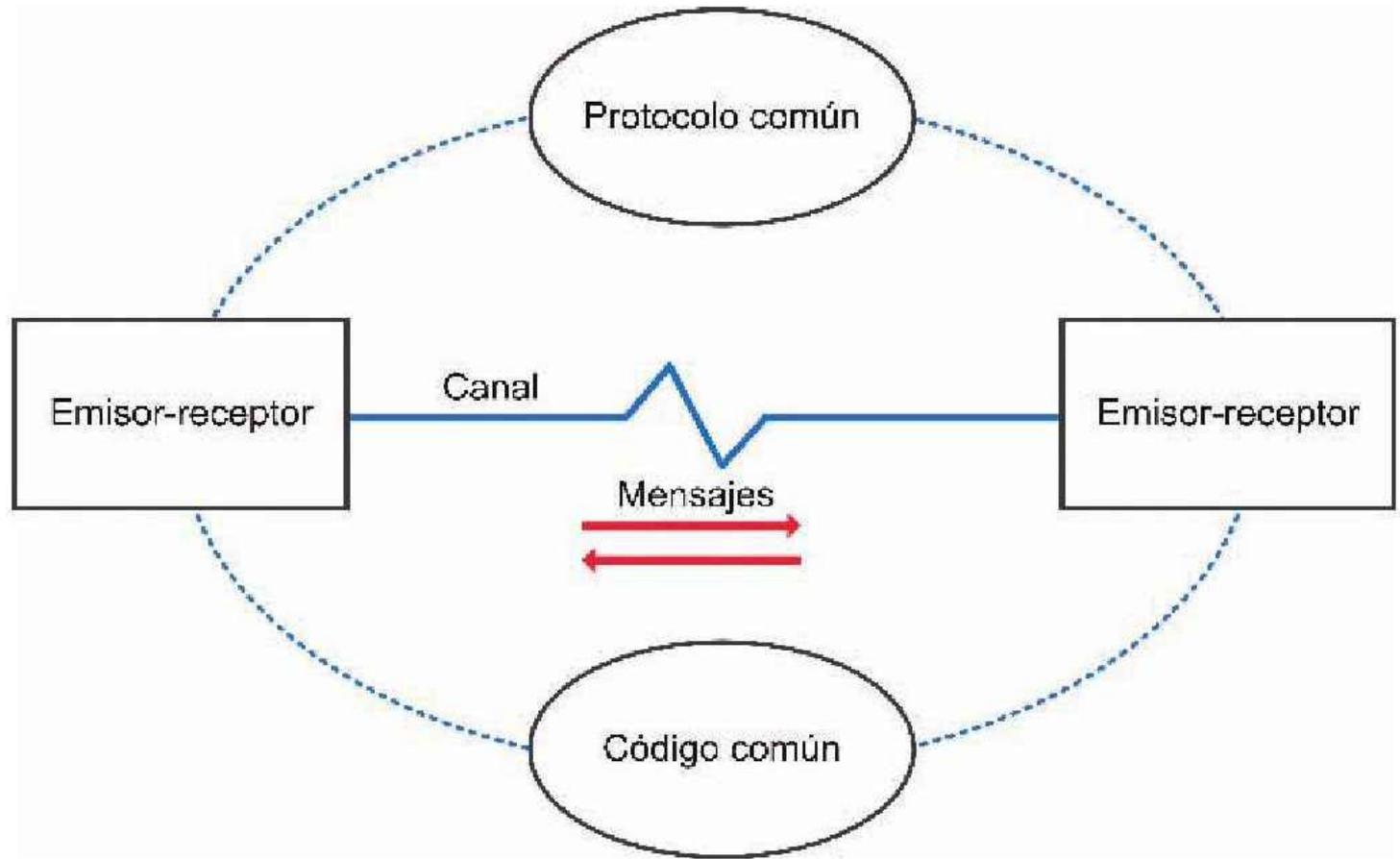


A satellite with four solar panels is shown in orbit above Earth. A blue laser beam originates from the satellite and points towards another satellite in the distance. The Earth's surface is visible below, showing terrain and clouds.

**IC323 COMUNICACIÓN DE DATOS**  
**Ingeniería en Computación**



# Medios de Transmisión

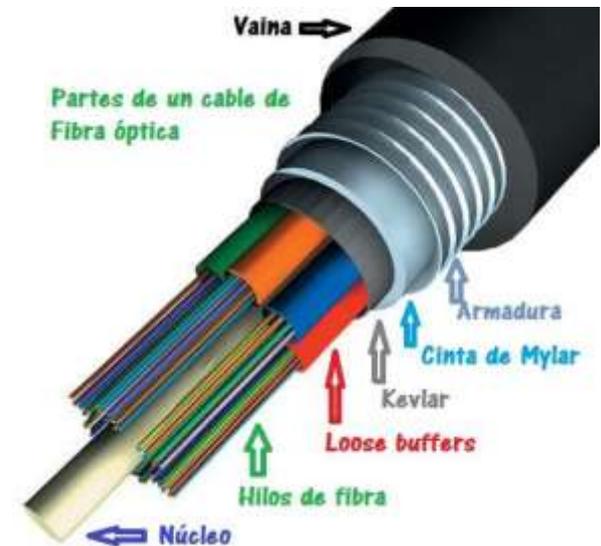
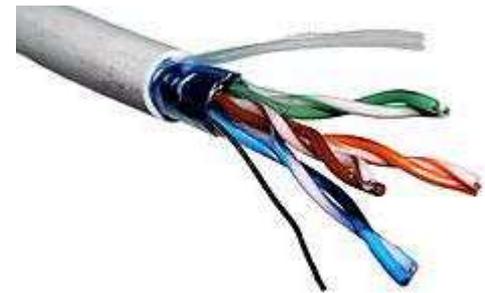


*Elementos que intervienen en el proceso de comunicación.*



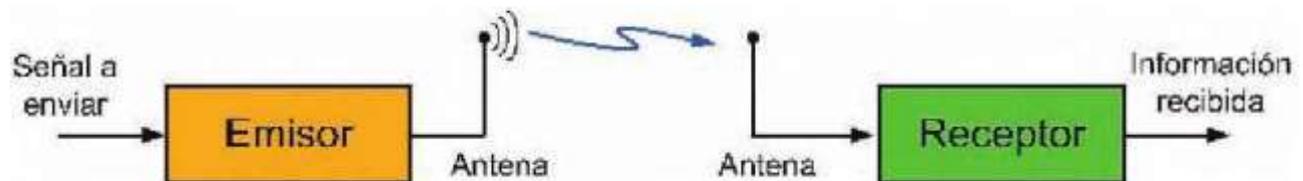
# Medios guiados

- Proporcionan un conductor de un dispositivo al otro.
- La señal es dirigida y contenida por los límites físicos del medio
- Los tres principales son:
  - Par trenzado
  - Cable coaxial
  - Fibra Óptica



# Medios no guiados

- Transportan ondas electromagnéticas sin usar un conductor físico.
- Las señales se radian a través del aire (o en pocos casos, el agua)
- Están disponibles para cualquier dispositivo capaz de aceptarlas.





# El Espectro Electromagnético

- Cuando los electrones se mueven crean ondas electromagnéticas que se pueden propagar por el espacio libre (aún en el vacío)
- El físico británico James Maxwell predijo estas ondas en 1.865 y el físico alemán Heinrich Hertz las produjo y observó por primera vez en 1.887.
- Se manifiestan como variaciones de campos eléctricos y magnéticos en el tiempo y en el espacio
- Pero... ¿que es una onda electromagnética?...

¿Qué es una onda? Frente de onda, cómo se propaga? ¿Cómo se mide una onda EM?



# Ecuaciones de Maxwell

- Todos los fenómenos electromagnéticos están gobernados por las ecuaciones de Maxwell. Que están formadas por cinco ecuaciones:

- **Dos ecuaciones rotacionales:**

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Ley de Ampere}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Ley de Faraday}$$

- **Dos ecuaciones de divergencia (que se pueden derivar de las rotacionales y por tanto no son independientes)**

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

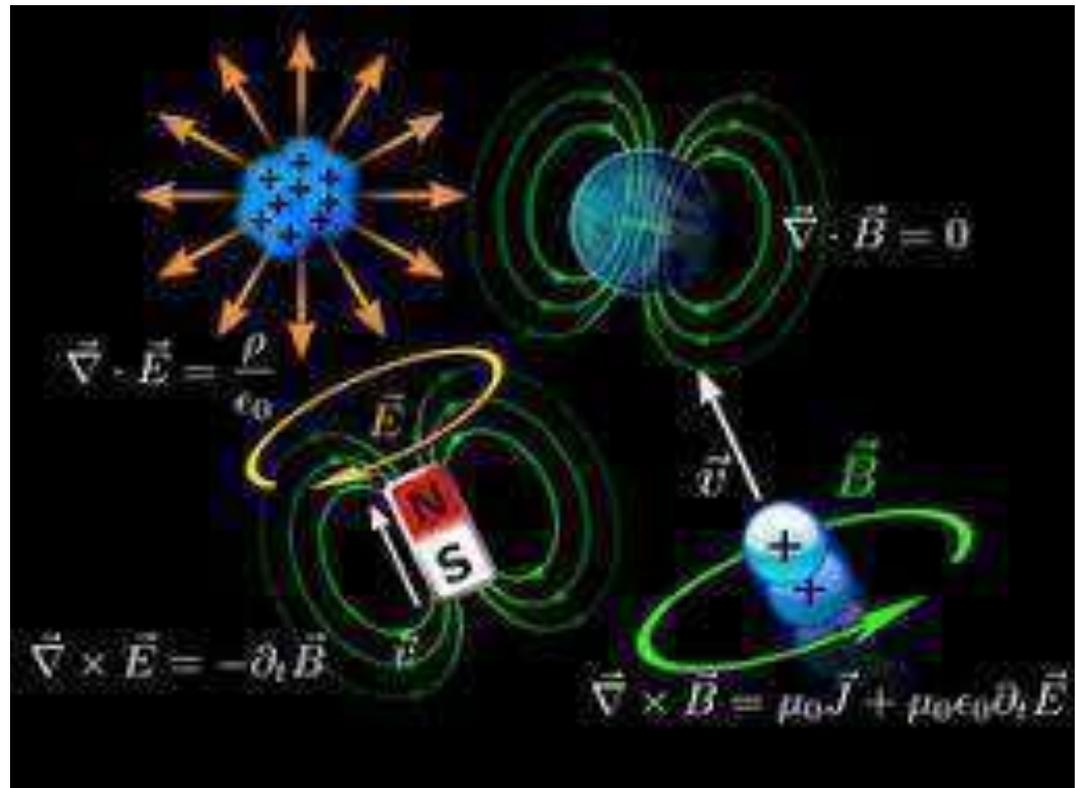
$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Ley de Gauss}$$

- **La ecuación de continuidad (principio de conservación de la carga)**

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$



# Ecuaciones de Maxwell

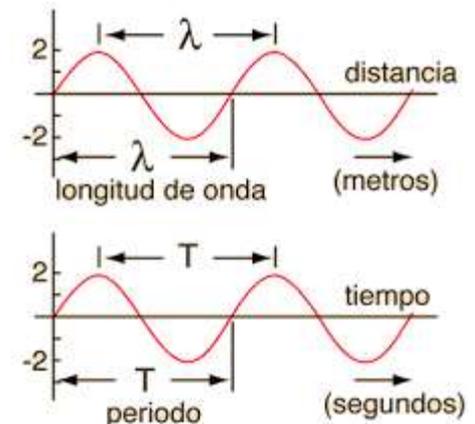




# El Espectro Electromagnético

- Las variaciones de los campos eléctricos y magnéticos de las ondas electromagnéticas pueden representarse por funciones senoidales (solución a las ecuaciones de Maxwell), tanto en función del tiempo como del espacio
- Así, la cantidad de oscilaciones por segundo de una onda electromagnética es su frecuencia,  $f$ , y se mide en Hz (Hertz) (en el dominio del tiempo) y la distancia entre dos máximos (o mínimos) consecutivos se llama longitud de onda,  $\lambda$  lambda (en el dominio del espacio)

