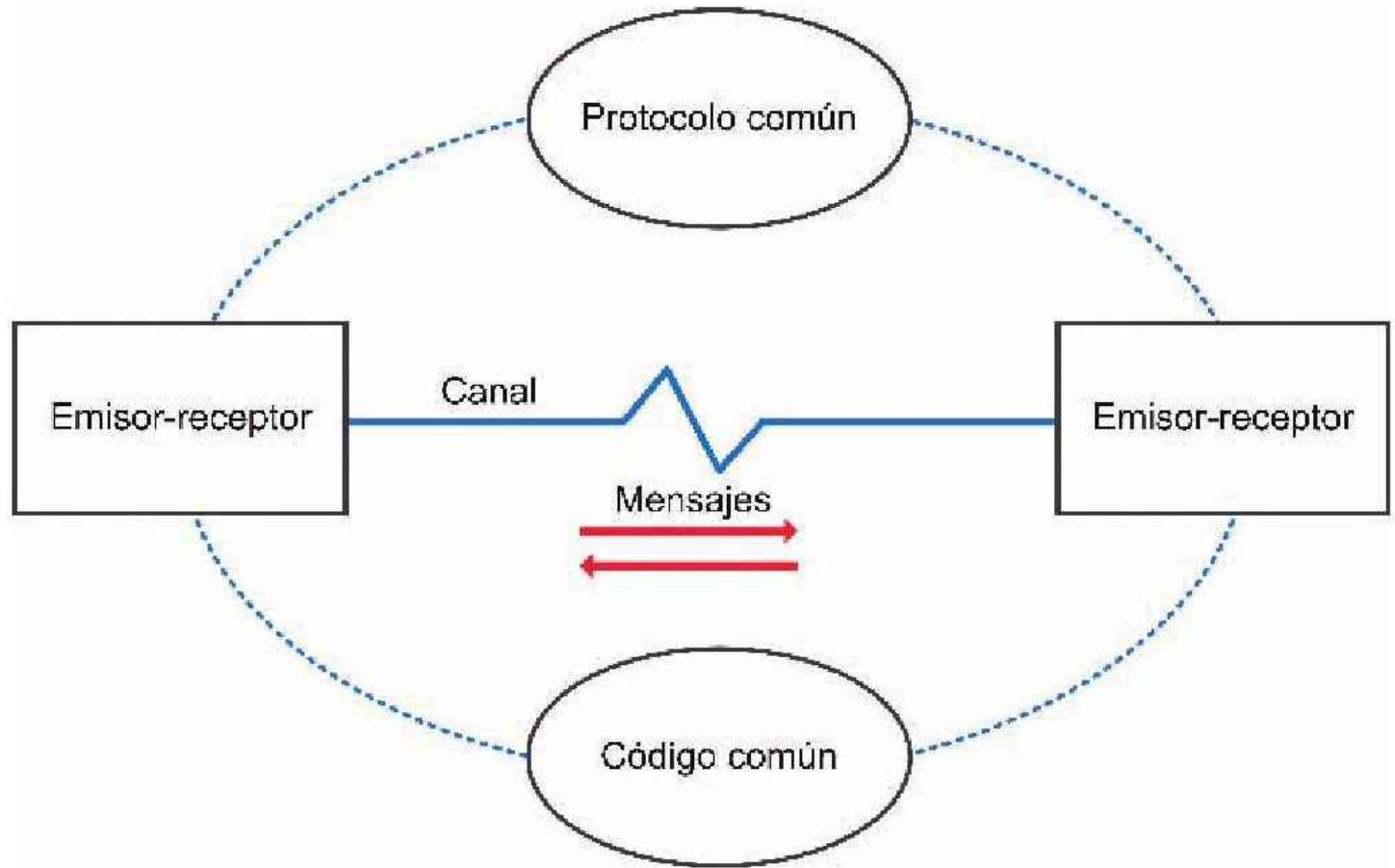


A satellite with four solar panels is shown in orbit above Earth. A blue laser beam originates from the satellite and points towards another satellite in the distance. The Earth's surface is visible below, showing terrain and clouds.

IC323 COMUNICACIÓN DE DATOS
Ingeniería en Computación



Medios de Transmisión

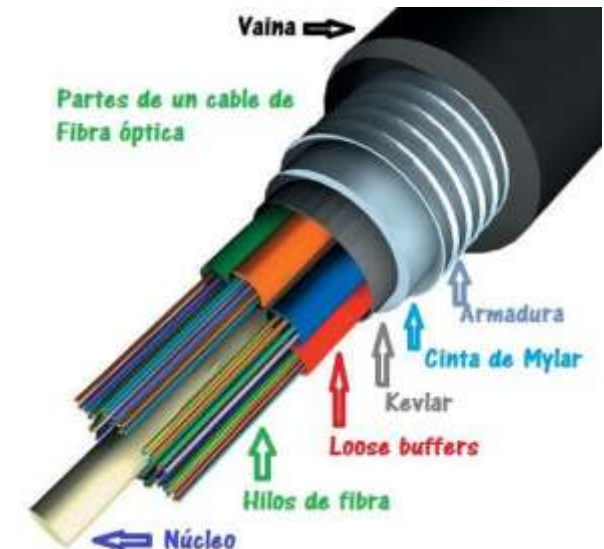
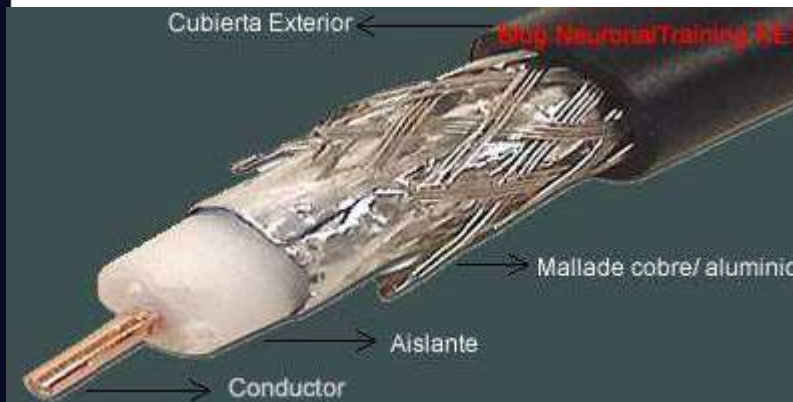
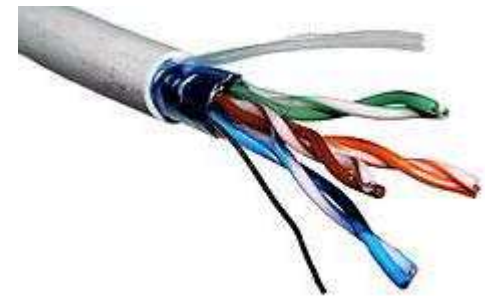


Elementos que intervienen en el proceso de comunicación.



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)**

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

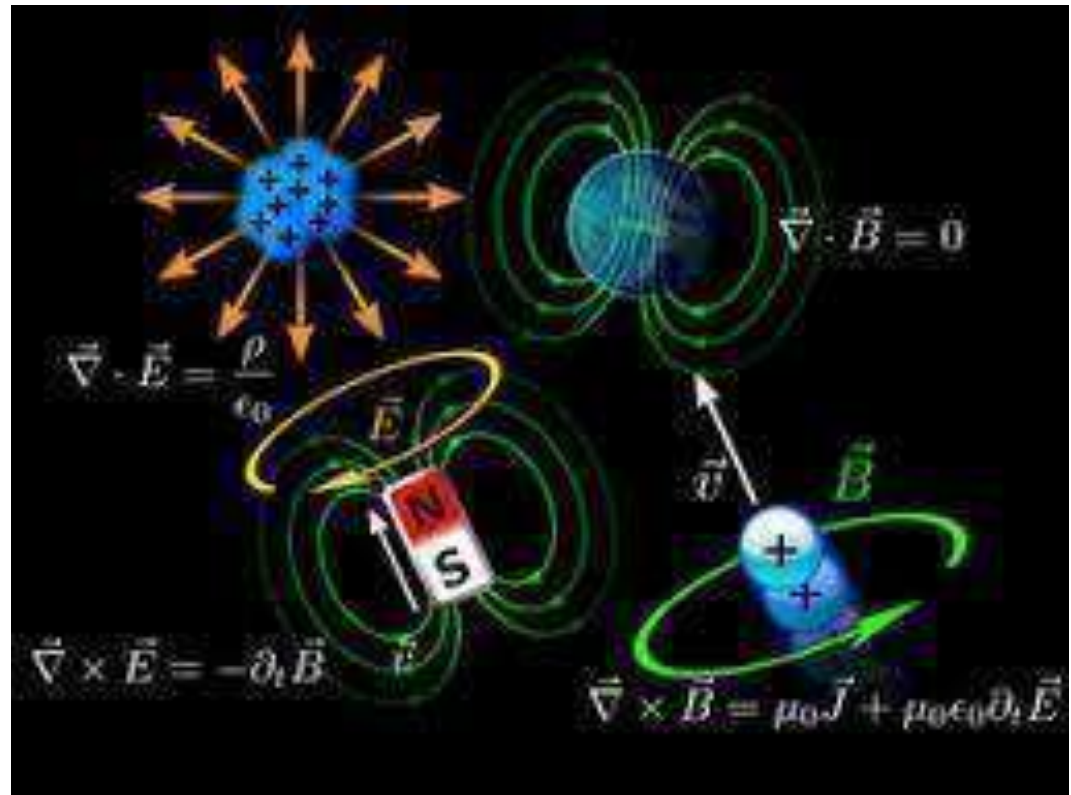
$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Ley de Gauss}$$

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

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



Ecuaciones de Maxwell

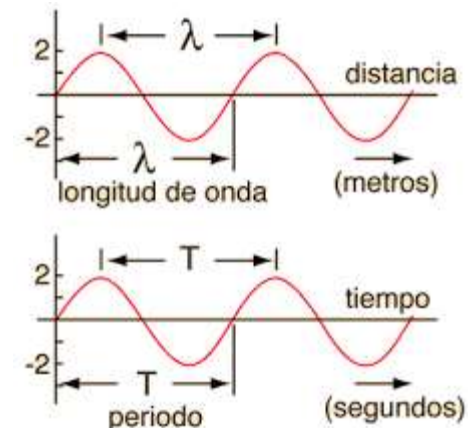




El Espectro Electromagnético

- 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, λ lambda (en el dominio del espacio)

