 y ϕ_1 es el ángulo a $R_0 + h$, ó bien:

$$\text{Sen}\phi_0 = \left(1 + \frac{h}{R_0}\right) \text{ Sen}\phi_1 \tag{1.24}$$

Si la atmósfera tiene una **estratificación lineal** será:

$$N(h) = N_0(1 + bh) \tag{1.25}$$

Donde se ha considerado que la superficie está a nivel del mar, por ello se utiliza **N** en lugar de **Ns** y **h** será la altura respectiva (esta suposición no resta generalidad a este análisis).

Como nos interesa trabajar con **n** y no con **N** es fácil demostrar que:

$$n(h) = n_0 \left(1 + \frac{gh}{n_0}\right) \quad \text{con } g = b(n_0 - 1) \tag{1.26}$$

y como:

$$R = R_0 + h = R_0 \left(1 + \frac{h}{R_0} \right) \quad (1.27)$$

resulta de la ecuación general:

$$n_0 R_0 \text{Sen} \phi_0 = n_0 \left(1 + \frac{g}{n_0} h \right) R_0 \left(1 + \frac{h}{R_0} \right) \text{Sen} \phi_1 \quad (1.28)$$

teniendo en cuenta que n difiere de n_0 solo en las millonésimas, operando y despreciando términos de segundo orden nos queda:

$$\text{Sen} \phi_0 = \left(1 + \frac{h}{R_0} + \frac{g}{n_0} h \right) \text{Sen} \phi_1 \quad (1.29)$$

o bien:

$$\text{Sen} \phi_0 = \left(1 + \frac{h}{R_0 + \frac{1}{1 + \frac{g}{n_0} R_0}} \right) \text{Sen} \phi_1 \quad (1.30)$$

Comparando con la similar obtenida para propagación rectilínea, observamos que si en vez de tener una tierra con radio R_0 , este fuese R_f con:

$$R_f = R_0 \left(\frac{1}{1 + \frac{g}{n_0} R_0} \right) = KR_0 \quad (1.31)$$

la propagación sería rectilínea, esta es la brillante idea propuesta en 1934 por Schilling, Burrowsky y Ferrell, que permite simplificar el trazado del rayo, ya que en vez de dibujarlo curvo en un gráfico con tierra **real** de radio R_0 , lo podemos dibujar recto en un gráfico con tierra **FICTICIA** de radio R_f .

No es sorprendente que R_f se llame **radio Ficticio de la Tierra**, y que puede expresarse así:

$$R_f = \frac{R_0}{g \frac{R_0}{n_0} + 1} = \frac{R_0}{\frac{dn}{dh} \frac{R_0}{n_0} + 1} \cong \frac{R_0}{1 + \frac{1}{157} \frac{dN}{dh}} = R_0 \frac{1}{1 + \frac{\Delta N}{157}} \quad (1.32)$$

Estas ideas son ilustradas por la **Figura 1.17**.

$$\therefore K = \frac{1}{1 + \frac{\Delta N}{157}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{157} \frac{dN}{dh}} \quad (1.33)$$

