

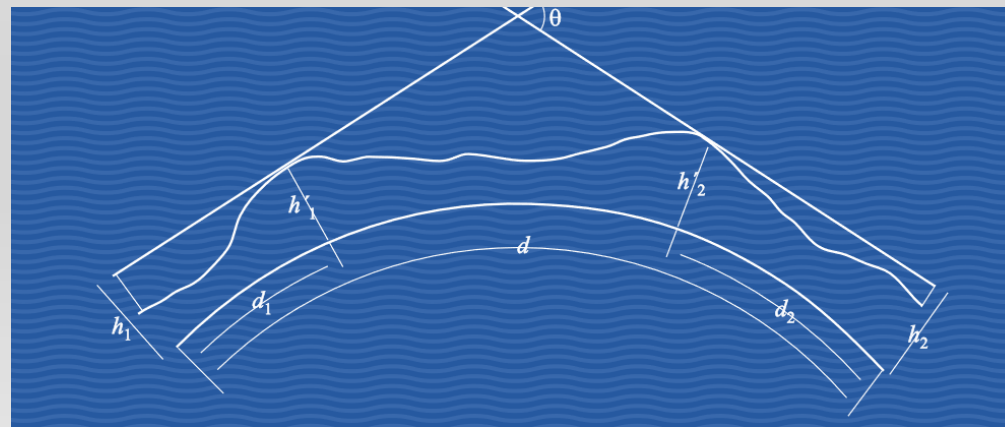
# EFECTOS DEL SUELO EN RADIO ENLACES

Ing. Christian Orellana  
Universidad de San Carlos de Guatemala



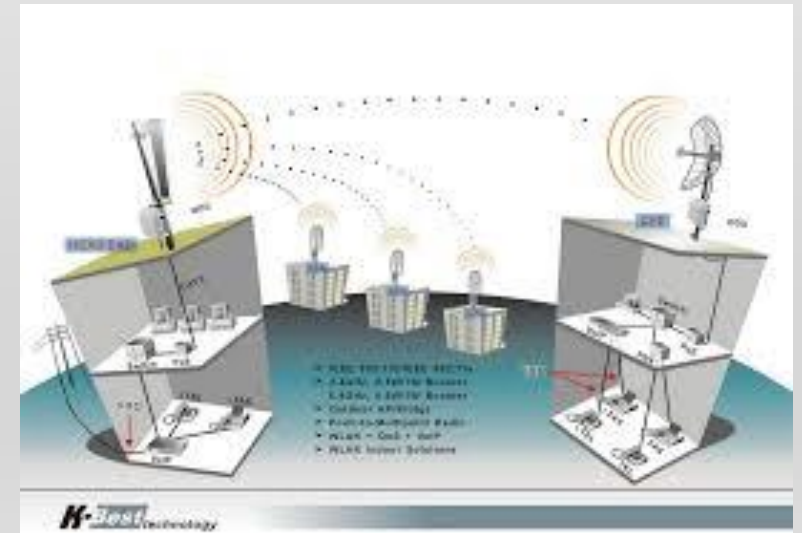
# EL SECTOR DE RADIOCOMUNICACIONES DE LA ITU

- El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

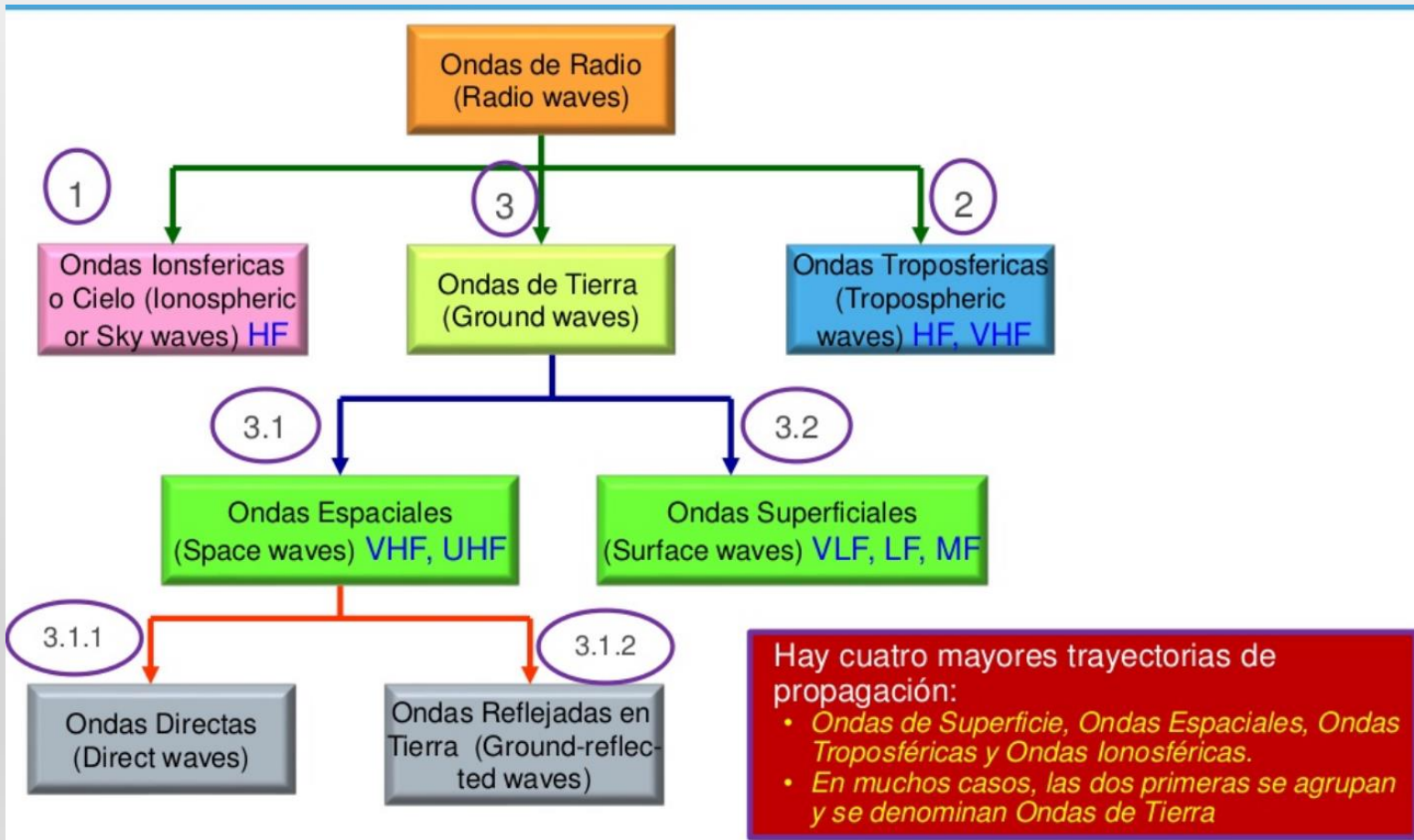


- Los radioenlaces terrenales forman parte fundamental de la infraestructura de telecomunicaciones de la mayoría de países del mundo. Su correcto dimensionamiento a efectos de la propagación de las ondas radioeléctricas reviste una importancia crucial para el adecuado funcionamiento de la red y la calidad de los servicios prestados, además de un muy importante valor económico resultante de la utilización más eficaz posible del espectro electromagnético.

El Manual del UIT-R – Información sobre propagación de las ondas radioeléctricas para el diseño de enlaces terrenales punto a punto presenta información básica y suplementaria sobre los efectos de la propagación de las ondas radioeléctricas



- Las características morfologías de la tierra condicionan las propiedades eléctricas y afecta la transmisión y propagación de las ondas TEM



- A bajas frecuencias la tierra se comporta como un buen conductor excitando las ondas en su superficie y se adapta a los terrenos y transporta a la ondas mas de la zona de visibilidad directa

