



METEOROLOGIA DESCRIPTIVA Y APLICACIONES EN CHILE.

JUAN INZUNZA B.
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA ATMÓSFERA Y DEL OCÉANO

INDICE.

BORRADOR

CAPITULO 1. CONOCIENDO LA ATMÓSFERA.

1.1 EL UNIVERSO.

En el universo se usan términos con nombres exóticos para indicar a los astros como galaxias, supernovas, quasares, pulsares, enanas blancas, gigantes rojas, hoyos negros, espacio intergaláctico, etc. Las distancias en el universo son tan grandes que se miden en función del tiempo que la luz demora en recorrer una longitud dada. Generalmente se usa el año luz, que es la distancia que recorre la luz en un año. La velocidad de la luz es aproximadamente 300.000 km por segundo, por lo tanto un año luz tiene una longitud aproximada de 9.45×10^{15} m.

Todas las estrellas que conocemos están incluidas en un gigantesco sistema de estrellas llamado la *Vía Láctea*, que es el nombre de nuestra *galaxia*. La Vía Láctea tiene forma de espiral, con un diámetro de 100.000 años luz y un grosor mayor en su centro de 10.000 años luz (figura 1.1). Nuestro sistema solar se encuentra lejos del centro de esta espiral, aproximadamente a la mitad del camino desde el centro hacia la periferia. En nuestro paso hacia el infinito surge la siguiente pregunta ¿hay algo más allá de nuestra galaxia? En la constelación de Andrómeda (figura 1.2), que brilla en lo alto de los cielos del hemisferio norte durante el otoño, puede verse a simple vista una mancha brumosa. Es la gran Nebulosa de Andrómeda, un sistema de estrellas de tamaño y forma aproximadamente similar a nuestra galaxia, que se encuentra a unos dos millones de años luz de distancia.

Existen cientos de miles de millones de estrellas (del orden de 10^{11}) solo en la vía Láctea, que es una de las billones (10^{12}) de galaxias del universo. Todas las galaxias forman un sistema mayor llamado *metagaláctico*, cuyo tamaño se calcula en billones de años luz. Cualquiera sea la dirección en que miremos, no hallamos el fin de este sistema, ¡las distancias son enormes! ¿Estaremos solos en el Universo?

Figura 1.1 Vista Parcial de la Vía Láctea, parte central.



Figura 1.2 Galaxia Andrómeda



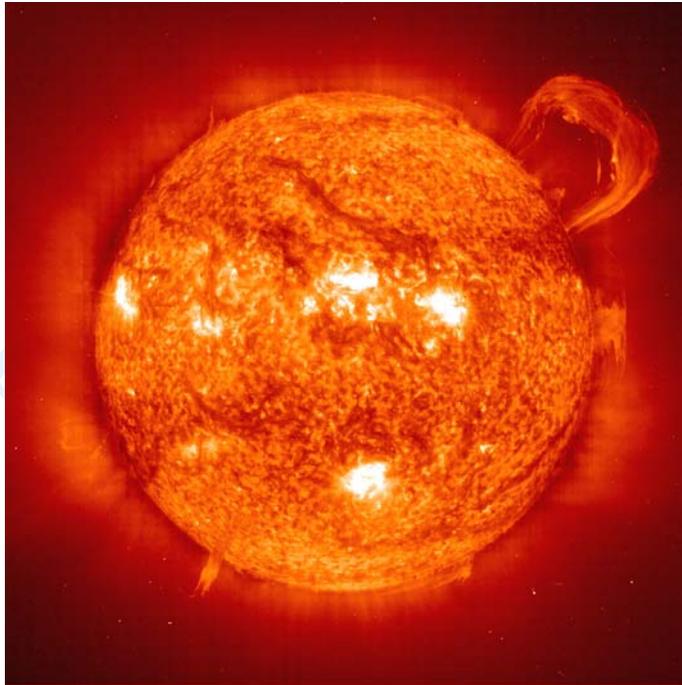
Un satélite que se mueva con una velocidad de 27.000 km/hr, dando una vuelta a la Tierra en 90 minutos, demoraría 25 años en llegar a Plutón. La estrella más cercana a la Tierra después del Sol, está 250.000 veces más lejos que él, es la estrella Alfa Centauro, se encuentra aproximadamente a 4 años luz de la Tierra. Esta distancia significa que una nave espacial que viajase a la mayor velocidad alcanzada sobre la Tierra, demoraría más de 100.000 años en llegar allí. Las estrellas que se ven en la noche están a una distancia de al menos 10 años luz de nosotros.

1.1.1 El Sol.

El *Sol* es una estrella que la vemos muy brillante, porque se encuentra muy cerca nuestro, sólo a 149.600.000 km de la Tierra u 8 minutos luz, a esta distancia se le llama Unidad Astronómica. El Sol es una estrella enana amarilla, una esfera de gas de 1.392.000 km de diámetro, enormemente comprimido por gravedad, y está muy caliente producto de las fusiones nucleares (figura 1.3). Su masa es $1,99 \times 10^{30}$ kg, 330.000 veces mayor que la de la Tierra. Convierte 4×10^6 toneladas de materia en energía cada segundo, cantidad despreciable comparada con su masa total. La temperatura en su centro es del orden de 14 millones de grados Celsius, y en su superficie de aproximadamente 5700° C. Su edad es del orden de 5000 millones de años, y está en la mitad de su vida útil. Cuando muera se convertirá en gigante roja, acabándose la fuente de energía para todos los procesos de la vida, pero usted puede dormir tranquilo ya que el Sol seguirá saliendo y poniéndose por algunos miles de millones de años más.

El Sol es la principal fuente de energía para todos los procesos que ocurren en la Tierra, más del 99,9% de la energía del sistema tierra-atmósfera-oceano proviene del Sol. La Tierra intercepta sólo una pequeñísima cantidad de la energía total que emite el Sol, del orden de 5×10^{-10} del total, pero es suficiente para mantener el sistema climático. Otras fuentes de energía son la radiación de la Luna, energía liberada por los terremotos, volcanes, energía eólica, etc.