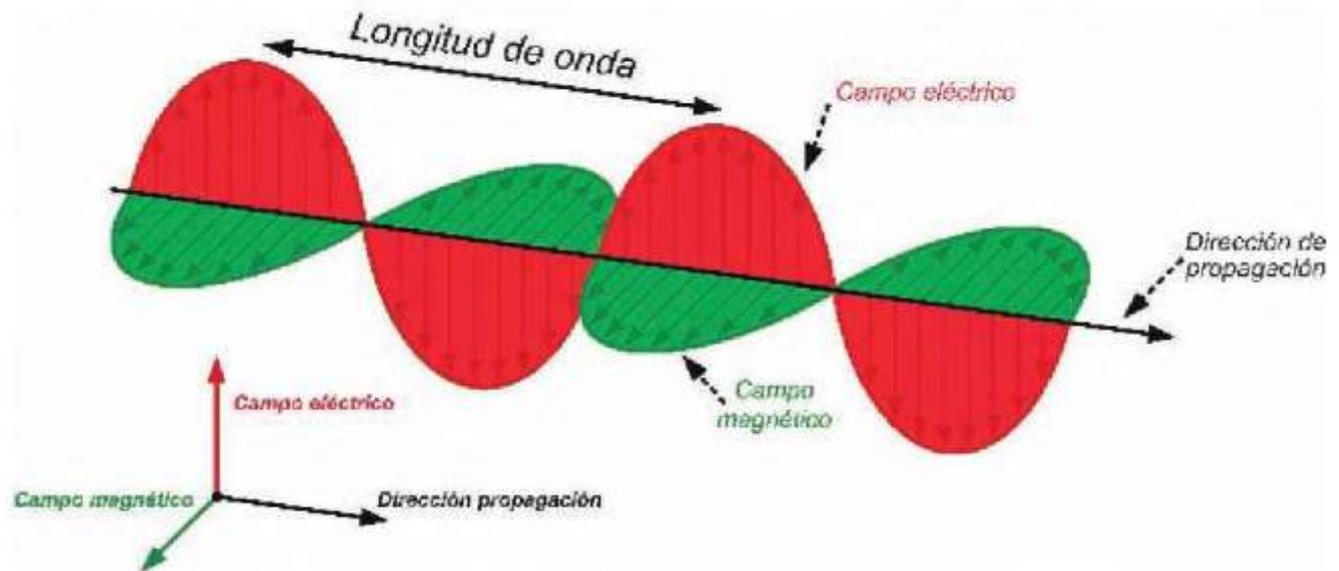
- La relación fundamental entre  $f$  y  $\lambda$  es:  $\lambda \cdot f = c$   
( $c$  es una constante)





# Ondas Electromagnéticas

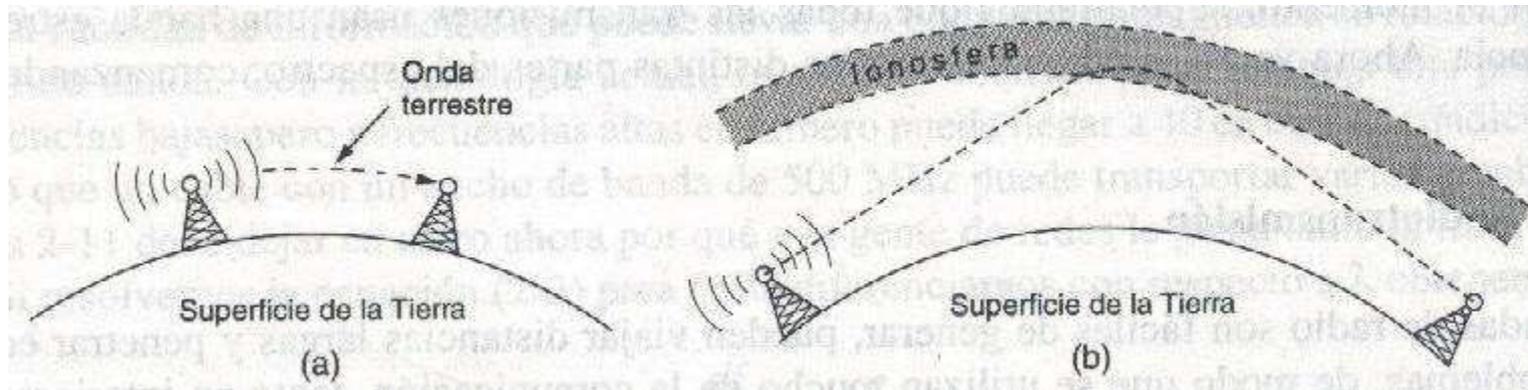
- Las ondas electromagnéticas están constituidas por un campo eléctrico (E) y un campo magnético (B) perpendiculares entre sí.
- Son ondas transversales porque los campos E y B son siempre perpendiculares a la dirección de propagación de la onda





# Radiotransmisión

- Las ondas de radio (o electromagnéticas) pueden viajar distancias largas e incluso penetrar edificios.
- Las propiedades de propagación dependen de la frecuencia: a bajas frecuencias cruzan bien los obstáculos pero se atenúan fuertemente con la distancia. A frecuencias más altas, tienden a viajar en línea recta y a rebotar en los obstáculos, o ser absorbidas por la lluvia.





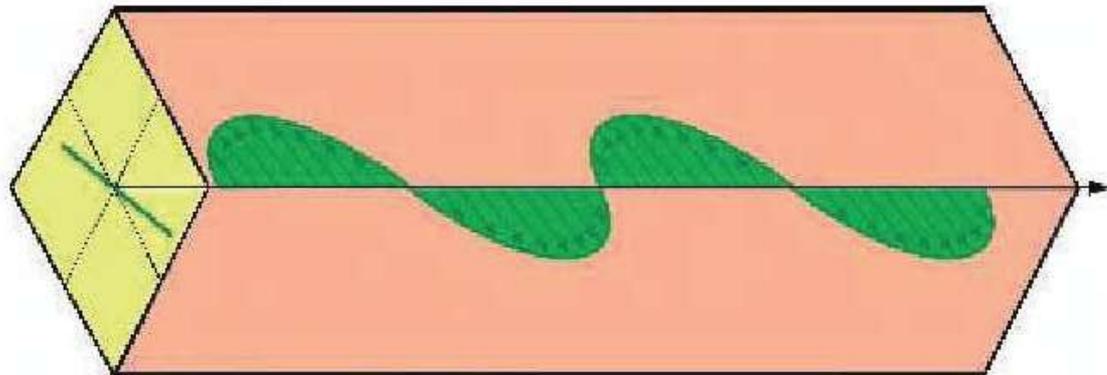
# Radiopropagación

- Cuando hablamos de radio propagación o propagación por radio frecuencia nos referimos a la propagación de ondas electromagnéticas en el espacio libre (vacío)
- Sin embargo, a menudo, la propagación por la atmósfera terrestre también se la denomina propagación por el espacio libre (la atmósfera introduce pérdidas por absorción)



# Polarización

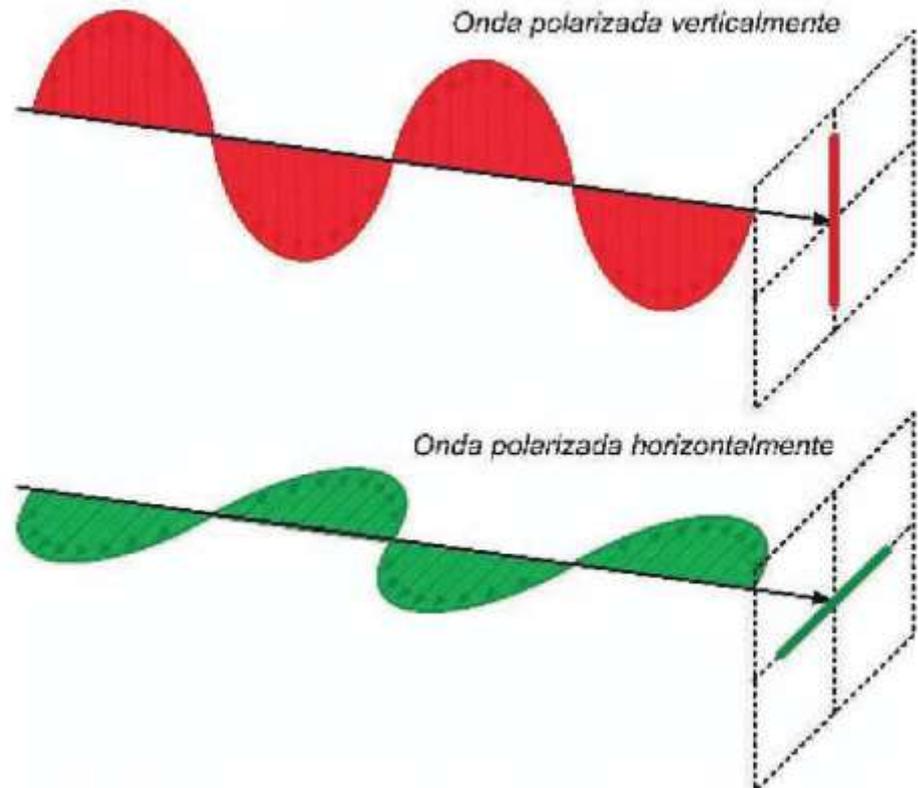
- Las ondas electromagnéticas están formadas por un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares entre sí y perpendicular también a la dirección de propagación
- Polarización es la orientación del campo eléctrico respecto a la superficie de propagación (horizonte)
- Cuando la polarización permanece constante se llama lineal





# Polarización

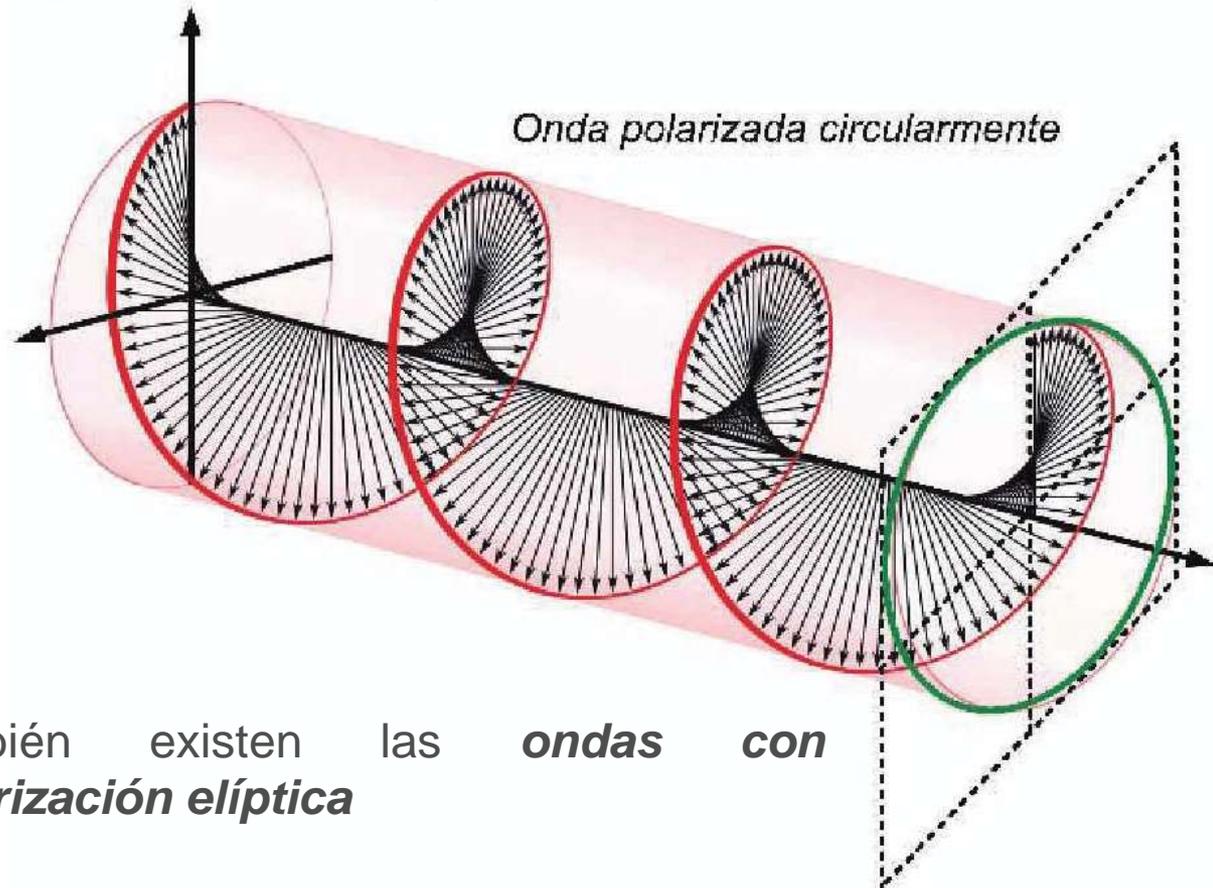
- Además de lineal, si el campo eléctrico se propaga vertical a la superficie terrestre, se llama polarización vertical
- Si el campo eléctrico es paralelo a la superficie de propagación, la polarización es horizontal





# Polarización

- También existen ondas con **polarización circular** (el vector de polarización va girando 360 grados conforme la onda recorre el espacio de una longitud de onda)





