

# **CAPÍTULO 3**

## **PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN LA ATMÓSFERA**

Las ondas de radio se propagan por el aire o por el espacio. En el caso del aire, la atmósfera produce efectos sobre las ondas que la atraviesan. La capa de aire está compuesta de Nitrógeno y Oxígeno en grandes proporciones, junto a otros gases en cantidades mucho más pequeñas, incluidos fragmentos de elementos que llegan del espacio exterior. [14]

Estos compuestos se encuentran hasta una altitud de 100 Km., pero la densidad disminuye notablemente y en la alta atmósfera solamente se encuentra Nitrógeno y Helio.

La radiación del Sol actúa en toda la atmósfera. En áreas cercanas a la superficie influye con su calor en los fenómenos meteorológicos. En la alta atmósfera transforma los gases mediante la radiación ultravioleta y los rayos X.

Existe una división de la atmósfera en grandes regiones con diferentes características: la troposfera, la estratosfera, la mesosfera y la ionosfera.

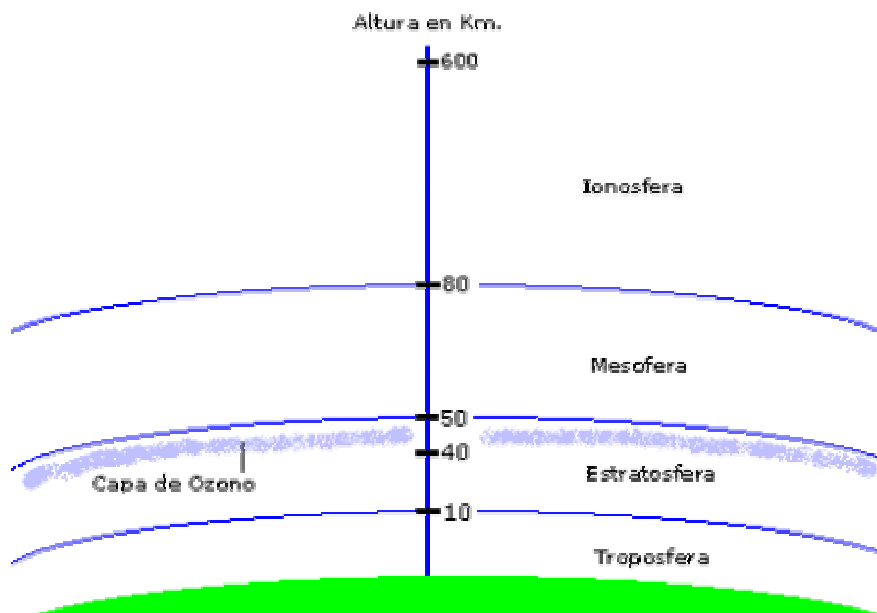


Figura 3.1 Regiones de la Atmósfera. [14]