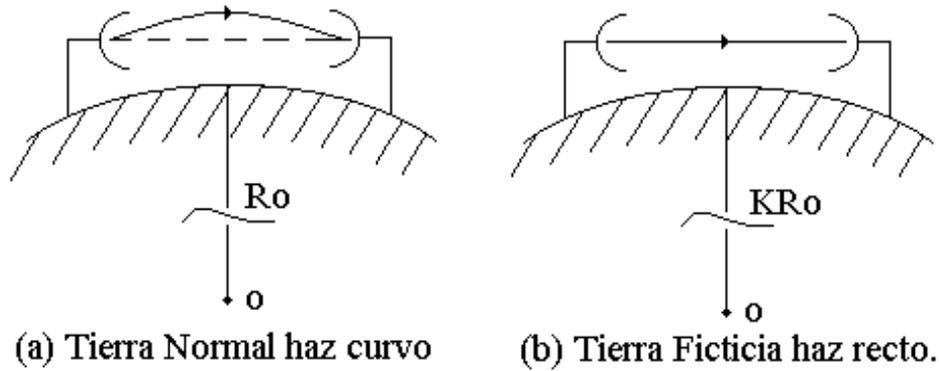


Fig. 1.17 Concepto de Radio Ficticio de la Tierra

Recuerdese que la validez de estas idea **SE LIMITA AL MODELO LINEAL.**

Como el CCIR denominó **gradiente normal** a $\Delta N = -40$ (uN/Km), resulta que el **K** correspondiente (**K normal**) es:

$$K = 4/3$$

En Venezuela, típicamente, $\Delta N = -52$ que conduce a $K = 3/2$

Veamos lo que ocurre para diversos valores de **K** y de **dN/dh**:

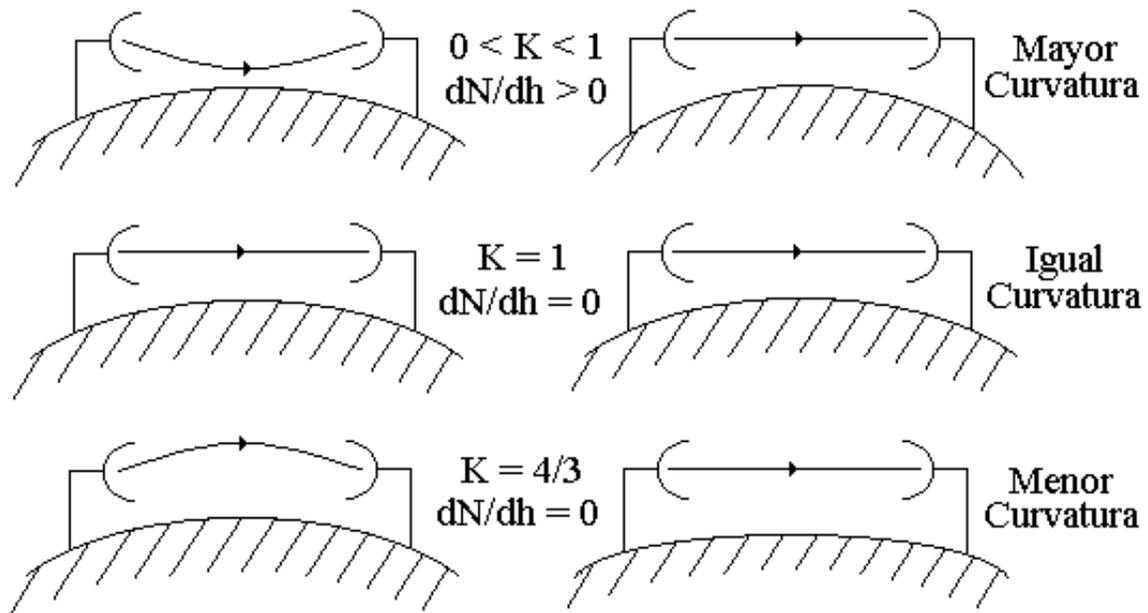


Figura 1.18a.- Trayectorias para distintos K y dN/dh

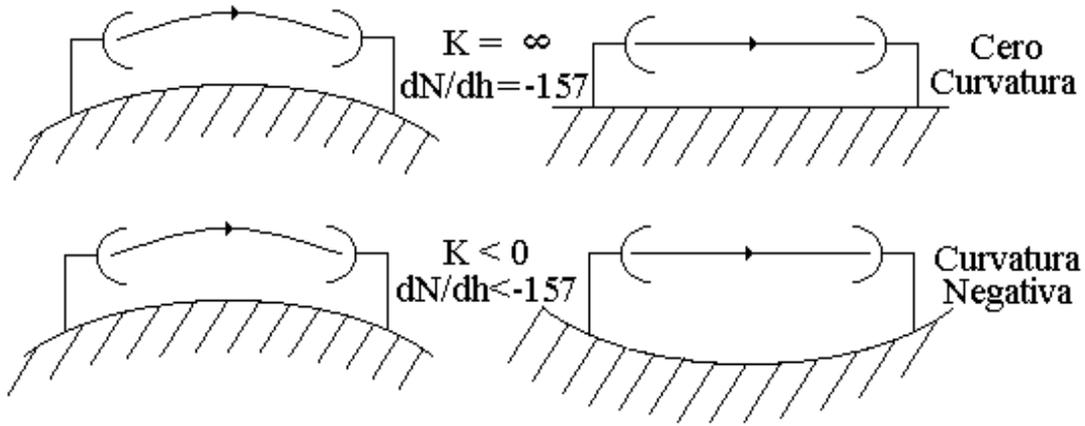


Fig. 1.18b.- Trayectoria para distintos K y dN/dh

Estos dibujos (**Figuras 1.18a y 1.18b**) pueden inducir a confusión, pues en cada uno de ellos la antena apunta en direcciones distintas.

Si la antena permanece fija (vertical) lo que ocurre se muestra en la **Figura 1.19**.

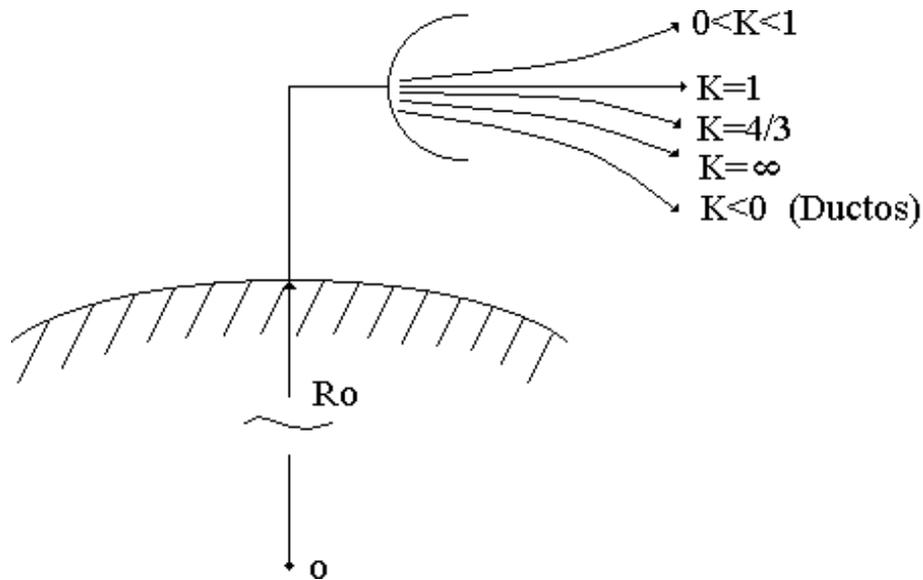


Fig. 1.19.- Distintas Trayectorias para diversos K

1.7.-Módulo de refracción ó índice modificado de refracción. Atmósfera normal, subnormal y supernormal.

Como los valores de dN/dh son incómodos se usa **M módulo de refracción** definido así:

$$M = N + \frac{h}{R_0} \cdot 10^6 = N + 157h \qquad \frac{10^6}{R_0} = 157 \qquad (1.34)$$

Propiedades de **M**:

$$\frac{dM}{dh} = \left(\frac{dN}{dh} \right) + \frac{10^6}{R_0} \quad \text{Luego} \quad \frac{dM}{dh} = \text{ctte. en atm ósféricas lineales}$$

$$M_s = N_s$$

Sustituyendo dN/dh en la expresión de K resulta:

$$K = \frac{10^6}{R_0 \frac{dM}{dh}} \quad \text{de donde:} \quad K \cdot \left(\frac{dM}{dh} \right) = \frac{10^6}{R_0} = 157 \left(\frac{Un}{Km} \right) \quad (1.35)$$