# Rayo y Frente de Onda

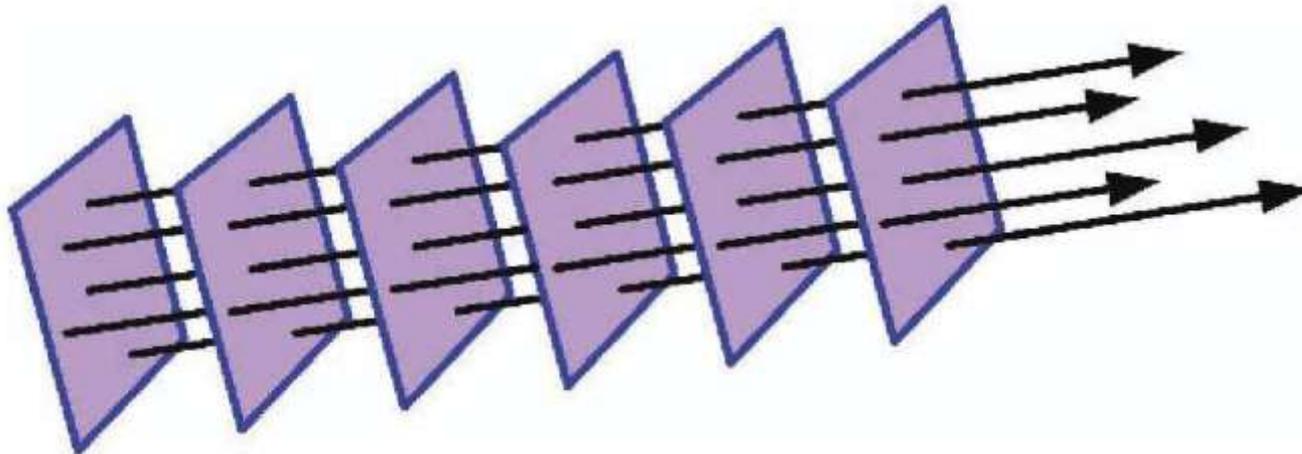
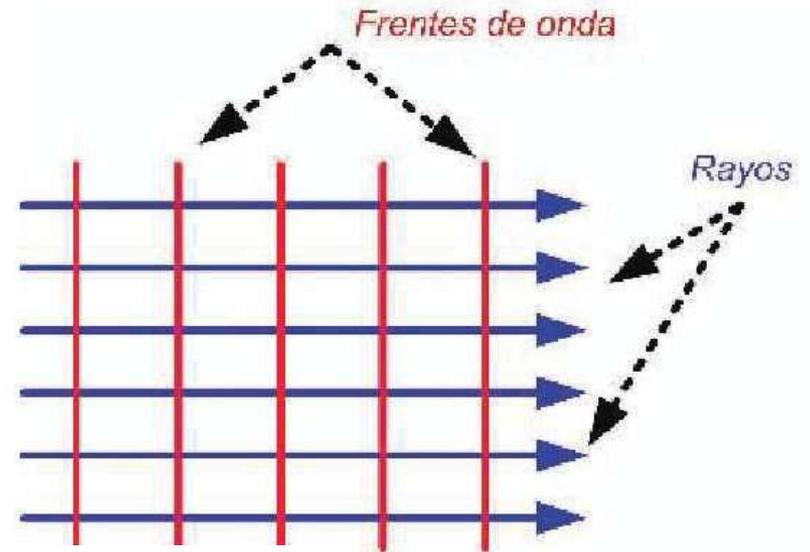
- El análisis de ondas electromagnéticas requiere emplear métodos indirectos para representarlas (no son visibles al ojo humano)
- Para ilustrar el fenómeno de propagación a través del espacio, se usa el concepto de **rayo y frente de onda**
- **Rayo** se emplea para ilustrar la dirección relativa de propagación de la onda (línea que seguiría la trayectoria de propagación de la onda EM)
- **Frente de onda** representa una superficie de ondas EM de fase constante, es decir, puntos de igual fase de ondas EM provenientes de la misma fuente

(un rayo no representa, necesariamente, a una única onda electromagnética)



# Ondas Planas

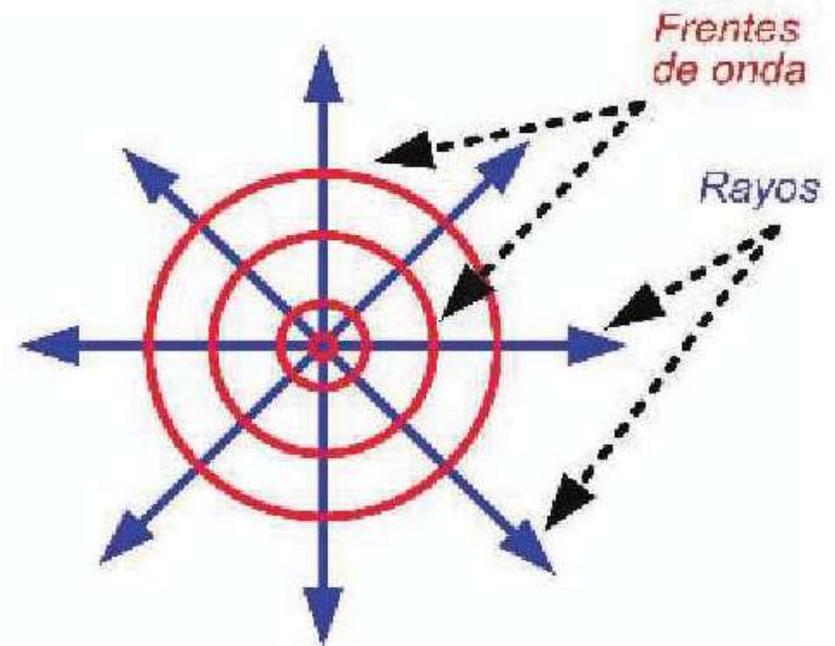
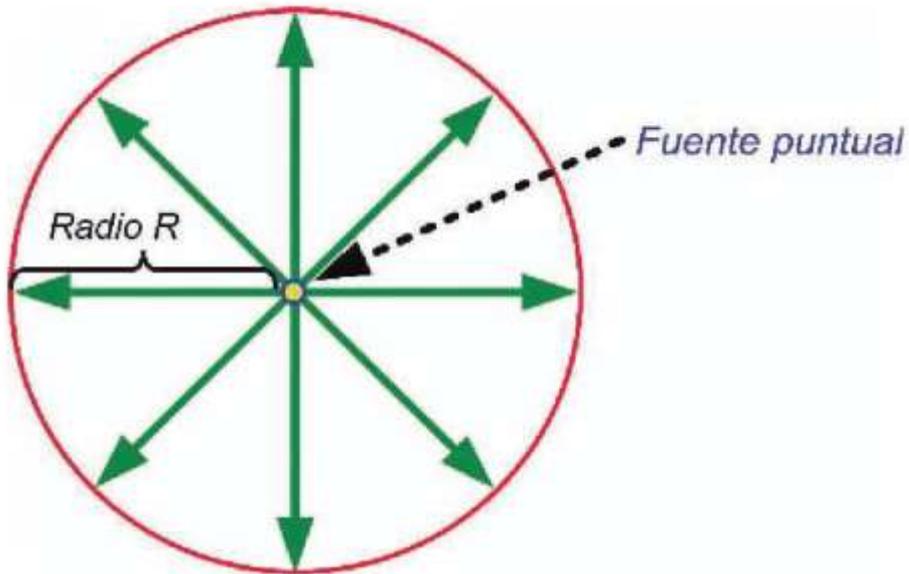
- Decimos que una onda es plana cuando su frente de onda se propaga en una única dirección a lo largo del espacio





# Ondas Esféricas

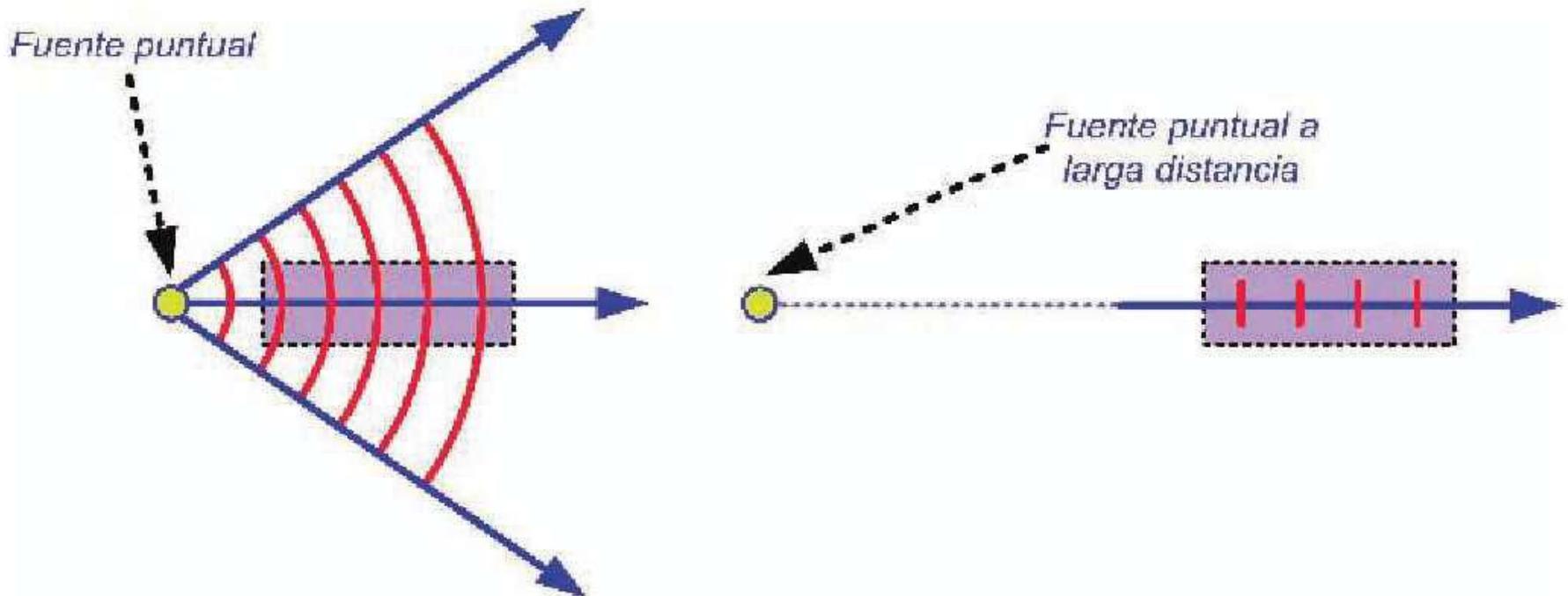
- Una **fente puntual** (también llamada **isotrópica**) radia uniformemente en todas las direcciones, creando un frente de onda esférico
- Cuando nos encontramos lejos de la fuente, la onda esférica puede aproximarse como plana





# Ondas Esféricas

- Una **fente puntual** (también llamada **isotrópica**) radia uniformemente en todas las direcciones, creando un frente de onda esférico
- Cuando nos encontramos lejos de la fuente, la onda esférica puede aproximarse como plana





# Densidad de Potencia e Intensidad de Campo

- La densidad de potencia se define como la cantidad de energía que atraviesa una superficie determinada en un instante de tiempo
- Es indicativo del flujo de energía por unidad de tiempo y de superficie (se mide en vatios por metro cuadrado)
- Las intensidades se refiere a los campos eléctrico (E) y magnético (H), medidas en voltios por metro y amperios por metro, respectivamente
- Se relacionan por

$$d_{potencia} = E \cdot H$$



# Impedancia Característica

- Al igual que la tensión y la corriente de un circuito se relacionan por una impedancia, las intensidades de campo eléctrico y magnético se relacionan por una impedancia característica
- En un medio sin pérdidas, la impedancia característica viene dada por la raíz cuadrada del cociente entre su permeabilidad magnética y su permisividad eléctrica

$$Z_s = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$$

- En el vacío tiene un valor de 377 ohmios



# Densidad de Potencia e Impedancia Característica

- La densidad de potencia puede expresarse como

$$d_{potencia} = \frac{E^2}{Z_s}$$

- Para el vacío es

$$d_{potencia} = \frac{E^2}{377}$$

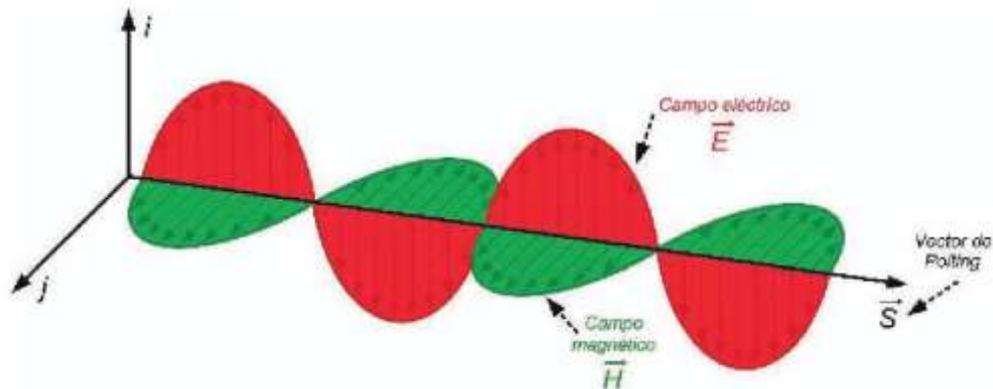


# Vector de Pointing

- El vector de Pointing se define como el producto vectorial del vector de campo eléctrico y el vector campo magnético

$$\vec{S} = \vec{E} \wedge \vec{H}$$

- Es un vector perpendicular al campo eléctrico y magnético, que apunta en la dirección de propagación y cuyo módulo representa la intensidad instantánea de la onda que fluye por unidad de área perpendicular a la dirección de propagación (densidad de potencia instantánea)