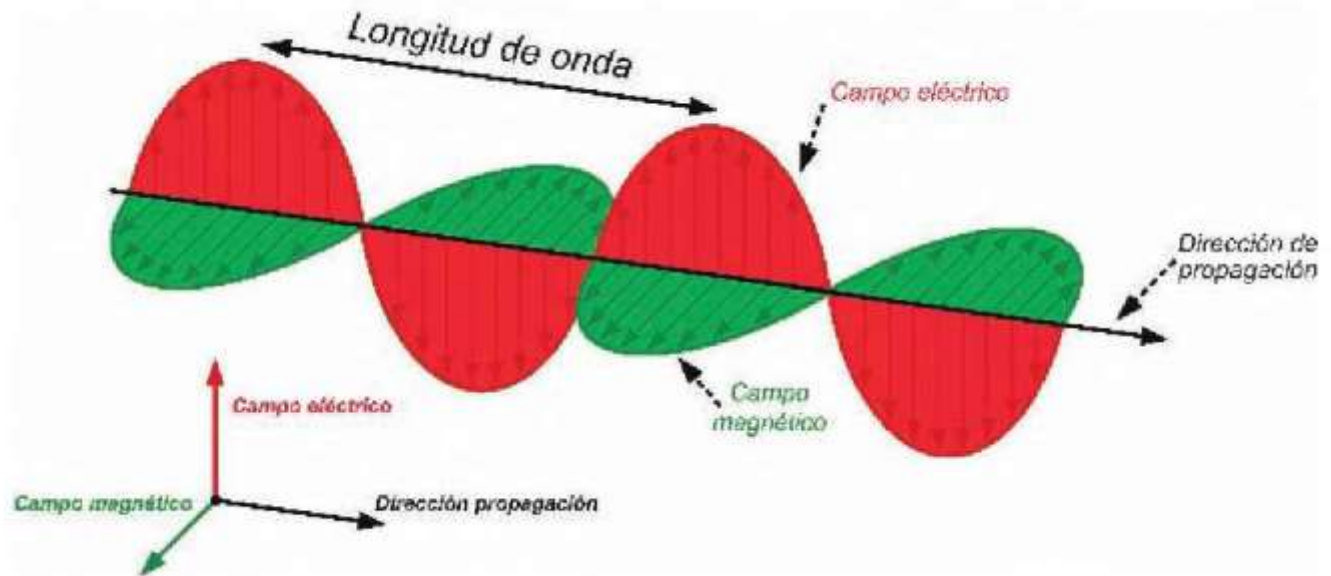
- La relación fundamental entre f y λ es: $\lambda \cdot f = c$
(c es una constante)





Ondas Electromagnéticas

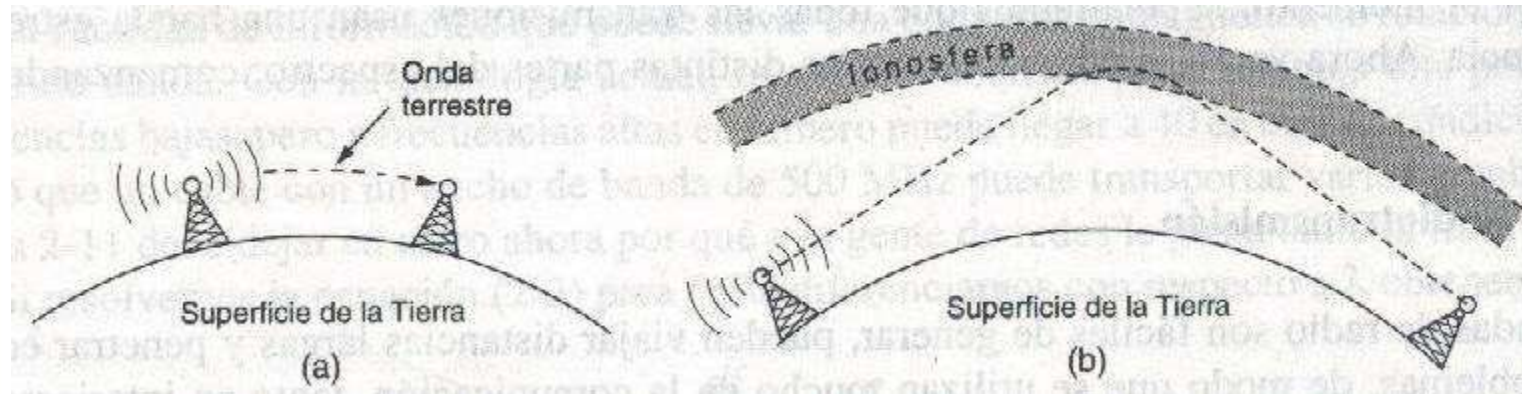
- Las ondas electromagnéticas están constituidas por un campo eléctrico (E) y un campo magnético (B) perpendiculares entre sí.
- Son ondas transversales porque los campos E y B son siempre perpendiculares a la dirección de propagación de la onda





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.





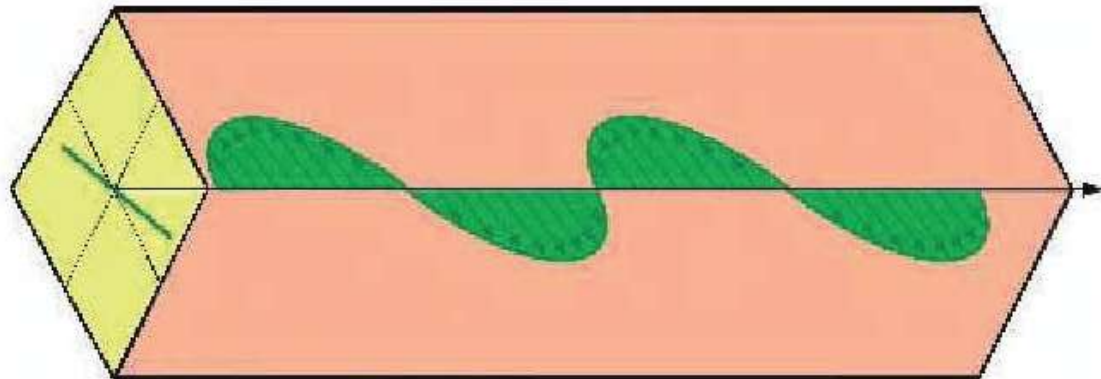
Radiopropagación

- 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

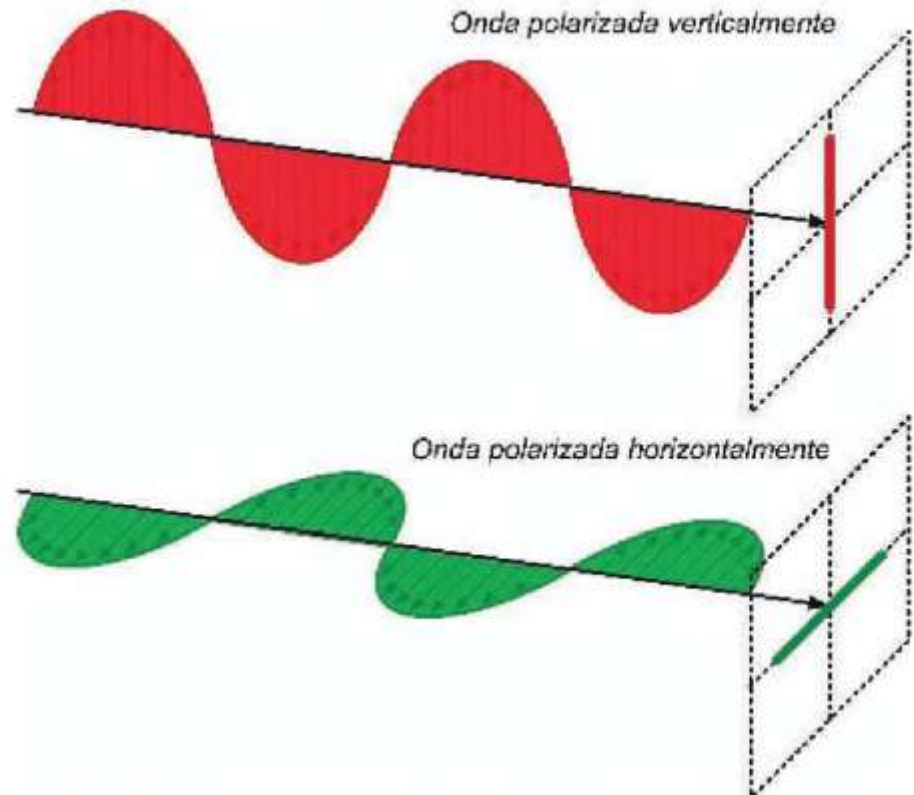
- Las ondas electromagnéticas están formadas por un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares entre sí y perpendicular también a la dirección de propagación
- Polarización es la orientación del campo eléctrico respecto a la superficie de propagación (horizonte)
- Cuando la polarización permanece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





Polarización

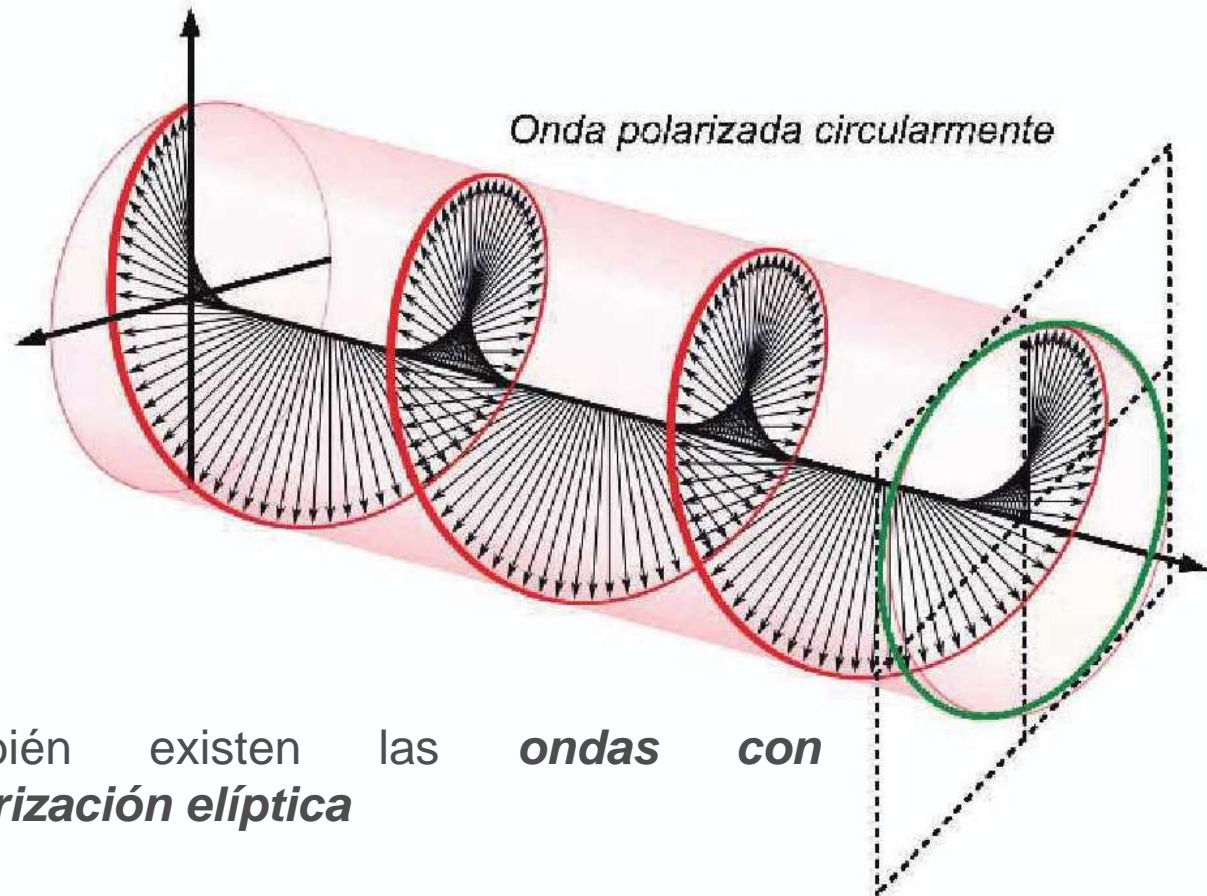
- Además de lineal, si el campo eléctrico se propaga vertical a la superficie terrestre, se llama polarización vertical
- Si el campo eléctrico es paralelo a la superficie de propagación, la polarización es horizontal