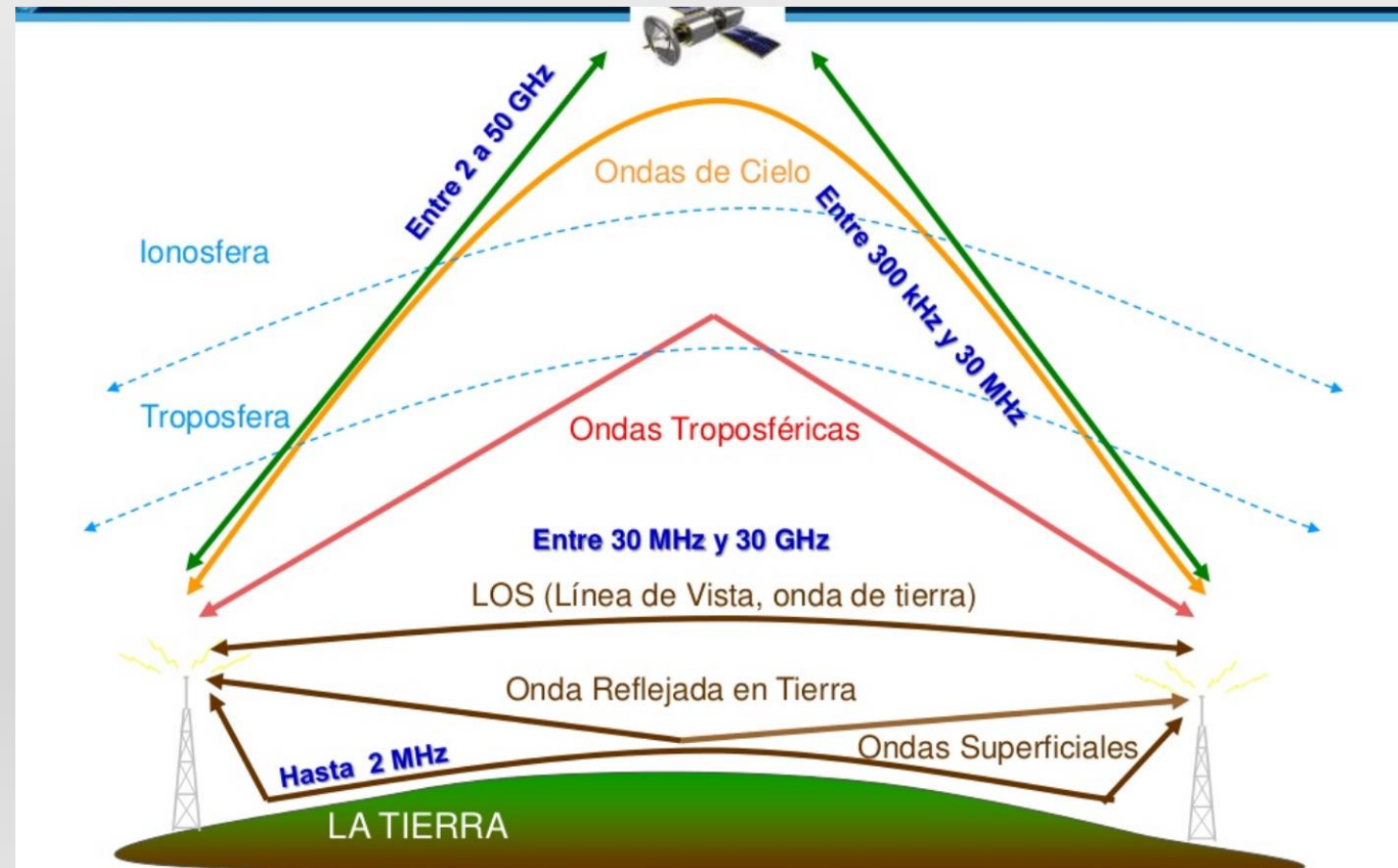


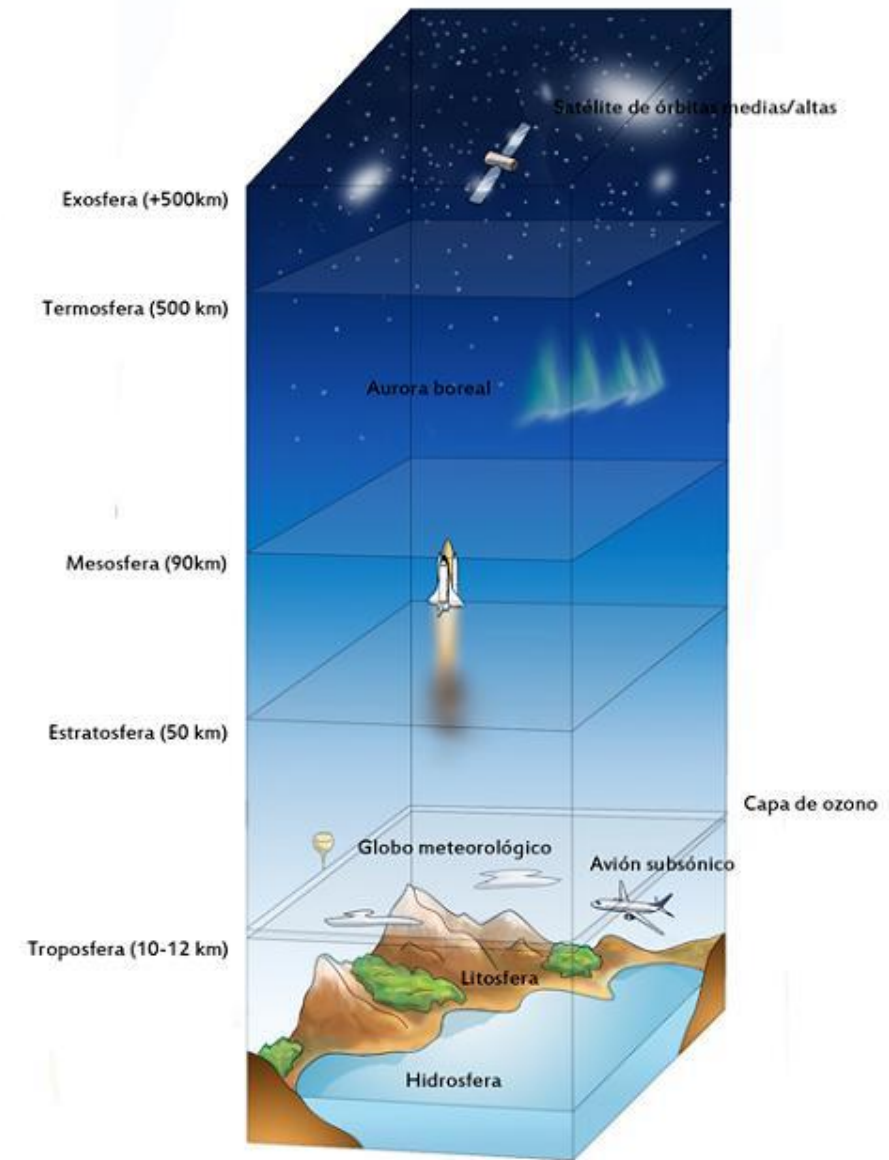
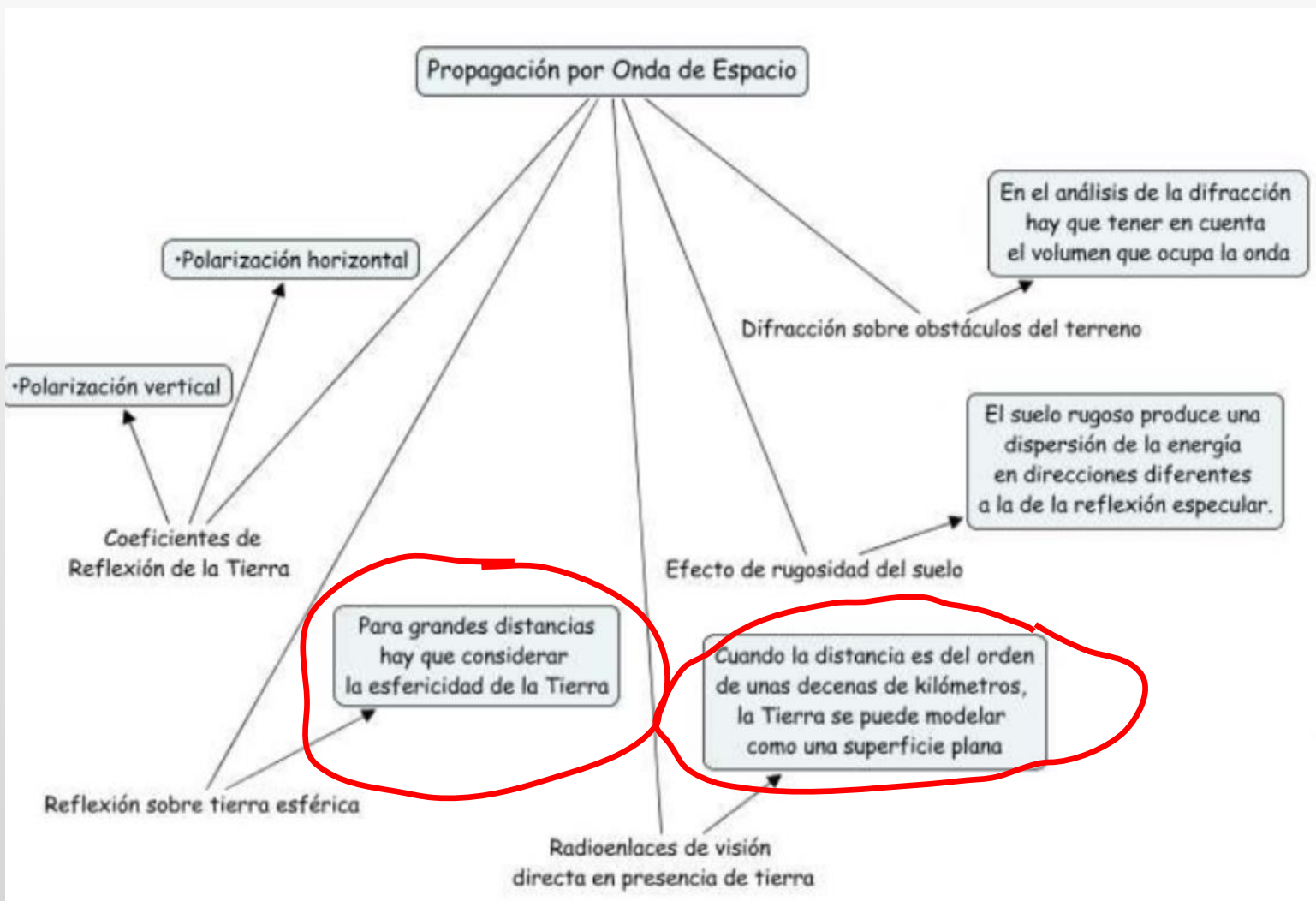


Con frecuencias altas la atenuación de la tierra es elevada y es necesario elevar las antenas respecto del suelo

- Otro factor es la concentración no uniforme de gases en la troposfera es mayor a menor altura, esto produce una curvatura en los rayos por los índices de refracción del medio.

- **Ionósfera:** Refracción ionosférica, cuyo índice aumenta con la altitud (~ 50km a ~ 400km).
- **Estratósfera:** De poco interés para las telecomunicaciones.
- **Tropósfera:** Refracción de onda, absorción troposférica, atenuación por lluvia, etc.

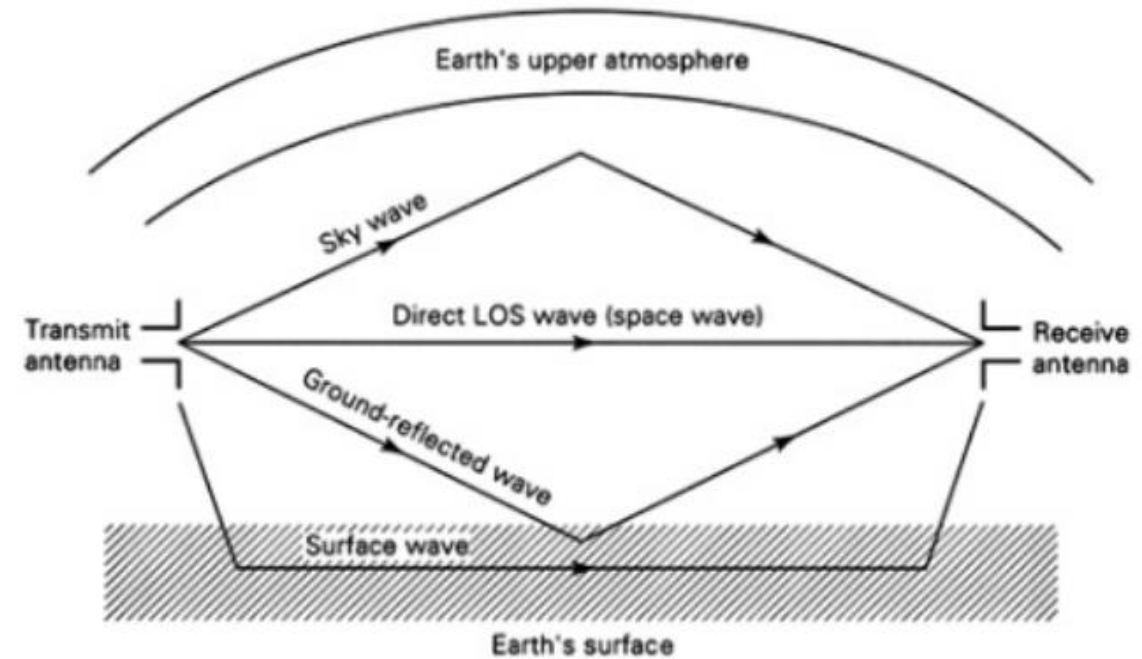




*Los modos de propagación de una onda radioeléctrica dependen de su frecuencia y del tipo y características eléctricas del terreno subyacente.*