# Ley del Cuadrado Inverso

- Los frentes de onda esféricos son producidos por fuentes puntuales que radian la misma potencia en todas las direcciones
- A una distancia determinada de la fuente isotrópica,  $R$ , el frente de onda conforma una esfera donde todos los puntos poseen la misma densidad de potencia.
- La potencia total radiada será uniforme en toda la superficie, por lo que la densidad de potencia estará dada por

$$d_{potencia} = \frac{P_{radiada}}{4\pi R^2}$$

- Conforme nos alejamos, la potencia total permanece constante, pero **la densidad disminuye según el cuadrado inverso**



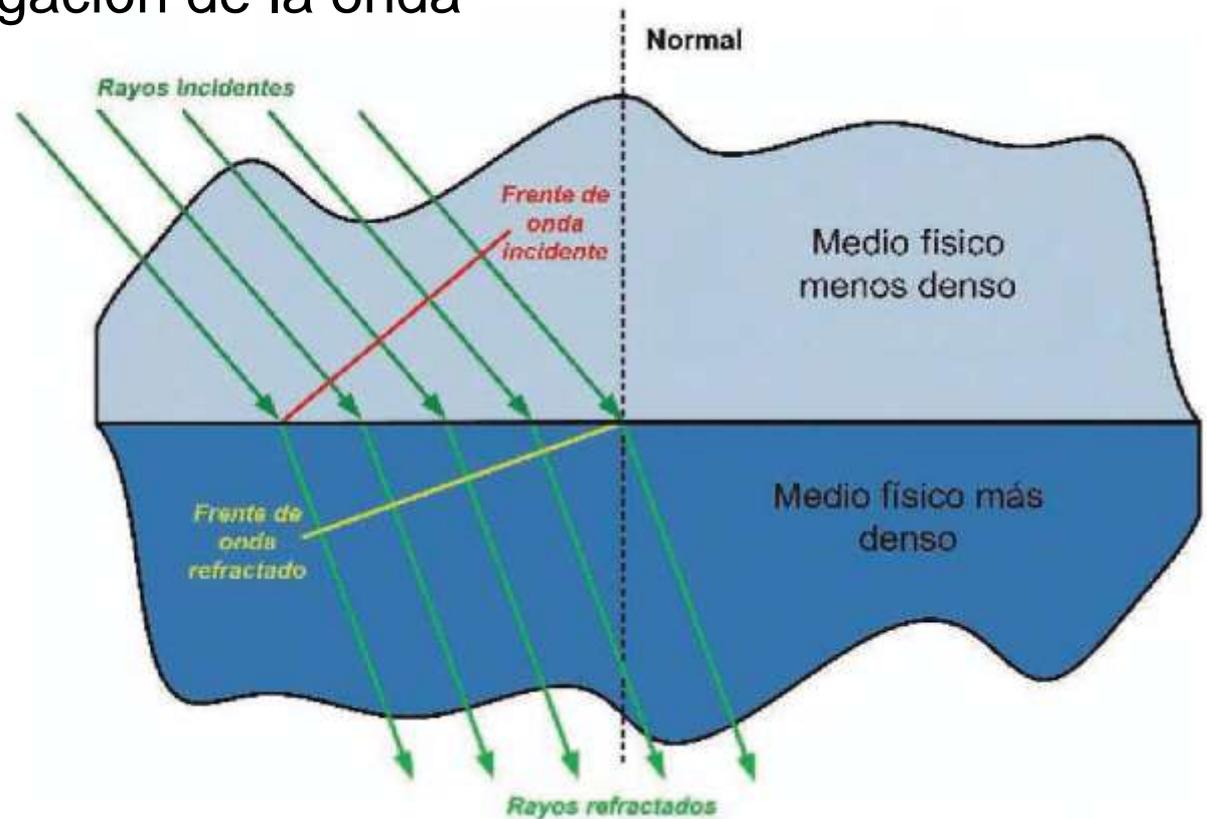
# Atenuación vs. Absorción

- En el vacío, las ondas EM no tiene pérdidas (su potencia total radiada es constante)
- Los rayos tienden a dispersarse y esto implica una disminución de la densidad de potencia, este fenómeno se conoce como **atenuación**
- Por otro lado, **absorción** se asocia a las pérdidas que las ondas electromagnéticas sufren al propagarse por la atmósfera (las partículas y obstáculos absorben la potencia radiada)
- El fenómeno de absorción puede considerarse despreciable para frecuencias inferiores a los 10 GHz.



# Refracción

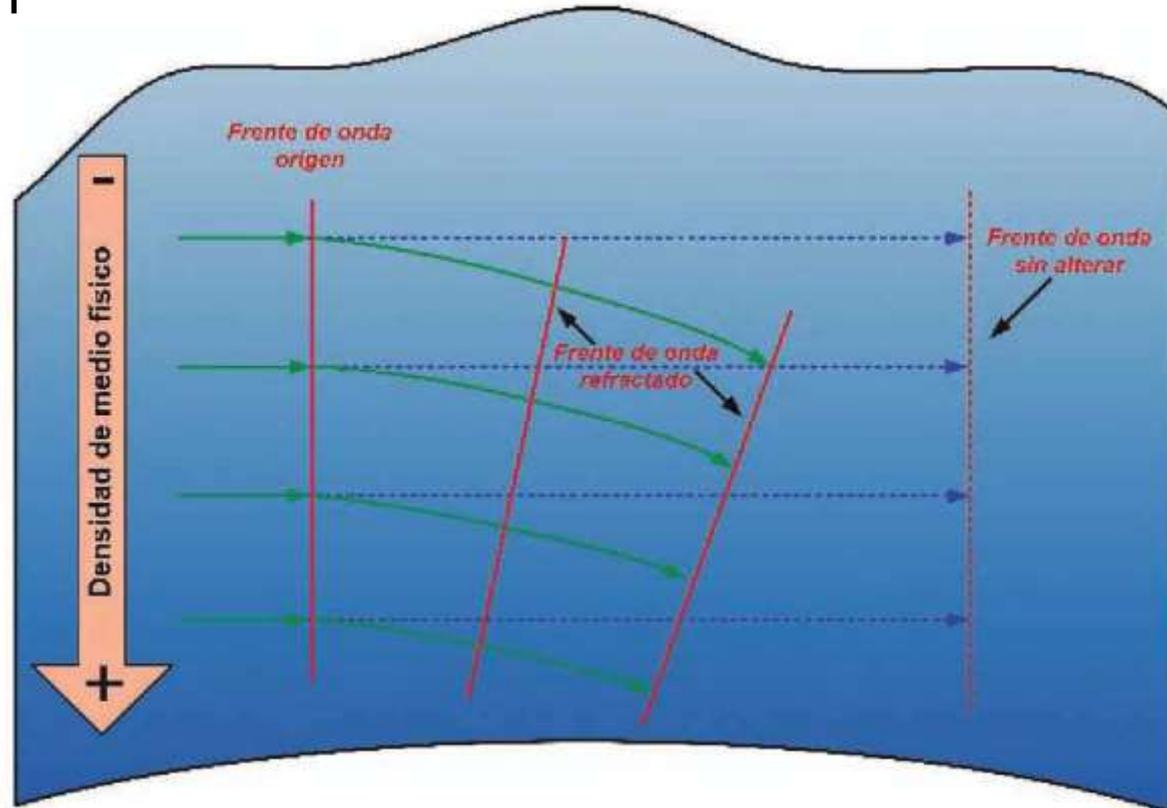
- Ocurre cuando una onda EM que se propaga por un medio atraviesa a otro con distinta densidad (distinta velocidad de propagación)
- Se produce un cambio en la dirección de propagación de la onda





# Refracción en Medio con Gradiente de Densidad

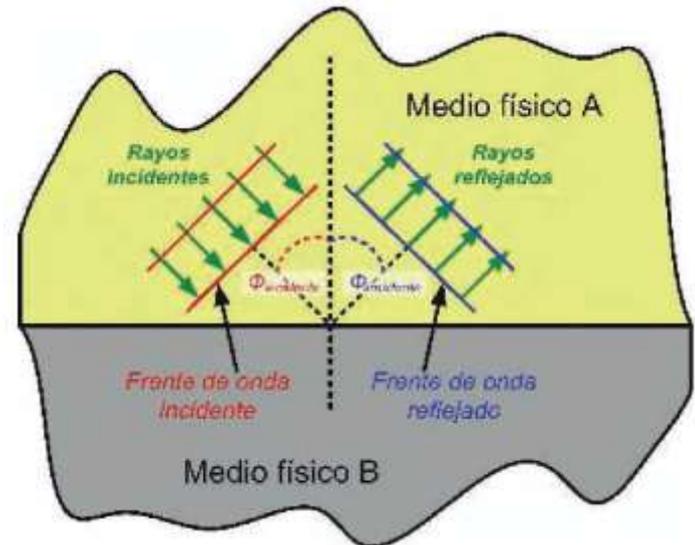
- Si la onda se propaga en un medio cuya densidad varía gradualmente (tiene un gradiente de densidad) perpendicular a la dirección de propagación de la onda, también se produce el fenómeno de refracción





# Reflexión

- Cuando una onda colisiona con la interfaz de dos medios y la totalidad o parte de la onda es “reflejada” al medio original
- Si se refleja completamente, las velocidades de las ondas incidente y reflejada son iguales y los ángulos de incidencia y reflexión también
- El **coeficiente de reflexión** es la relación entre la intensidad del campo eléctrico de la onda incidente y el de la onda reflejada





# Difracción

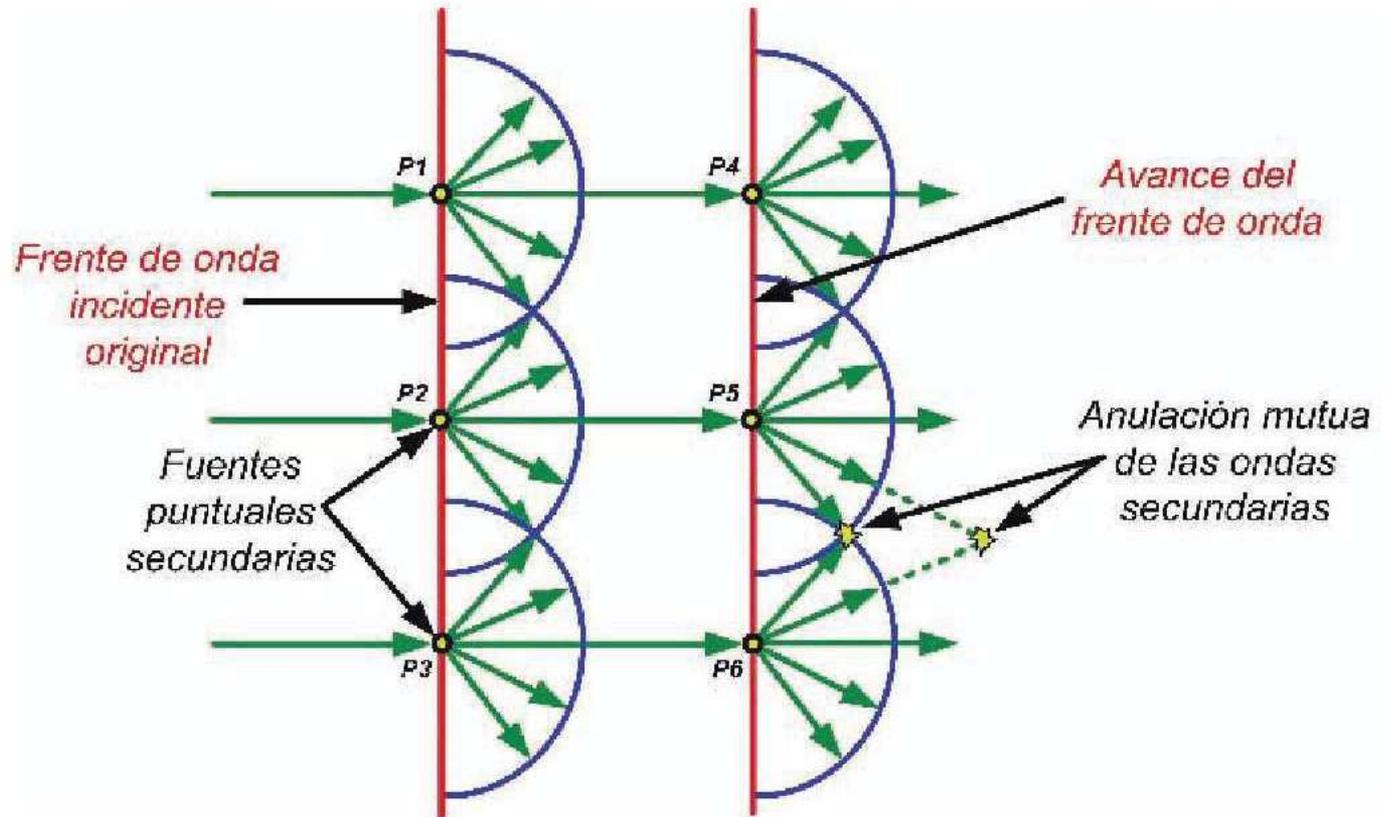
- Se produce cuando la onda encuentra un obstáculo
- Se manifiesta como una redistribución o modulación de la energía dentro del frente de onda
- Reflexión y Refracción se producen cuando las dimensiones de las superficies son mucho mayores que la longitud de onda de la señal
- Si el tamaño del obstáculo es comparable a la longitud de onda, puede producirse la difracción
- Principio de Huygens: *todo punto sobre un frente de onda esférico puede ser, a su vez, considerado como una Fuente secundaria de ondas EM o*

