

**Atmósfera**, mezcla de gases que rodea un objeto celeste (como la Tierra) cuando éste cuenta con un campo gravitatorio suficiente para impedir que escapen. La atmósfera terrestre está constituida principalmente por nitrógeno (78%) y oxígeno (21%). El 1% restante lo forman el argón (0,9%), el dióxido de carbono (0,03%), distintas proporciones de vapor de agua, y trazas de hidrógeno, ozono, metano, monóxido de carbono, helio, neón, kriptón y xenón.

La actual mezcla de gases se ha desarrollado a lo largo de 4.500 millones de años. La atmósfera primigenia debió estar compuesta únicamente de emanaciones volcánicas. Los gases que emiten los volcanes actuales están formados por una mezcla de vapor de agua, dióxido de carbono, dióxido de azufre y nitrógeno, sin rastro apenas de oxígeno. Si ésta era la mezcla presente en la atmósfera primitiva, han tenido que desarrollarse una serie de procesos para dar lugar a la mezcla actual. Uno de ellos fue la condensación. Al enfriarse, la mayor parte del vapor de agua de origen volcánico se condensó, dando lugar a los antiguos océanos. También se produjeron reacciones químicas. Parte del dióxido de carbono debió reaccionar con las rocas de la corteza terrestre para formar carbonatos, algunos de los cuales se disolverían en los nuevos océanos. Más tarde, cuando evolucionó en ellos la vida primitiva capaz de realizar la fotosíntesis, los organismos marinos recién aparecidos empezaron a producir oxígeno. Se cree que casi todo el oxígeno que en la actualidad se encuentra libre en el aire procede de la combinación fotosintética de dióxido de carbono y agua. Hace unos 570 millones de años, el contenido en oxígeno de la atmósfera y los océanos aumentó lo bastante como para permitir la existencia de la vida marina y la evolución de animales terrestres capaces de respirar aire.

El contenido en vapor de agua del aire varía considerablemente, de 190 partes por millón (ppm) a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta 42.000 ppm a  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Otros elementos que en ocasiones constituyen parte de la atmósfera en cantidades minúsculas son el amoníaco, el sulfuro de hidrógeno y óxidos, como los de azufre y nitrógeno cerca de los volcanes, arrastrados por la lluvia o la nieve. No obstante, el principal riesgo se centra en los óxidos y otros contaminantes emitidos a la atmósfera por las industrias y los vehículos debido a los efectos dañinos que originan cuando forman la lluvia ácida. Hay además muchas posibilidades de que el progresivo incremento de dióxido de carbono, producido sobre todo por los combustibles fósiles desde el siglo pasado, pueda afectar al clima planetario a través del llamado efecto invernadero.

Hay similar preocupación por el brusco aumento del contenido de metano en la atmósfera. Su concentración ha aumentado un 11% desde 1978. Más o menos el 80% del gas es producido por descomposición en arrozales, pantanos, intestinos de los animales herbívoros, y por las termitas tropicales. Añadido al efecto invernadero, el metano reduce el volumen atmosférico de iones hidroxilo, alterando así la capacidad de la atmósfera para autodepurarse de contaminantes.

El estudio de muestras indica que hasta los 88 km por encima del nivel del mar la composición de la atmósfera es sustancialmente la misma que al nivel del suelo. El movimiento continuo ocasionado por las corrientes atmosféricas contrarresta la tendencia de los gases más pesados a permanecer por debajo de los más ligeros. En la parte más baja de la atmósfera está presente, en proporciones muy reducidas, el ozono, un isótopo del oxígeno con tres átomos en cada molécula. La capa atmosférica que va de los 19 a los 48 km tiene un mayor contenido en ozono, producido por la radiación ultravioleta procedente del Sol. Pero, incluso en este estrato, el porcentaje es sólo de un 0,001 por volumen. Las perturbaciones atmosféricas y las corrientes descendentes arrastran distintas proporciones de ozono hacia la superficie terrestre. En las capas bajas de la atmósfera, la actividad humana incrementa la cantidad de ozono, que se convierte en un contaminante capaz de ocasionar daños graves en las cosechas.