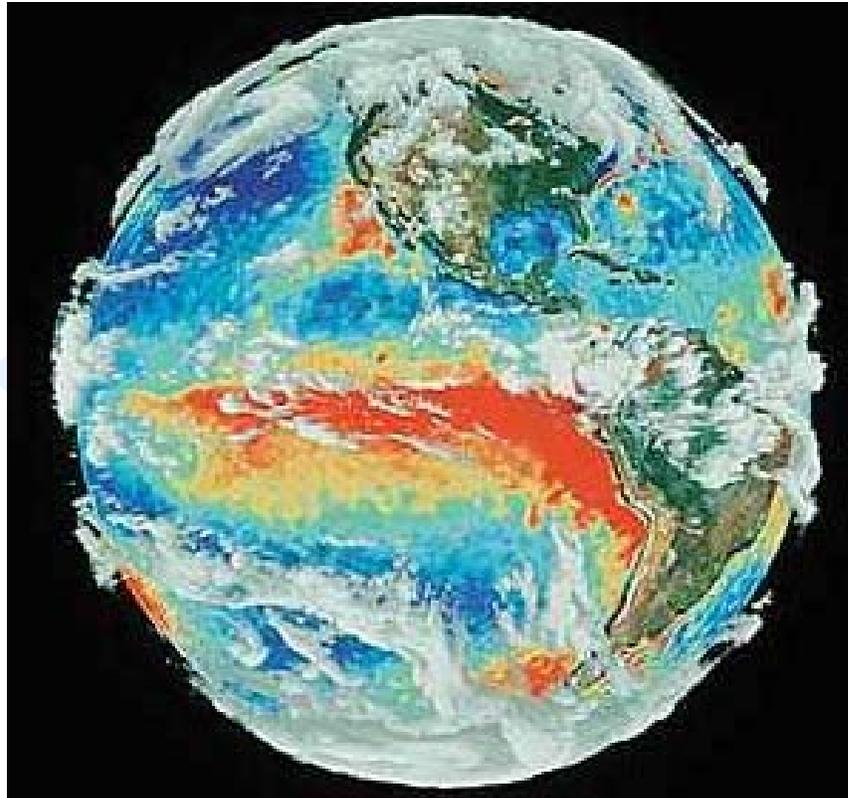
Figura 1.3 Fotografía con rayos X del Sol.



1.1.2 La Tierra.

La Tierra es un satélite del Sol, es el quinto planeta más grande del Sistema Solar (figura 1.4). La Tierra gira alrededor del Sol con un movimiento llamado de ***traslación***, a 107280 km/h ó 29.8 km/s, completa una vuelta en 365,242199 días, definiendo el ciclo anual. Describe una órbita elíptica, la menor distancia al Sol, llamada perihelio es de 147×10^6 km y se produce el 3 de enero, y la mayor distancia al Sol llamada afelio es de 152×10^6 km, se produce el 4 de julio. Aunque la Tierra esta más cerca del Sol en enero que en julio, esta diferencia no juega un rol importante en la distribución estacional de temperatura, por ejemplo en enero, cuando la Tierra está mas cerca del Sol, esta en invierno el hemisferio norte.

Figura 1.4. Nuestro Planeta.



La Tierra gira sobre un eje propio en 23 horas 56'4'', tiempo que se llama día sidereal, levemente menor al día calendario, que es el promedio entre dos cruces sucesivos del Sol por un meridiano de igual longitud geográfica. Este es el movimiento de **rotación**, que produce el ciclo diario del día y la noche. Su radio medio es 6371 km, su masa 5.976×10^{24} kg y su densidad media $5,517 \text{ gr/cm}^3$. Solo el 29% de su superficie es tierra, el resto es agua líquida de los océanos, lagos, ríos, etc. Su atmósfera tiene un 78% de nitrógeno (N_2) y un 21% de oxígeno (O_2), mas otros gases, como vapor de agua, bióxido de carbono (CO_2), además de polvo, contaminación y todo tipo de impurezas.

1.1.3 La Luna.

La Tierra tiene un satélite natural, la Luna que esta a 384.400 km de distancia (figura 1.5). La luz de la Luna es reflejo de la luz solar, sus fases dependen de la posición relativa del Sol, la Tierra y la Luna. Gira sobre su eje una vez cada 27.3 días que es lo mismo que tarda en girar en torno a la Tierra (lo que no deja de ser curioso), por eso las malas lenguas dicen que la Luna está enamorada de la Tierra, porque siempre tiene su misma cara mirando a la Tierra.

Otra coincidencia curiosa de la naturaleza es que el Sol tiene un diámetro 390 veces mayor que la Luna y está 390 veces más lejos, por lo que el Sol y la Luna parecen tener el mismo tamaño, por esto en los eclipses total de Sol la Luna lo tapa completamente. Esta circunstancia es muy esperada por los astrónomos para hacer estudios de la superficie solar.

Figura 1.5 La Luna.



1.2 ESFERAS DE LA TIERRA.

El medio ambiente físico de la tierra se considera formada por tres grandes partes: la tierra sólida, la porción de agua que es la hidrosfera y la atmósfera que es la envoltura gaseosa que la rodea y que será nuestro tema de estudio. Se considera también la biosfera, que está asociada con cada una de las tres regiones anteriores y es parte integral de la Tierra.

1.2.1 Tierra sólida.

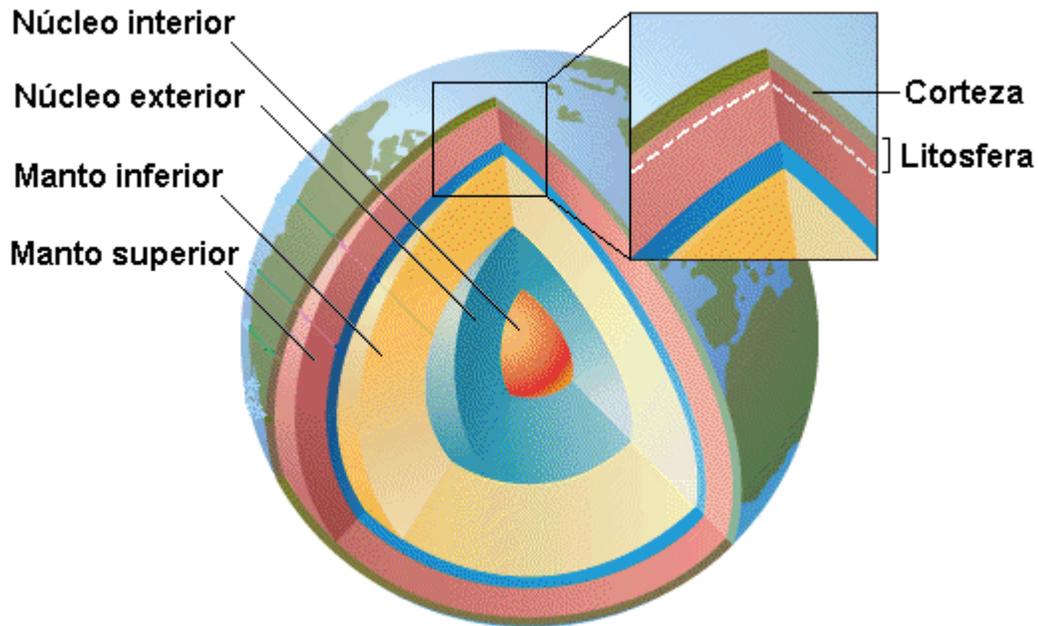
Formada por tres unidades principales: el núcleo denso, el manto menos denso y la corteza, que se muestran en la figura 1.6. El término litosfera se refiere a la capa exterior rígida de la Tierra que incluye la corteza y la parte más externa del manto. La corteza es una delgada capa comparada con el radio terrestre, que tiene espesor medio de 20 km y varía entre 5 km en las cuencas de los océanos a más de 35 km en continentes. Es importante porque en esta capa se encuentran las fuentes minerales y de energía que son básicos en el mundo moderno, además que su conocimiento permite comprender la historia y naturaleza de nuestro planeta.