Modos de propagación según la frecuencia:

- 1 Onda ionosférica (OI)
  - a. Propagación tierra-ionósfera
  - b. Propagación ionosférica (*sky-waves*)
- 2 Ondas de dispersión troposférica (ODT)
- 3 Onda espacial (OE)
  - a. Onda Directa (OD) [LOS - *line-of-sight*]
  - b. Onda Reflejada (OR)
  - c. Onda de Multitrayecto (ORM)
- 4 Onda de superficie (OS)



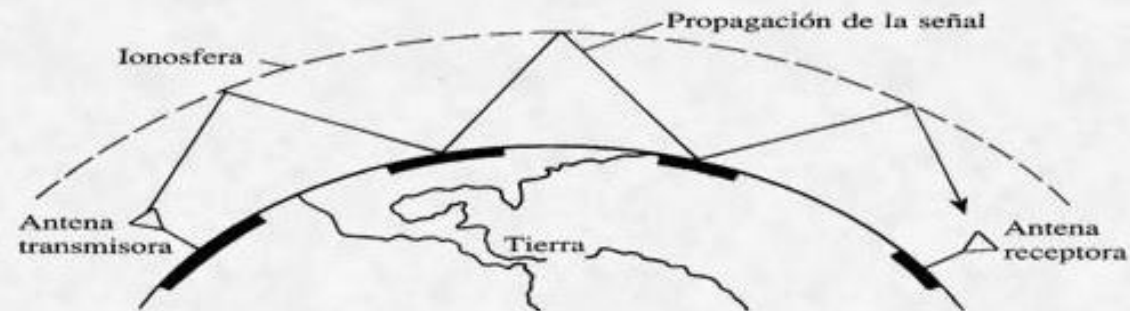


# EN LA IONOSFERA

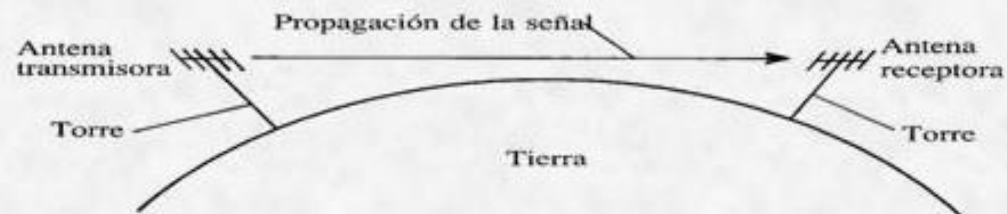
REFLEJA	ULF	LF
REFRACTA	MF 	HF
DESPOLARIZA	VHF	UHF



a) Propagación de una onda de tierra (por debajo de 2 MHz)



b) Propagación de una onda espacial (2 a 30 MHz)



c) Propagación en línea de vista (LOS) (por encima de 30 MHz)



# PROPAGACION EN LA IONOSFERA

La causa principal de ionización de la ionosfera es la radiación solar, en las bandas de ultravioletas y rayos X. También contribuyen a la ionización la incidencia de partículas cargadas (protones y electrones) de origen solar y los rayos cósmicos galácticos. La creación de iones depende de la energía de las radiaciones y de la densidad de moléculas.

División capas de la Ionosfera:

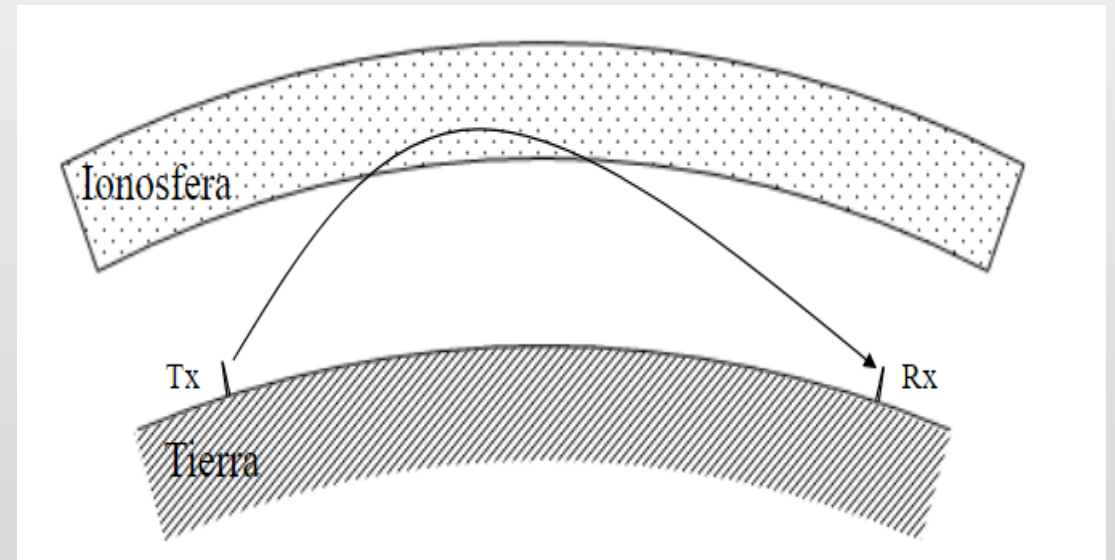
Región D: 60 Km; Día Si, noche No

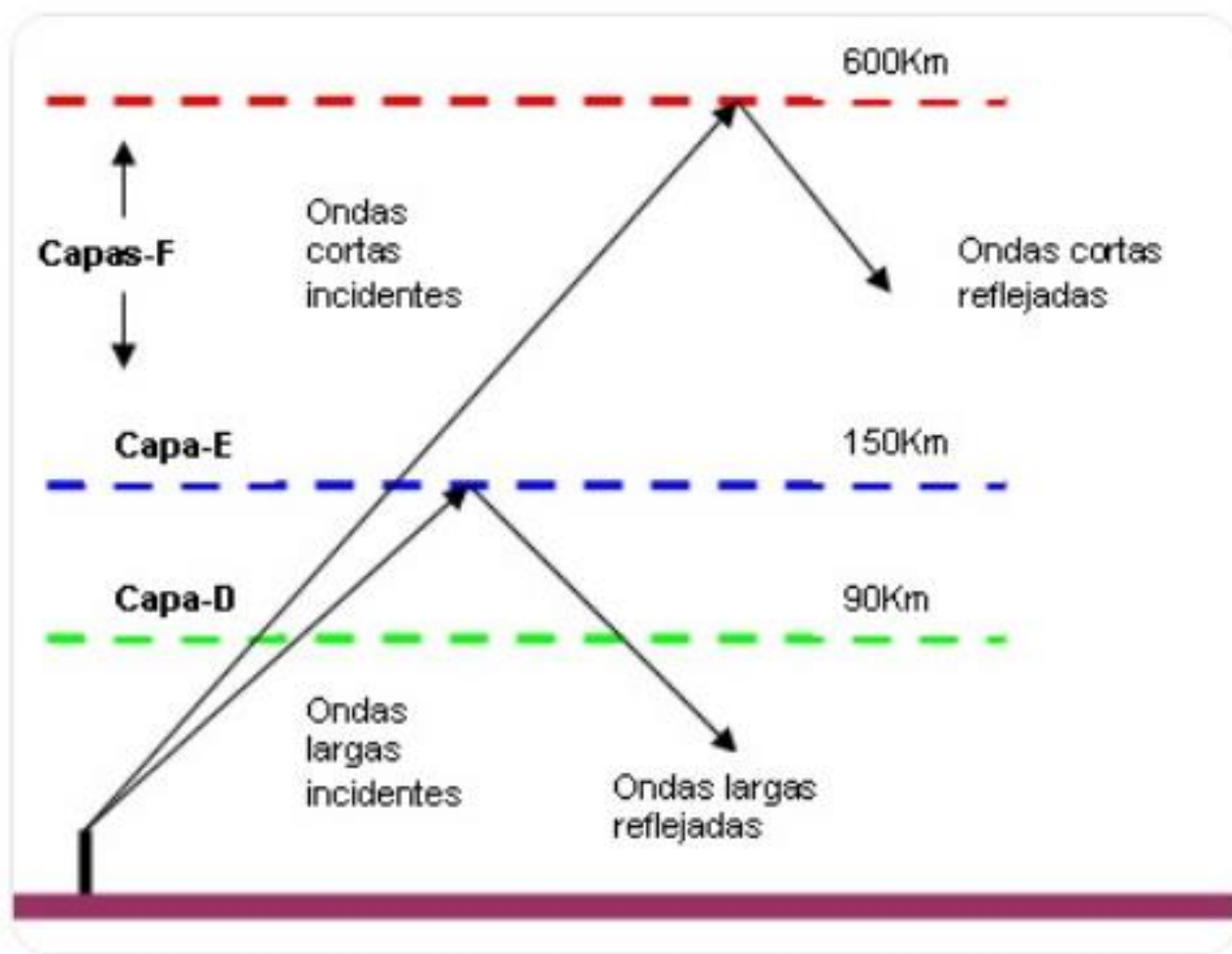
Región E: 80 a 150 Km Día Si, noche Esporádica

Región F: 180 600 Km Día Si , noche No

Región F Capa F1: 180 a 300 Km Día Si, noche NO

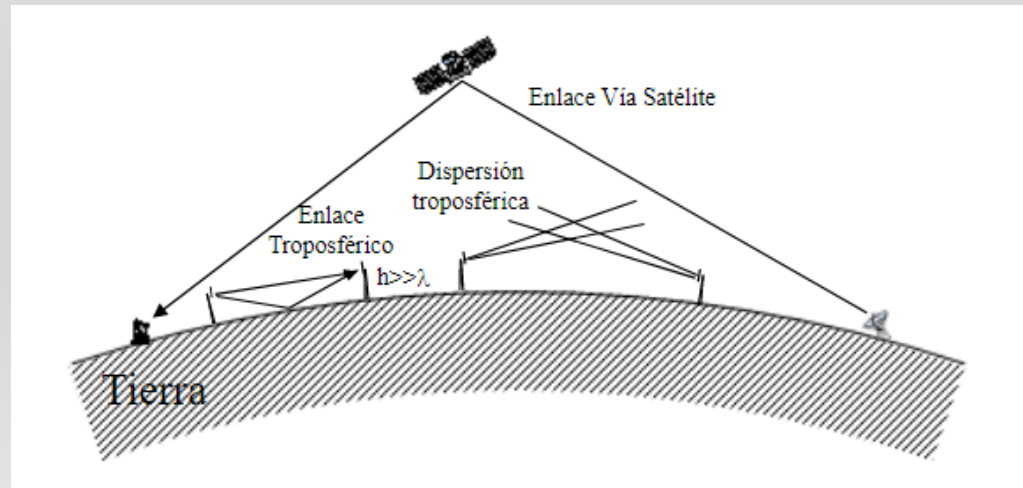
Región F Capa F2: 300 a 600 Km Día Si, noche No  
y densidades de ionización