La capa de ozono se ha convertido en motivo de preocupación desde comienzos de la década de 1970, cuando se descubrió que los clorofluorocarbonos (CFC), o clorofluorometanos, estaban siendo vertidos a la atmósfera en grandes cantidades a consecuencia de su empleo como refrigerantes y como propelentes en los aerosoles. La preocupación se centraba en la posibilidad de que estos compuestos, a través de la acción solar, pudiesen

atacar fotoquímicamente y destruir el ozono estratosférico, que protege la superficie del planeta del exceso de radiación ultravioleta. El resultado ha sido que, en los países industrializados, se ha abandonado la utilización de clorofluorocarbonos para todos aquellos usos que no son esenciales. Los posteriores estudios acerca de la amenaza que en la actualidad representa la actividad humana para la capa de ozono no son concluyentes.

La atmósfera se divide en varios niveles. En la capa inferior, la troposfera, la temperatura suele bajar 5,5 °C por cada 1.000 metros. Es la capa en la que se forman la mayor parte de las nubes. La troposfera se extiende hasta unos 16 km en las regiones tropicales (con una temperatura de -79 °C) y hasta unos 9,7 km en latitudes templadas (con una temperatura de unos -51 °C). A continuación está la estratosfera. En su parte inferior la temperatura es prácticamente constante, o bien aumenta ligeramente con la altitud, especialmente en las regiones tropicales. Dentro de la capa de ozono, aumenta más rápidamente, con lo que, en los límites superiores de la estratosfera, casi a 50 km sobre el nivel del mar, es casi igual a la de la superficie terrestre. El estrato llamado mesosfera, que va desde los 50 a los 80 km, se caracteriza por un marcado descenso de la temperatura al ir aumentando la altura.

Gracias a las investigaciones sobre la propagación y la reflexión de las ondas de radio, sabemos que a partir de los 80 km, la radiación ultravioleta, los rayos X y la lluvia de electrones procedente del Sol ionizan varias capas de la atmósfera, con lo que se convierten en conductoras de electricidad. Estas capas reflejan de vuelta a la Tierra ciertas frecuencias de ondas de radio. Debido a la concentración relativamente elevada de iones en la atmósfera por encima de los 80 km, esta capa, que se extiende hasta los 640 km, recibe el nombre de ionosfera. También se la conoce como termosfera, a causa de las altas temperaturas (en torno a los 400 km se alcanzan unos 1.200 °C). La región que hay más allá de la ionosfera recibe el nombre de exosfera y se extiende hasta los 9.600 km, lo que constituye el límite exterior de la atmósfera.

La densidad del aire seco al nivel del mar representa aproximadamente un 1/800 de la densidad del agua. A mayor altitud desciende con rapidez, siendo proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura. La presión se mide mediante un barómetro y su valor, expresado en torrs, está relacionado con la altura a la que la presión atmosférica mantiene una columna de mercurio; 1 torr equivale a 1 mm de mercurio. La presión atmosférica normal a nivel del mar es de 760 torrs, o sea, 760 mm de mercurio. En torno a los 5,6 km es de 380 torrs; la mitad de todo el aire presente en la atmósfera se encuentra por debajo de este nivel. La presión disminuye más o menos a la mitad por cada 5,6 km de ascensión. A una altitud de 80 km la presión es de 0,007 torr.

La troposfera y la mayor parte de la estratosfera pueden explorarse mediante globos sonda preparados para medir la presión y la temperatura del aire y equipados con radiotransmisores que envían la información a estaciones terrestres. Se ha explorado la atmósfera más allá de los 400 km de altitud con ayuda de satélites que transmiten a tierra las lecturas realizadas por los instrumentos meteorológicos. El estudio de la forma y el espectro de la aurora ofrece información hasta altitudes de 800 kilómetros.

**Troposfera**, capa inferior de la atmósfera terrestre y escenario de todo los procesos meteorológicos. La troposfera 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 troposfera y la estratosfera.