1.2.2 Hidrosfera.

Es la porción de agua del planeta. Esta dinámica masa de líquido está continuamente en movimiento desde los océanos al aire, del aire a la tierra y de aquí de nuevo al océano. La principal contribución a la hidrosfera es de los océanos que cubren el 71 % de la superficie terrestre y son el 97.5 % del total de agua de la hidrosfera, el resto es de los glaciares con 2.05 %, agua del suelo (ríos, lagos, etc) con 0.43 % y lo que falta 0.02 % es de otro origen (humedad, vapor, etc.) Los hielos o glaciares sobre la Tierra, como están formados por agua sólida son parte de la hidrosfera, no de la tierra sólida. Algunas veces se consideran como una esfera pro-

pia de la Tierra y se les da el nombre de criosfera. Son la mayor reserva de agua dulce del mundo, con un 85 % de agua fresca.

Figura 1.6 Capas de la Tierra.



1.2.3 Atmósfera.

Atmósfera es una mezcla de gases que rodea a un objeto celeste (como la Tierra) cuando éste cuenta con un campo gravitatorio suficiente para impedir que escapen. La atmósfera terrestre es una delgada envoltura gaseosa, parte integral del planeta, está constituida principalmente por nitrógeno (78%) y oxígeno (21%). El 1% restante lo forman el argón, dióxido de carbono, vapor de agua, y trazas de hidrógeno, ozono, metano, helio, neón, kriptón, xenón. Su densidad media en superficie es 1.29 kg/m^3 .

No solo proporciona el aire que respiramos, sino que también nos protege del intenso calor del sol y de su radiación peligrosa. El continuo intercambio de energía entre la atmósfera y la superficie de la Tierra produce el tiempo meteorológico. Si no hubiera atmósfera, la Tierra sería igual que la Luna, sin vida.

1.2.4 Biosfera.

Incluye todas las formas de vida sobre la Tierra, que se puede encontrar en la tierra sólida, la hidrosfera y la atmósfera, donde se pueden desarrollar los organismos vivos.

1.3 METEOROLOGIA, TIEMPO Y CLIMA.

Por los efectos combinados de la energía del Sol y los movimientos de la Tierra, la atmósfera reacciona produciendo diversos tipos de tiempo que a su vez crean los patrones globales del clima. Tiempo y clima no son idénticos, pero tienen mucho en común.

1.3.1 Algo de historia.

Los estudiosos de la antigua Grecia mostraban gran interés por la atmósfera. Ya en el año 400 AC Aristóteles escribió un tratado llamado “Meteorológica”, donde abordaba el “estudio de las cosas que han sido elevadas”; un tercio del tratado está dedicado a los fenómenos atmosféricos y el término ***meteorología*** deriva de su título. A lo largo de la historia, gran parte de los progresos realizados en el descubrimiento de leyes físicas y químicas se vio estimulado por la curiosidad que despertaban los fenómenos atmosféricos.

La predicción del tiempo ha desafiado al hombre desde los tiempos más remotos, y buena parte de la sabiduría acerca del mundo exhibida por los

diferentes pueblos se ha identificado con la previsión del tiempo y los almanaques climatológicos. No obstante, no se avanzó gran cosa en este campo hasta el siglo XIX, cuando el desarrollo en las ciencias de la termodinámica y la aerodinámica suministraron una base teórica a la meteorología. Las mediciones exactas de las condiciones atmosféricas son también de la mayor importancia en el terreno de la meteorología, y los adelantos científicos se han visto potenciados por la invención de instrumentos apropiados de observación y por la organización de redes de observatorios meteorológicos para recoger datos. Los registros meteorológicos de localidades individuales se iniciaron en el siglo XIV, pero no se realizaron observaciones sistemáticas sobre áreas extensas hasta el siglo XVII. La lentitud de las comunicaciones también dificultaba el desarrollo de la predicción meteorológica, y sólo tras la invención del telégrafo a mediados del siglo XIX se hizo posible transmitir a un control central los datos correspondientes a todo un país para correlacionarlos a fin de hacer una predicción del clima.

Uno de los hitos más significativos en el desarrollo de la ciencia moderna de la meteorología se produjo en tiempos de la I Guerra Mundial, cuando un grupo de meteorólogos noruegos encabezado por Vilhelm Bjerknes (1862 – 1951), realizó estudios intensivos sobre la naturaleza de los frentes y descubrió que la interacción entre masas de aire genera los ciclones, tormentas típicas del hemisferio norte. Los posteriores trabajos en el campo de la meteorología se vieron auxiliados por la invención de aparatos como el radiosonda, que hizo posible la investigación de las condiciones atmosféricas a grandes alturas. Después de la I Guerra Mundial, un matemático británico, Lewis Richardson (1881 – 1953), realizó el primer intento significativo de obtener soluciones numéricas a las ecuaciones matemáticas para hacer el primer pronóstico meteorológico numérico: con un numeroso equipo de personas hizo cálculos manuales durante casi un año. Sus intentos no dieron resultados en su época, en términos prácticos fueron un rotundo fracaso, no así en términos académicos donde se consideran un éxito, ya que contribuyeron a un progreso explosivo de la predicción meteorológica numérica hasta nuestros días.