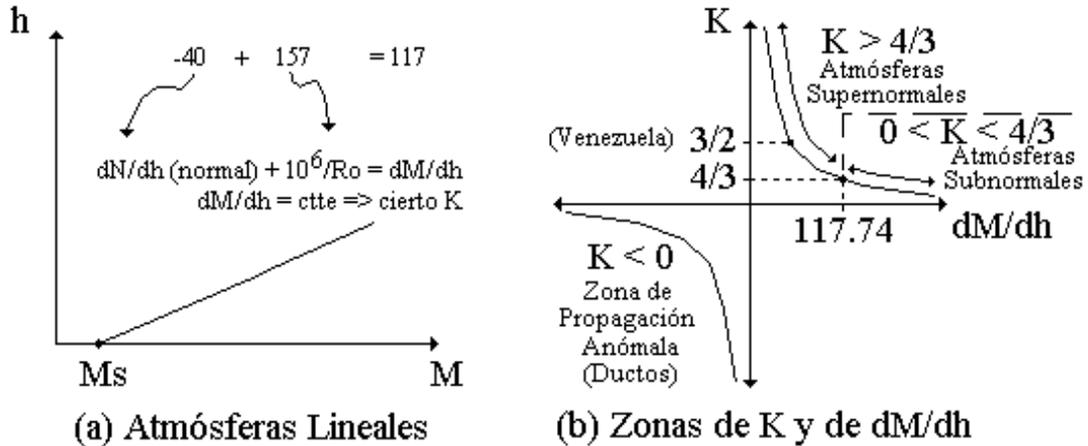


Fig. 1.20.- Módulo de Refracción.

La expresión anterior corresponde a una hipérbola equilátera, tal como o muestra la **figura 1.20(b)** en ella se identifican cuatro casos muy definidos:

Primer Caso: ATMOSFERA NORMAL

Corresponde a $K = 4/3$ y a $dM/dh = 117.74$

Segundo Caso: ATMOSFERA SUPERNORMAL o SUPER-REFRACTIVA:

Es para $K > 4/3$ y $dM/dh < 117.74$ (Caso de Venezuela $K = 3/2 = 1.5$)

Tercer Caso: ATMOSFERA SUBNORMAL o SUBREFRACTIVA:

abarca $K < 4/3$ y $dM/dh > 117.74$

Cuarto Caso: $dM/dh < 0$

Corresponde cuando **la temperatura o la humedad aumentan con la altura** (la presión casi siempre disminuye).

La **figura 1.21** muestra cada uno de los casos:

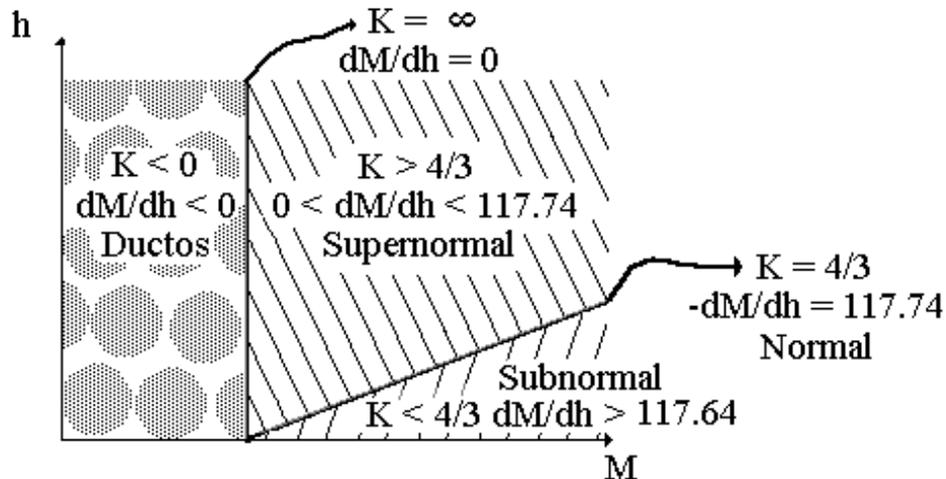


Fig. 1.21.- Diversas zonas de K, dM/dh y M

El cuarto caso contiene 2 sub-casos:

a.- $dM/dh < 0$ cerca de la superficie.

La figura 1.22 (a) nos ilustra sobre la variación de M con h (la cual tiene dos tramos lineales) mientras que la parte (b) muestra los caminos recorridos por rayos lanzados con distintos ángulos de elevación.

Existe un ángulo crítico por debajo del cual el rayo regresa a la tierra, por el contrario los que están por encima escapan.

El rayo que regresa lo hace con el mismo ángulo que salió y si el suelo lo refleja recorrerá o través un camino similar, en microondas es razonable suponer que la superficie es suficientemente irregular para producir una reflexión difusa y escapar (en el caso de que requiera más de una reflexión para alcanzar la antena receptora), otra cosa ocurre sobre el mar donde las reflexiones son buenas.

Este fenómeno de haz atrapado se denomina **DUCTO** dando idea de tubería y guía de onda.

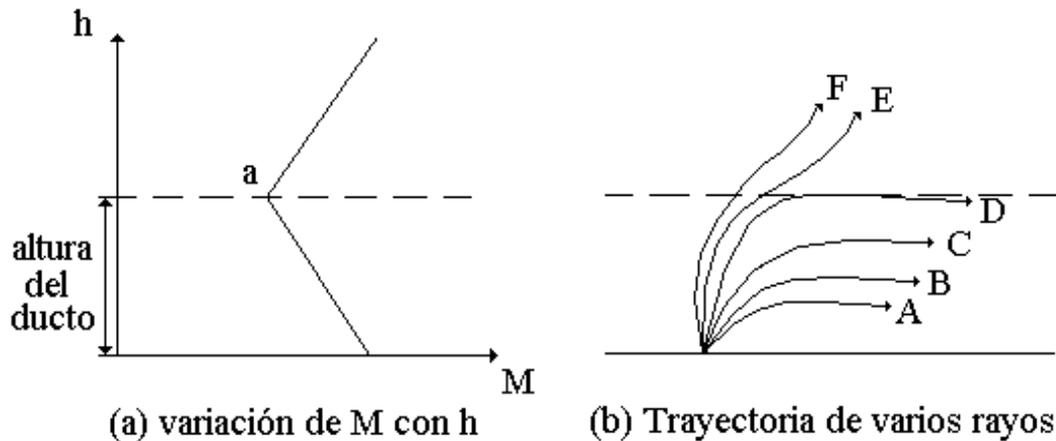


Fig. 1.22 Variación de M vs. h

Por otra parte se requiere que $dM/dh < 0$ se mantenga por varios λ ya que, a pesar de que no es una guía metálica, tiene longitud de onda de corte, de manera tal que la onda queda **atrapada** en SHF y raramente lo hace en VHF. Estos ductos tienen espesores de 10 a 25 m y a

veces sobre los mares templados son varios cientos de metros. En el Mediterráneo en verano se observan condiciones anormales el 70% del tiempo, en los mares tropicales la alta humedad sobre la superficie produce cambios con $\Delta N = 40$. Las causas más comunes del ducto superficial son: sobre tierra el enfriamiento nocturno del suelo y sobre el mar el paso de aire caliente seco sobre una corriente de agua más fría aunque en mar la transición día-noche también da lugar a ductos, tal como se muestra en la **figura 1.25**.

b.- si $dM/dh < 0$ a cierta altura se produce un ducto elevado.

