

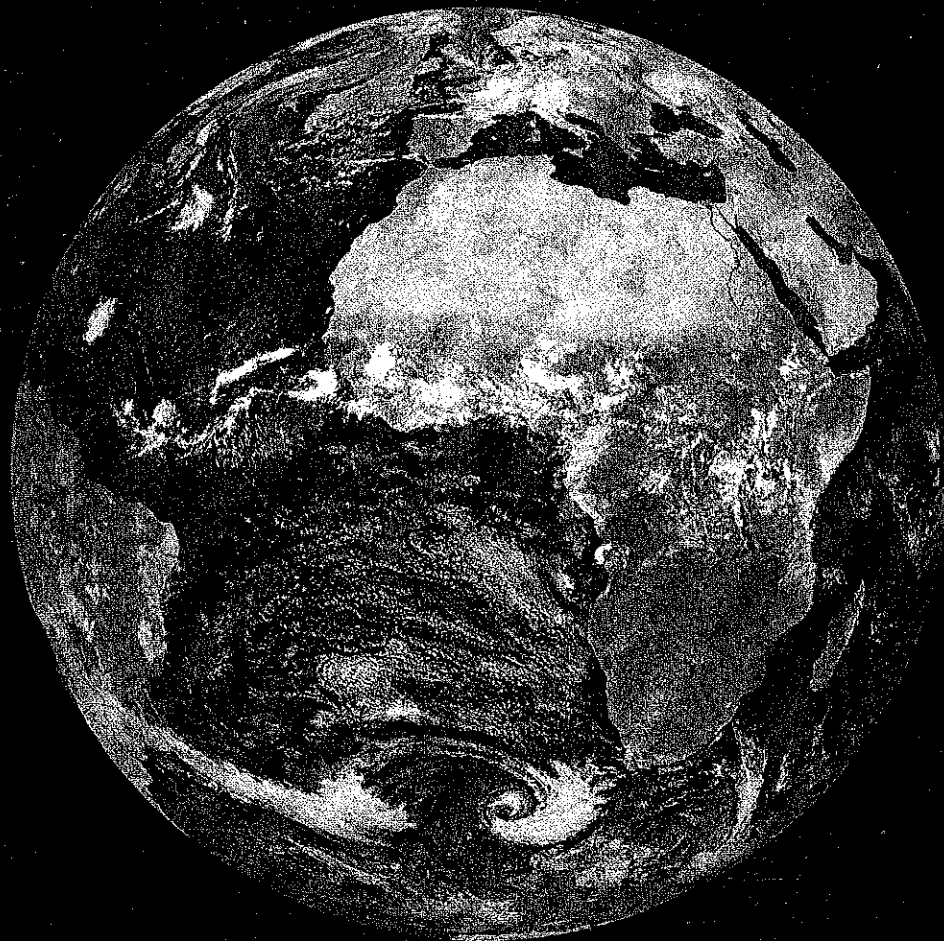
## DINÁMICA DE LAS MASAS FLUIDAS

1. Introducción
2. La atmósfera: composición, estructura y función
3. Dinámica atmosférica vertical
4. Dinámica de las masas fluidas a escala global
5. El clima: concepto y parámetros
6. El clima en nuestras latitudes
7. El clima de las bajas latitudes
8. Cambios climáticos pasados
9. Cambios climáticos presentes y futuros

El sistema denominado masas fluidas está integrado por la atmósfera y la hidrosfera y, en su conjunto, constituye la máquina climática que rige el clima terrestre.

La diferencia de calentamiento entre las zonas tropicales y las polares pone en circulación la hidrosfera y la atmósfera, originando corrientes oceánicas y los vientos que transportan el calor desde las zonas de superávit hasta las de déficit. Esta dinámica condiciona el clima en las distintas regiones del planeta.

Otra evidencia del funcionamiento de la máquina climática lo constituye la formación sobre el globo terrestre de un cinturón de borrascas ecuatoriales y dos cinturones de borrascas subpolares, separadas todas ellas por áreas anticiclónicas despejadas de nubes.