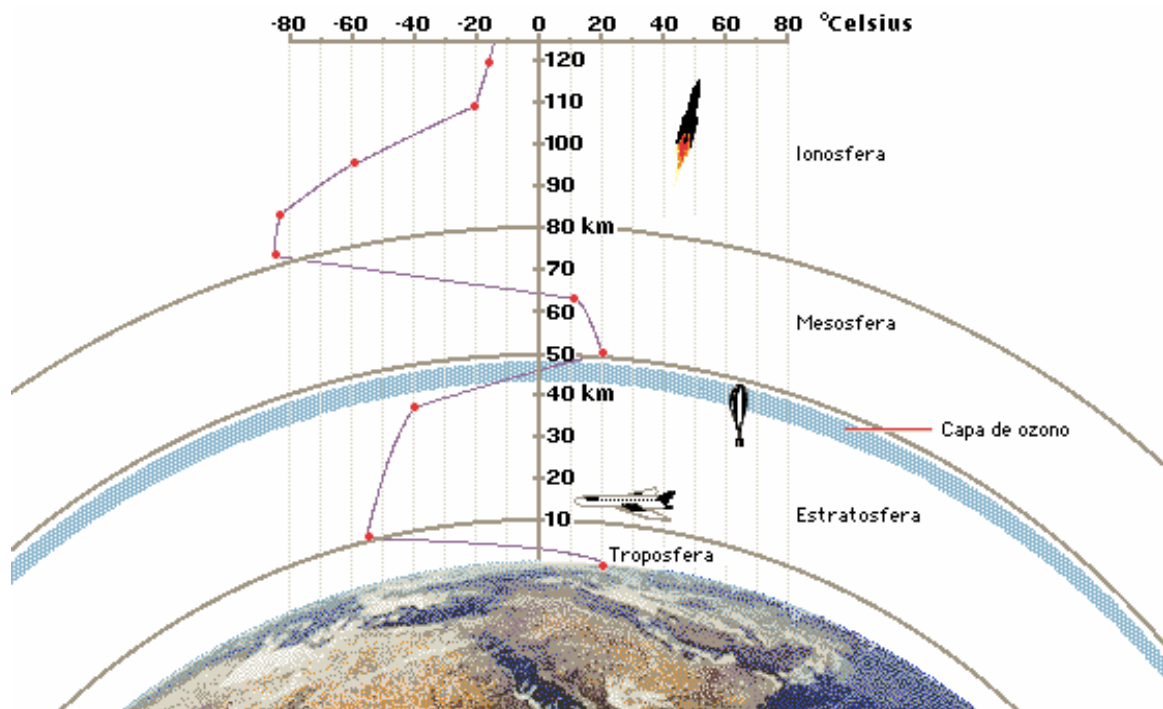


Figura 3.2 Regiones de la Atmósfera y su temperatura. [11]

### 3.1 Tropósfera.

Es la capa inferior de la atmósfera terrestre y escenario de todos los procesos meteorológicos, ya que es aquí donde se encuentran las nubes, tormentas, vientos, frentes de diferente presión, temperaturas variables, etc. La tropósfera se extiende hasta una altitud de unos 11 km sobre las zonas polares y hasta unos 16 km sobre las regiones ecuatoriales. La tropopausa es la frontera entre la tropósfera y la estratosfera. [14]

La tropósfera contiene el 80% de toda la masa de gases de la atmósfera y el 99% de todo el vapor de agua. En general, la temperatura de la tropósfera decrece con la altitud a razón de 5 y 6 °C/km. En la tropósfera, los intercambios de calor se producen por turbulencia y por el viento, y los intercambios de agua

por evaporación y precipitación. La intensidad de los vientos crece con la altura, y las nubes más altas alcanzan una altitud de 10 km. [14]

Esta capa es la responsable de la mayoría de las condiciones de propagación en VHF según las condiciones del clima.

### **3.2 Estratósfera.**

Es una capa superior de la atmósfera que empieza a una altitud entre los 12,9 y 19,3 km y que se extiende 50 km hacia arriba. En su parte inferior, la temperatura permanece casi invariable con la altitud, pero a medida que se asciende aumenta muy deprisa porque el ozono absorbe la luz solar. La estratósfera carece casi por completo de nubes u otras formaciones meteorológicas. Por debajo de la estratósfera se sitúa la tropósfera, de la que está separada por una zona denominada tropopausa. Por encima, la estratósfera termina en la estratopausa.[14]

Es una capa de baja densidad, no tiene ninguna influencia sobre las comunicaciones. Tiene gran poder de absorción de la radiación ultravioleta del sol, en la que el Ozono juega un papel muy importante, impidiendo que los rayos ultravioletas alcancen la superficie de la tierra. [14]

### **3.3 Mesósfera.**

Esta situada entre 50 y 80 km por encima de la superficie. Está por encima de la estratósfera y por debajo de la ionósfera (esta capa también se conoce como termosfera). La estratósfera y la mesósfera reciben a veces el nombre de atmósfera media. La interfase entre estratósfera y mesósfera se llama estratopausa, y mesopausa la que separa la mesósfera de la termosfera. [14]