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

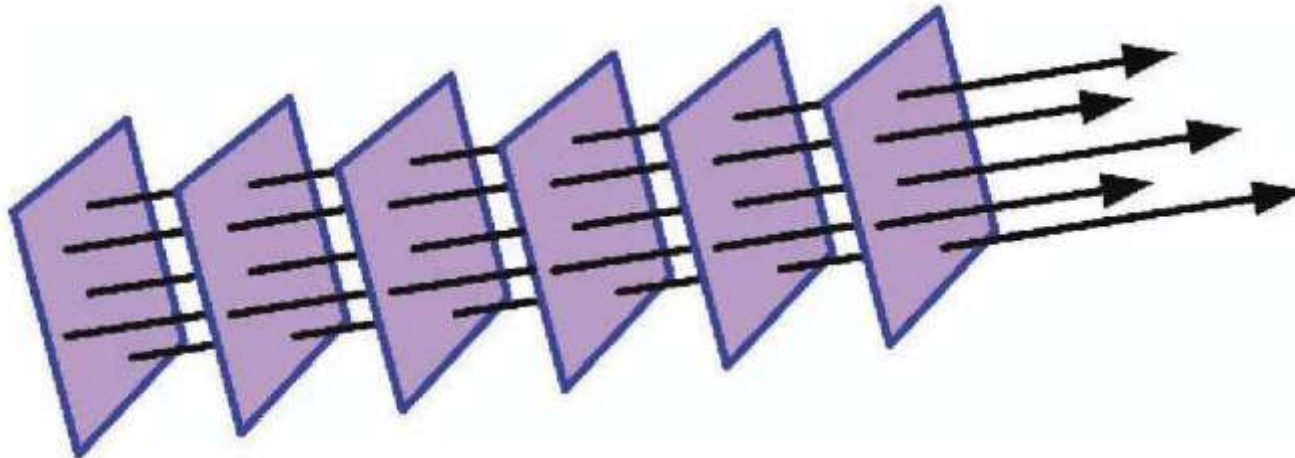
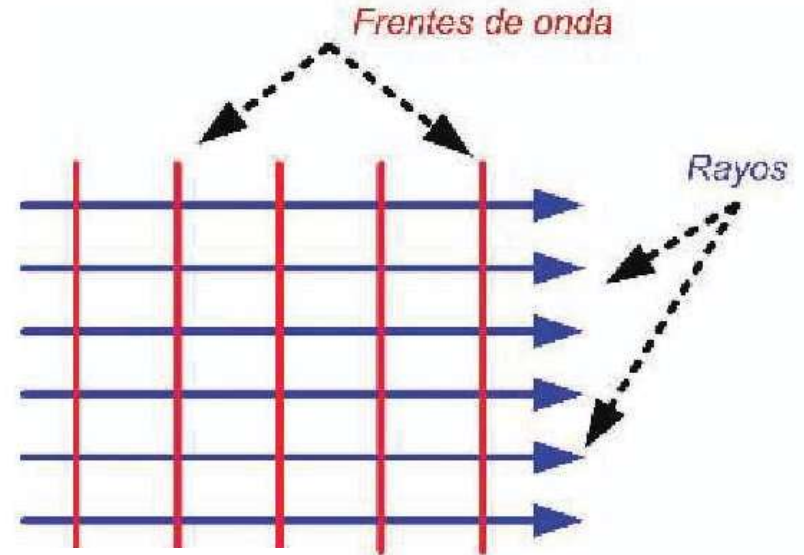
- El análisis de ondas electromagnéticas requiere emplear métodos indirectos para representarlas (no son visibles al ojo humano)
- Para ilustrar el fenómeno de propagación a través del espacio, se usa el concepto de **rayo y frente de onda**
- **Rayo** se emplea para ilustrar la dirección relativa de 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

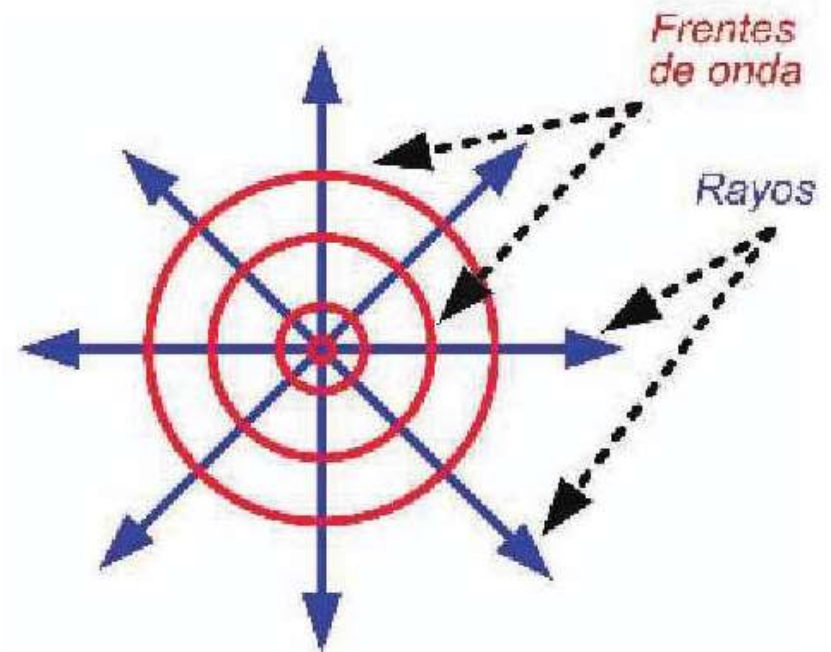
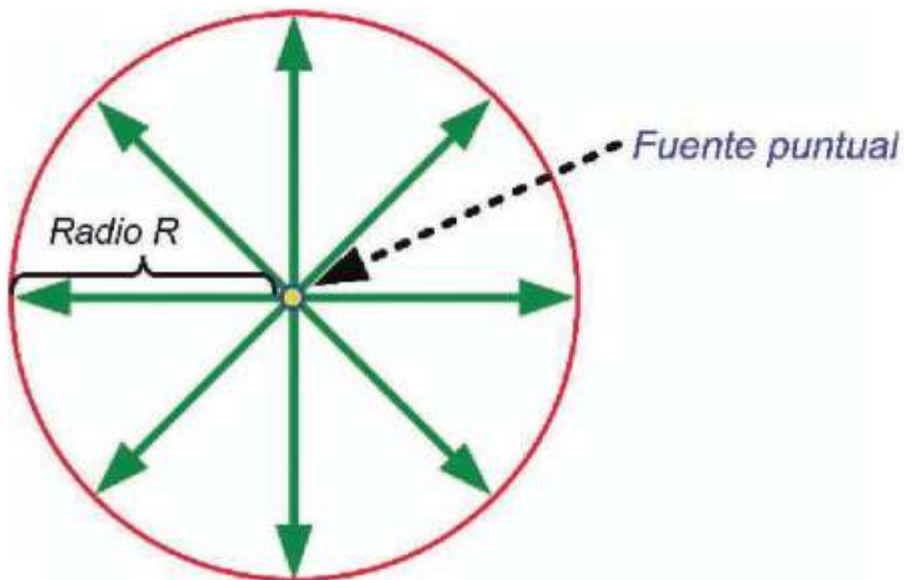
- Decimos que una onda es plana cuando su frente de onda se propaga en una única dirección a lo largo del espacio





Ondas Esféricas

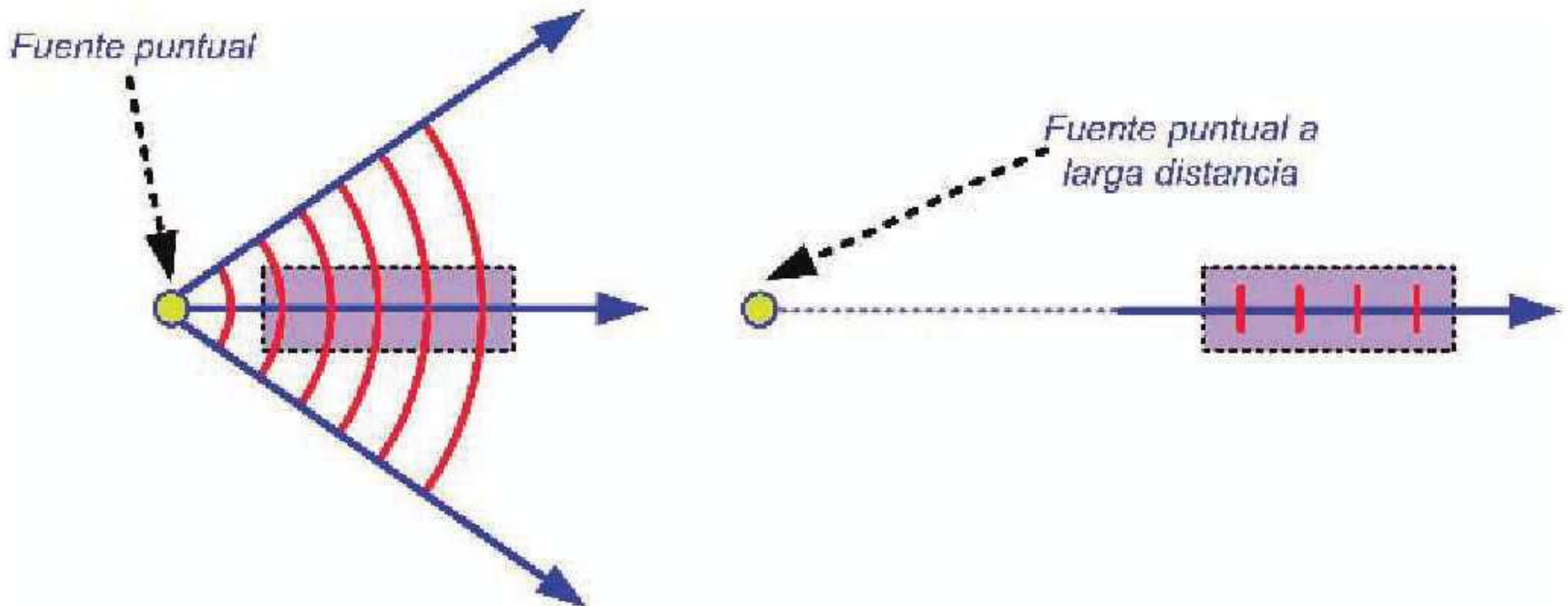
- Una **fente puntual** (también llamada **isotrópica**) radia uniformemente en todas las direcciones, creando un frente de onda esférico
- Cuando nos encontramos lejos de la fente, la onda esférica puede aproximarse como plana