## 1. Introducción

Llamamos capas fluidas a la atmósfera y a la hidrosfera, porque ambas están constituidas por fluidos, aire y agua, respectivamente. La atmósfera y la hidrosfera son los dos subsistemas terrestres más relevantes para el funcionamiento del sistema climático. Ambas constituyen la máquina climática, sistema dinámico que funciona con energía solar y determina el clima en gran medida. Podríamos afirmar que el **ciclo del agua** (Fig. 6.1) constituye la interacción más importante dentro de la máquina climática:

### ! Importante

**S = A U H**

**S** = máquina climática

**A** = atmósfera

**U** = interacciones

**H** = hidrosfera

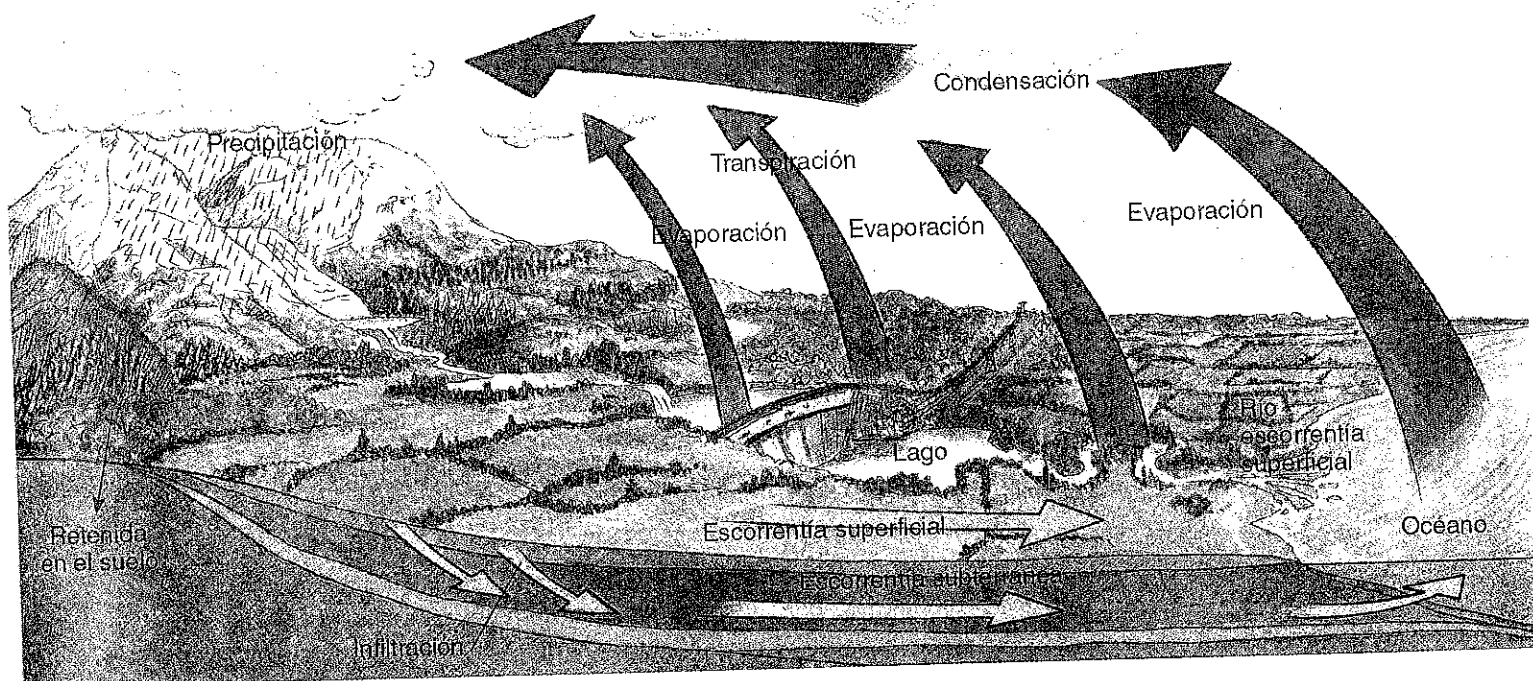


Fig. 6.1. El ciclo del agua.