Pese a que la mesósfera contiene sólo cerca del 0,1% de la masa total de la atmósfera por debajo de 80 km, es importante por la ionización y las reacciones químicas que ocurren en ella. La atmósfera media está formada por los mismos componentes que la tropósfera (sobre todo nitrógeno y oxígeno), pero también contiene algunos gases menores muy importantes, en especial ozono, que, pese a que alcanza su máxima concentración en la estratósfera, a una altitud inferior, provoca el máximo calentamiento solar cerca de la estratopausa. La mesósfera es distinta de la estratósfera, sobre todo porque el calentamiento del ozono disminuye con la altura desde su valor máximo cerca de la estratopausa y, por tanto, también disminuye la temperatura mesosférica. Esta reducción rápida de la temperatura con la altitud es la principal característica diferencial de la mesósfera. [14]

La disminución de la temperatura combinada con la baja densidad del aire en la mesósfera (aproximadamente de  $1 \text{ gm}^{-3}$  en la estratopausa, mil veces menos que a nivel del mar y 100 veces menos que en la mesopausa) determinan la formación de turbulencias y ondas atmosféricas que actúan a escalas espaciales y temporales muy grandes. Estos movimientos son importantes, no sólo por la mezcla de compuestos químicos que causan, sino también porque la mesósfera es la región de la atmósfera donde las naves

espaciales que vuelven a la Tierra empiezan a notar la estructura de los vientos de fondo, y no sólo el freno aerodinámico. Algunos de los vientos a pequeña escala inducen un flujo estacional medio que va hacia arriba desde la parte inferior de la mesósfera en el verano polar a través del ecuador y desciende hacia la estratósfera en el invierno polar. [14]

En verano, la rapidez con que desciende la temperatura a medida que el calentamiento del ozono se reduce con la altitud se combina con el mayor enfriamiento debido al movimiento de elevación medio de fondo. Esto hace que en el verano local la mesopausa polar sea el lugar más frío de la Tierra; la temperatura normal es de sólo  $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y se han registrado valores inferiores a  $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A veces estas bajas temperaturas parecen asociarse con la formación de delgados estratos nubosos, que se ven mejor durante el crepúsculo (cuando la mesósfera está aún iluminada por el Sol, mientras que la superficie está ya en la oscuridad). Estas nubes se llaman noctilúcidas.

La mesósfera contiene la parte de la ionosfera llamada región D, donde la ionización de oxígeno molecular ( $\text{O}_2$ ) y atómico ( $\text{O}$ ) libera electrones. La ionización es sobre todo una respuesta a la radiación solar, y desaparece durante la noche; esto explica por qué la recepción de radio mejora cuando se pone el Sol.

Los componentes menores de la atmósfera media, incluidos los compuestos químicos naturales y antropogénicos (es decir, debidos a la actividad humana) se transportan desde las regiones de penetración en esta región atmosférica (por lo general, la estratósfera ecuatorial inferior) hasta la mesósfera, desde donde pueden desplazarse rápidamente (en menos de seis

meses) hasta cualquier latitud. Debido a los rápidos movimientos y a las bajas densidades naturales de la mesósfera, éste es el primer lugar en que se dejan sentir los efectos de cantidades pequeñas de algunos compuestos antropogénicos.

### **3.4 Ionósfera.**

Se encuentra sobre la mesósfera y hasta una altura de 600 Km. Esta región de la atmósfera se ioniza, al recibir la radiación ultravioleta y los rayos X del Sol, y se liberan electrones de las moléculas de Nitrógeno y de Oxígeno (que pueden permanecer muchas horas en ese estado y en grandes áreas). Si estos electrones reciben excitación de radiofrecuencia, están en condiciones de irradiarla nuevamente hacia áreas adyacentes, incluida la tierra, o simplemente la disipan. [14]

Esta capa es muy importante para las comunicaciones en HF ya que las señales que llegan a esta región son refractadas hacia la tierra, a miles de Km. del lugar de origen. En condiciones normales la ionósfera no produce ningún efecto sobre las señales de VHF, que la atraviesan y se pierden en el espacio exterior. Los electrones libres se agrupan en diferentes capas dentro de la ionósfera.