La troposfera 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 troposfera decrece con la altitud a razón de 5 y 6 °C/km. En la troposfera, 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.

**Estratosfera**, 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 estratosfera carece

casi por completo de nubes u otras formaciones meteorológicas.

**Mesosfera**, capa de la atmósfera terrestre situada entre 50 y 80 km por encima de la superficie. Está por encima de la estratosfera y por debajo de la ionosfera (esta capa también se conoce como termosfera). La estratosfera y la mesosfera reciben a veces el nombre de atmósfera media. La interfase entre estratosfera y mesosfera se llama estratopausa, y mesopausa la que separa la mesosfera de la termosfera.

Pese a que la mesosfera 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 troposfera (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 estratosfera, a una altitud inferior, provoca el máximo calentamiento solar cerca de la estratopausa. La mesosfera es distinta de la estratosfera, 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 mesosfera.

La disminución de la temperatura combinada con la baja densidad del aire en la mesosfera (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 mesosfera 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 mesosfera en el verano polar a través del ecuador y desciende hacia la estratosfera en el invierno polar.

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 mesosfera está aún iluminada por el Sol, mientras que la superficie está ya en la oscuridad). Estas nubes se llaman noctilúcidas.

La mesosfera contiene la parte de la ionosfera llamada región D, donde la ionización de oxígeno molecular ( $\text{O}_2$ ) y atómico (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 estratosfera ecuatorial inferior) hasta la mesosfera, 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 mesosfera, éste es el primer lugar en que se dejan sentir los efectos de cantidades pequeñas de algunos compuestos antropogénicos.

**Ionosfera**, nombres dados a una o varias capas de aire ionizado en la atmósfera que se extienden desde una altura de casi 80 km sobre la superficie terrestre hasta 640 km o más. A estas distancias, el aire está enrarecido en extremo, presenta una densidad cercana a la del gas de un tubo de vacío. Cuando las partículas de la atmósfera experimentan una ionización por radiación ultravioleta, tienden a permanecer ionizadas debido a las mínimas colisiones que se producen entre los iones.

La ionosfera ejerce una gran influencia sobre la propagación de las señales de radio. Una parte de la energía radiada por un transmisor hacia la ionosfera es absorbida por el aire ionizado y otra es refractada, o desviada,

de nuevo hacia la superficie de la Tierra. Este último efecto permite la recepción de señales de radio a distancias mucho mayores de lo que sería posible con ondas que viajan por la superficie terrestre.

Sin embargo, estas ondas refractadas alcanzan el suelo sólo a determinadas distancias definidas del transmisor; la distancia depende del ángulo de refracción y de la altura. Así, una señal de radio puede no ser detectable a 100 km de la fuente, pero sí a 500 km. Este fenómeno se conoce como *skip*. En otras zonas, las señales terrestres y las refractadas por la ionosfera pueden alcanzar el receptor e interferir una con otra produciendo el fenómeno llamado *fading*.

La importancia de la refracción en la ionosfera decrece con el incremento de la frecuencia de las ondas; para frecuencias muy altas es casi inexistente. Por lo tanto, la transmisión a larga distancia de ondas de radio de alta frecuencia se limita a la línea del horizonte. Este es el caso de la televisión y de la radio de frecuencia modulada (FM), donde las transmisiones de larga distancia sólo pueden producirse en línea recta, como entre la tierra y un satélite de telecomunicaciones; la señal se puede enviar entonces desde el satélite hasta algún punto lejano en tierra.

La ionosfera suele dividirse en dos capas principales: la inferior, designada como capa E (a veces llamada capa de Heaviside o de Kennelly–Heaviside) que se sitúa entre 80 y 112 km sobre la superficie terrestre y que refleja las ondas de radio de baja frecuencia; y la superior, F o de Appleton, que refleja ondas de radio con frecuencias mayores. Esta última se divide además en una capa F1, que empieza a unos 180 km sobre la tierra; y la capa F2, que surge a unos 300 km de la superficie. La capa F se eleva durante la noche, por tanto cambian sus características de reflexión.