# ONDAS EN EL ESPACIO

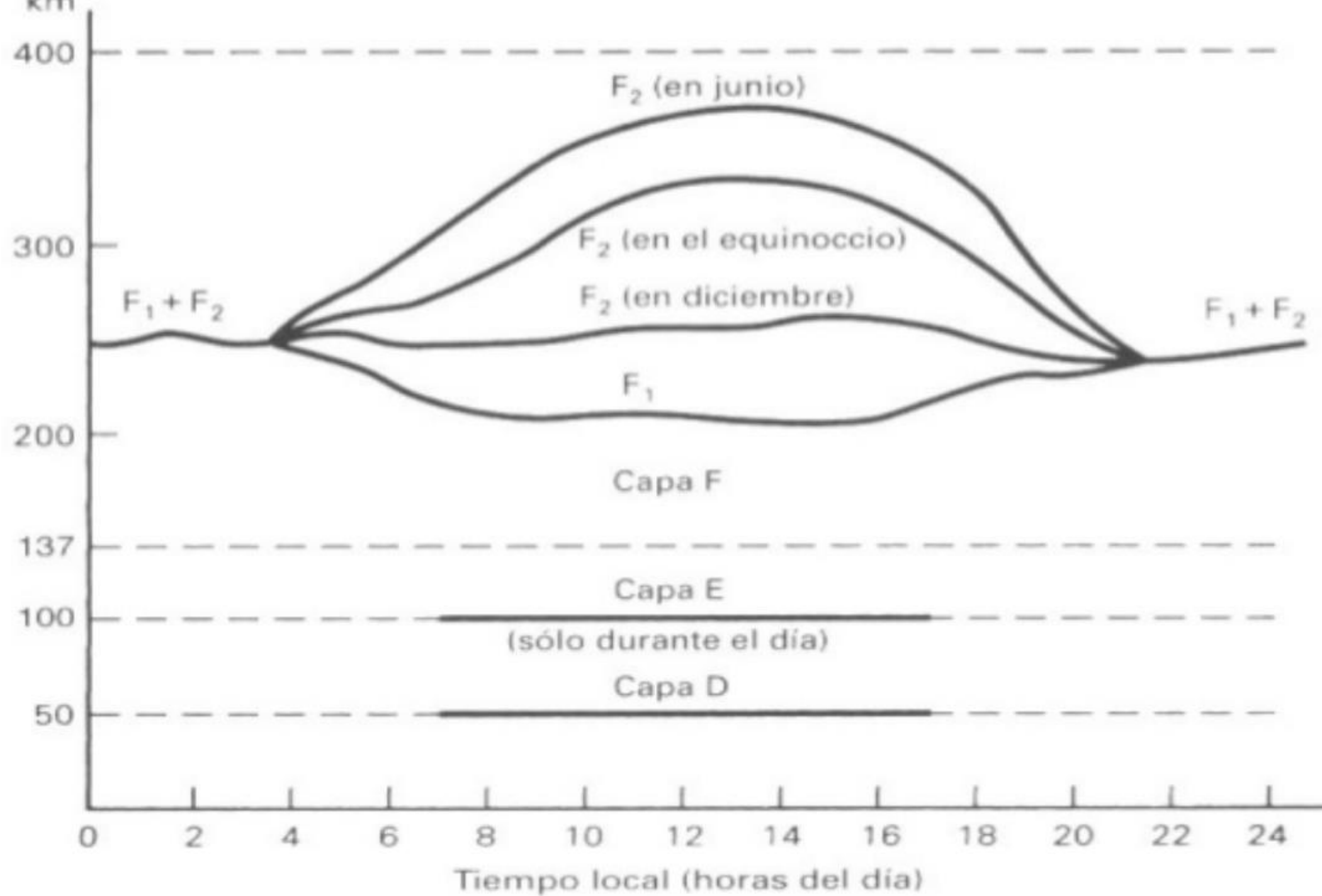
- Para las frecuencias de VHF y superiores, para las que la ionosfera se hace transparente, se asume una propagación en espacio libre modificada por el suelo (reflexión y difracción) y por la troposfera (refracción, atenuación y dispersión).
- Se emplea antenas elevadas y directivas.
- El alcance es muy variable: desde las decenas de Km a los 40.000 Km en comunicaciones por satélite y millones de Km en comunicaciones de espacio profundo.
- Este modelo se aplica en Radiodifusión de FM y TV, Telefonía móvil, enlaces fijos , radar, comunicaciones vía satélite, etc.



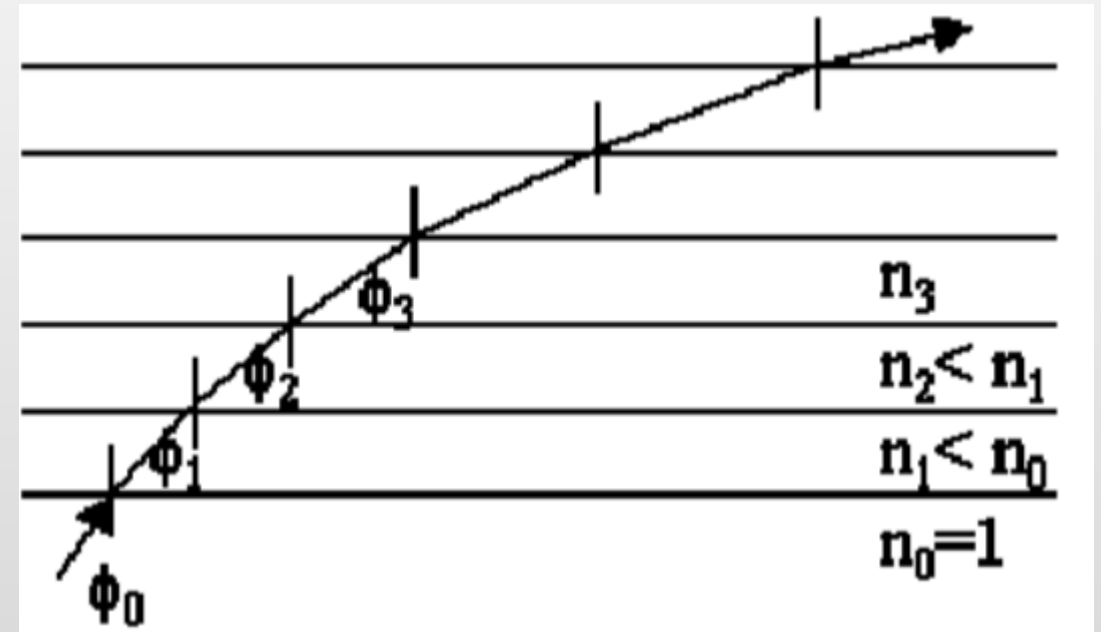
# LA PROPAGACIÓN DE SEÑALES DEPENDEN DE F Y EL TIPO DE SUELO

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





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

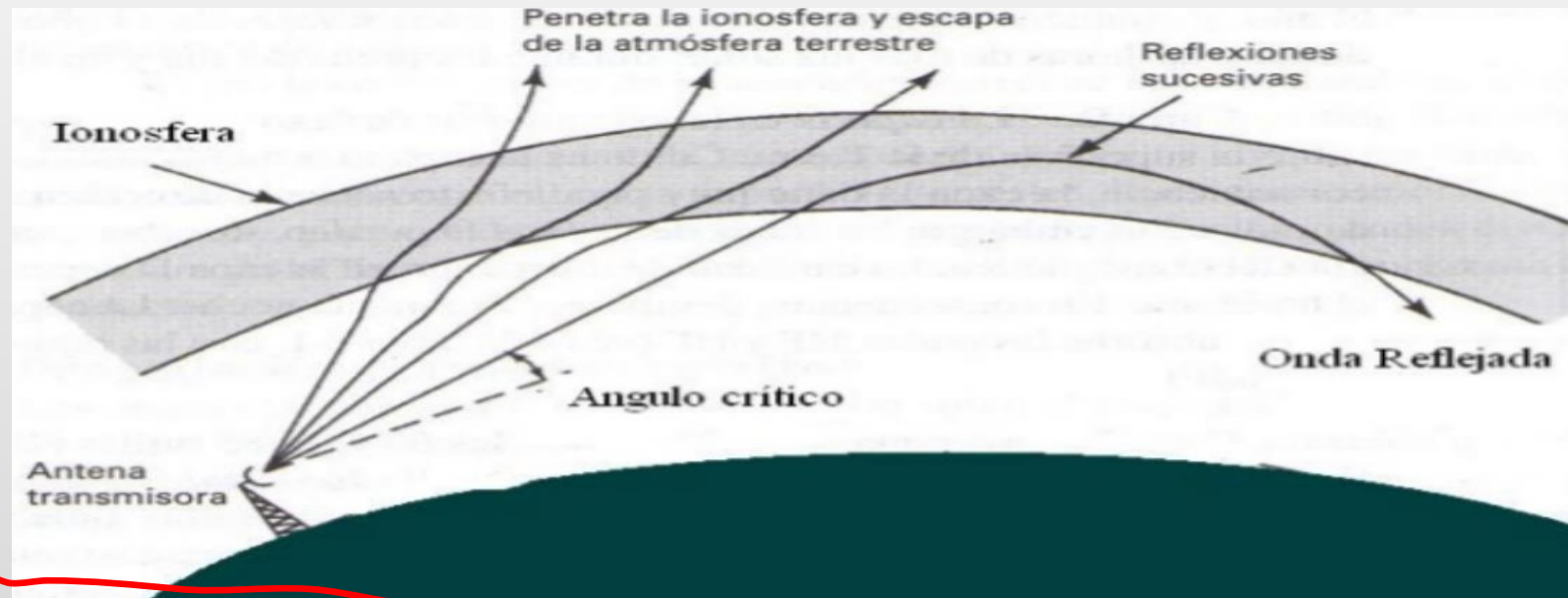


Existe una frecuencia máxima utilizable (MUF), denominada de esa forma debido a que un valor mayor que ella ocasiona que la onda no rebote en la ionosfera sino que siga su camino fuera de la atmósfera terrestre.