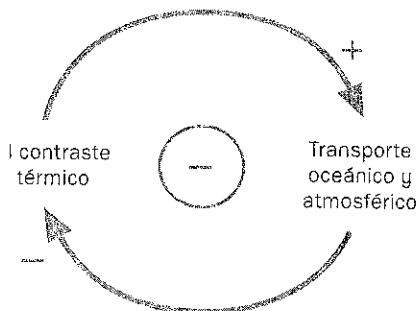
El agua pasa de la hidrosfera a la atmósfera por **evaporación**. Al enfriarse, se **condensa** y se forman las nubes. Con la **precipitación** el agua es devuelta a la tierra en forma líquida o sólida y, a partir de ahí, puede seguir varios caminos: la **escorrentía superficial**, que consiste en un desplazamiento sobre la superficie terrestre hacia las zonas más bajas, ya sea de manera libre o encauzada en los ríos; la **retenida**, cuya cantidad está en función de las características del suelo, del clima (que favorece o dificulta su retención en forma de hielo) y de la acción de los seres vivos que la incorporan, y de la **infiltración** que, atravesando las capas permeables del terreno, se incorpora a las aguas freáticas, dando lugar a la **escorrentía subterránea**, que circula hacia el mar. El agua que se incorporó a la biosfera retorna a la atmósfera por **transpiración** y, unida a la **evaporación** ocurrida sobre la superficie terrestre, se incluye en el concepto de **evapotranspiración**.

La máquina climática es un sistema muy complejo, por lo que su estudio debe realizarse a partir de modelos como única manera de comprender un poco su intrincado funcionamiento que, en esencia, se basa en los movimientos generados debido a la existencia de un gradiente entre dos puntos.

Se llama **gradiente** a la diferencia existente entre dos puntos en alguno de los parámetros atmosféricos (temperatura, humedad o presión).

### Más datos

Una pequeña perturbación atmosférica en Brasil, como el batir de las alas de una mariposa, puede desencadenar un tornado en Texas (**efecto mariposa**). Este efecto ocurre en los **sistemas caóticos**, como por ejemplo, en la atmósfera. Esta es la razón por la que las previsiones meteorológicas son tan difíciles de realizar. Sería como si pidiésemos a un experto que prevea el momento de caída de una hoja seca de un árbol y la trayectoria que seguirá. Una mínima variación, por ejemplo, en la dirección del viento, bastaría para echar por tierra los cálculos más perfectos.



**Fig. 6.2.** Este bucle de realimentación negativa da estabilidad al sistema planetario, llevando el calor de las zonas de superávit a las de déficit. En un planeta sin capas fluidas, si no existiera el transporte, no se amortiguarían las diferencias térmicas.

La existencia de un gradiente o contraste en los valores de presión, temperatura, humedad o densidad, entre dos puntos situados a una cierta distancia (tanto en sentido vertical como horizontal) en el interior de la atmósfera o de la hidrosfera, va a generar un movimiento de circulación del fluido mediante el cual se tiende a amortiguar las diferencias entre un extremo y otro.

En el caso de la atmósfera, el transporte entre los dos puntos lo realiza el viento. En el de la hidrosfera, el transporte se lleva a cabo por las corrientes oceánicas.

Como es lógico, cuanto mayor sea el gradiente entre dos puntos, más vigorosa será la circulación del viento o de las corrientes oceánicas; el flujo cesa en el momento en que los parámetros se igualan, con lo que el gradiente se reduce a cero.

Por ejemplo, cuando existe un **gradiente térmico** (Fig. 6.2) determinado por una diferencia de temperatura entre dos puntos, se producirá un movimiento mediante el cual se transporta calor de un extremo a otro.

El comportamiento de la atmósfera y de la hidrosfera es distinto debido a sus diferencias en cuanto a la densidad (la del aire es 773 veces inferior a la del agua), su compresibilidad (el agua es poco compresible), su movilidad (el aire es de más fácil movilidad), su capacidad para almacenar el calor (la hidrosfera es capaz de almacenar una gran cantidad de la radiación solar recibida en forma de energía térmica) y su capacidad para conducir el calor (la del aire es escasa, la del agua es mayor).