La **Figura 1.23** muestra la presencia entre los puntos a y b de la curva el ducto que se produce debido a una **capa de inversión**.

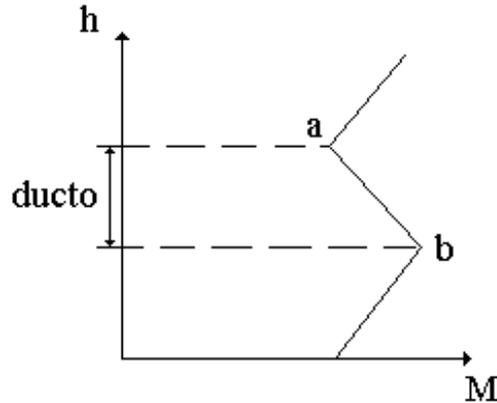


Fig. 1.23.- Ducto Elevado

La **Figura 1.24** muestra varios casos de ductos, el **(a)** es un ducto elevado que interrumpe la comunicación entre un punto alto y otro bajo, el **(b)** guía la señal, aumenta mucho la potencia recibida y con ella el ruido de intermodulación, en **(c)** un ducto de superficie llamado bloqueo total.

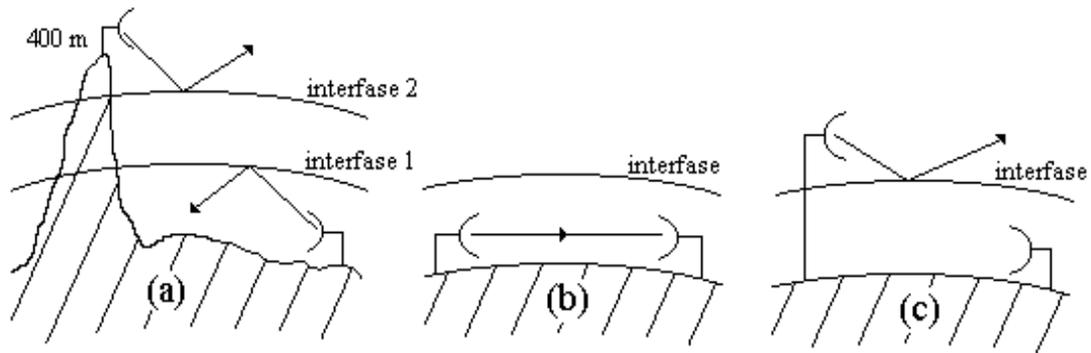


Fig. 1.24.- Diversos casos de Ducto.

En la **figura 1.25** se muestra el proceso de formación de ducto sobre el mar en la transición día-noche.

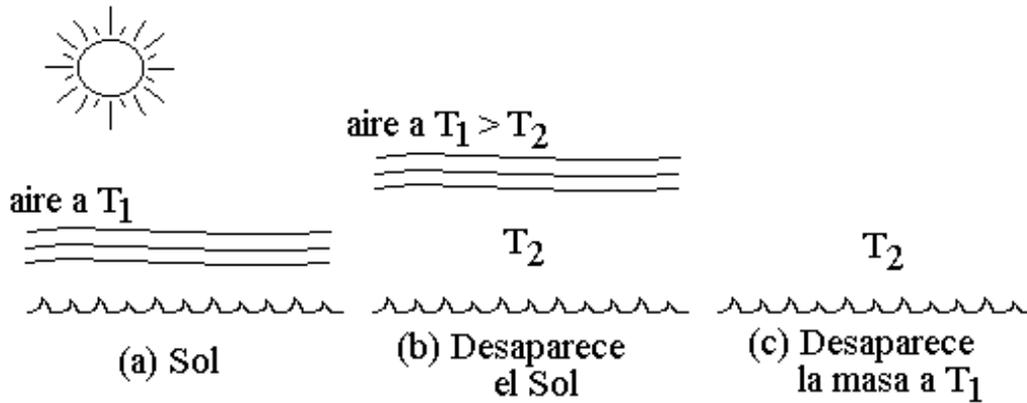


Fig. 1.25.- Día-Noche/mar

Entre 50 MHz y 10 GHz lo peor que puede suceder es estratificación: días claros, soleados con atmósfera quieta, los días lluviosos, con viento y turbulencias no tienen estratificación.