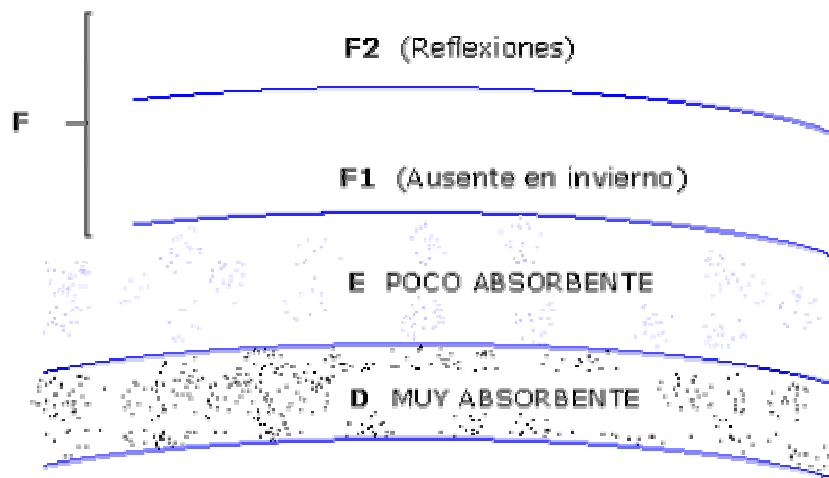


Figura 3.3 Capas de la Ionósfera. [14]

La ionósfera es un grupo de capas en nuestra atmósfera donde el aire es muy delgado y que se extiende entre unos 50 km y unos 500km de altura. Bajo la influencia de la radiación solar los átomos se rompen formando los iones. Lo mejor de este proceso es que esos iones pueden reflejar o doblar ondas de radio hasta una determinada longitud de onda.

La ionización es un proceso de ruptura de los enlaces electrónicos en los átomos, que producen la formación de parejas de iones de cargas opuestas. Los principales mecanismos de ionización son la colisión de los átomos o moléculas con otros átomos e iones, la interacción con algún tipo de radiación i la aportación de calor. [14]

Los iones son los que dan nombre a la ionósfera la cual al ser más ligera permite a los electrones moverse más libremente. Este factor es importante



para la propagación de alta frecuencia (HF: 3 a 30 Mhz). Generalmente, cuantos más electrones, frecuencias más altas se pueden usar.

Durante el día puede haber en la ionósfera 4 regiones o capas llamadas D, E, F1 y F2.

Sus alturas aproximadas son: [14]

- Región D de 50 a 90 Km.
- Región E de 90 a 140 Km.
- Región F1 de 140 a 210 Km
- Región F2 más de 210 Km de altura.

A continuación se explican cada una de las capas de la atmósfera con más detalle.

### **3.4.1 Propiedades de la Ionósfera, según el momento del día.**

A continuación se presentan algunas de las propiedades que caracterizan a la ionósfera según el momento del día, con el fin de entender de manera clara la propagación en la banda de HF, que como se mencionó anteriormente, se realiza básicamente por propagación ionosférica.

#### **3.4.1.1 La Ionósfera durante el día.**

Si existe una radiación ultravioleta al máximo, la capa F se separa en dos: la capa F1 por debajo, y la capa F2, por arriba. Existe otra capa denominada capa D, que es máxima al medio día y la cual absorbe totalmente las señales entre 1 y 10 MHz emitidas desde la tierra, de manera que éstas no llegan a la capa F para ser reflejadas. Debido a estos comportamientos, durante las horas del día las comunicaciones en las bandas de 1,8 MHz y de 3,5 MHz se limitan a algunos cientos de kilómetros [11].

Las señales superiores a los 20 MHz atraviesan todas las capas, incluida la F1 y pueden llegar a la capa F2, las cuales, mediante reflexión retornan a la tierra. Durante el invierno, al medio día, la capa F1 desaparece y de esta manera la capa F2 refleja señales de frecuencias mas elevadas.