*Un frente de onda puede ser considerado como una sucesión de emisiones puntuales de frentes de onda*



# Difracción

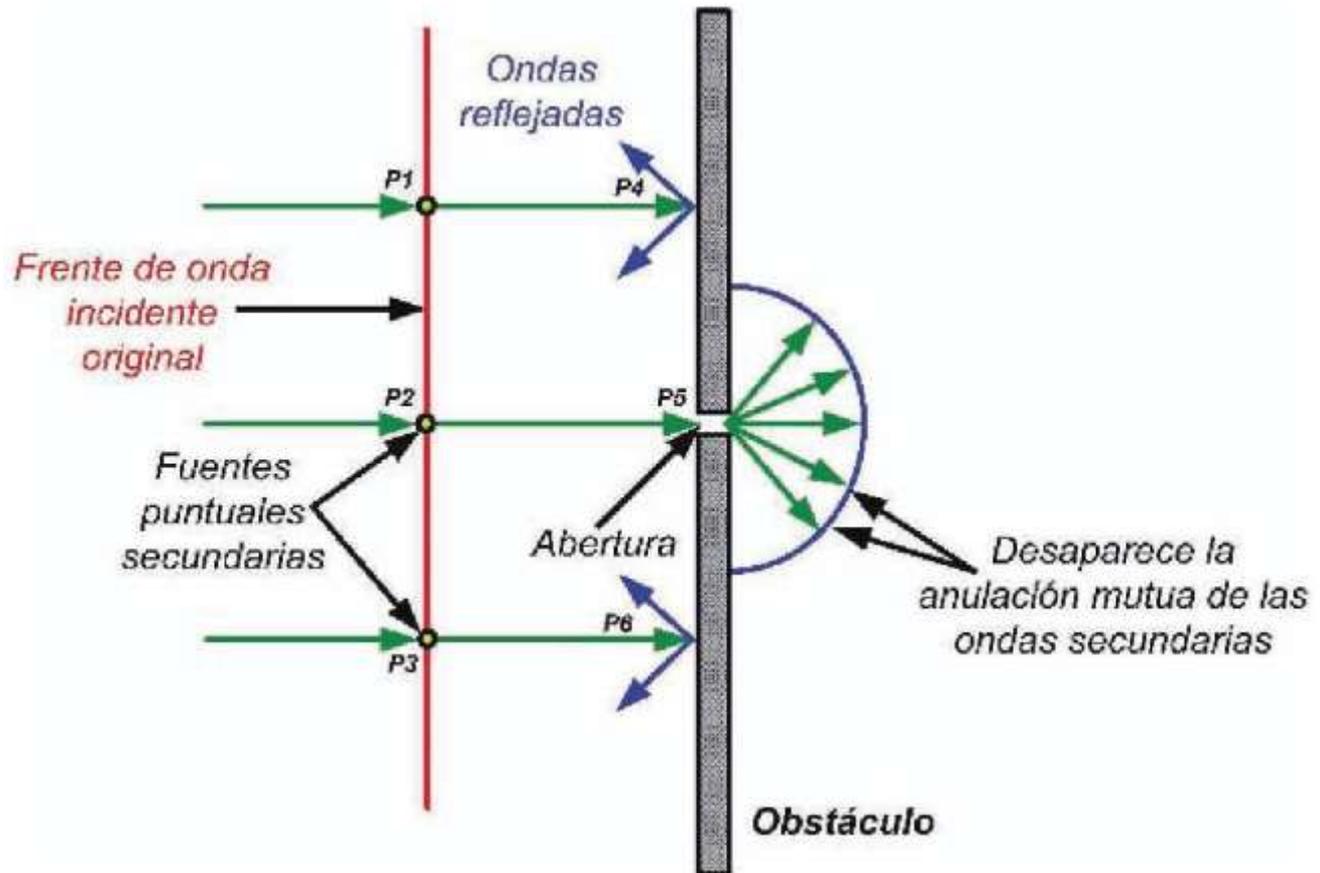
- Esquematización del principio de Huygens





# Difracción

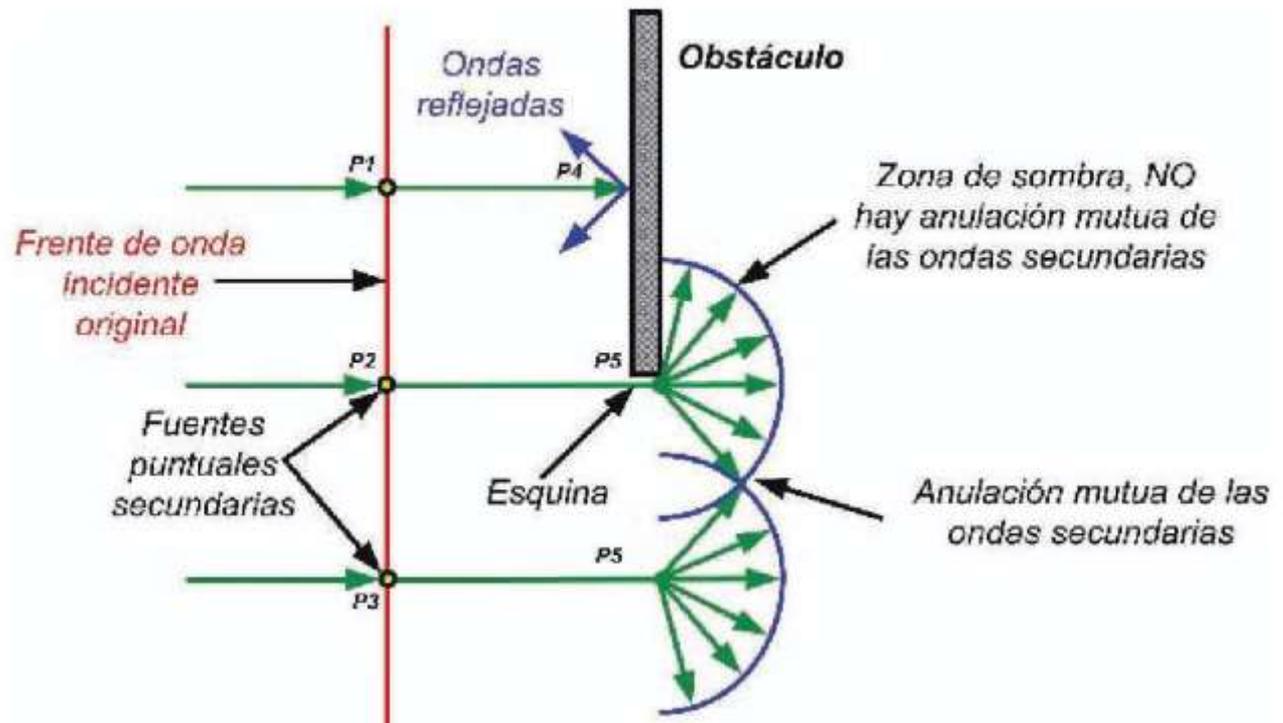
- Esquematización de la difracción





# Difracción

- También la difracción explica porqué las ondas pueden sortear esquinas de obstáculos, pues la anulación de irradiaciones será parcial, permitiendo la propagación hacia la “zona de sombra”





# Interferencia

- Cuando dos o más ondas EM coinciden en el tiempo y espacio formando una nueva onda
- Existe en este punto una gran coincidencia con el concepto de **difracción**, pero podemos restringir el concepto de **interferencia** al fenómeno que involucra dos o más fuentes **diferentes** de ondas EM



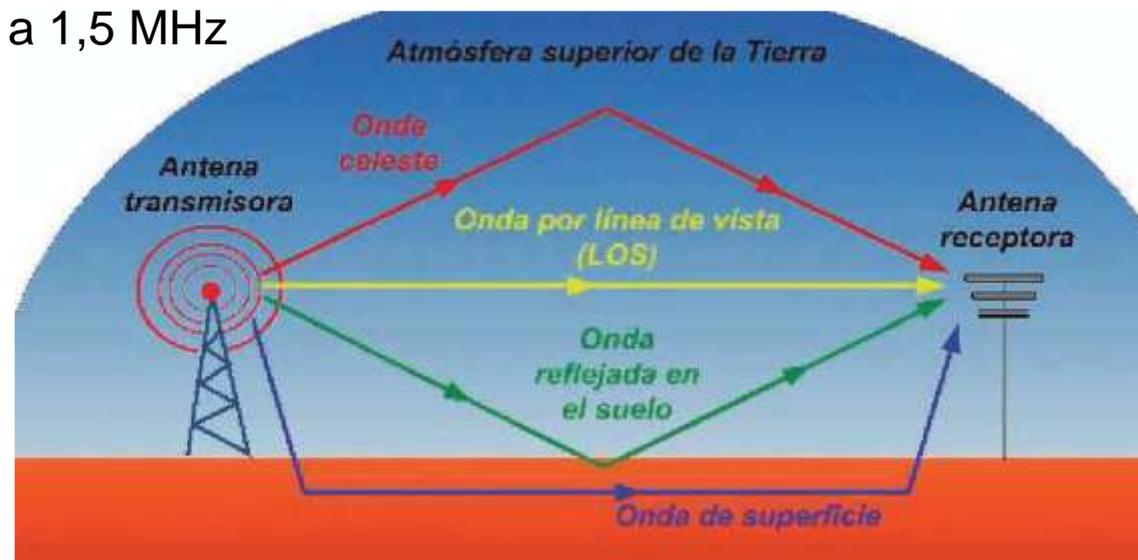
# Propagación de Ondas Electromagnéticas

- Hasta ahora se consideró la propagación de ondas EM en el vacío, pasaremos a considerar los efectos de la atmósfera Terrestre
- La propagación en el vacío es en línea recta, pero en la atmósfera se producen reflexiones, refracciones, difracciones e interferencias
- Influyen especialmente la capa de la atmósfera considerada, la frecuencia de transmisión, la distancia, el clima, si es día o noche, etc.
- Resultando fundamentalmente tres modos de propagación
  - **Onda Terrestre**
  - **Onda Espacial**
  - **Ondas Celestes o Ionosféricas**