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

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

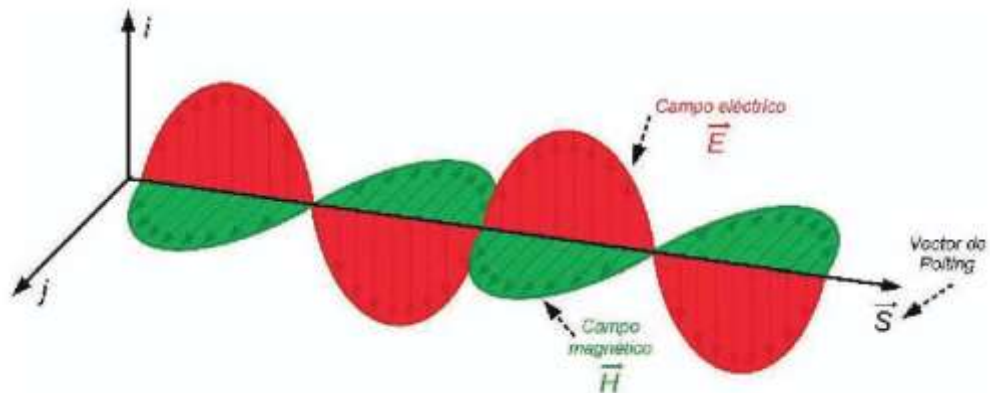


Vector de Pointing

- 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**



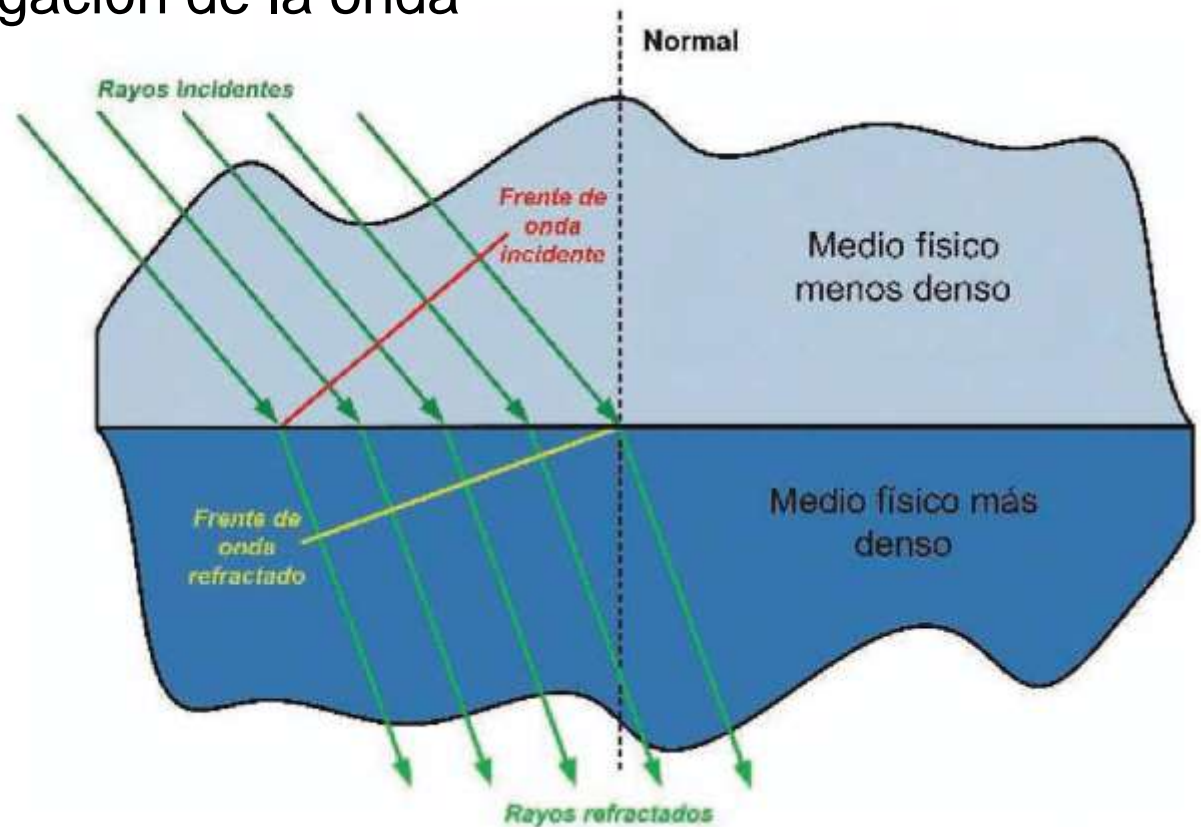
Atenuación vs. Absorción

- 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

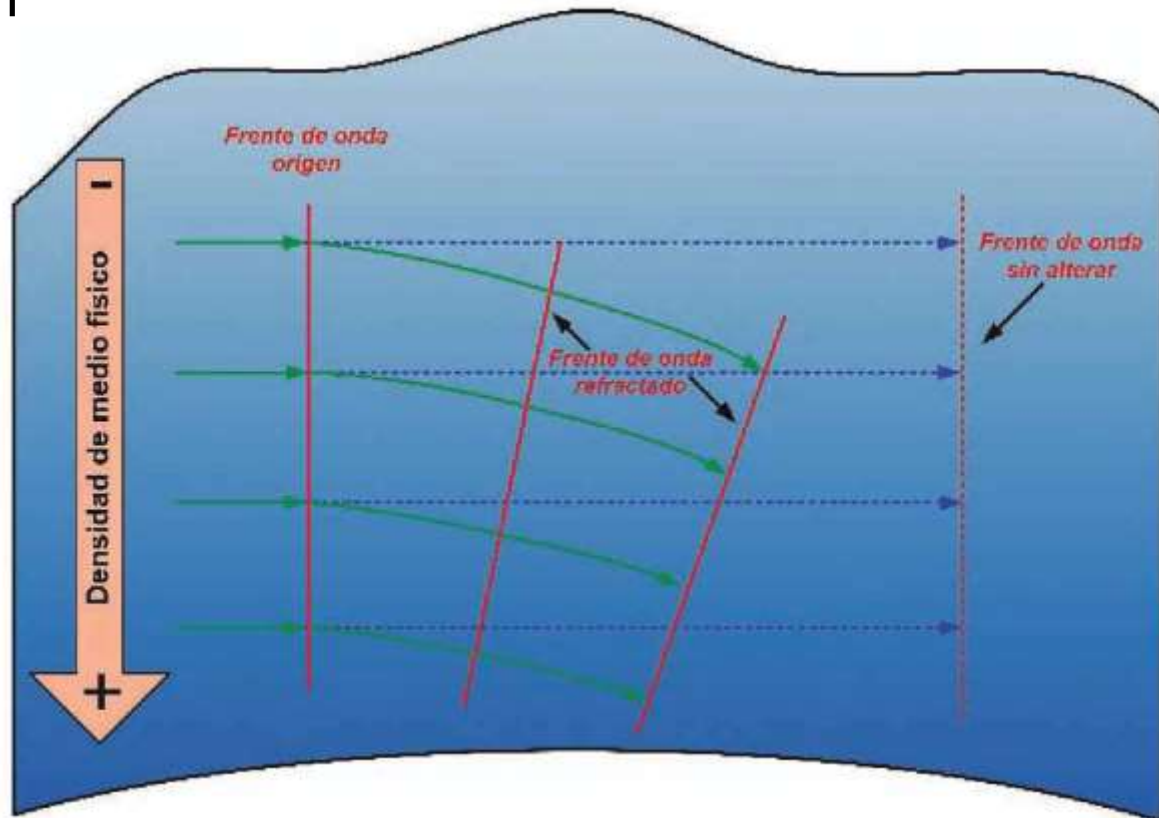
- Ocurre cuando una onda EM que se propaga por un medio atraviesa a otro con distinta densidad (distinta velocidad de propagación)
- Se produce un cambio en la dirección de propagación de la onda





Refracción en Medio con Gradiente de Densidad

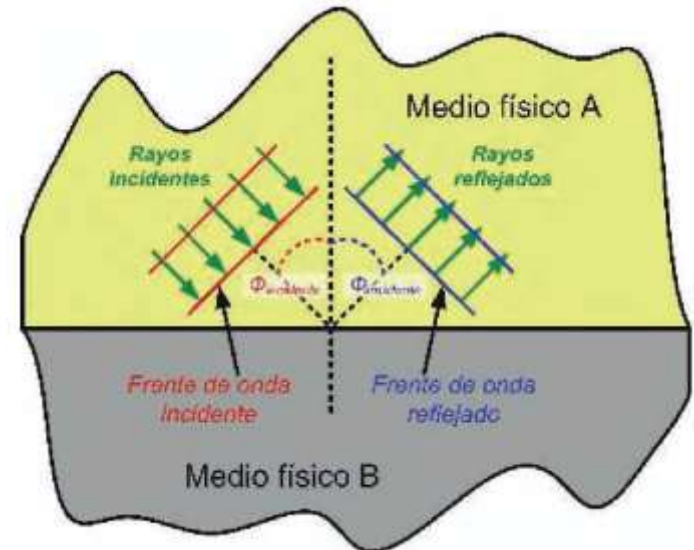
- Si la onda se propaga en un medio cuya densidad varía gradualmente (tiene un gradiente de densidad) perpendicular a la dirección de propagación de la onda, también se produce el fenómeno de refracción





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

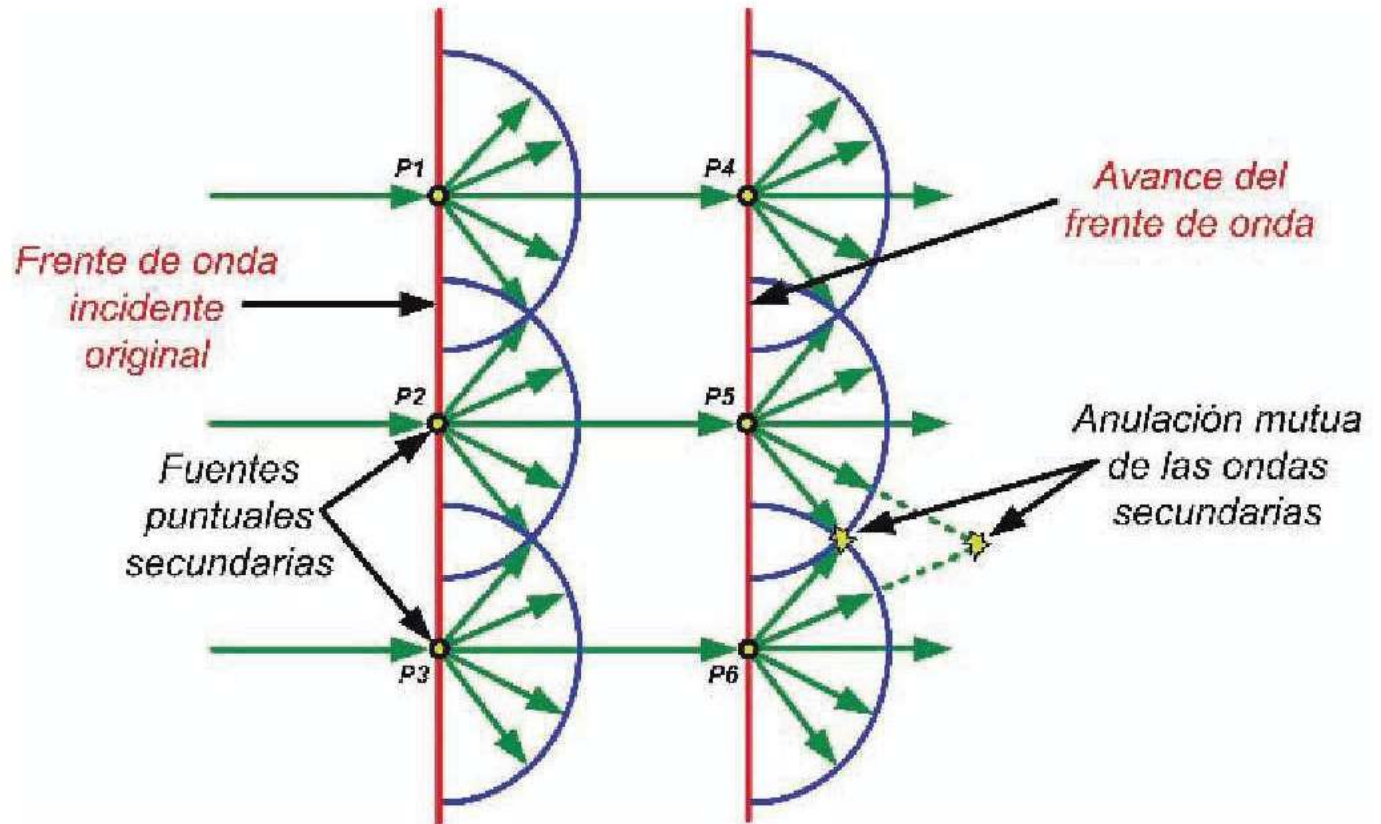
- Se produce cuando la onda encuentra un obstáculo
- Se manifiesta como una redistribución o modulación de la energía dentro del frente de onda
- Reflexión y Refracción se producen cuando las dimensiones de las superficies son mucho mayores que la longitud de onda de la señal
- Si el tamaño del obstáculo 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