1.3.2 Meteorología.

La ***meteorología*** es la rama de la Física que estudia la atmósfera y los fenómenos físicos que en ella tienen lugar. Deriva de las voces griegas *meteoro* y *logos*, que significan fenómeno celeste y tratado. Su objetivo es estudiar los fenómenos atmosféricos y resolver el problema fundamental de la meteorología, a saber, la predicción del tiempo. Es una ciencia observacional, por lo que su comprensión depende fuertemente de los sistemas de medidas y de observación. Incluye el análisis de las variaciones diarias de las condiciones atmosféricas (meteorología sinóptica), el estudio de las propiedades dinámicas, térmicas, eléctricas, ópticas y otras de la atmósfera (meteorología física); el estudio del clima, las condiciones medias y extremas durante largos periodos de tiempo (climatología), la variación de los elementos meteorológicos cerca del suelo en un área pequeña (micrometeorología) y muchos otros fenómenos. El estudio de las capas más altas de la atmósfera (superiores a los 50 km) suele implicar el uso de técnicas y disciplinas especiales, y recibe el nombre de aeronomía. El término aerología se aplica al estudio de las condiciones atmosféricas a cualquier altura.

1.3.3 Tiempo.

El ***tiempo*** se puede considerar como una compleja combinación de movimientos horizontales y verticales de las masas atmosféricas, de su temperatura y de su contenido de agua. Es el estado de la atmósfera en un instante y lugar dado, cambia continuamente, a veces en forma muy errática, por lo que es impredecible.

1.3.4 Clima.

Los movimientos en apariencia desordenados de la atmósfera obedecen a unas leyes; la propia atmósfera manifiesta tendencias regulares, aunque

no constantes, a adoptar estados semejantes en unos mismos lugares y en unos mismos instantes del ciclo solar anual. De esta forma se distinguen frecuentes sucesiones de tipos de tiempo, a los que se llama *clima*. Clima es el efecto a largo plazo de la radiación solar sobre la superficie y la atmósfera de la Tierra en rotación. La palabra clima viene del griego klima, que hace referencia a la inclinación del Sol. Aunque el tiempo cambia erráticamente, es posible encontrar un comportamiento regular de esas variaciones, definiéndose el clima. El modo más fácil de interpretarlo es en términos de la información estadística de muchos años del tiempo, medias anuales o estacionales de temperatura y precipitaciones, en un lugar o región dada, que incluye variaciones extremas y la probabilidad que tales anomalías se produzcan. La *climatología* como ciencia esta estrechamente relacionada con el rápido y progresivo desarrollo de la meteorología. El objetivo de la climatología es tratar de predecir como se va a comportar la atmósfera en el futuro a partir de lo que ha ocurrido con la atmósfera en el pasado. La posibilidad de predecir el clima tiene fuertes implicancias socioeconómicas.

El estudio del tiempo y clima se hace en términos de elementos básicos, cantidades que se miden regularmente. Algunos de los más importantes son temperatura del aire, humedad del aire, presión atmosférica, rapidez y dirección del viento, tipo y cantidad de precipitación, tipo y cantidad de nubes; estas son consideradas las variables del tiempo y clima. Aunque cada una de ellas se estudia en forma separada, se debe tener en cuenta que están relacionadas entre sí, ya que el cambio de una produce una variación de las otras. La comprensión del clima puede ser obtenida con estudios de diagnóstico basados en análisis observacionales tanto de las leyes físicas como de modelos matemáticos.

Las áreas de tierra firme y las marinas, al ser tan variables, reaccionan de modos muy distintos ante la atmósfera, que circula constantemente en un estado de actividad dinámica. Las variaciones día a día en un área dada definen el tiempo meteorológico, mientras que el clima es la síntesis a largo plazo de esas variaciones. El clima se mide por medio de termómetros, pluviómetros, barómetros y otros instrumentos, pero su estudio de-

pende de las estadísticas. Hoy tales estadísticas son realizadas competentemente por ordenadores. Con todo, un resumen sencillo a largo plazo de los cambios climáticos no proporciona una representación exacta del clima. Para obtenerla, es necesario el análisis de los patrones diarios, mensuales y anuales. La investigación de los cambios climáticos en términos de tiempo geológico es el campo de estudio de la paleoclimatología, que requiere las herramientas y métodos de la investigación geológica.

Además de los efectos de la radiación solar y sus variaciones, el clima siempre está bajo la influencia de la compleja estructura y composición de la atmósfera y de los mecanismos por los que ésta y los océanos transportan el calor. Así pues, para cualquier área dada de la Tierra, debe considerarse no sólo su latitud (que determina la inclinación del Sol), sino también su altitud, el tipo de suelo, la distancia del océano, su relación con sistemas montañosos y lacustres, y otras influencias similares. Otra consideración a tener en cuenta es la escala: el término macroclima hace referencia a una región extensa; mesoclima, a una más pequeña; y microclima, a un área diminuta. Por ejemplo, puede especificarse que un buen microclima para cultivar plantas es el que hay al abrigo de grandes árboles y de su sombra.

El clima tiene una gran influencia en la vegetación y la vida animal, incluyendo a los humanos. Desempeña un papel significativo en muchos procesos fisiológicos, desde la concepción y el crecimiento de los seres vivos hasta la salud y la enfermedad. El ser humano, por su parte, puede influir en el clima al cambiar su medio ambiente, tanto a través de la alteración de la superficie de la Tierra como por la emisión de contaminantes y productos químicos, como el dióxido de carbono, a la atmósfera.

1.4 COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA.

Según Aristóteles, el aire era una de los cuatro elementos fundamentales que no podían subdividirse en componentes. Los otros tres elementos eran el agua, el fuego, la tierra. Aún hoy el término aire es usado como si

fuera un solo gas, que no lo es. El aire es una mezcla de gases que forman la atmósfera que rodea la tierra, cada uno de los cuales tienen sus propias propiedades físicas.