Los desplazamientos de las masas fluidas pueden ser de los dos tipos siguientes:

### Movimientos verticales

Los movimientos verticales arriba y abajo de ambos fluidos dependen de la temperatura a la que se encuentren, lo que, además de generar un gradiente térmico vertical, también afecta a su densidad, ya que tanto el agua como el aire son más densos cuanto menor sea la temperatura a la que se encuentren.

Sin embargo, el sentido en el que se inician dichos movimientos depende de la capacidad para conducir el calor, que es muy diferente en ambos fluidos; el aire es muy mal conductor del calor, por lo que apenas se calienta con la radiación solar directa. Se calienta por debajo, gracias al calor irradiado desde la superficie terrestre, previamente calentada por el sol. Así, el aire superficial, más caliente y menos denso, tenderá a subir, enfriándose a medida que asciende; por su parte, el aire de altura, frío y más denso, tenderá a bajar, calentándose durante el descenso.

La hidrosfera se calienta por arriba, por lo que no puede haber movimientos verticales, ya que el agua superficial, más caliente y menos densa, no tenderá a descender. El movimiento vertical solo será posible en aquellos lugares en los que, debido al clima, el agua de la superficie esté más fría que la del fondo; en cuyo caso, tenderá a bajar, haciendo que la profunda se eleve.

### Movimientos horizontales

El desplazamiento de los vientos, o de las corrientes oceánicas impulsadas por ellos, entre dos zonas geográficas determinadas, se debe al contraste térmico horizontal generado por la desigual insolación de la superficie terrestre (mayor en el ecuador y menor en los polos). Gracias a este transporte de calor se amortiguarán las diferencias térmicas entre los polos y el ecuador terrestre. La presencia de las masas continentales dificulta este transporte de calor, porque frena y desvía vientos y corrientes oceánicas.

## 2. La atmósfera: composición, estructura y función

### 2.1. Composición

La atmósfera primitiva se formó por la desgasificación sufrida por la Tierra durante su proceso de enfriamiento. A esto hay que añadir las aportaciones de ingentes cantidades de polvo y gases a través de los volcanes; las de los seres vivos, que cambiaron drásticamente su composición, aportando  $O_2$  y  $N_2$  y rebajando el  $CO_2$ , y las de la hidrosfera, que aporta vapor de agua, sal marina y compuestos de azufre. La humanidad altera gravemente su composición y sus propiedades con acciones como la quema de combustibles fósiles o la deforestación.

Clasificamos los componentes atmosféricos en tres grupos:

- **Mayoritarios** ( $N_2$ ,  $O_2$ , Ar,  $CO_2$ ).
- **Minoritarios**, que, por estar en muy pequeñas proporciones, se miden en partes por millón (ppm), y a su vez se dividen en **reactivos** (CO,  $CH_4$ , hidrocarburos, NO...) y **no reactivos** (He, Ne, Kr, Xe,  $H_2$ ...).
- **Variables**, como el vapor de agua, cuyo papel es muy importante en la regulación del clima; y los contaminantes, cuyas proporciones están sujetas a fluctuaciones por la proximidad de núcleos urbanos e industriales o por la presencia de corrientes atmosféricas que los transporten a determinados lugares.

$N_2$	78,0
$O_2$	20,9
Ar	0,93
$CO_2$	0,03
Otros	0,14

**Tabla 6.1.** Componentes mayoritaria de la atmósfera.

### 2.2. Estructura y función de la atmósfera

Las funciones de la atmósfera son dos:

- **Actúa como filtro protector:** el Sol emite una serie de partículas (protones y electrones) y de radiaciones electromagnéticas. La mayoría de las partículas solares son desviadas por el campo magnético terrestre, por lo que no alcanzan la superficie terrestre. Las radiaciones electromagnéticas se dividen en tres grupos (onda corta, visible y onda larga) (Fig. 3.12). Las diversas capas de la atmósfera hacen de filtro, de manera que solo las radiaciones del centro del espectro consiguen atravesarlas sin dificultad. Se trata en su mayoría de luz visible que, además de intervenir en la fotosíntesis, participa en la dinámica de las masas fluidas poniéndolas en circulación por todo el planeta.