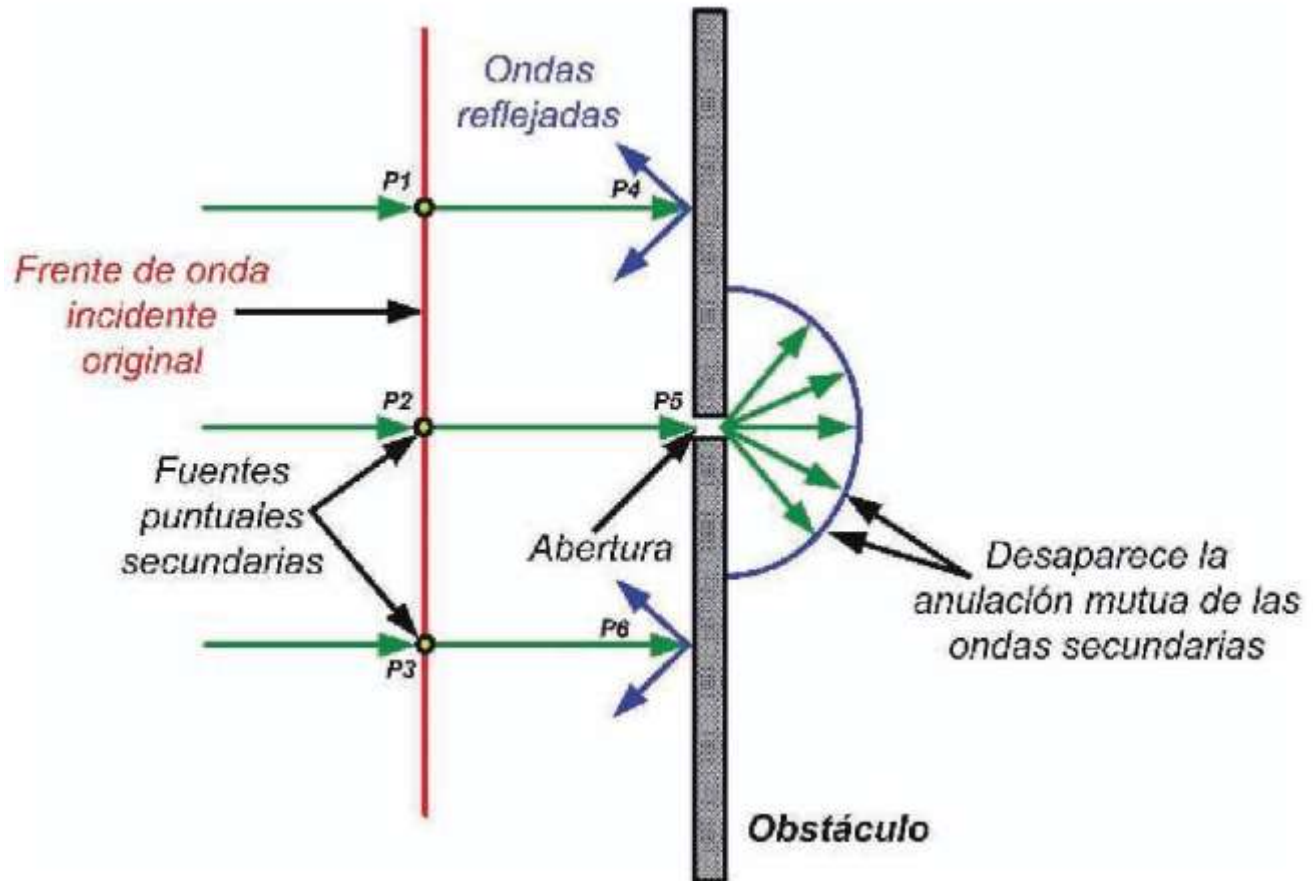
- Esquematización del principio de Huygens





Difracción

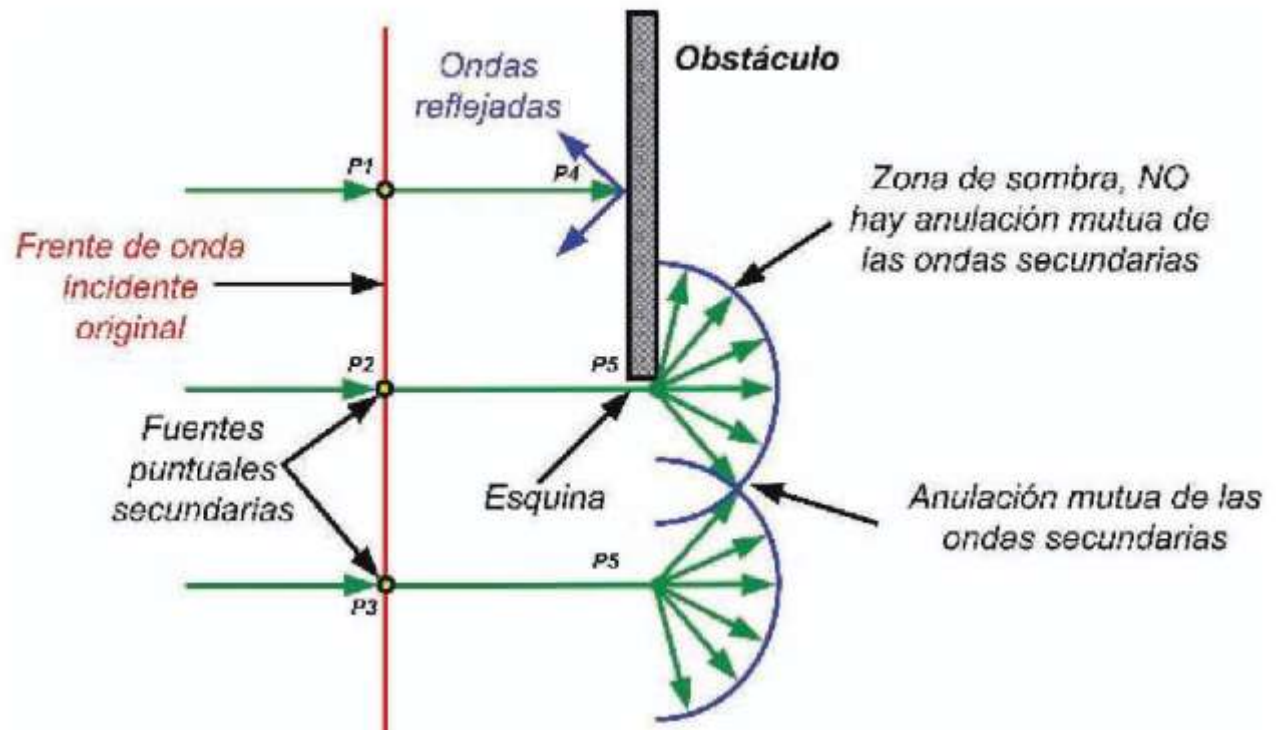
- Esquematización de la difracción





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



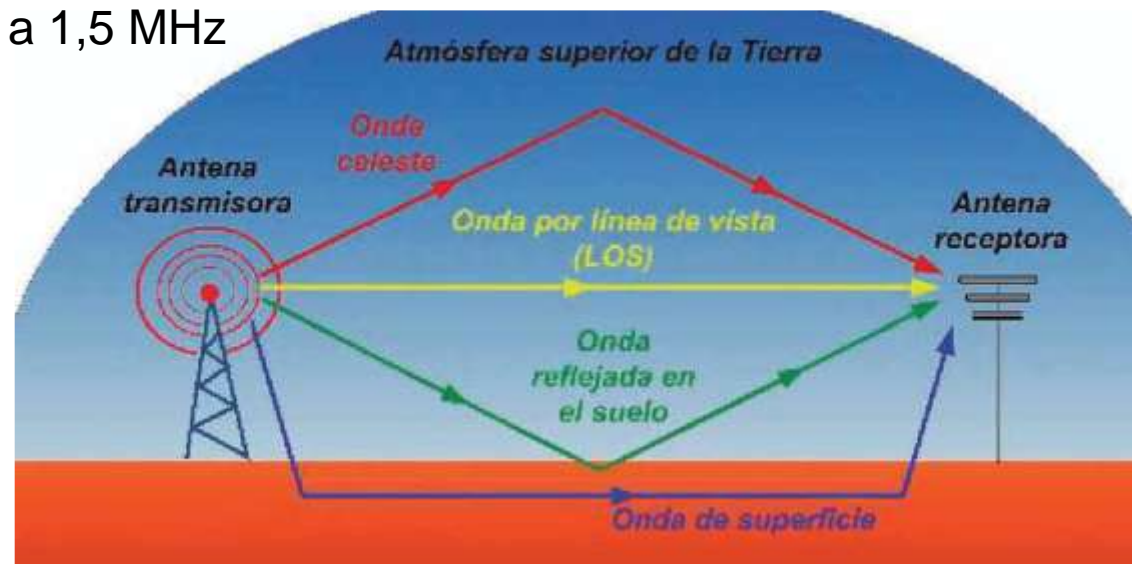
Propagación de Ondas Electromagnéticas

- 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

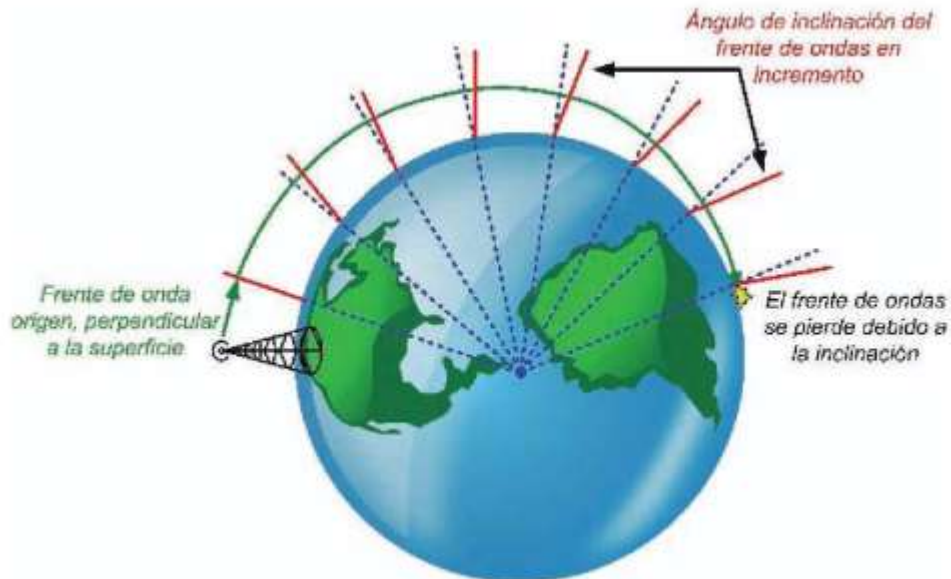
- Resultando fundamentalmente tres modos de propagación
 - Onda Terrestre
 - Onda Espacial
 - Ondas Celestes o Ionosféricas
- Estos coexisten pero siempre prevalece uno de acuerdo a las condiciones del terreno y la frecuencia
 - Las ondas terrestres se propagan mejor a frecuencias inferiores a 1,5 MHz