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 gas que compone la atmósfera se llama *aire* y está formado por una mezcla de gases: oxígeno, nitrógeno y gases raros, que mantiene una composición aproximadamente constante. El aire también se puede considerar, para fines prácticos, formado por aire seco más vapor de agua, donde el aire seco es aquel que no contiene vapor de agua. El estado del aire cambia, almacena energía en forma de calor y se carga de impurezas, tales como el vapor de agua, bióxido de carbono, varias clases de sales, polvo, partículas líquidas y sólidas, bacterias y microorganismos diversos. La composición de la atmósfera que se muestra en la tabla 1.1, no es constante ni en el tiempo ni en el espacio. Si se excluyen los componen-

tes variables como vapor de agua e impurezas, se considera constante hasta aproximadamente 80 km de altura. En el aire seco el nitrógeno (N₂) y el oxígeno (O₂) ocupan más del 99 % en volumen. Aunque estos gases son los más abundantes y de gran importancia para la vida sobre la Tierra, no tienen importancia en los fenómenos meteorológicos. Esta composición no es al azar, ya que por ejemplo, la cantidad de oxígeno en la atmósfera es la justa, porque si existiera más, se produciría la combustión espontánea, que es una forma de oxidación muy rápida, de las plantas sobre la tierra.

Tabla 1-1. Composición de la troposfera.

| Gas | Fórmula | PM | Volumen en % |
|--------------------|------------------|-----------|----------------------------|
| Nitrógeno | N ₂ | 28.0 | 78.09 |
| Oxígeno | O ₂ | 32.0 | 20.95 |
| Argón | Ar | 39.94 | 0.93 |
| Neón | Ne | 20.2 | 1.8 x 10 ⁻³ |
| Helio | He | 4.0 | 5.3 x 10 ⁻⁴ |
| Metano | CH ₄ | 16.0 | 1.5 x 10 ⁻⁴ |
| Kriptón | Kr | 83.8 | 1.1 x 10 ⁻⁴ |
| hidrógeno | H ₂ | 2.0 | 5.0 x 10 ⁻⁵ |
| xenón | X | 131.3 | 8.0 x 10 ⁻⁶ |
| ozono | O ₃ | 48.0 | 1.0 x 10 ⁻⁸ |
| yodo | I | 126.9 | 3.5 x 10 ⁻⁹ |
| radón | Rn | 222.0 | 6.0 x 10 ⁻¹⁸ |
| otros... | | | menos de 10 ⁻¹⁰ |
| bióxido de carbono | CO ₂ | 44 | 0.02-0.04 |
| vapor de agua | H ₂ O | 18 | 0.0 - 4.0 |

Algunos componentes pueden variar significativamente en el espacio y el tiempo por lo que se llaman componentes variables, entre los que se incluyen el vapor de agua, ozono (O₃) y los aerosoles. Estos gases variables, aunque se encuentran en pequeña proporción, si son de principal importancia en la actividad del tiempo y del clima. La atmósfera tiene

además toda clase de impurezas y contaminación, que también contribuyen a la actividad meteorológica.

1.4.1 Vapor de agua.

La cantidad de vapor de agua en el aire varía considerablemente, desde 0 a cerca de un 4%. El vapor de agua es la fuente de formación de las nubes y la precipitación, lo que basta para comprender su importancia. Pero otro importante papel que tiene en meteorología es su capacidad para absorber energía emitida por la Tierra, como también parte de la energía solar, lo que tiene efecto en el calentamiento de la atmósfera. El vapor de agua también puede cambiar de estado, en el proceso de evaporación se absorbe calor sensible (que se siente), y se mantiene en la atmósfera como calor latente (u oculto), el que posteriormente es liberado en el proceso de condensación del vapor en gotas de nubes.

1.4.2 Aerosoles.

Los movimientos de la atmósfera son suficientes para mantener una gran cantidad de partículas líquidas y sólidas en suspensión en el aire. Aunque el polvo algunas veces opaca el cielo, esas partículas son relativamente grandes y muy pesadas, por lo que permanecen poco tiempo en suspensión. Pero muchas de esas partículas son microscópicas y pueden permanecer suspendidas por largos períodos de tiempo. Estas se originan de diversas fuentes, naturales o humanas, e incluyen sal marina producida por el rompimiento de las olas, polvo muy fino, humo y hollín de industrias e incendios, polen liberado por el viento, ceniza y polvo de erupciones volcánicas, etc. A este conjunto de partículas se les llama aerosoles, y se concentran principalmente en la baja atmósfera. La importancia meteorológica de estos aerosoles está en que sirven como superficie donde puede comenzar la condensación del vapor de agua, pueden absorber o reflejar la radiación solar y reducir la cantidad de luz que llega a la super-

ficie, y contribuyen a observar un fenómeno óptico, el cielo amarillento - naranja - rojizo cuando el Sol esta cerca del horizonte.

1.4.3 Ozono.

Es otro importante componente de la atmósfera, que se encuentra en muy pequeña cantidad, con una distribución no uniforme y un máximo en la estratosfera. El ozono absorbe los rayos ultravioletas del Sol, que son dañinos para todo tipo de vida sobre la Tierra, por lo que el ozono en la atmósfera actúa como una capa protectora de la biosfera. Mas sobre el ozono se hablará posteriormente en el capítulo 11.

1.4.4 Dióxido de carbono, CO₂.

Aunque este gas está presente en pequeña cantidad en la atmósfera, es de gran interés meteorológico por su eficiencia en absorber la energía emitida por la Tierra y su efecto en el calentamiento de la atmósfera. Si bien la concentración de CO₂ en la atmósfera es aproximadamente constante, en las últimas décadas se ha estado incrementando por efecto de la quema de combustibles fósiles como petróleo y carbón, usados para energía, por lo que se considera también como un gas variable. Mas sobre este gas se hablará posteriormente, en el capítulo 11.

1.5 ESTRUCTURA DE LA ATMÓSFERA.

Es obvio que la atmósfera comienza en la superficie de la Tierra y se extiende en la vertical, pero ¿hasta donde llega la atmósfera y donde empieza el espacio exterior? No hay un límite exterior definido y a mucha altura hay muy pocas moléculas de gas, en el espacio interestelar hay un átomo/cm³ y en el espacio intergaláctico un átomo/m³, esta densidad es sólo 10⁻¹⁹ la del aire.

1.5.1 Observaciones en la atmósfera superior

Los métodos modernos de predicción, así como las necesidades de la aviación, exigen que la medición cuantitativa del viento, la presión, la temperatura y la humedad se realicen en la atmósfera libre. Estos datos son recogidos hoy por observadores distribuidos en varios cientos de estaciones dispersas por todos los continentes y desde los barcos dispersos por los océanos.