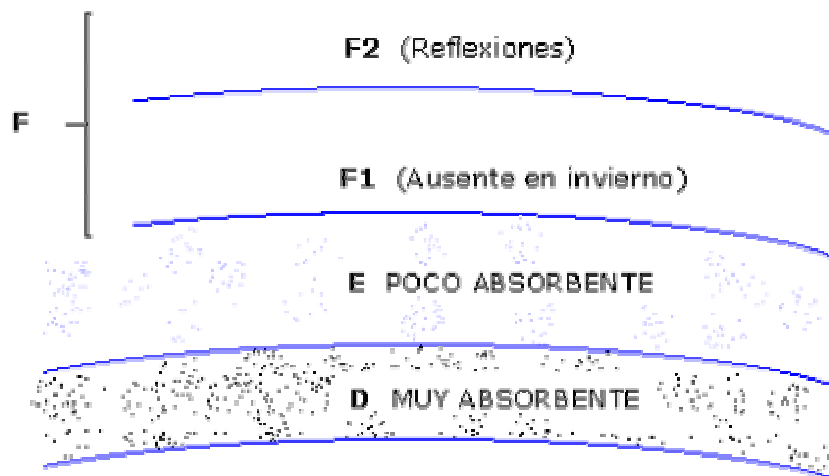


Figura 3.4. Capas de la Ionósfera.

### 3.4.1.2 La ionósfera durante la noche.

Cuando no hay radiación solar las capas F1 y F2 se juntan y forman una sola, la capa F, entre 300 y 400 Km. sobre la superficie de la tierra, refleja las señales de hasta 10 MHz aproximadamente, mientras que el resto de las señales se pierden en el espacio exterior. Durante periodos de máxima actividad solar, con ionización nocturna intensa, las señales superiores a los 14 MHz e incluso las de 50 MHz se pueden reflejar en esta capa. La distancia a cubrir en un solo salto es de mínimo 4000 Km. y se logran distancias mayores mediante saltos múltiples [11].

Entre los principales usos de esta banda se tiene la radioafición, la radiodifusión internacional, comunicaciones militares, comunicación a larga distancia por aeronaves y embarcaciones.

#### **3.4.2 La Capa D.**

Esta capa aparece de día durante todo el año y se encuentra entre los 80 y los 90 Km de altura. Cuanto más radiación ultravioleta recibe, más absorbe señales de las bandas inferiores de HF, aunque permite el paso de frecuencias superiores a los 14 MHz sin dificultad. Cuando es de noche, desaparece y permite que las señales de HF en frecuencias menores a los 5 MHz la atraviesen libremente. [14]

#### **3.4.3 La Capa E.**

Esta localizada sobre la capa D y hasta los 110 Km. de altitud. Su densidad de ionización depende de la luz solar. Durante el día es más densa, pero mucho menos absorbente que la capa D, mientras que de noche es esporádica y permeable. [14]

#### **3.4.4 La Capa F.**

Esta capa se encuentra entre los 110 y los 400 Km. De altitud y muestra características puramente reflectivas, se divide en dos, la capa F1 y la capa F2. La capa F1 (entre los 110 Km. Y los 250 Km.) presente solamente durante el día (ausente en invierno) y la capa F2 (entre los 250 hasta los 550 aproximadamente) presente en mayor cantidad durante la noche. [14]

#### **3.5 El Sol.**

La densidad de la ionósfera depende de la cantidad de radiación solar recibida, la cual no es constante. La radiación emitida por el Sol es variable con respecto a su rotación sobre su propio eje y después de un periodo de 11 años de actividad. Estas variaciones, son manifestadas por la cantidad de las manchas solares observadas en el astro. El promedio de las manchas solares alcanza picos máximos cada once años. Hasta el momento el máximo promedio de manchas en un ciclo fue de 200. También se puede expresar la intensidad de la actividad como flujo solar, expresado en una escala de 60 a 300. El mínimo

de manchas corresponde a una medida de 60 en la escala de flujo solar y el máximo de manchas corresponde a una medición de 300 del flujo solar. [14]

Las denominadas manchas solares, consisten en disturbios magnéticos en su superficie, seguidos de altísimas emisiones de ondas electromagnéticas. Estas emisiones abarcan un amplio rango de frecuencias, desde frecuencias de HF hasta los Rayos X, manifestándose inclusive como alto ruido en la banda de VHF. Estas emisiones se incrementan durante los picos máximos del ciclo de 11 años, ya mencionados. De esta manera llegan emisiones ultravioletas a la ionósfera, aumentando la frecuencia máxima utilizable en la capa F2 y posibilitando comunicaciones de mayor distancia en HF e inclusive favorecer las comunicaciones en las bandas inferiores de VHF. Las predicciones de las condiciones de propagación toman en cuenta el flujo solar y las manchas solares en conjunto con otras variables. [14]