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)





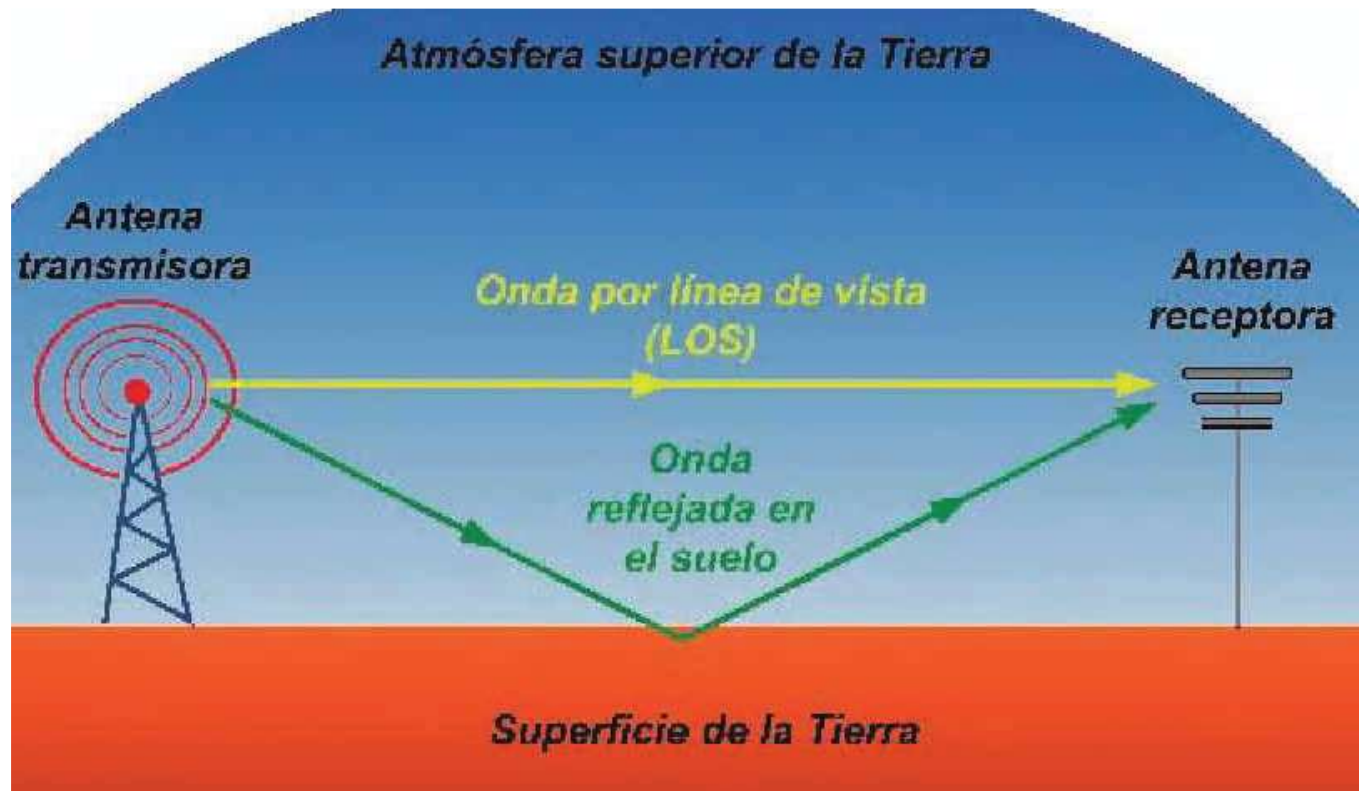
Propagación por Ondas Terrestres

- 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

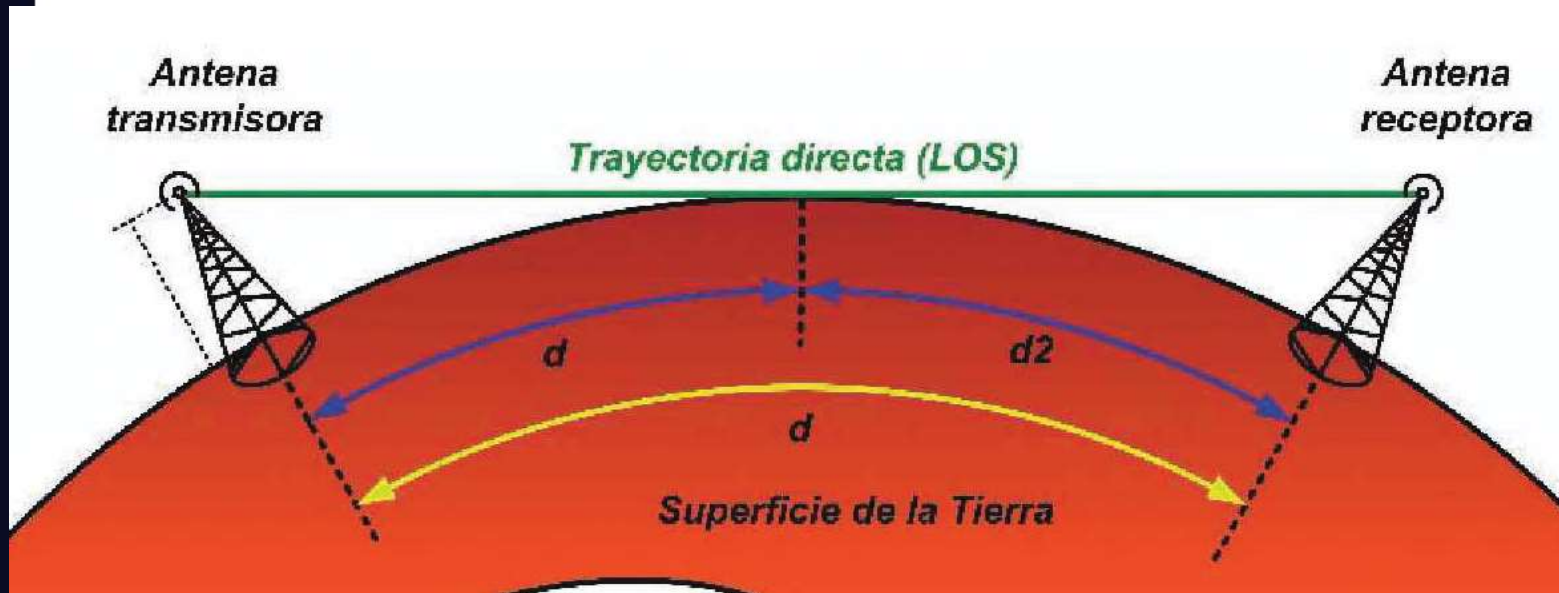
- Se propaga en los primeros kilómetros de la atmósfera
- Está conformada por ondas directas y reflejadas





Propagación por Ondas Espaciales

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

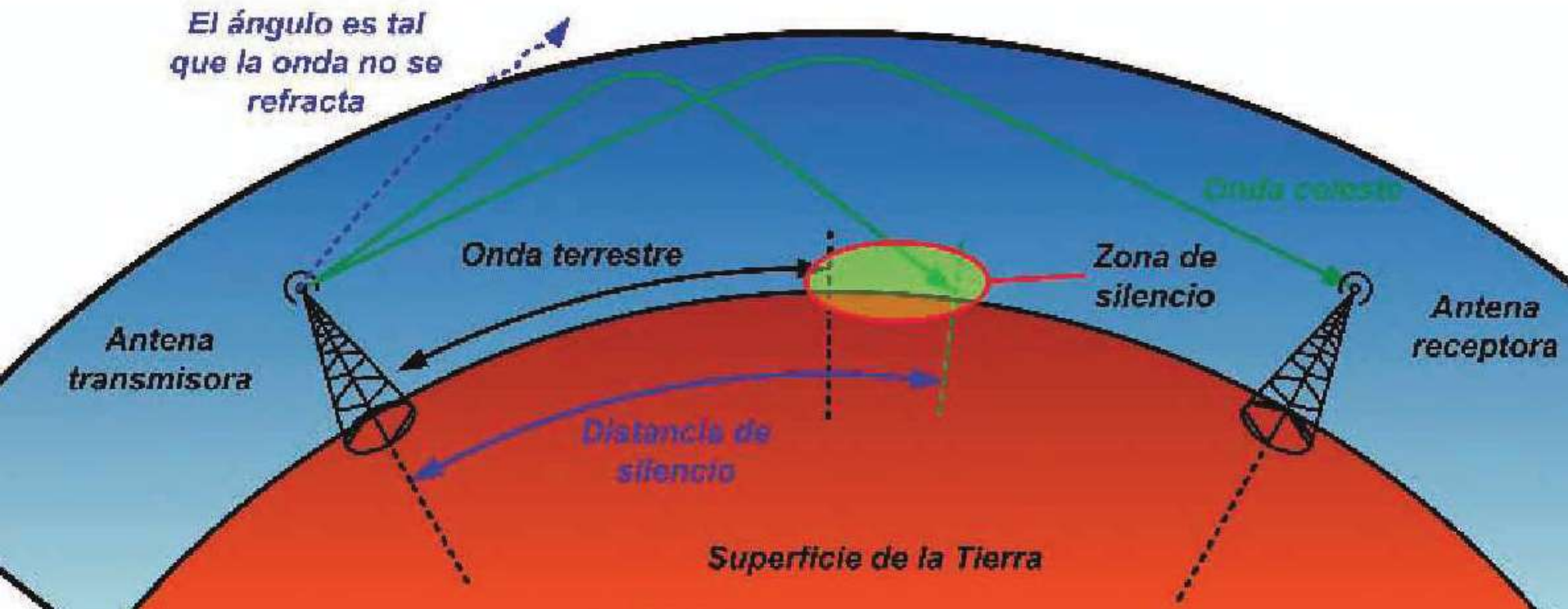


- El horizonte de radio es un poco mayor que el óptico ($4/3$), debido al gradiente de densidad
- Para aumentar el horizonte de radio, se debe aumentar la altura de las antenas
- Existen ondas reflejadas que pueden producir interferencias