Las de longitud de onda corta (rayos gamma, rayos X y UV de menor longitud de onda) tienen una gran energía y un gran poder de penetración. Todas ellas son filtradas por las capas altas de la atmósfera. Si dichas radiaciones llegaran a la Tierra, actuarían como cuchillos, rompiendo moléculas debido a la ionización de sus átomos. Por lo que son incompatibles con la vida fuera del agua. Por el contrario, las de onda más larga, como las de radio, no tienen ningún impedimento para su penetración; lo que ocurre es que quedan ahogadas por las emitidas desde la Tierra y que son usadas por nosotros como medio de comunicación.

- **Función reguladora:** es su principal función. La cantidad de radiación incidente sobre la Tierra, o balance de radiación solar, depende, además de la radiación incidente, de la estructura física y de la composición química de la atmósfera, que dan lugar a las condiciones térmicas especiales de nuestro planeta que, a diferencia de los planetas vecinos, lo hacen apto para la vida.

Las capas de la atmósfera son (Fig. 6.3):

- **Troposfera.** Es la capa inferior de la atmósfera y termina en la tropopausa. Su altitud varía con la latitud (es aproximadamente de 9 km en los polos, de 12 km en las latitudes medias y de 16 km en el ecuador) y con las estaciones (es más elevada en verano que en invierno, porque el aire cálido es menos denso). Sus características son:

- **Hace posible la vida**, porque en ella se concentran el 80% de los gases atmosféricos ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ) necesarios para la vida.
- **La presión atmosférica es mayor en las capas bajas.** La presión atmosférica (peso ejercido por la atmósfera sobre la superficie terrestre) es mayor junto a la superficie terrestre, debido a que los gases atmosféricos se comprimen y concentran en esa zona.  
La presión atmosférica desciende bruscamente con la altitud, desde unos 1.013 mb (milibares) junto a la superficie terrestre hasta unos 200 mb en la tropopausa.
- **La temperatura disminuye con la altura.** En la parte inferior hay unos 15 °C como media y desciende hasta unos -70 °C en la tropopausa (recuerda que el aire se calienta por debajo). Esta disminución tiene un valor medio de unos 0,65 °C/100 m y se denomina **gradiente vertical de temperatura (GVT)**.
- **Es la capa del efecto invernadero**, originado por la presencia de ciertos gases ( $CO_2$ , vapor de agua, etc.) que absorben prácticamente toda la radiación infrarroja procedente del Sol y, aproximadamente, el 88% de la emitida por la superficie terrestre (Fig. 6.52).
- **Es la capa del clima.** En ella se producen la mayor parte de los cambios meteorológicos: se forman la mayoría de las nubes y de las precipitaciones y existen movimientos verticales (ascendentes y descendentes) del aire que lo reciclan, facilitando la dispersión de los contaminantes y del polvo en suspensión procedente de los desiertos, los volcanes, la sal marina, el transporte y las actividades industriales. Estos se acumulan en la denominada **capa sucia** (los primeros 500 m) y su presencia se detecta por la coloración rojiza del cielo del amanecer y del atardecer.

**Vocabulario**

**difusión:** desviación hacia todas las direcciones, producida cuando las ondas electromagnéticas chocan contra partículas de polvo atmosférico. Es un proceso muy selectivo, dependiendo del tamaño de las partículas y de la longitud de onda de la radiación, pero gracias a él se pueden ver los objetos aunque no reciban iluminación directa. El color azul difunde más al tener la menor longitud de onda, originando el color del cielo. Durante el atardecer, la mayor inclinación de los rayos solares hace que se difunda el rojo. En atmósferas contaminadas, al existir partículas de mayor tamaño, aumenta la difusión de todos los colores, lo que equivale a la luz blanca.