# Propagación de Ondas Electromagnéticas

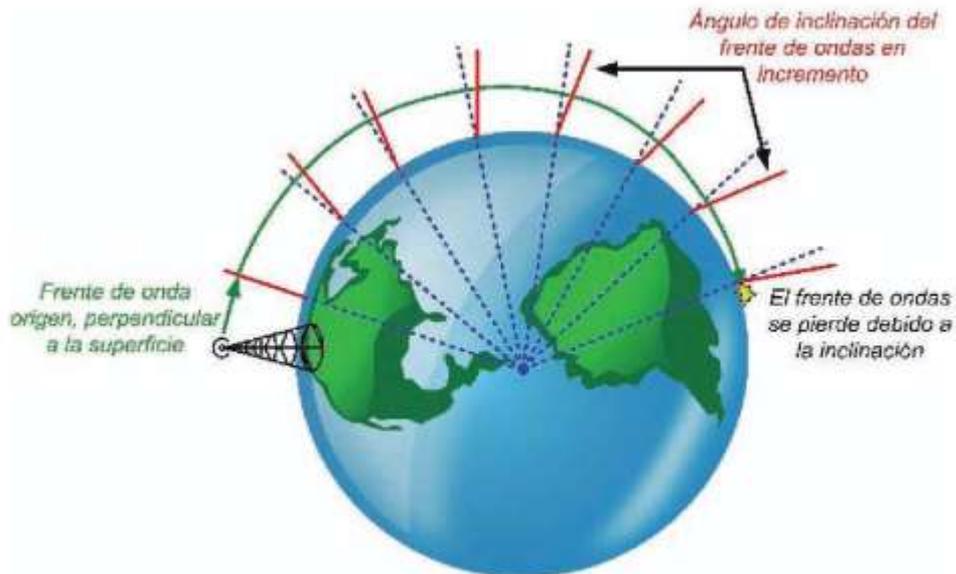
- Resultando fundamentalmente tres modos de propagación
  - Onda Terrestre
  - Onda Espacial
  - Ondas Celestes o Ionosféricas
- Estos coexisten pero siempre prevalece uno de acuerdo a las condiciones del terreno y la frecuencia
  - Las ondas terrestres se propagan mejor a frecuencias inferiores a 1,5 MHz





# Propagación por Ondas Terrestres

- Viajan por la superficie de la Tierra y los primeros metros de la atmósfera, por lo que también son llamadas ondas superficiales
- El campo eléctrico variable induce corrientes muy parecidas a las de una línea de transmisión
- Deben ser polarizadas verticalmente
- Son absorbidas en su propagación
- Tiene un gradiente de densidad (menos densa conforme nos alejamos de la superficie)





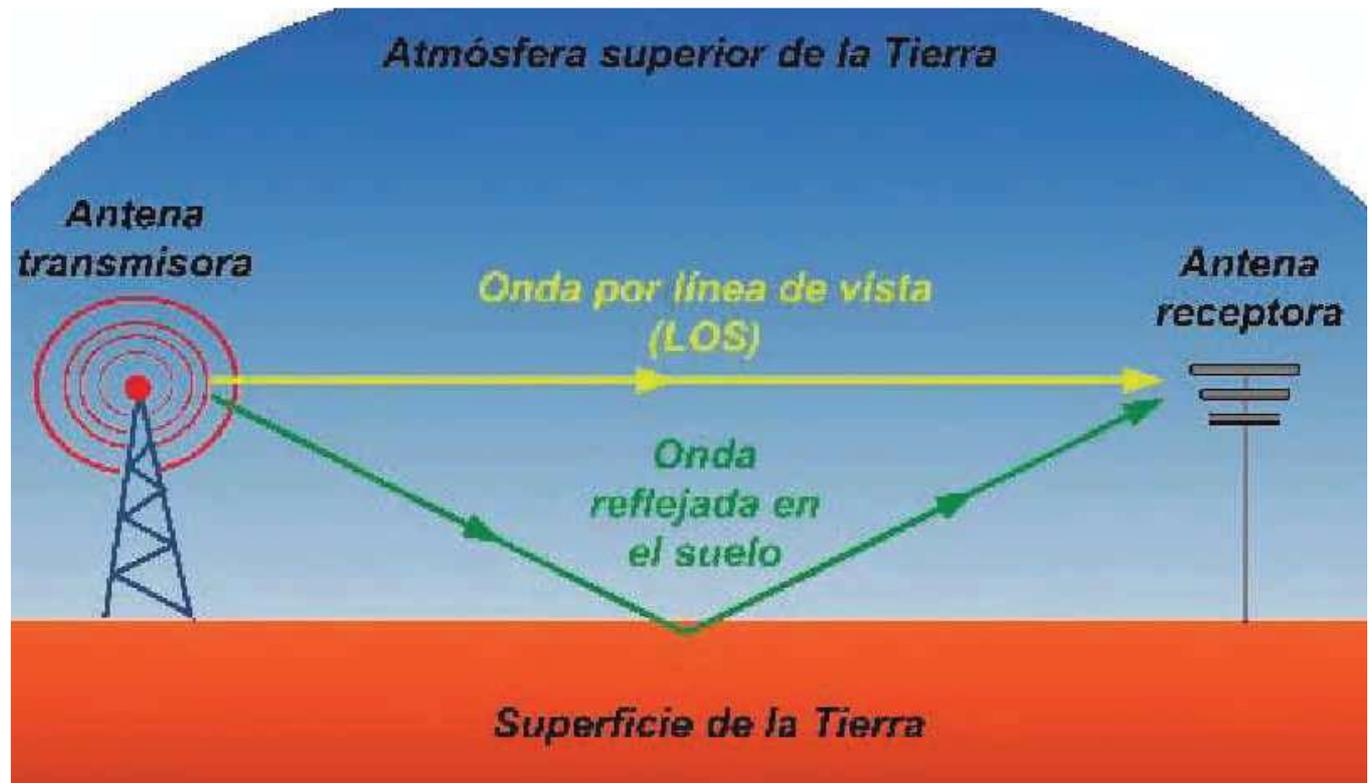
# Propagación por Ondas Terrestres

- Se propagan mejor sobre el agua salada (se utiliza para comunicaciones de embarcaciones en 15KHz)
- Requieren antenas de gran tamaño y altas potencias (hasta 200 metros)
- La banda LF (30-300 KHz) llega hasta los 2.000 Km
- La banda HF (3-30 MHz) llega a 50 Km



# Propagación por Ondas Espaciales

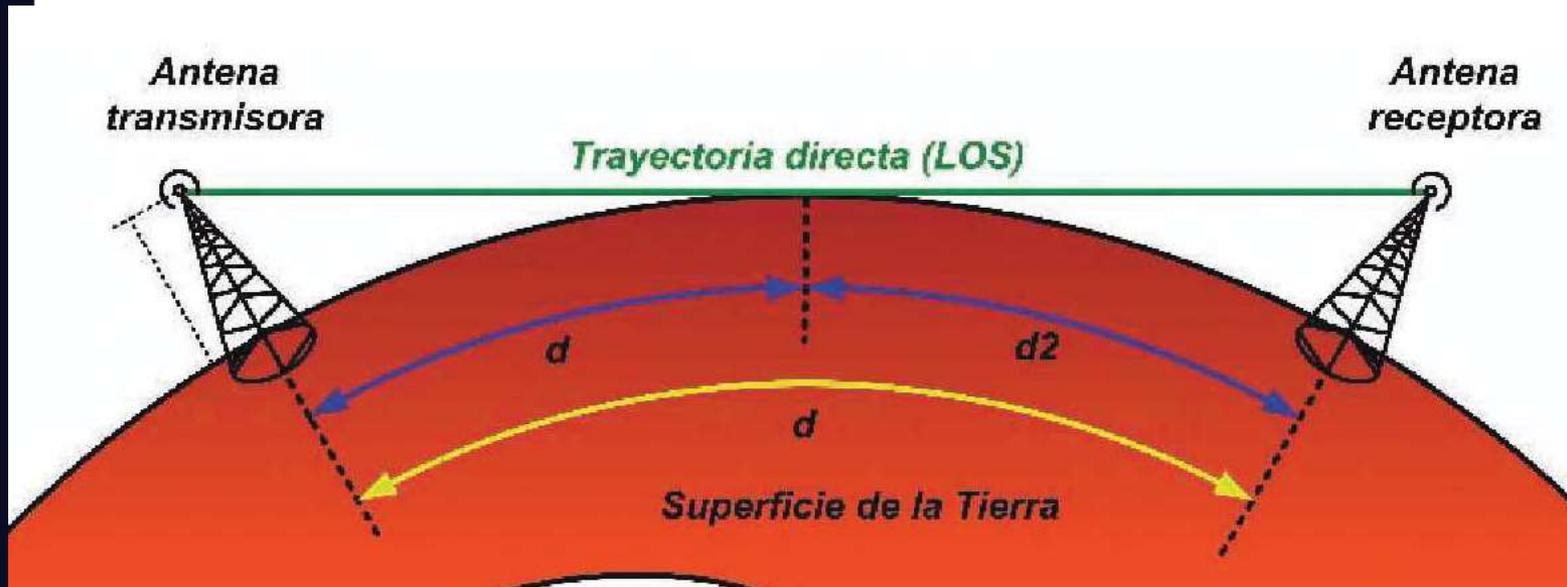
- Se propaga en los primeros kilómetros de la atmósfera
- Está conformada por ondas directas y reflejadas





# Propagación por Ondas Espaciales

- Ondas directas (*Line of Sight* - LOS) está limitada por la curvatura de la tierra

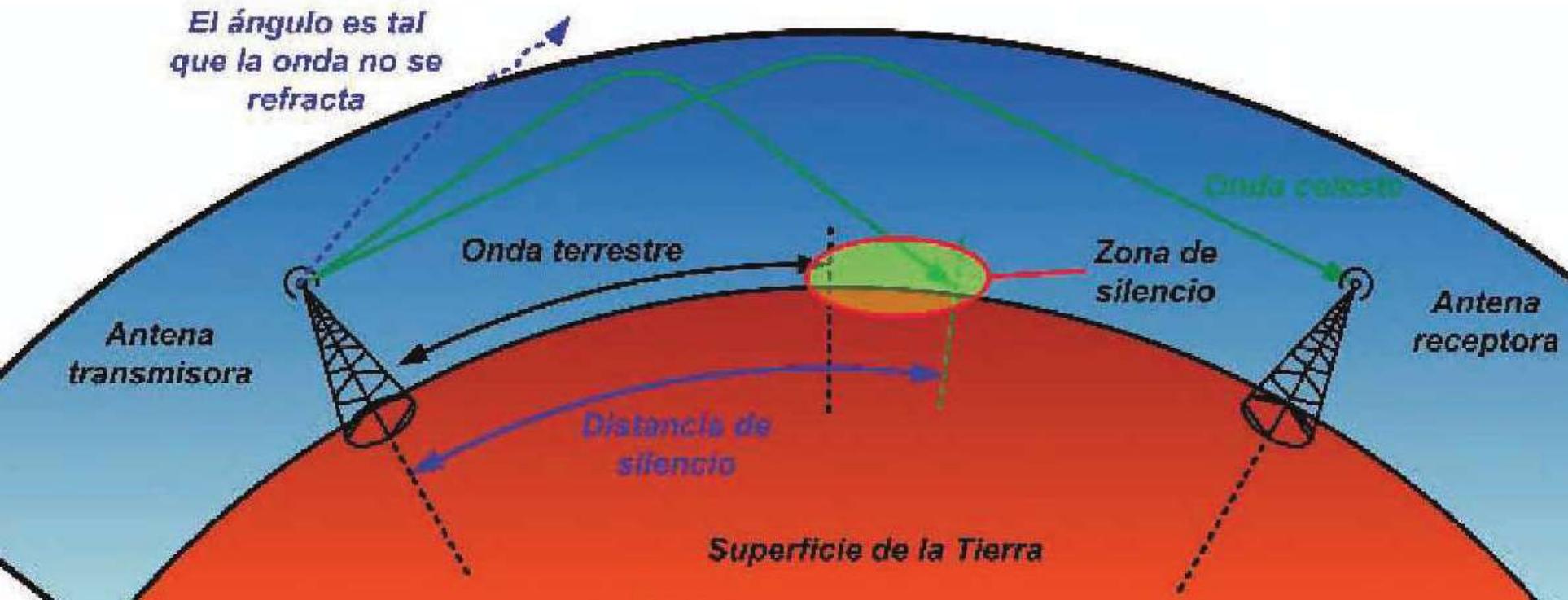


- El horizonte de radio es un poco mayor que el óptico ( $4/3$ ), debido al gradiente de densidad
- Para aumentar el horizonte de radio, se debe aumentar la altura de las antenas
- Existen ondas reflejadas que pueden producir interferencias