Propagación por Ondas Celestes o Ionosféricas

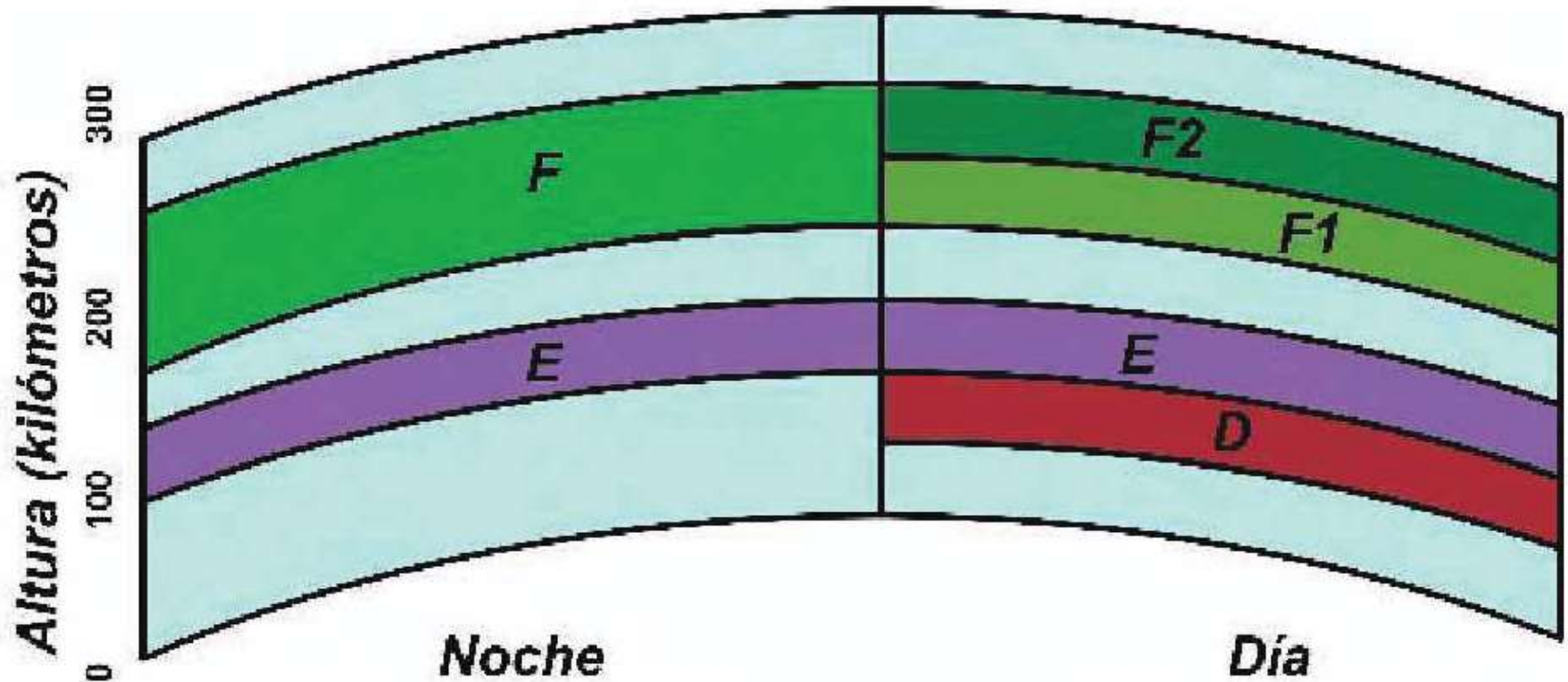
- Se radian formando un ángulo relativamente grande respecto al horizonte o superficie de la Tierra
- Son dirigidas hacia la atmósfera donde son reflejadas o refractadas hacia la superficie por la ionósfera (entre 50 y 400 Kilómetros de altura)
- A mayor frecuencia, mayor penetración en la ionósfera





Propagación por Ondas Celestes o Ionosféricas

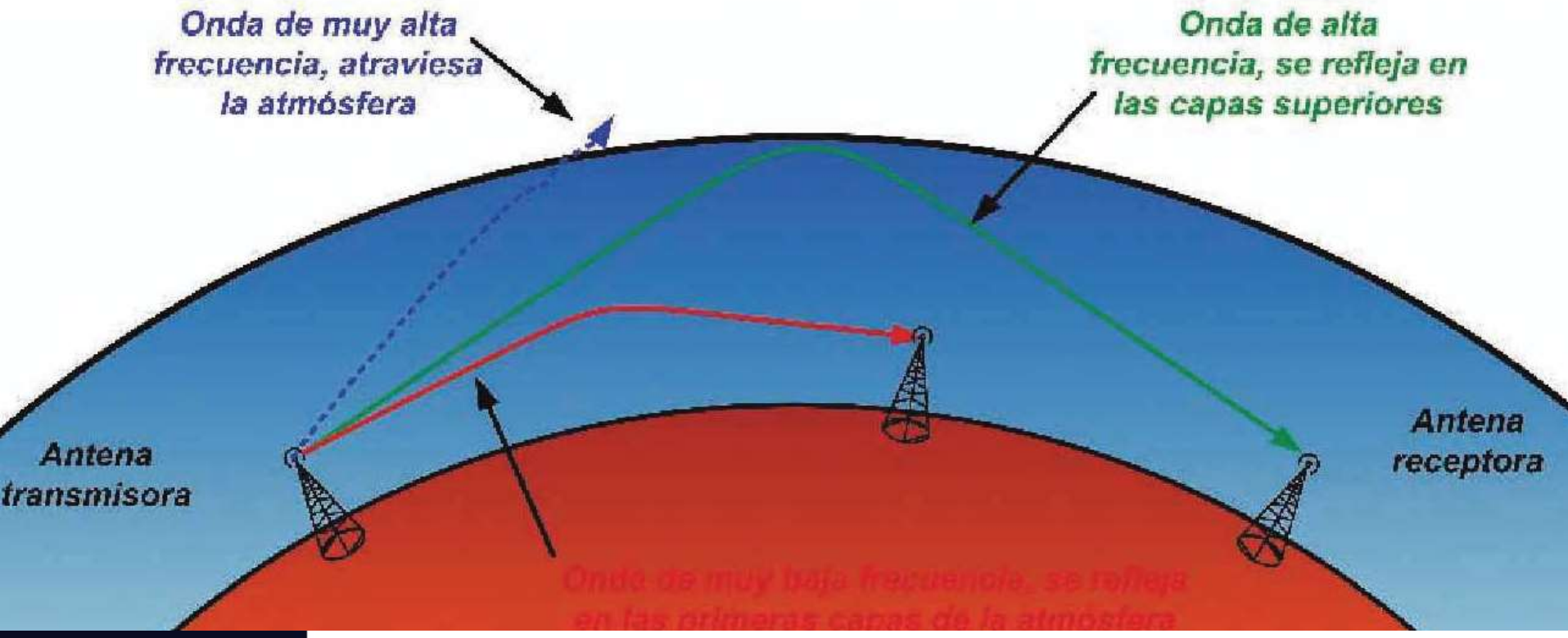
- La ionósfera está estratificada en capas:
 - Capa D: refleja las ondas VLF (3-30 KHz) LF (30-300 KHz) (desaparece por la noche)
 - Capa E: refleja bien MF (300-3.000 KHz) y poco HF (3-30 Mhz) (el sol también influye en su comportamiento)
 - Capa F (F1 y F2), HF





Propagación por Ondas Celestes o Ionosféricas

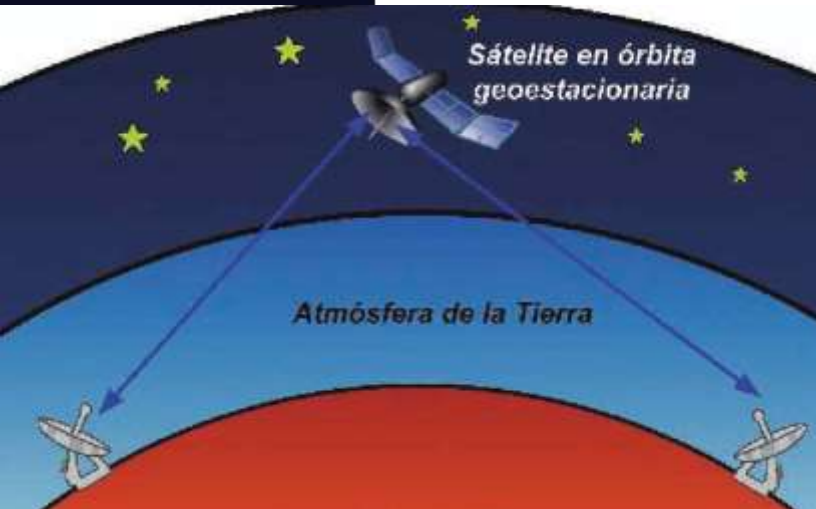
Las ondas reflejadas por la ionósfera alcanzan la superficie de la Tierra únicamente a determinadas distancias del transmisor, dependiendo de la frecuencia, el ángulo de reflexión y de la profundidad de penetración



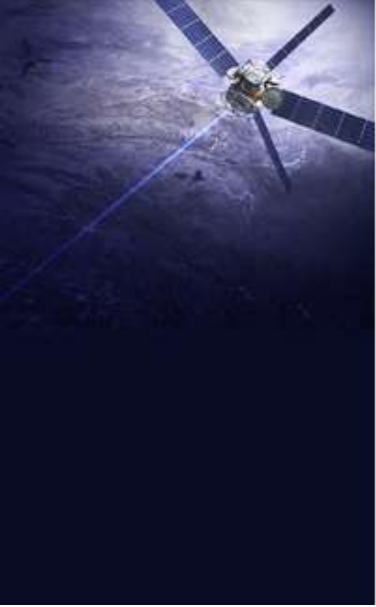


Propagación vía Satélite

- 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)