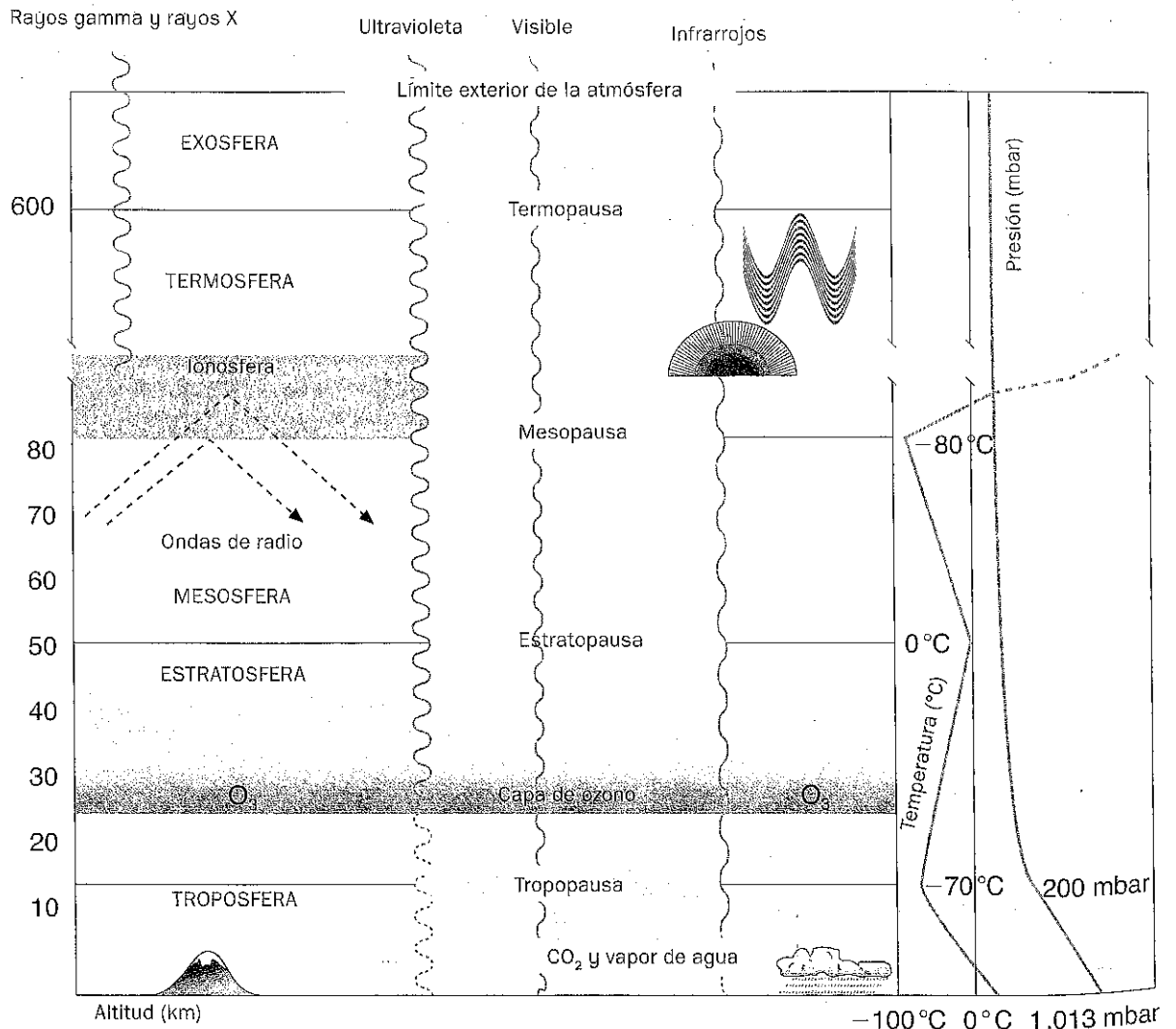


Fig. 6.3. Capas de la atmósfera.

- **Estratosfera.** Se extiende desde la tropopausa hasta la estratopausa, situada a 50-60 km de altitud. En ella el aire es muy tenue y no existen movimientos verticales, sino horizontales, debido a su disposición en estratos o capas superpuestas. Además, no existen nubes, salvo en las zonas polares, en las que en la parte inferior de esta capa se forman unas muy tenues, nacaradas, constituidas por hielo, llamadas **nubes estratosféricas polares** o **NEP**.