$$n_0 \sin \phi_0 = n_1 \sin \phi_1 = \dots = n_i \sin \phi_i$$

$$OWF_i(d) = 0,85 \cdot MUF_i(d)$$

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



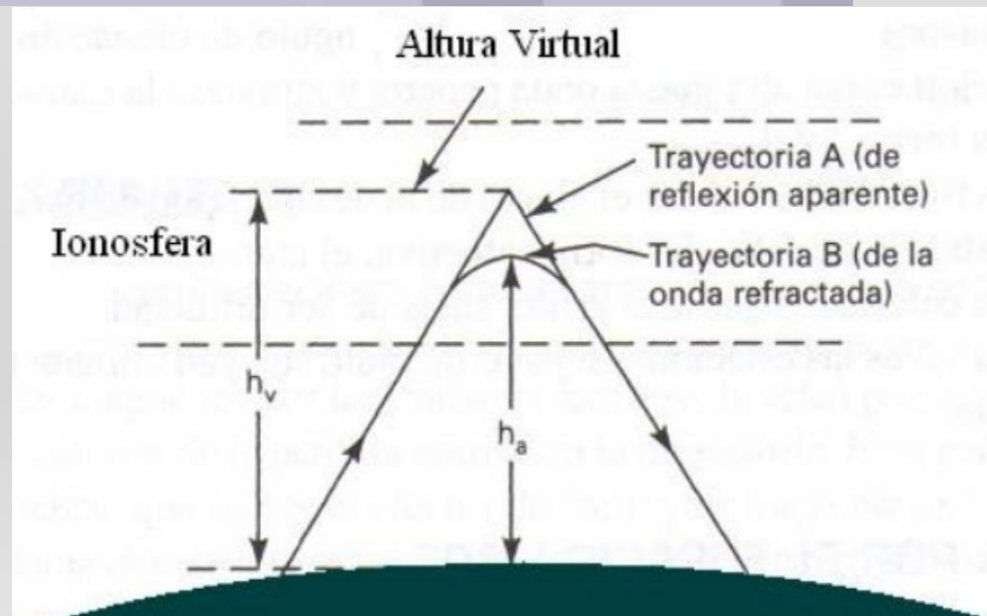
Este valor es aproximadamente **30 MHz**

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

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

Aplicando la Ley de la secante, se puede calcular el alcance, definiendo una **altura virtual**  $h_v$  de una emisión a una frecuencia  $f$  y con un ángulo de incidencia  $\Phi_0$  como aquélla que le correspondería a una frecuencia  $f_v$  con incidencia vertical:

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





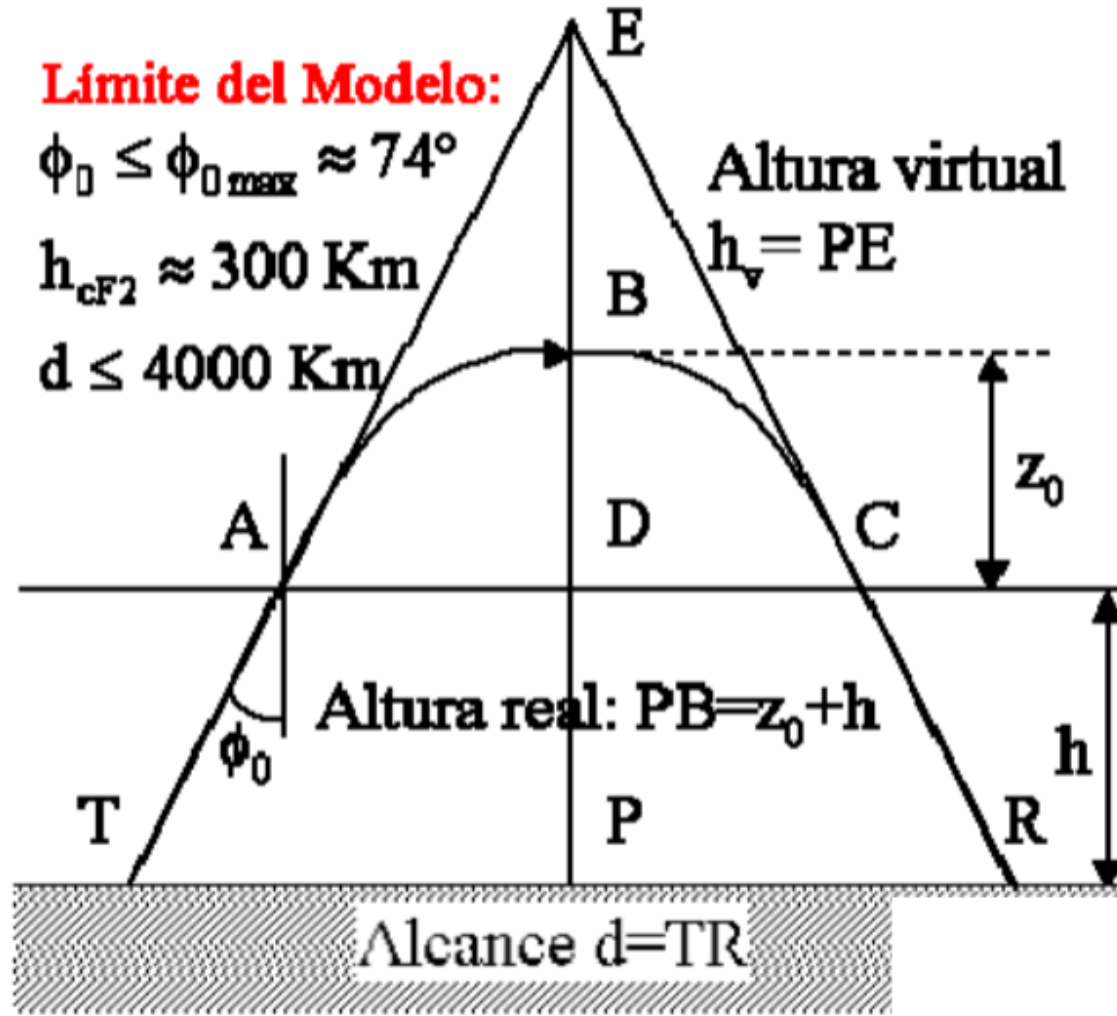
La relación entre el alcance (d) y la máxima frecuencia utilizable (MUF) se obtiene aplicando la Ley de la secante

### Límite del Modelo:

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

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

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



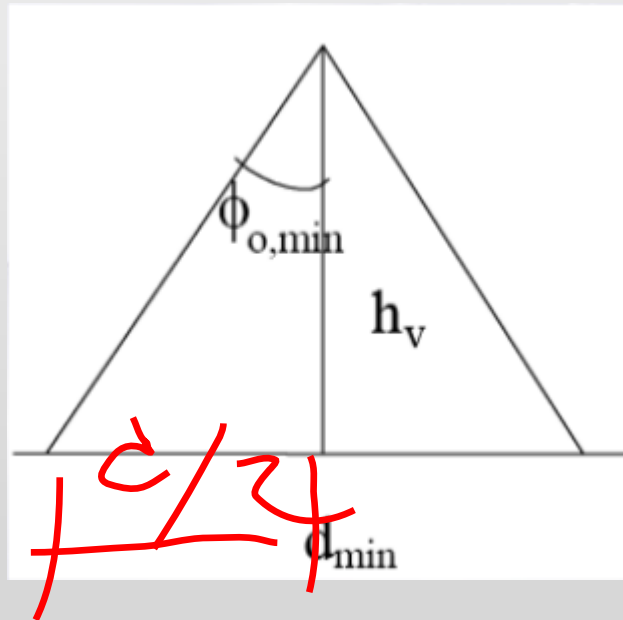
$$MUF_i(\phi_o) = f_{c,i} \sec(\phi_o) \Rightarrow MUF(d) = f_{c,i} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2h_v}\right)^2}$$

Las transmisiones se realizan a la frecuencia óptima de trabajo (Optimum Working Frequency) que se toma como un 85% de la MUF.

$$OWF_i(d) = 0,85 \cdot MUF_i(d)$$



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



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



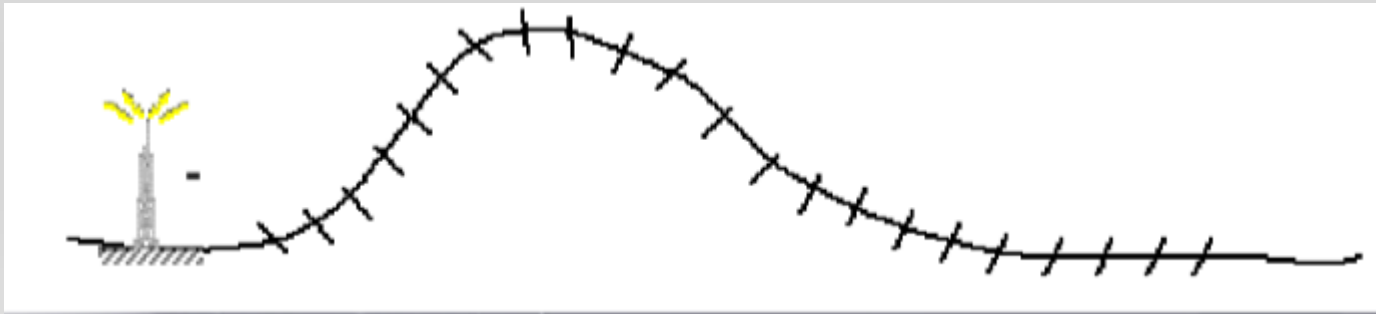
$$f_{emission} = f_{c,F2} \sec(\phi_{o,min}) \Rightarrow \sec(\phi_{o,min}) = \frac{f_{emission}}{f_c} = 1.67 \Rightarrow \phi_{o,min} = 53.13^\circ$$



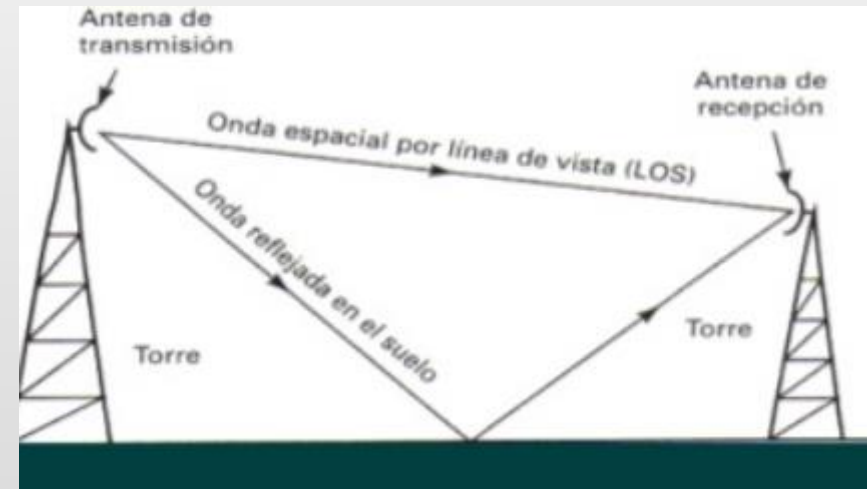
# MODELOS DE PROPAGACION

Los primeros modelos de onda de superficie fueron propuestos en 1909

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



- La curvatura de la tierra es un obstáculo para la propagación de ondas. Esta curvatura presenta un horizonte de propagación dentro del cual se pueden realizar procesos de comunicación de vista conocido como HORIZONTE DE RADIO