Para las mediciones rutinarias realizadas en las capas superiores de la atmósfera, los meteorólogos han desarrollado el rawinsonde (radio-wind-sounding device) o radiosonda, que consiste en un instrumento meteorológico ligero (del tamaño de un celular) capaz de medir la presión, la temperatura y la humedad equipado, con un pequeño transmisor de radio de alta frecuencia. El radiosonda, que se muestra en la figura 1.7, se fija a un globo inflado con hidrógeno o helio que lo eleva hasta la atmósfera superior. Las mediciones realizadas por los sensores meteorológicos son transmitidas automáticamente y recibidas por una estación en tierra. Un teodolito o radiodetector sigue la dirección del globo mientras éste es arrastrado por los vientos de las capas superiores de la atmósfera y, midiendo su posición en momentos sucesivos, se puede calcular la velocidad y dirección del viento a diferentes alturas.

Para obtener datos sobre la atmósfera superior se emplean también aviones, en especial cuando los huracanes o los tifones amenazan con afectar a zonas habitadas. Se sigue la pista a estas peligrosas tormentas tropicales con aviones de reconocimiento que se envían para localizar el centro u ojo de la tormenta y realizar mediciones meteorológicas del viento, la temperatura, la presión y la humedad tanto en el interior como en las cercanías de la tormenta.

Los sistemas convencionales de observación de la atmósfera superior empiezan a resultar cada vez más inadecuados para hacer frente a las necesidades de los nuevos métodos de predicción numérica. Las teorías

modernas sobre la circulación atmosférica hacen cada vez más hincapié en la importancia de la unidad global de la atmósfera, y produce gran preocupación que existan enormes regiones oceánicas que permanecen ignotas en la práctica para los métodos convencionales. Se mantienen, con un costo muy elevado, algunos barcos meteorológicos, pero disponer de ellos en número suficiente para lograr una cobertura apropiada, tendría un costo prohibitivo.

Figura 1.7 Radiosonda.



Uno de los nuevos métodos de mayor éxito para la observación general de la atmósfera ha sido el empleo de satélites artificiales. Los satélites que fotografían de forma automática la Tierra en órbitas polares desde una altura de 850 kilómetros, o en órbitas geoestacionarias sobre puntos predeterminados del ecuador, desde una altitud de 35600 kilómetros, suministran imágenes de los sistemas nubosos y las tormentas, a cualquier estación meteorológica equipada para recibir sus transmisiones de radio.

Cap. 1 Conociendo la atmósfera.

Casi todos los servicios meteorológicos importantes del mundo están equipados para recibir estas imágenes, y los países ribereños de los grandes océanos se benefician de la capacidad para mantener una vigilancia continua de las tormentas que amenazan a sus costas. Durante la noche pueden obtenerse imágenes de alta resolución de los sistemas nubosos por medio de la luz infrarroja, los sensores infrarrojo permiten determinar la temperatura de la parte superior de las nubes, y de esta forma hacen posible estimar la altura aproximada de las nubes en la atmósfera.

Los patrones fotográficos suministrados por los satélites tienen una utilidad limitada para los métodos modernos de predicción meteorológica, que se basan en el empleo de mediciones de la temperatura y la presión en el interior mismo de la atmósfera. Se están realizando grandes esfuerzos en la investigación de nuevos métodos para recoger datos sobre la atmósfera superior en todo el mundo. Una de las propuestas en estudio es la Técnica de Sondeo Horizontal Global (Global Horizontal Sounding Technique, GHOST), que combinaría una red general de globos de flotación libre equipados con instrumentos y los datos obtenidos por los satélites para recopilar la información necesaria.

1.5.2 Cambios de presión.

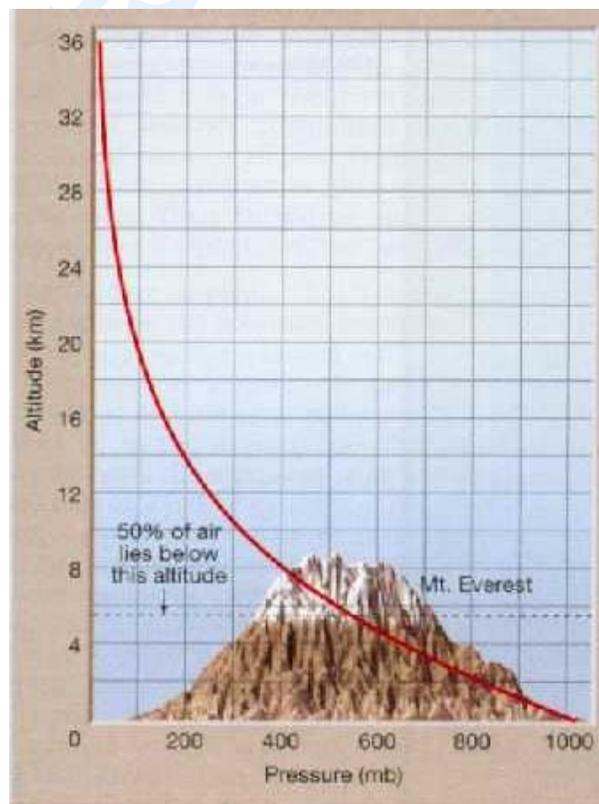
Para entender la extensión vertical de la atmósfera, se puede hacer examinando los cambios de presión con la altura. La presión atmosférica es el peso de la masa de aire sobre la superficie de la Tierra. En superficie es aproximadamente 1000 hectoPascuales o milibares o una atmósfera. Esto es equivalente a soportar un peso de aproximadamente 1 kg por cm² como la superficie del ser humano adulto es del orden de 20000 cm², soportamos una masa de atmósfera equivalente a 20 toneladas.

Aproximadamente la mitad de la masa de atmósfera esta bajo 5.5 km. Debajo de 15 km se encuentra casi el 90 % de la masa de atmósfera, y sobre 100 km sólo hay un 3×10^{-5} % del total de los gases de la atmósfera. Sobre esta altura hay ya tan pocas moléculas de aire que su densidad

es menor que el vacío más perfecto de los laboratorios en la tierra. Pero la atmósfera continúa a mayor altura, la hacemos terminar dependiendo del fenómeno que se quiera estudiar. Comparada con el radio terrestre la atmósfera es un velo muy delgado.

La presión disminuye con la altura en la forma que se muestra en la figura 1.8, porque a medida que nos elevamos encontramos menos moléculas de aire. La disminución de la presión con la altura no es uniforme, es mayor mas cerca de la superficie, donde disminuye aproximadamente un hPa cada 10 metros de altura. Sobre los 20 km de altura la disminución es mas pequeña, y sobre los 100 km la presión es muy baja.