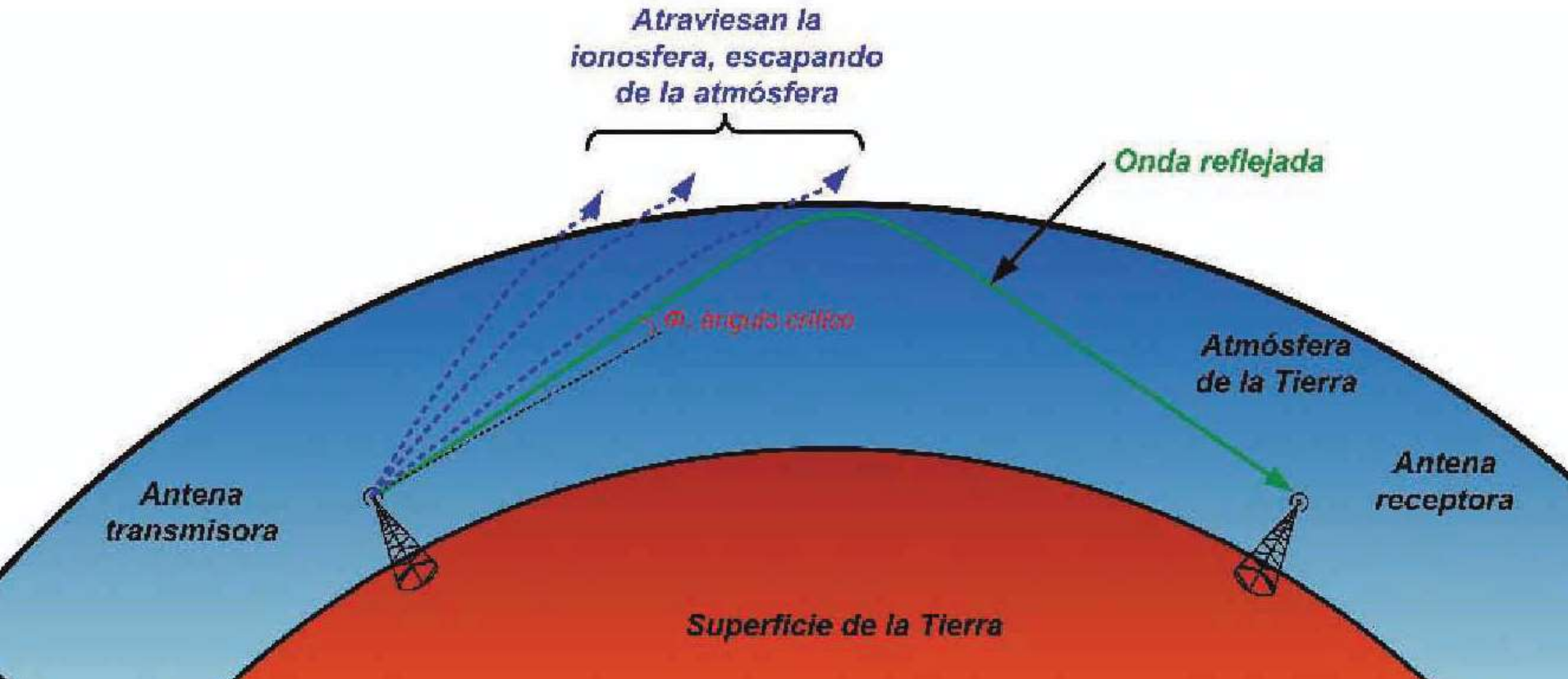


| Banda | Rango de frecuencias ascendentes (GHz) | Rango de frecuencias descendentes (GHz) |
|-------|--|---|
| C | 5,925 - 6,425 | 3,7 - 4,2 |
| Ku | 14,0 - 14,5 | 11,7 - 12,2 |
| Ka | 27,5 - 30,5 | 17,7 - 21,7 |



Términos y definiciones de propagación

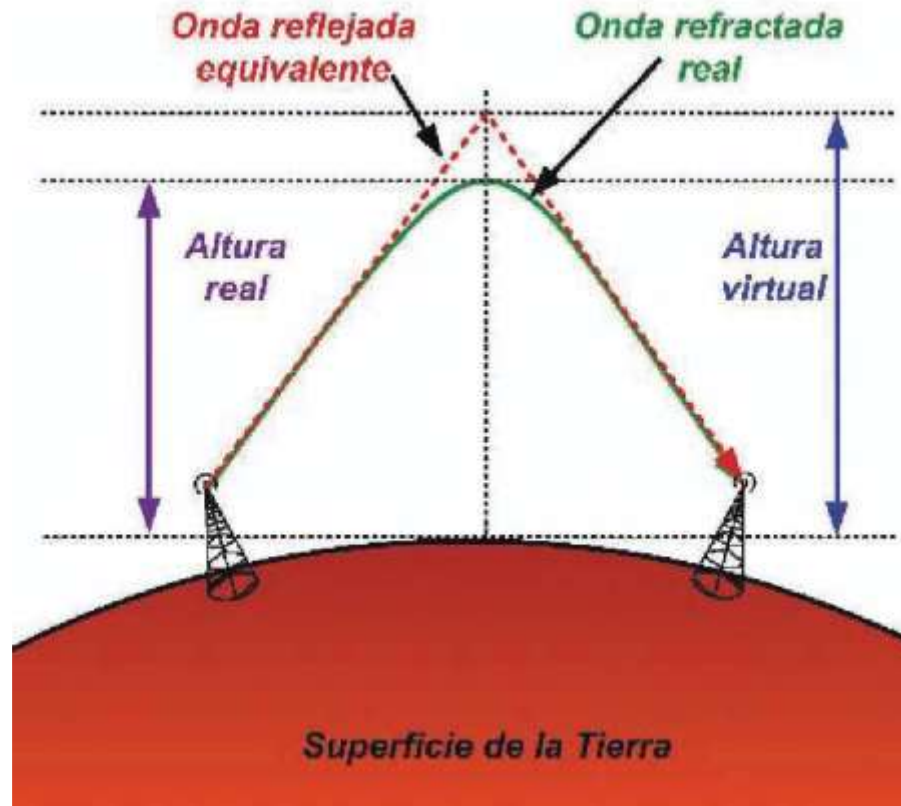
- **Frecuencia crítica:** máxima frecuencia de la onda celeste que es reflejada por la ionósfera (depende de las condiciones atmosféricas y la radiación solar)
- **Ángulo crítico,** mayor ángulo (medido con la vertical) a partir del cual no se produce reflexión





Términos y definiciones de propagación

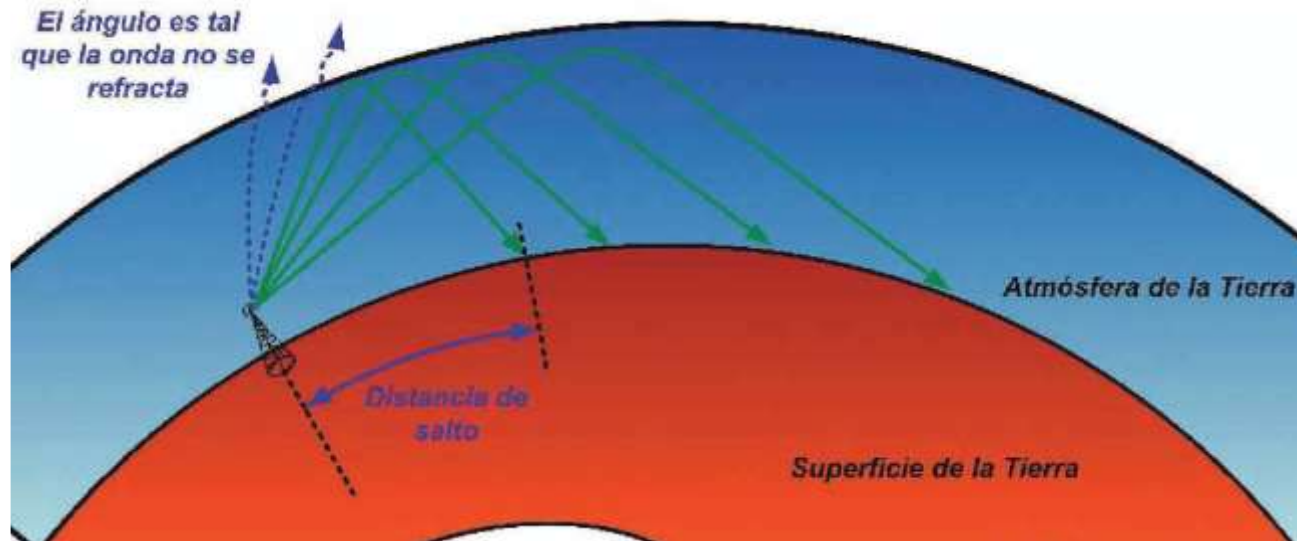
- **Altura virtual:** altura desde la superficie de la Tierra en la que una onda “parece” reflejarse





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.



| Banda | Longitud de onda (m) | Frecuencia (Hz) |
|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 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 |

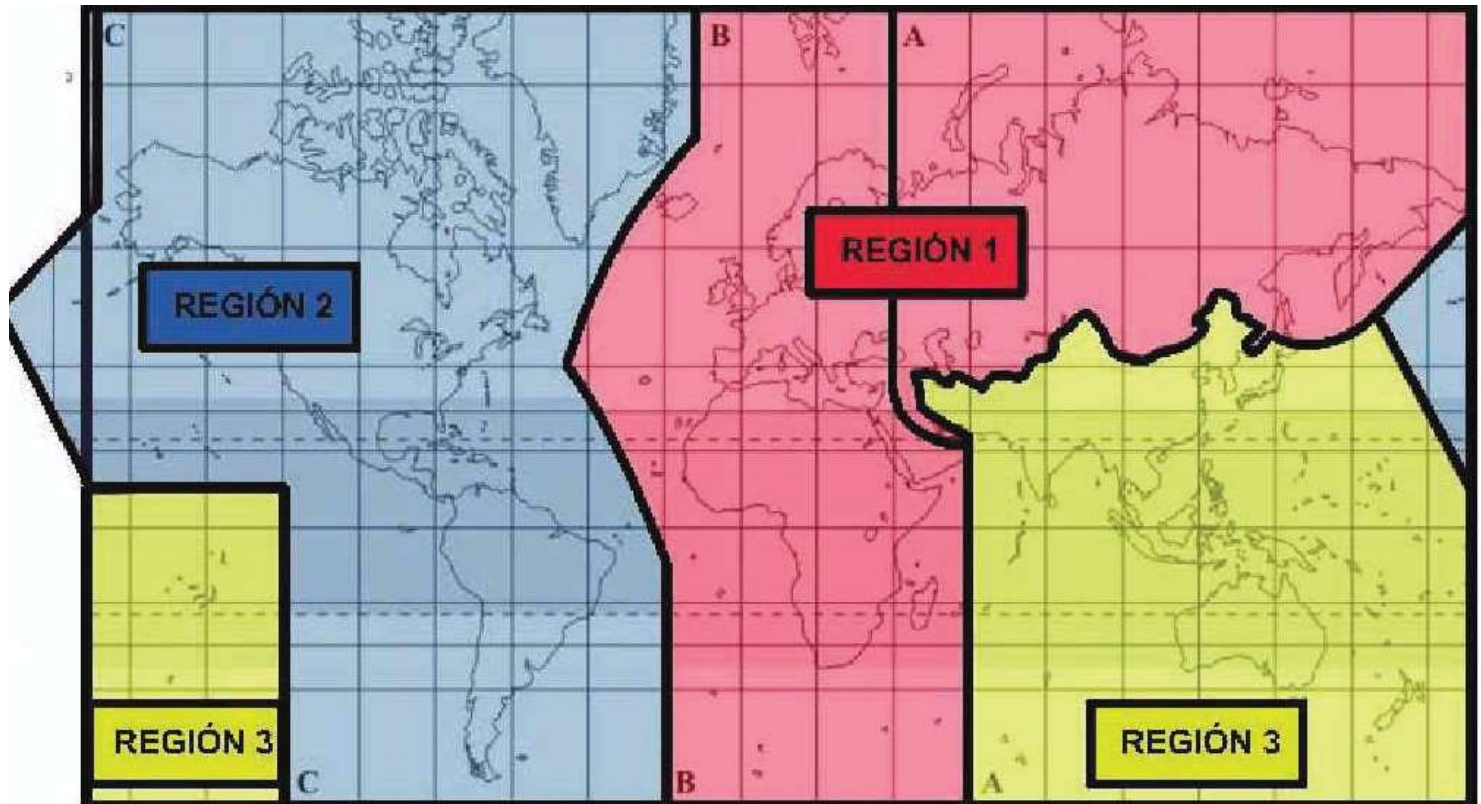
Tabla 3.4. Banda de frecuencias para las microondas

| 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