# Propagación por Ondas Celestes o Ionosféricas

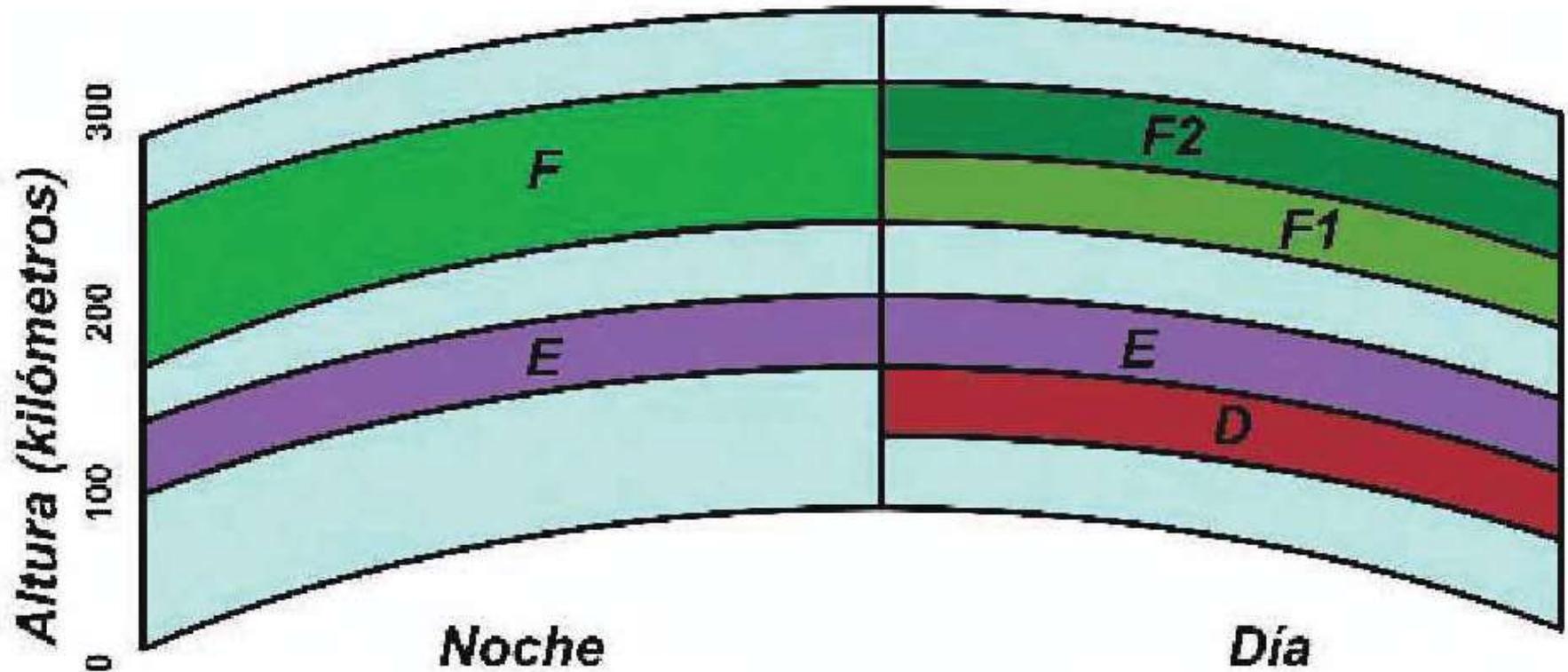
- Se radian formando un ángulo relativamente grande respecto al horizonte o superficie de la Tierra
- Son dirigidas hacia la atmósfera donde son reflejadas o refractadas hacia la superficie por la ionósfera (entre 50 y 400 Kilómetros de altura)
- A mayor frecuencia, mayor penetración en la ionósfera





# Propagación por Ondas Celestes o Ionosféricas

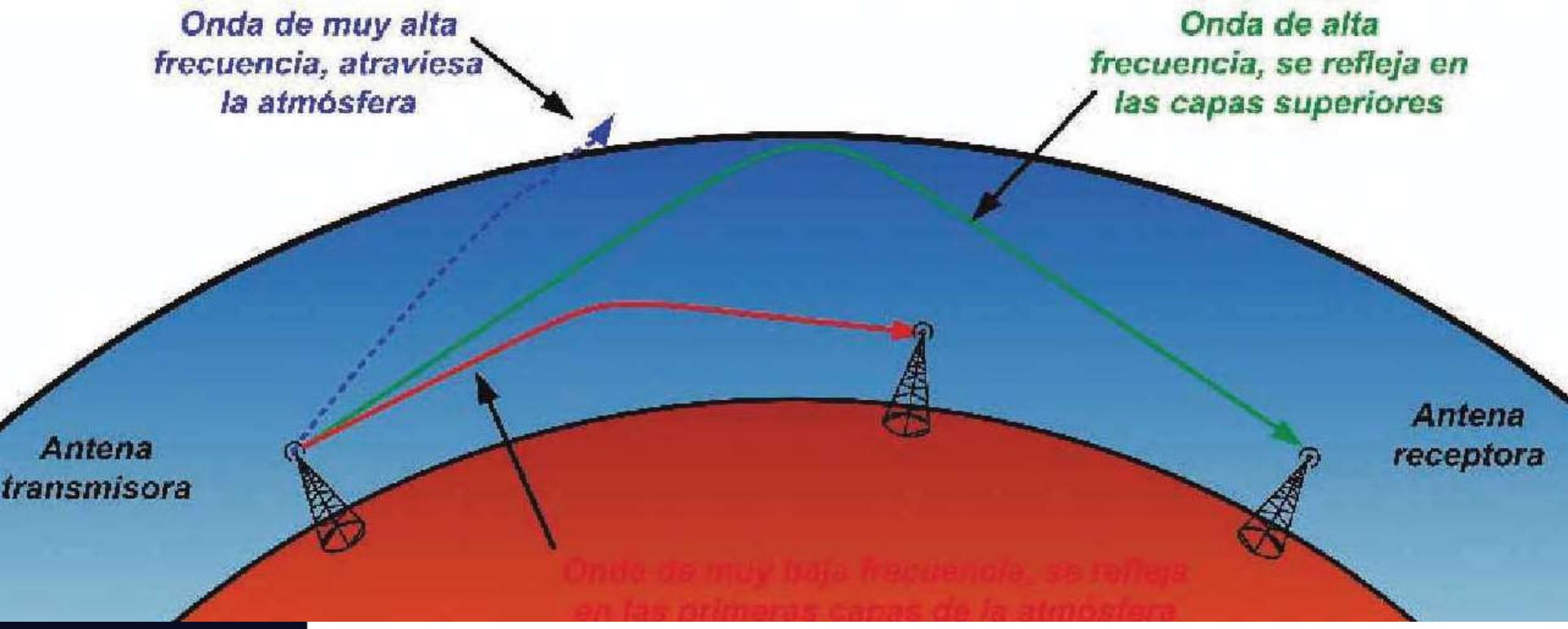
- La ionósfera está estratificada en capas:
  - Capa D: refleja las ondas VLF (3-30 KHz) LF (30-300 KHz) (desaparece por la noche)
  - Capa E: refleja bien MF (300-3.000 KHz) y poco HF (3-30 Mhz) (el sol también influye en su comportamiento)
  - Capa F (F1 y F2), HF





# Propagación por Ondas Celestes o Ionosféricas

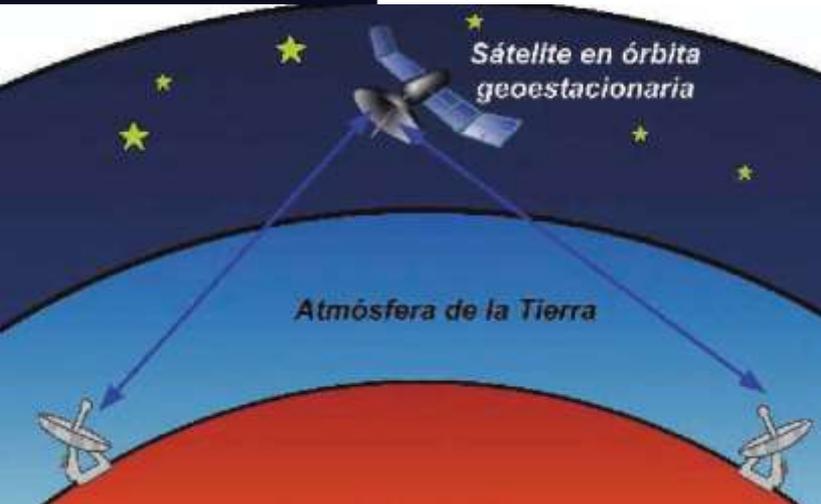
Las ondas reflejadas por la ionósfera alcanzan la superficie de la Tierra únicamente a determinadas distancias del transmisor, dependiendo de la frecuencia, el ángulo de reflexión y de la profundidad de penetración





# Propagación vía Satélite

- Para ondas mayores a 30 MHz, la propagación Terrestre es rápidamente atenuada, precisando que exista visibilidad radioeléctrica entre emisor y receptor
- Es frecuente colocar repetidores, en la superficie o en el espacio (satélite)

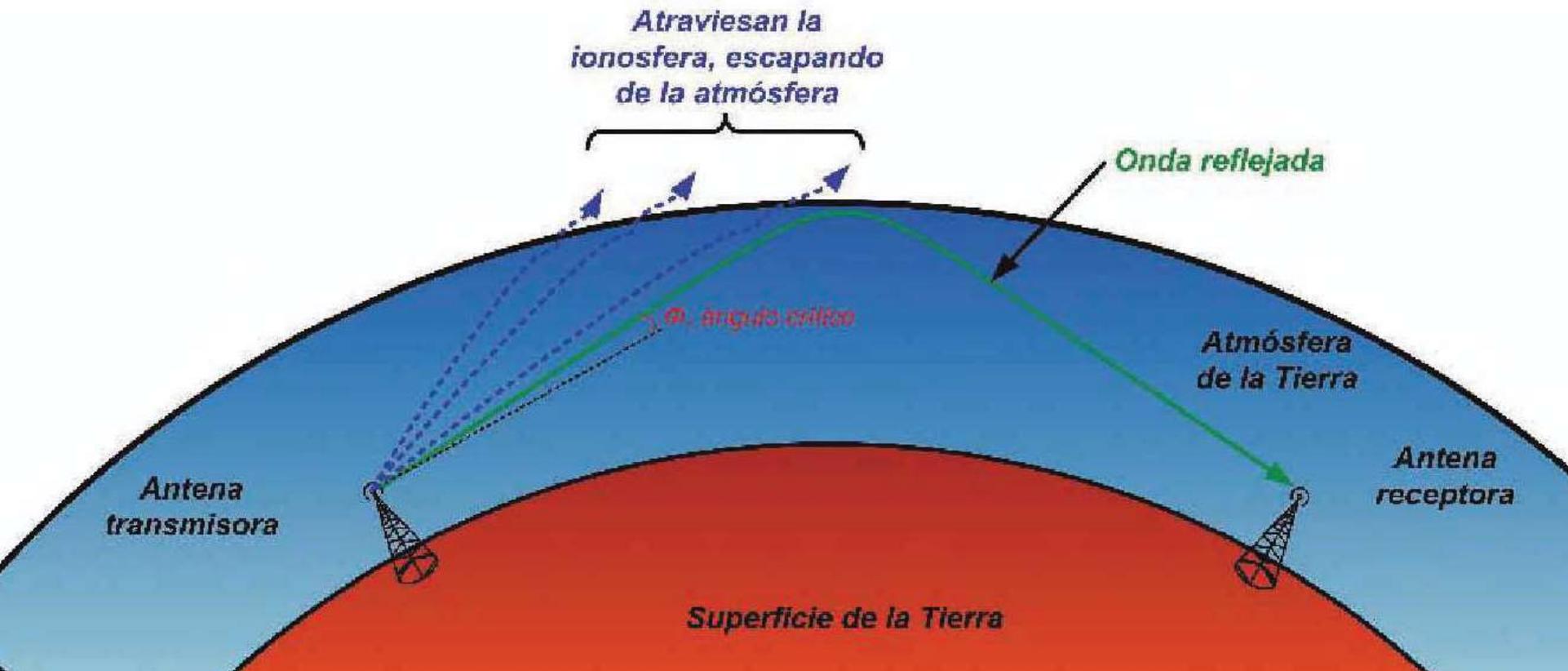


Banda	Rango de frecuencias ascendentes (GHz)	Rango de frecuencias descendentes (GHz)
C	5,925 - 6,425	3,7 - 4,2
Ku	14,0 - 14,5	11,7 - 12,2
Ka	27,5 - 30,5	17,7 - 21,7