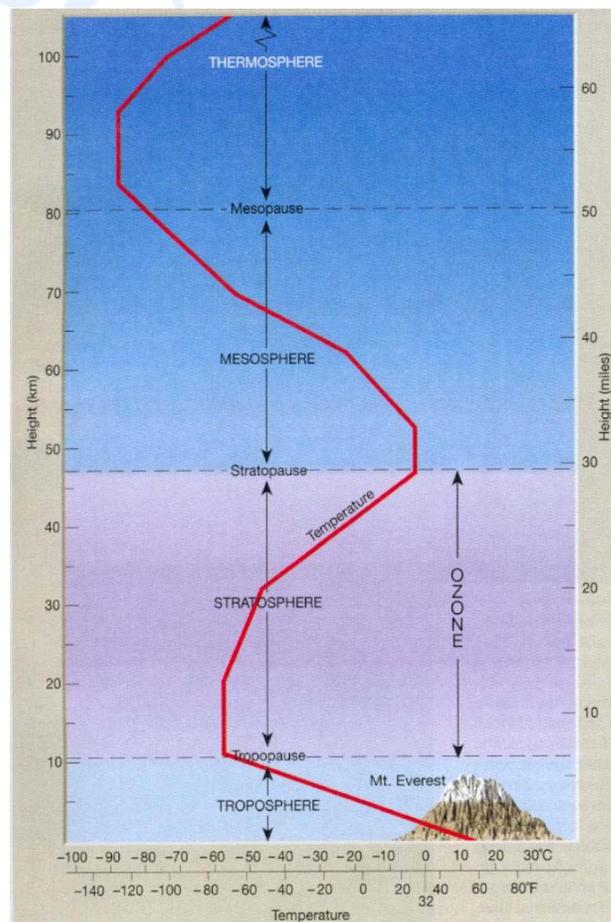
Figura 1.8 Variación de presión con la altura.



1.5.3 Cambios de Temperatura.

Con radiosondas y cohetes se puede medir la presión, temperatura y humedad relativa hasta grandes alturas. La temperatura cambia con la altura, en base a esta variación vertical de temperatura, la atmósfera se puede dividir en cuatro capas que se muestran en la figura 1.9 y que se describen a continuación.

Figura 1.9 Variación de temperatura con la altura.

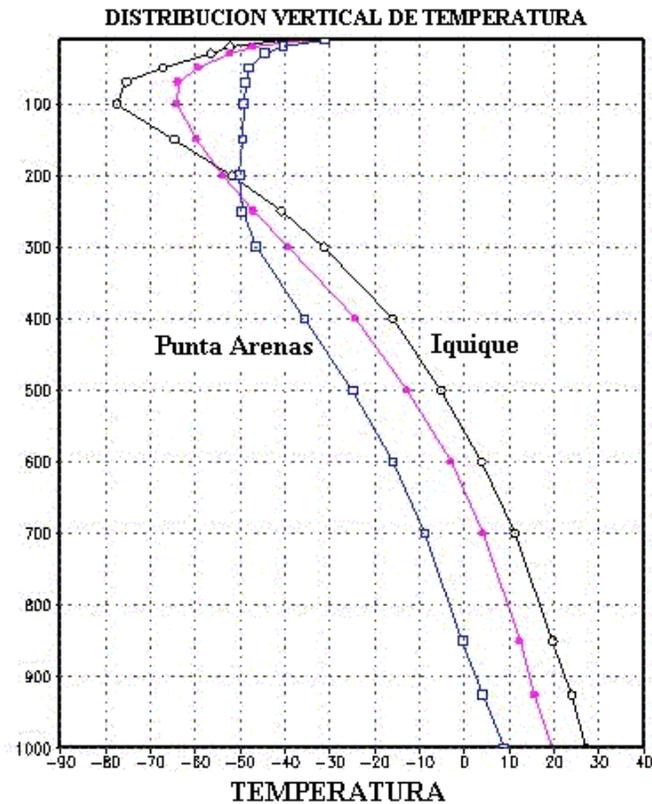


Troposfera.

Es la capa en contacto con la superficie terrestre, donde se desarrolla la vida. Aquí la temperatura disminuye con la altura, esta disminución que no es constante, porque cambia en el espacio y el tiempo, se conoce con el nombre de ***gradiente ambiental de temperatura***. Las variaciones diarias de la temperatura dependen de las condiciones del tiempo. Incluso se puede encontrar capas donde la temperatura aumente con la altura, que se llaman capas de inversión térmica. En promedio global la disminución es de 6.5°C/km , que se conoce como ***gradiente normal de temperatura***. La disminución de temperatura termina a una altura que se conoce como tropopausa, que tiene una ubicación variable, es más baja sobre regiones polares donde se ubica entre 8-9 km y más alta en zonas tropicales donde llega hasta 16-18 km (figura 1.10). La troposfera es la capa donde se producen los fenómenos del tiempo y clima, contiene casi todas las nubes y precipitación, que producen las tormentas. Contiene también casi toda la contaminación.

En la figura 1.10 se observa la variación vertical media anual de temperatura en puntos cercanos a tres lugares representativos de la diferente geografía de Chile: Iquique por el norte, Concepción en el centro y Punta Arenas por el extremo sur. El gráfico se realizó en el Departamento de Física de la Atmósfera y del Océano de la Universidad de Concepción, con datos conocidos como reanálisis, preparados en el National Centers for Environmental Prediction de Washington D.C. y en el National Centers for Atmospheric Research de Boulder, CO, (NCEP/NCAR). Estos datos corresponden a una serie de 51 años desde 1948 a 1998. El eje vertical corresponde a la presión con valores en hPa. De la figura se puede observar claramente que la tropopausa sobre Punta Arenas (53°S) se encuentra a menor altura y tiene una temperatura mayor que en los otros dos lugares. No se nota diferencia en la altura de la tropopausa de Iquique (20.5°S) y de Concepción (36.8°S , curva central), pero sí en su temperatura.

Figura 1.10



Estratosfera.

En la baja estratosfera la temperatura es aproximadamente constante hasta alturas del orden de 20 - 25 km. Luego la temperatura aumenta a valores cercanos a los de superficie hasta aproximadamente 50 km de altura, ya que en esa capa se encuentra la mayor concentración de ozono, que al absorber la radiación ultravioleta del Sol produce un aumento de temperatura. El máximo de ozono se concentra entre los 20 - 35 km.