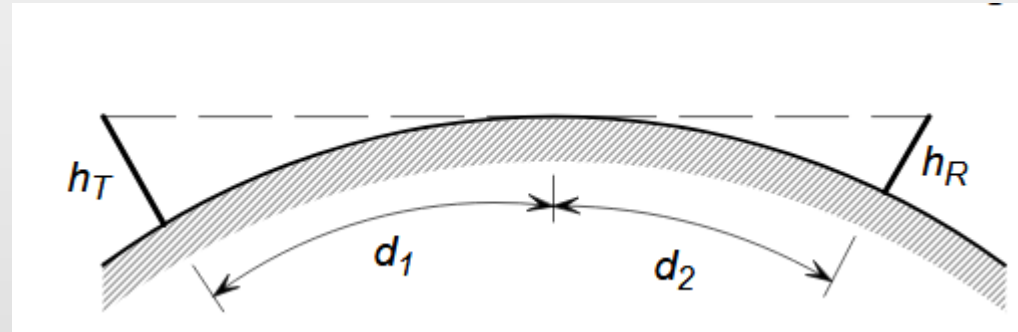
La curvatura de las trayectorias de los rayos en la atmósfera da lugar al concepto de horizonte radioeléctrico, que no debe confundirse con el horizonte óptico, es decir, las ondas electromagnéticas “ven” el horizonte más lejos de lo que realmente está desde el punto de vista óptico

$$d = \sqrt{2} * h$$



# HORIZONTE RADIOELECTRICO

$$d_H = d_1 + d_2$$



$$d = \sqrt{2} * h_T + \sqrt{2} * h_R = \sqrt{2} * (h_T + h_R)$$

$d$  = Distancia total

$h_T$  = Altura de la antena Transmisora

$h_R$  = Altura de la antena Receptora

$d_T$  = Distancia de radio a la antena transmisora

$d_R$  = Distancia de radio a la antena receptora

## 2 MODELOS D

- TIERRA PLANA

Se aplica para curvas menores de 5Mts

Modelo básico para comunicaciones urbanas

Trabaja en la banda VHF y superiores ( $f \geq 30\text{MHz}$  /  $f < 150\text{MHz}$ )

La reflexión de la onda causa reflexión ionosferica

- TIERRA CURVA

Se aplica para curvas mayores a 5Mts

Modelo valido para comunicaciones marítimas de carácter naval o militar

Trabaja en las bandas low frequency (LF) y medium frequency (MF)

La reflexión de la onda causa divergencia

# MODELO TIERRA PLANA

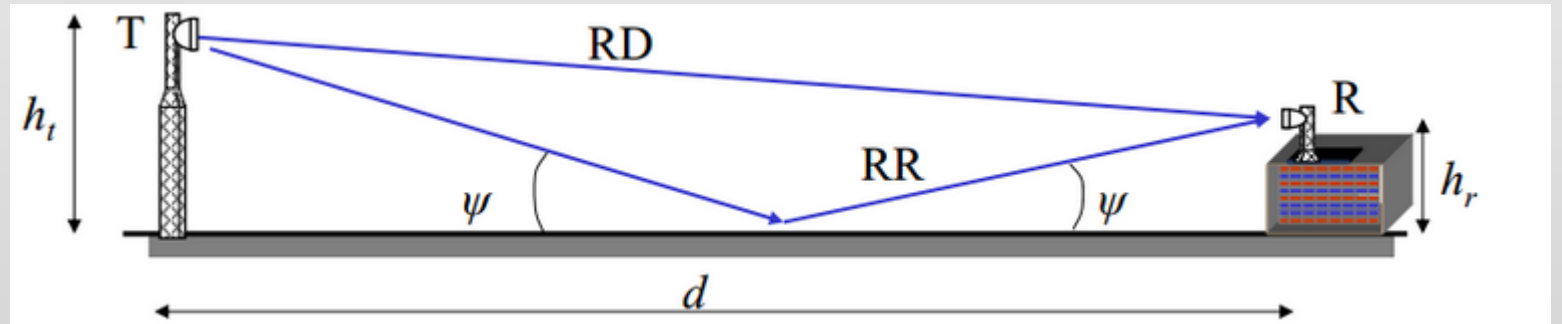
Este modelo simple supone una propagación de espacio libre afectada por un factor de atenuación de campo eléctrico  $F_e$ ,

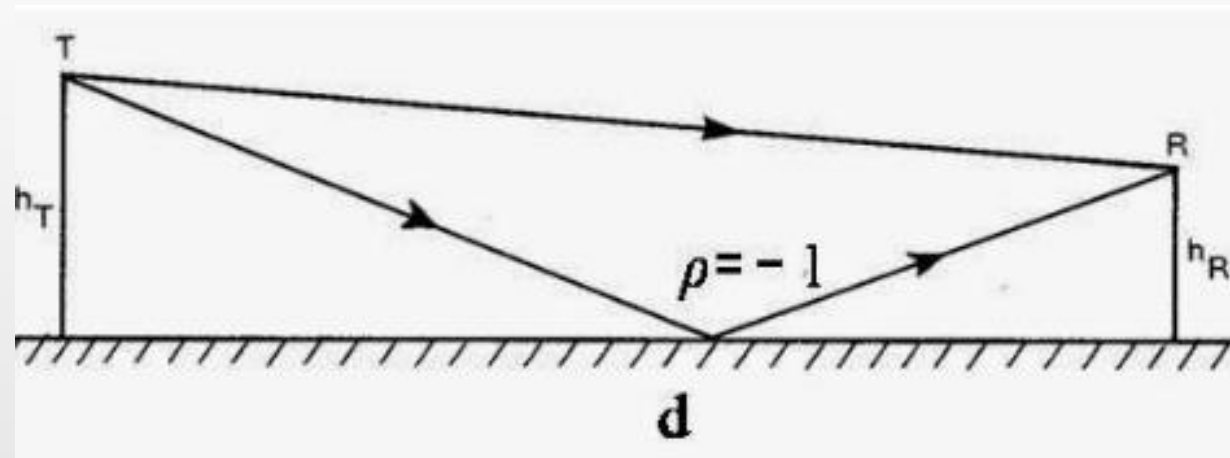
$$F_e = \frac{2 + 0.3p}{2 + p + 0.6p^2}$$

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



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





- La intensidad total del campo eléctrico en el receptor es la suma de las dos componentes: la debida al rayo directo y la debida al rayo reflejado

$$E = E_1 + E_2 = \frac{\sqrt{60P_{AT}G_1}}{RD} (1 + |p|e^{-j\tau})$$

$P_{AT}$ : potencia de entrada a la antena transmisora.

$G_1$ : Ganancia directa en la dirección del rayo directo (RD).

$p$ : coeficiente de reflexión.

- El ángulo de incidencia es:

$$\psi = \arctan\left(\frac{h_t + h_r}{d}\right)$$

- La diferencia de trayectos se aproxima para:

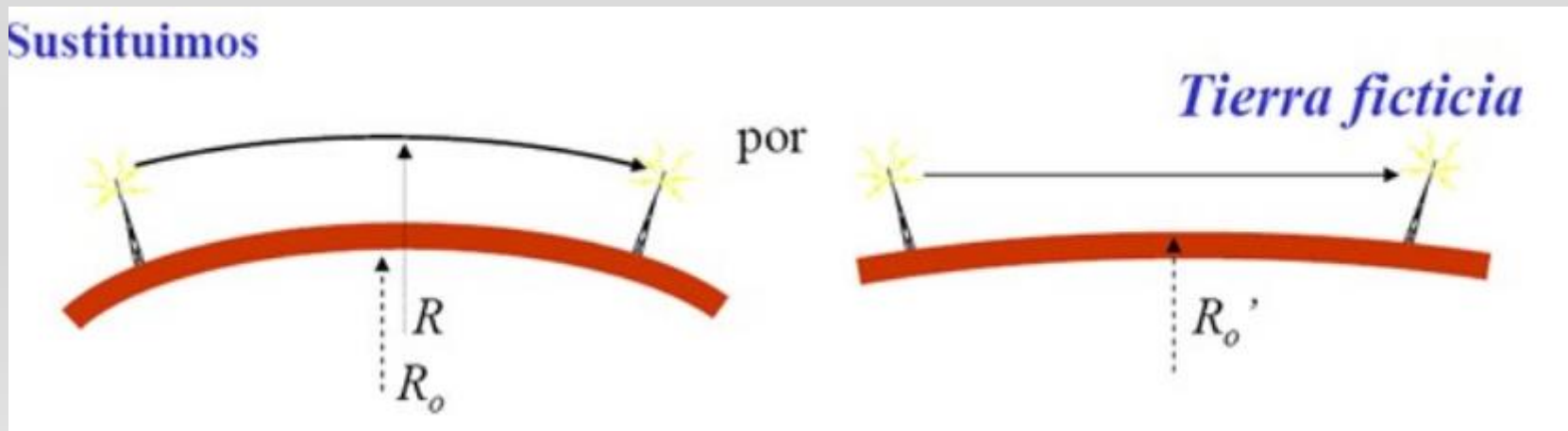
$$\Delta l \cong \frac{2 \cdot h_t \cdot h_r}{d}$$

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



# MODELO TIERRA CURVA

- Si las protuberancias debidas a la curvatura terrestre son superiores a unos 5 m, el modelo de Tierra plana deja de ser válido, pasando a regir el modelo de Tierra curva.
- En este modelo se considera una trayectoria del rayo rectilínea y una Tierra ficticia de radio  $R'_0 = kR_0$ . Se supone una Tierra lisa, como sucede en propagación sobre mar, grandes lagos o llanuras con terreno muy poco ondulado.