1.8.- Distribución estadística de K.

El valor de **K** varía estadísticamente a lo largo del día, mes y del año, generalmente el porcentaje del tiempo en que se excede un valor determinado de **K** es el dado en la tabla siguiente:

% tiempo	K
99.9	2/3
80	1
50	4/3
20	2
.1	10

En consecuencia si se ha diseñado para **K = 4/3** y **K** cambia a 2/3 puede haber obstrucción, tal como se ve en la figura 1.26.

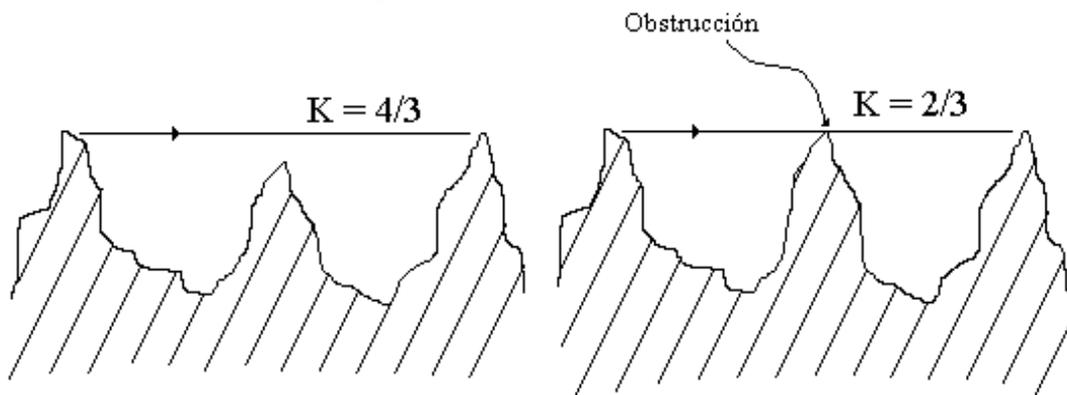


Fig. 1.26 Efectos de la variación de K.

Para diseñar hay que tomar el valor mínimo de K en la zona por lo que la experiencia es muy importante, un criterio recomendable es:

f > 2 GHz, K mínimo: 1 sobre tierra y 2/3 sobre mar.

f < 2GHz, K promedio 4/3

1.9.- Propagación en la tropósfera:**1.9.1.- Absorción:**

La absorción atmosférica es causada por la presencia de gases, principalmente oxígeno y vapor de agua, y se debe a que la estructura de las moléculas hace que se comporten como dipolos eléctricos o magnéticos. Al incidir sobre ellas campos electromagnéticos producen movimientos rotacionales o de oscilación de estas moléculas, por lo que hay una cesión de energía electromagnética a energía mecánica (calor) que atenúa el campo. En el caso del oxígeno el fenómeno se debe al dipolo magnético y el de vapor de agua se debe a que las moléculas tienen un momento eléctrico.

La resonancia de las moléculas de vapor de agua está cerca de 1.3 cm y allí un “ pico ” de atenuación, lo mismo ocurre con el oxígeno para 0.5 cm, la **figura 1.27** muestra los máximos relativos correspondientes al oxígeno (O_2) y al agua (H_2O) y la curva compuesta.

Figura 1.27 Curva calculada de absorción a nivel del mar

Es obvio que en caso de la lluvia, niebla, nieve y/o nubes la atenuación se incrementará pues aumentará la cantidad de H₂O además de estos fenómenos atmosféricos producirán dispersión.