Mesosfera.

Sobre la estratosfera la temperatura nuevamente decrece con la altura hasta valores del orden de -90°C en 80 km de altura, definiendo la ***mesosfera***. Las temperaturas más bajas de la atmósfera se han medido en esta capa.

Termosfera.

Esta capa se encuentra sobre la mesosfera, se extiende hasta un límite superior no bien definido, donde las temperaturas alcanzan valores mayores que 1000°C , producidas por la absorción por los átomos de oxígeno y nitrógeno de radiación solar de alta energía de onda muy corta. Contiene una muy pequeña porción de masa atmosférica, el aire es muy rarificado.

1.5.4 Cambios en la composición.

En la atmósfera la presión del aire disminuye con la altura. Cuanto más cerca se encuentra de la Tierra, más comprimido está el aire debido a la fuerza de gravedad. Este efecto es compensado por el movimiento térmico de las moléculas de aire. En ausencia de gravedad las moléculas de aire escaparían al espacio exterior. En su estado normal la atmósfera de la Tierra está en un equilibrio entre la fuerza de gravedad que tiende a atraer a las moléculas de aire hasta la superficie y el movimiento térmico que las dispersaría por el espacio.

La atmósfera se compone principalmente de nitrógeno y oxígeno, que ocupan cerca del 99% del total. Si reemplazáramos esta atmósfera por una de hidrógeno, cuyas partículas pesan solo $1/14$ que las del nitrógeno, el efecto compresor de la gravedad disminuiría. Si los demás factores permanecieran invariables, la presión en la atmósfera de hidrógeno no descendería a la mitad sino hasta alcanzar unos 70 km de altura. Si suponemos una *atmósfera ideal*, esto es una atmósfera sin radiación solar,

viento y otras perturbaciones, que se componga solo de hidrógeno y nitrógeno mezclados, los dos gases serían independientes entre si, en el sentido que la concentración del nitrógeno disminuiría a la mitad a los 5 km y la del hidrógeno lo haría a los 70 km (5kmx14). La gravedad concentraría al nitrógeno más pesado cerca de la Tierra, pero el hidrógeno más liviano se dispersaría mas libremente. En esta condición ideal, en nuestra atmósfera se formarían capas de gases superpuestas, desde los más pesados a los más livianos.

El anterior razonamiento permite sugerir una variación vertical de la composición de la atmósfera, que se puede dividir en dos capas:

Homósfera.

Desde la superficie hasta aproximadamente 80 km de altura la composición de la atmósfera es uniforme, definiendo una capa de composición homogénea llamada ***homósfera***.

Heterósfera.

Sobre los 80 km de altura la composición de la atmósfera no es uniforme, esta capa es llamada ***heterósfera***. Desde su base dominan desde los elementos mas pesados hacia arriba: N₂ molecular (1^{ra} capa), O atómico (2^{da} capa), He (3^{era} capa), H (4^{ta} capa).

1.5.5 La ionosfera.

Se conoce además otra capa que no está definida sobre la base de los criterios anteriores, la ***ionosfera***, se encuentra entre 80 - 400 km de altura. La irradiación de un gas con luz ultravioleta, rayos X o rayos gamma, significa que el gas es impactado violentamente por fotones de alta energía, separando electrones de las moléculas. La molécula con electrones menos se llama ***ión*** y queda cargada positivamente. En la

menos se llama **ión** y queda cargada positivamente. En la ionosfera las moléculas de N_2 y los átomos de O son fácilmente ionizados porque absorben alta energía solar de onda corta, perdiendo cada molécula o átomo uno o más electrones, quedando los electrones libres para moverse como corriente eléctrica y el átomo o molécula queda ionizado.

En esta capa se produce un interesante espectáculo de la naturaleza, las auroras. Durante las tormentas solares nubes de protones y electrones se emiten hacia la Tierra, siendo capturados por el campo magnético terrestre. Estas partículas chocan en la ionosfera, energizando los átomos de O y moléculas de N_2 , haciendo que estos emitan luz produciendo las **auroras**, una de cuyas imágenes se muestra en la figura 1.11.

Figura 1.11 Aurora Boreal.



PREGUNTAS.

1. Comentar algunas características del Universo, del Sol y de la Luna.
2. Sabiendo que distancia = rapidez x tiempo, que el radio de la Tierra es 6370 km y que Plutón está a una distancia de 5.75×10^{12} km de la Tierra, verificar los valores dados en la página 13 para el satélite.
3. Demostrar que la estrella Alfa Centauro se encuentra a 4 años luz de la Tierra.
4. Mencionar algunas de las propiedades físicas de la Tierra.
5. Describir las esferas de la Tierra.
6. Explicar la diferencia entre el tiempo y el clima y mencionar sus variables básicas.
7. ¿Cuáles son los principales componentes del aire seco y limpio?
8. ¿Cuáles son los más importantes gases variables en la atmósfera?
9. ¿Qué procesos se producen en el cambio de estado del vapor de agua?
10. ¿Cuál es la importancia meteorológica de los aerosoles?
11. Describir las características de la troposfera.
12. Con referencia al gráfico de la figura 1.8 ¿Cuanto aproximadamente disminuye la presión del aire entre la superficie y 4 km de altura, y entre 4 y 8 km? Basado en su respuesta anterior, cuando aumenta la altura, ¿la presión del aire disminuye en una proporción constante, creciente o decreciente?

Cap. 1 Conociendo la atmósfera.

13. Si la temperatura al nivel del mar fuera 23°C , ¿cual debería ser la temperatura del aire a una altura de 2 km en condiciones promedio?
14. Del gráfico 1.9 de la estructura térmica de la atmósfera determinar cual es aproximadamente la altura y temperatura de la estratopausa. Cual es la altura de la temperatura más baja y su valor.
15. Un día de mediados de marzo en Concepción se mide una temperatura en superficie (nivel del mar) de 20°C . Si la temperatura disminuye con la altura a razón de 6.5°C por kilómetro y la temperatura en la tropopausa es -60°C ¿cuál es la altura de la tropopausa?
16. Si el mismo día de marzo en Arica se mide una temperatura de 26°C y la tropopausa se encuentra a 16 km de altura ¿cuál es la temperatura del aire en la tropopausa? Comentar las diferencias con el resultado de la pregunta 11.