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

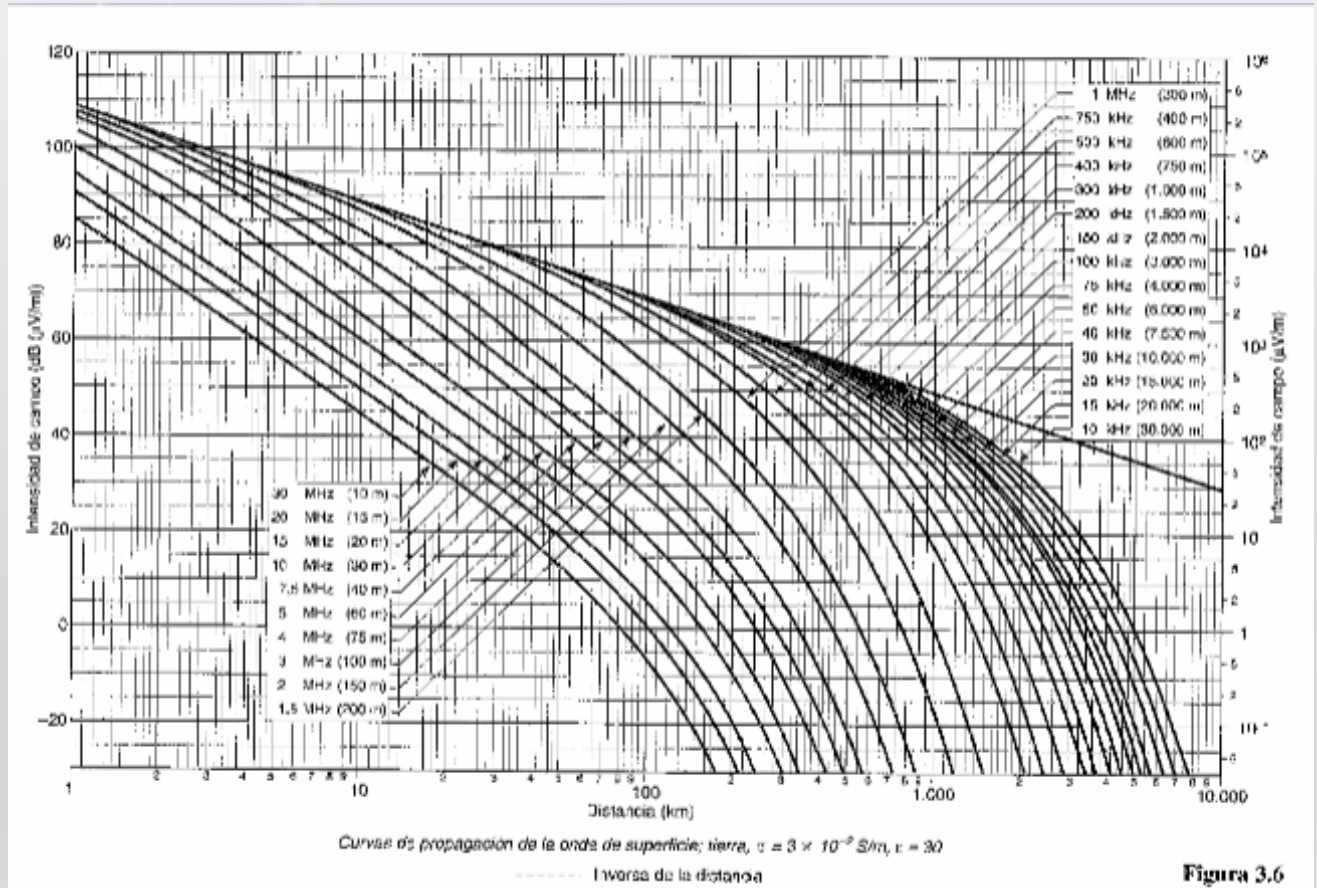
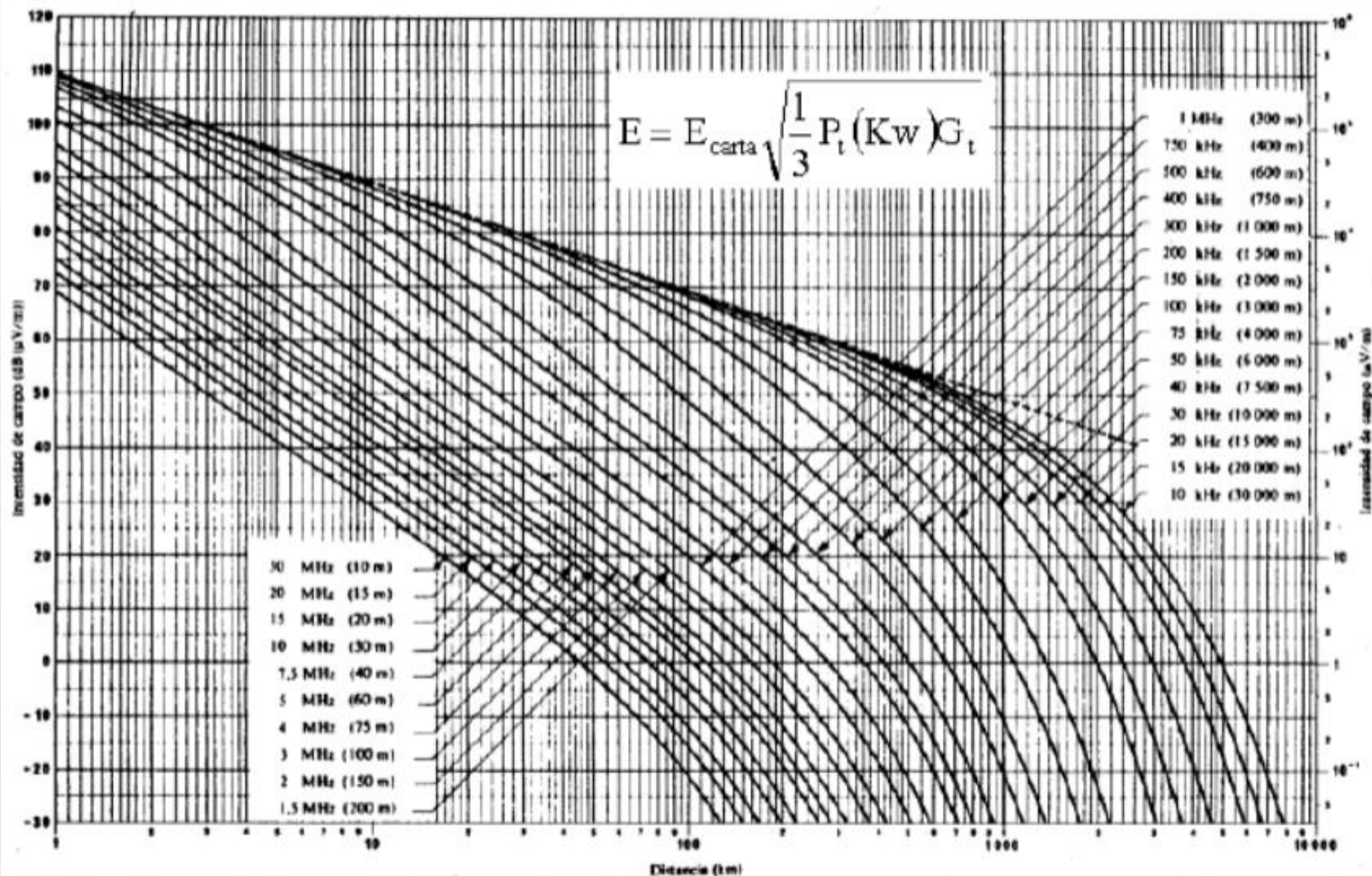


Figura 3.6





- Este modelo se describe en su totalidad en la Recomendación 369-9 de la ITU-R. Es un modelo empírico que se ha utilizado principalmente para la planificación de radiodifusión de emisiones de Onda Media.

- Es un modelo que no tiene en cuenta los posibles obstáculos del terreno, la razón de esto es que el modelo está basado en un grupo de medidas llevadas a cabo a diferentes frecuencias en diferentes tipos de suelo y climas.

-

# CONSIDERACIONES

- Las medidas se presentan en un juego de curvas de propagación por onda de superficie que corresponden a un cierto número de valores-tipo de frecuencias y de características del suelo y han sido calculadas con arreglo a las siguientes hipótesis:
  - La Tierra es una esfera homogénea lisa.
  - Tanto las antenas transmisoras como las receptoras se hallan situadas en tierra.
  - El elemento radiante es un monopolo vertical corto. Se supone dicha antena vertical en la superficie de una Tierra plana, perfectamente conductora y excitada de forma que radie 1 kW, en cuyo caso la intensidad de campo a 1 Km de distancia será de 300 mV/m.
  - Las curvas se han trazado para distancias medidas siguiendo la curvatura de la tierra.



- Las figuras adjuntas proporcionadas por el ITUR modelan la intensidad de campo producida por una antena transmisora en función de la frecuencia, la distancia y el tipo de terreno. para un monopolo corto que radia 1 Kw.
- Para otro tipo de antena y otra potencia el valor del campo es:

$$E = E_{\text{carta}} \sqrt{\frac{1}{3} P_t (\text{Kw}) G_t} \quad G_t \approx 2 \cdot \text{Directividad}_{\text{dipolo equivalente}}$$

- Se observa que:
  - La amplitud de los campos es independiente de la altura del monopolo vertical, mientras este sea corto.
  - En regiones próximas a la antena el campo decae como  $1/R$
  - En regiones más alejadas de la antena el campo decae como  $1/R^2$
  - A gran distancia de la antena transmisora ( $>100 \text{ Km}$ ) la intensidad de campo cae exponencialmente.

- Nivel de señal por propagación:

$$E(\text{dB}\mu\text{V}) = E_{\text{carta}}(\text{dB}\mu\text{V}) + 10 \log P_t (\text{Kw}) + 10 \log \frac{G_t}{3} = 20 \log E_{\text{nef}} (\mu\text{V})$$

- Empleando las cartas de la UIT-R, obtenga la distancia a la que se alcanza un campo de  $100 \mu\text{V/m}$  eficaces transmitiendo con un mástil de 75 m que a 1 MHz radia una potencia de 91.5 kW. Considerar la directividad de 3.28