# Términos y definiciones de propagación

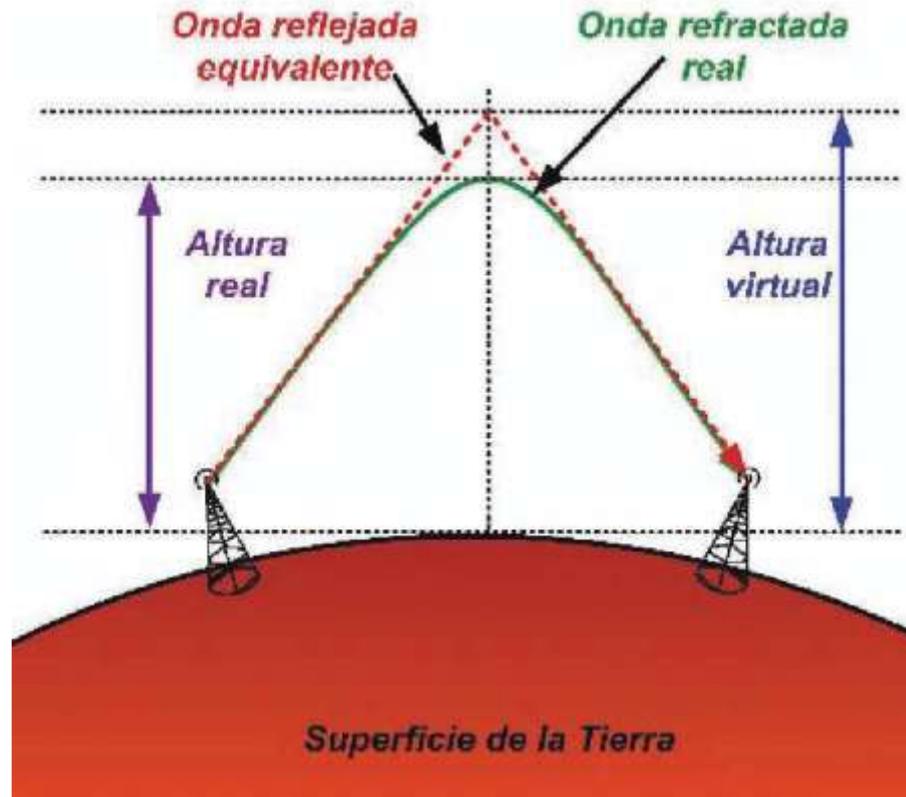
- **Frecuencia crítica:** máxima frecuencia de la onda celeste que es reflejada por la ionósfera (depende de las condiciones atmosféricas y la radiación solar)
- **Ángulo crítico,** mayor ángulo (medido con la vertical) a partir del cual no se produce reflexión





# Términos y definiciones de propagación

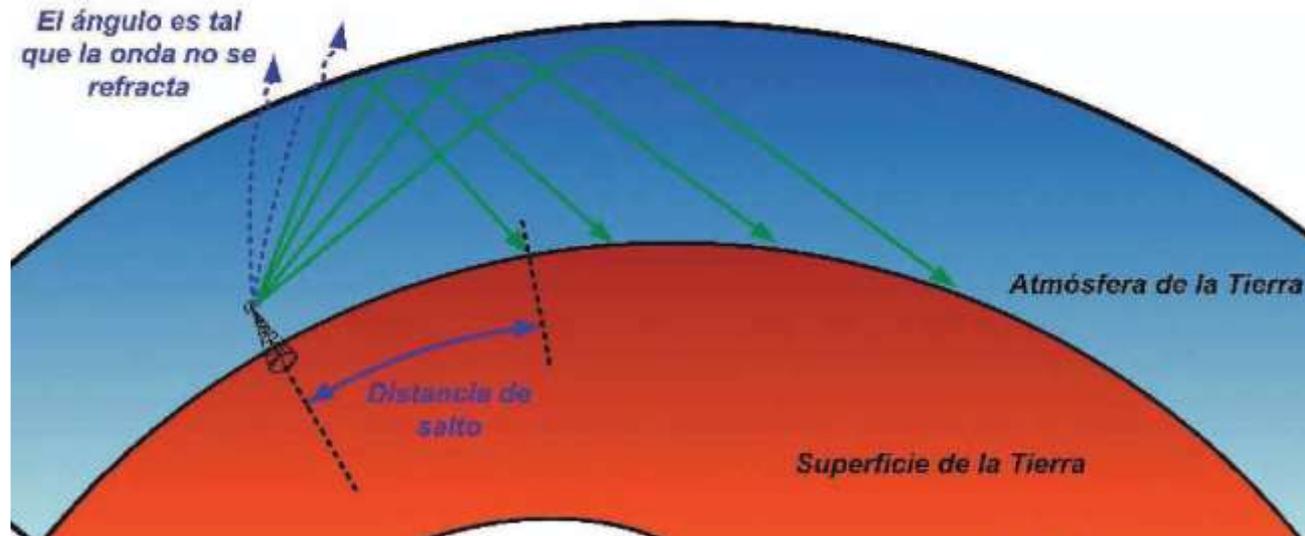
- **Altura virtual:** altura desde la superficie de la Tierra en la que una onda “parece” reflejarse





# Términos y definiciones de propagación

- **Máxima frecuencia útil (MFU):** se define como la mayor frecuencia utilizable para la propagación de ondas ionosféricas entre dos puntos cualquiera en la superficie de la Tierra. Es una predicción numérica para un día determinado y a una hora determinada, con un 50% de error.
- **Distancia de salto,** mínima distancia, medida desde el transmisor, a la que una onda celeste retornará





# Espectro electromagnético vs espacio radioeléctrico

- Espectro electromagnético: conjunto de ondas electromagnéticas que se propagan a la velocidad de la luz, abarcando desde el infrarrojo hasta los rayos cósmicos, pasando por la luz visible, los rayos X, las microondas, etc.



<b>Banda</b>	<b>Longitud de onda (m)</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>
Rayos gamma	$< 10 \times 10^{-12}$	$> 30,0 \times 10^{18}$
Rayos X	$< 10 \times 10^{-9}$	$> 30,0 \times 10^{15}$
Ultravioleta extremo	$< 200 \times 10^{-9}$	$> 1,5 \times 10^{15}$
Ultravioleta cercano	$< 380 \times 10^{-9}$	$> 7,89 \times 10^{14}$
Luz visible	$< 780 \times 10^{-9}$	$> 384 \times 10^{12}$
Infrarrojo cercano	$< 2,5 \times 10^{-6}$	$> 120 \times 10^{12}$
Infrarrojo medio	$< 50 \times 10^{-6}$	$> 6,00 \times 10^{12}$
Infrarrojo lejano/submilimétrico	$< 1 \times 10^{-3}$	$> 300 \times 10^9$
Microondas	$< 10^{-2}$	$> 3 \times 10^8$
Ultra alta frecuencia - Radio	$< 1$	$> 300 \times 10^6$
Muy alta frecuencia - Radio	$< 10$	$> 30 \times 10^6$
Onda corta - Radio	$< 180$	$> 1,7 \times 10^6$
Onda media - Radio	$< 650$	$> 650 \times 10^3$
Onda larga - Radio	$< 10 \times 10^3$	$> 30 \times 10^3$
Muy baja frecuencia - Radio	$> 10 \times 10^3$	$< 30 \times 10^3$



# Espectro electromagnético vs espacio radioeléctrico

- **Espectro radioeléctrico o espacio radioeléctrico:** el medio a través del cual se transmiten las frecuencias de las ondas de radio electromagnéticas que posibilitan los servicios de telecomunicación (radio, televisión, internet, televisión digital Terrestre, etc.) y que es administrado por el gobierno de cada país.
- Es por tanto un subconjunto del espectro electromagnético

**Tabla 3.3.** Designación de bandas del espacio radioeléctrico según la UIT

Nombre	Abreviatura	Banda UIT	Frecuencias	Longitud de onda
			< 3 Hz	> 100.000 km
Extra baja frecuencia	ELF	1	3-30 Hz	100.000–10.000 km
Súper baja frecuencia	SLF	2	30-300 Hz	10.000–1000 km
Ultra baja frecuencia	ULF	3	300–3000 Hz	1000–100 km
Muy baja frecuencia	VLf	4	3–30 KHz	100–10 km
Baja frecuencia	LF	5	30–300 KHz	10–1 km
Media frecuencia	MF	6	300–3000 KHz	1 km – 100 m
Alta frecuencia	HF	7	3–30 Mhz	100–10 m
Muy alta frecuencia	VHF	8	30–300 Mhz	10–1 m
Ultra alta frecuencia	UHF	9	300–3000 Mhz	1 m – 100 mm
Súper alta frecuencia	SHF	10	3-30 Ghz	100-10 mm
Extra alta frecuencia	EHF	11	30-300 Ghz	10–1 mm
			> 300 Ghz	< 1 mm

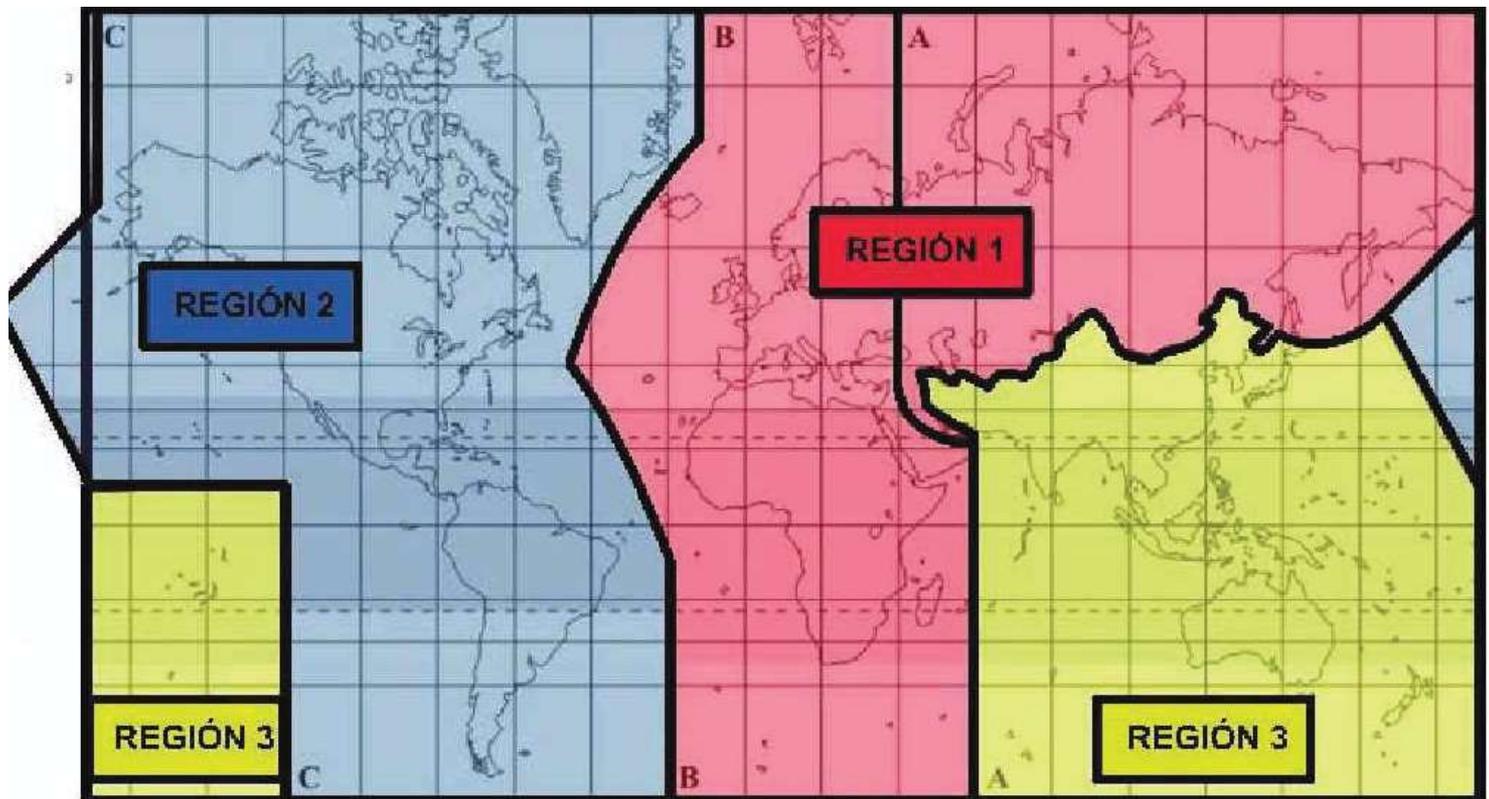
**Tabla 3.4.** Banda de frecuencias para las microondas

Banda	P	L	S	C	X	Ku	K	Ka	Q	U	V	E	W	F	D
Inicio (GHZ)	0,2	1	2	4	8	12	18	26,5	30	40	50	60	75	90	110
Final (GHZ)	1	2	4	8	12	18	26,5	40	50	60	75	90	110	140	170



# Gestión del Espectro Radioeléctrico

- Es un recurso limitado y regulado, no se puede utilizar libremente
- Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) o *International Telecommunications Union* (ITU)
- Regiones del mundo para la administración del ER





# Tipos de Servicios de Radiocomunicación

Un servicio de radiocomunicación es aquel que supone la transmisión, emisión o recepción de ondas radioeléctricas para facilitar a terceros o al público general, a través de una red de comunicación, que cualquier usuario pueda establecer una comunicación

Existen diferentes tipos de servicios regulados por ITU,

- Servicio Fijo (SF), servicio de radiocomunicación entre puntos fijos determinados
- Servicio Fijo por Satélite (SFS) servicio entre estaciones terrenas y uno o más satélites
- Servicio Móvil (SM)
- Servicio Móvil Aeronáutico