1.9.2.- Dispersión.

La presencia de gotas de agua por lluvia, niebla o nubes y la de partículas de hielo por nieve y granizo produce una reirradiación de energía electromagnética que se traduce en disminución de la señal en el radioenlace. La **figura 1.28** muestra la disminución de la señal producida por distintos niveles de lluvia y niebla.

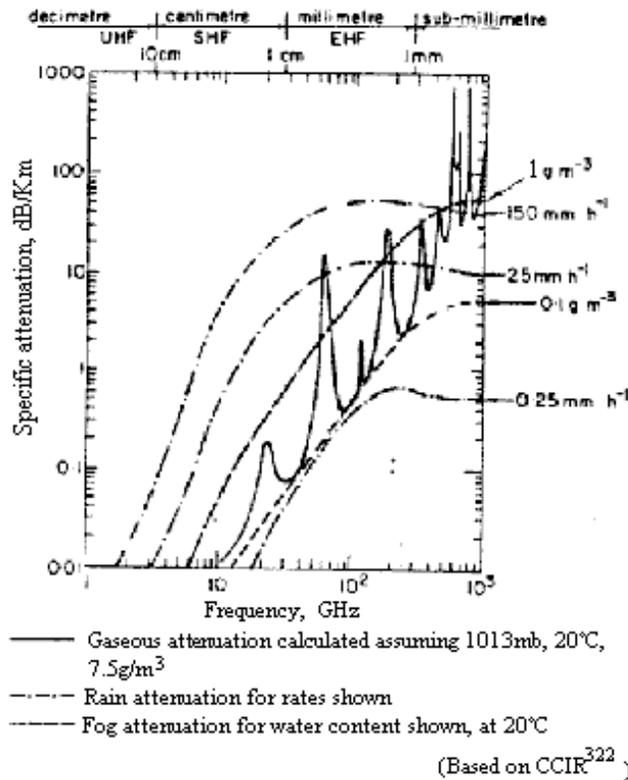


Figura 1.28 curvas de atenuación y dispersión atmosférica

Este tema es muy extenso, remitimos al lector interesado al capítulo 3 de Hall M.P. Effects of the Troposphere on radio communication, Peter Peregrinus para IEE.

BIBLIOGRAFÍA:

- (1) HUURDEMAN Anton, **Radio-Relay Systems**, Artech House.
- (2) FREEMAN Roger, **Telecommunication Transmission Handbook**, 3ª edición pág. 342, Wiley Interscience.
- (3) HALL M.P., **Effects of the Troposphere on Radio Communications**, Peter Peregrinus (Inglaterra) para IEE.
- (4) JORDAN y BALMAIN, **Electromagnetic Waves and Radiating Systems**, 2da De, Prentice Hall.

- (5) WAIT, **Electromagnetic Waves in Stratified Media. "The Constants in the Equation for Radio Refraction Index of the Air"**, Smith & Wientraub, Proceedings IRE, Vol. 41, #8, August 1953.
- (6) **"Models of the Atmospheric Radio Refractivity Index"**, Bean & Thayer, Proceedings IRE, Vol.47, #5, pag. 740, May 1959.
- (7) **"Some Applications of the Monthly Median Refractivity Gradient in Tropospheric Propagation"**, Bean & Maney, Proceedings IRE, Vol. 43 #10, pag.1419, October 1955.
- (8) **"Case Studies of beyond-the-horizon propagation in tropospheric ducting environments"**, Pappert & Goodhart, Radio Science, Vol. 12. #1, pag.75-87, Jan-Feb 1977.
- (9) VIDAL, **Conceptos básicos de Radiopropagación**, CET, Centro de Estudios de Telecomunicaciones de CANTV.
- (11) GOODING Clemente, **Apuntes de Ingeniería de Comunicaciones**, UCV.