*a) Sobre la superficie del mar*

*b) Sobre tierra seca*

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

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



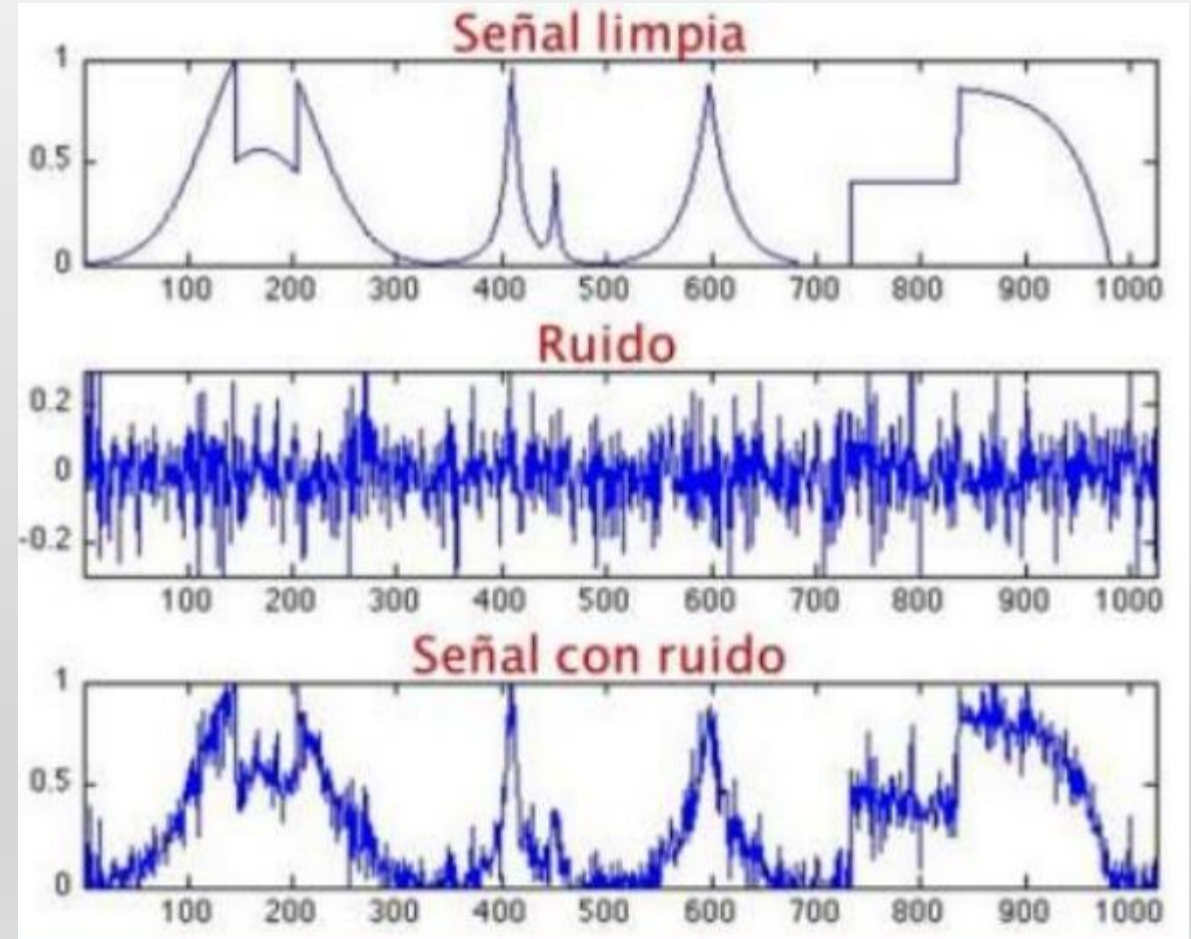
Y buscando  
el valor de  
ordenadas en  
las cartas de:

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

[illegible]

# RUIDO RADIOELCTRICO

- El ruido eléctrico se define como cualquier energía eléctrica no deseada en la pasabanda útil de un circuito de comunicaciones





## Formas de ruido externo

- **Ruido cósmico.** El Sol es una poderosa fuente de radiación en un amplio intervalo de frecuencias. Las frecuencias. Las estrellas irradian también ruido, que se conoce como ruido cósmico; cuando se lo recibe
- **Ruido atmosférico.** Se le llama **estática** porque los rayos, que son una descarga de electricidad estática, son una fuente importante de ruido atmosférico. Esta perturbación se propaga a largas distancias distancias por el espacio.
- **Ruido impulsivo.** Es un pico, una señal de amplitud alta en un periodo de tiempo muy corto, que viene que viene de líneas de potencia, iluminación, etc.
- **Ruido inducido.** Se debe a fuentes externas tales como motores y electrodomésticos. Estos dispositivos actúan como antenas emisoras y el medio de transmisión como la receptora.
- **Ruido de interferencia o diafonía NEXT** (*Near End Crosstalk*). se produce cuando hay un acoplamiento entre las líneas que transportan las señales. Una línea actúa como una antena emisora y la emisora y la otra como una receptora.

## RUIDO ELÉCTRICO INTERNO

● **Se produce** en los componentes pasivos (resistores y cables) y en los activos (diodos, transistores). Todos los transistores). Todos pueden ser fuentes de ruido.

### Formas de ruido interno

● **Ruido de disparo** (*shoot noise*). Se produce por las variaciones aleatorias en el flujo de corriente (electrones o huecos) en dispositivos activos, como transistores y diodos.

● **Ruido de partición**. Se produce en dispositivos donde una sola corriente se separa en dos o más trayectorias, por ejemplo en un transistor de juntura (BJT) bipolar, en donde la corriente del emisor es la suma de las corrientes de colector y la de base.

● **Ruido térmico**. Se produce por el movimiento aleatorio de los electrones en un conductor debido a la agitación térmica, que crea una señal extra no enviada originalmente por el transmisor. Por su importancia, se tratará con mayor detalle.

## RUIDO ELÉCTRICO CORRELACIONADO

● **Se produce** por amplificaciones no lineales de la señal y cuando distintas frecuencias comparten el mismo medio de transmisión.

### Formas de ruido correlacionado

● **Ruido por distorsión armónica**. Se producen armónicos por una mezcla no lineal.

● **Ruido por distorsión de intermodulación**. Se producen productos cruzados indeseables: suma o resta de frecuencias.



## RUIDO TÉRMICO

### ¿Qué lo produce?

● El movimiento **aleatorio** de los electrones en un conductor, debido a la agitación **térmica**. El incremento de la temperatura incrementa el movimiento de los electrones y se produce un flujo de corriente, una **corriente de ruido**.

● El flujo de corriente es **resistido**; los átomos se agitan y los electrones chocan entre sí. Esta resistencia aparente del conductor produce un **voltaje aleatorio** que se llama **ruido**.

### Potencia del ruido térmico

● Johnson (1928) demostró que la **potencia del ruido** producido por una fuente de ruido térmico es proporcional al producto de la temperatura por el ancho de banda útil.

### Potencia del ruido térmico

● Movimiento aleatorio de electrones.



● Corriente de ruido  $I_N$

● Resistencia  $R$  debido al choque de electrones entre si.



$$I_N \times R = V_N$$

Voltaje de ruido  $V_N$



$$N = kTB$$



$$I_N \times V_N = N$$

$N$  = potencia del ruido térmico, en **W**.

$k$  = constante de Boltzmann,  $1.38 \times 10^{-23}$ , en **J/K**.

$T$  = temperatura absoluta, en **K** ( $^{\circ}\text{C} + 273$ ).

$B$  = ancho de banda útil, en **Hz**.

## RELACIÓN SEÑAL A RUIDO

### ¿Para qué se calcula?

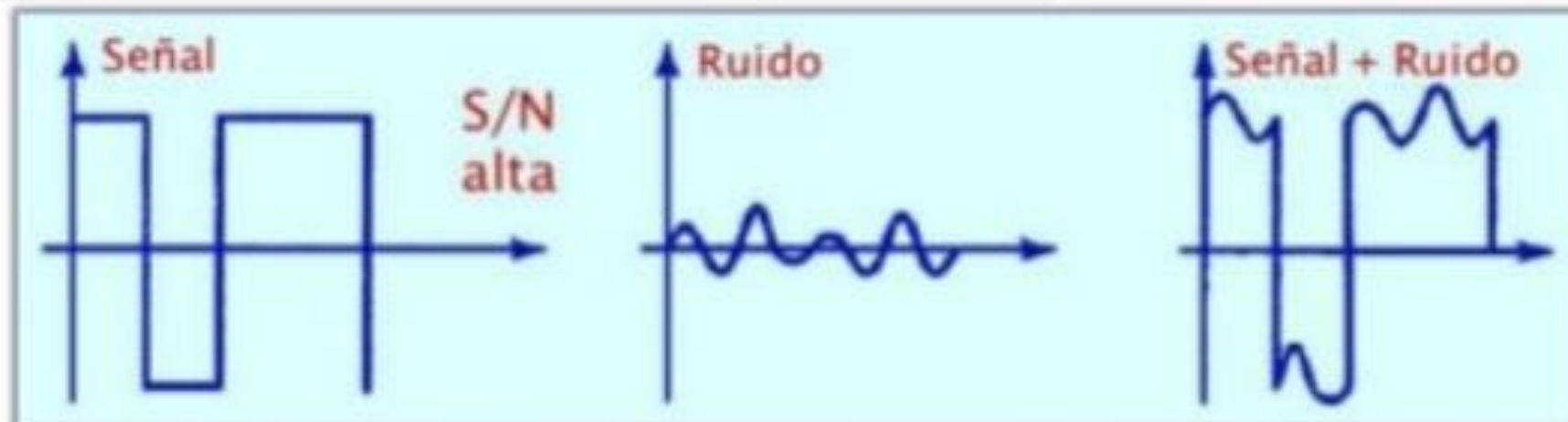
- La principal razón para calcular la **potencia de ruido** es es para determinar el efecto que el ruido tiene sobre la señal deseada.
- La cantidad de ruido no es lo que interesa, sino la cantidad cantidad de ruido **comparada** con el nivel de señal deseada, es decir lo que importa es la **relación** de potencia de la señal y la potencia de ruido.
- Esta relación, que se abrevia **S/N**, es una de las especificaciones más importantes de cualquier sistema de comunicaciones.

## Relación señal a ruido

$$S/N = \frac{\text{Potencia media de la señal}(W)}{\text{Potencia media del ruido}(W)}$$

$$S/N(\text{dB}) = 10 \log(S/N)$$

- S/N es la razón entre lo que que se quiere (señal) y lo que no se quiere (ruido).



# TEMPERATURA RUIDO

*Una antena al ser un dispositivo receptor, recibe tanto señales de información como de ruido.*

*A la potencia de ruido presentes en los terminales de una antena receptora se le asocia una temperatura de ruido de la antena  $T_a$ .*

$$P_N = \frac{V_N^2}{4R} = k T_a B$$

*$P_N$  = Potencia de ruido disponible en bornes de la antena.*

*$B$  = ancho de banda.*

*$K = 1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K constante de Boltzmann.*

*$R$  = Resistencia.*

*$V_N$  = la tensión (RMS) en circuito abierto.*



# SENSIBILIDAD

- La sensibilidad del receptor determina su capacidad para responder a señales débiles, donde la mínima potencia de la señal deseada que el receptor puede detectar se define como la sensibilidad.
- Generalmente en el lenguaje de los receptores el ancho de banda de la recepción deberá estar definido, así la mínima potencia de recepción esta relacionada con el ruido en el canal.
- Por ejemplo, una sensibilidad de la recepción de -98 dBm es mejor que una sensibilidad de la recepción del dBm -95 por DB 3, o un factor de dos.
- **ES LA SEÑAL MINIMA QUE ES CAPAZ DE RECIBIR EN EL RECEPTOR**



© BCCL 2018. ALL RIGHTS RESERVED.  
© BCCL 2019. ALL RIGHTS RESERVED.