### La capa de ozono

El ozono es una molécula triatómica ( $O_3$ ), gaseosa y de olor picante que existe en toda la atmósfera, incluida la troposfera, en la que constituye un contaminante. Cumple la importantísima misión de filtrar los rayos UV. La mayor parte del ozono atmosférico se encuentra concentrado en la estratosfera, sobre todo entre los 15 y 30 km de altura, aunque abunda más hacia los 25 km.

Los mecanismos naturales de formación y destrucción del ozono son los siguientes:

- 1.º **Ruptura por fotólisis del oxígeno a causa de la luz ultravioleta:**  $O_2 + UV \rightarrow O + O$
- 2.º **Formación del ozono por la unión de un oxígeno atómico (resultante del proceso anterior) con una molécula del mismo y liberación de calor:**  $O + O_2 \rightarrow O_3 + \text{calor}$
- 3.º **Destrucción por fotólisis del ozono:**  $O_3 + UV \rightarrow + O_2 + O$

En condiciones normales, estas reacciones están en equilibrio dinámico, por lo que el ozono se forma y se destruye y, a la vez que retiene el 90% de los rayos UV, se libera calor durante su formación (proceso 2.º) y se eleva la temperatura de la estratosfera (hasta alcanzar entre 0 °C y 4 °C en la estratopausa). Pero este equilibrio dinámico solamente puede ocurrir por encima del kilómetro 30, porque el tipo de radiaciones UV solares de onda más corta necesarias para ello han sido absorbidas más arriba y no pasan de esa altitud, por lo que será más intenso cuanto más arriba y más cerca esté de la estratopausa (ya que se reciben más radiaciones UV solares). Sin embargo, por debajo del kilómetro 30, llega menor cantidad de rayos UV y los pocos que llegan son incapaces de provocar la fotólisis del ozono (reacción 3.ª) de una manera eficaz, por lo que el ozono se acumula en esta zona.

- **Mesosfera.** Se extiende hasta la mesopausa, situada hacia el kilómetro 80. Aunque la densidad del aire aquí es muy reducida, resulta suficiente como para que el roce de las partículas que contiene provoque la inflamación de los meteoritos procedentes del espacio, dando lugar a la formación de **estrellas fugaces**. De esta manera, la gran mayoría de ellos se consumen y no alcanzan la superficie terrestre, donde constituirían un riesgo. La temperatura disminuye de nuevo hasta unos -80 °C.
- **Ionosfera o termosfera.** Se prolonga hasta el kilómetro 600 aproximadamente. Aquí la temperatura aumenta hasta unos 1.000 °C debido a la absorción de las radiaciones solares de onda más corta (rayos X y gamma) llevada a cabo por las moléculas de nitrógeno y de oxígeno presentes que, debido a ello, se transforman en iones de carga positiva, liberándose electrones. Esto da lugar a un **campo magnético terrestre** comprendido entre la ionosfera, cargada positivamente, y la superficie terrestre, cargada negativamente. Desde la ionosfera fluyen cargas positivas hasta la superficie terrestre y desde esta última ascienden cargas negativas hasta la ionosfera.

En determinadas ocasiones, sobre las zonas polares, el rozamiento de los electrones procedentes del Sol contra las moléculas de esta capa produce espectaculares manifestaciones de luz y color: son las **auroras boreales** en el hemisferio norte y las **auroras australes** en el hemisferio sur. Su color depende de la molécula contra la que choquen los electrones y de la presión atmosférica. Es amarillo-verdoso cuando chocan contra las moléculas de oxígeno a baja presión; rojo, si esa misma colisión tiene lugar a muy baja presión, y azul si el impacto es contra una molécula de nitrógeno.

- **Exosfera.** Se extiende hasta el kilómetro 800 aproximadamente. Es la última capa y su límite viene marcado por una bajísima densidad atmosférica, similar a la del espacio exterior. Aquí el aire es tan tenue que no puede captar la luz solar y, debido a ello, el color del cielo se va oscureciendo hasta alcanzar la negrura del espacio exterior.

### ! Importante

Algunos rayos ultravioletas resulta beneficiosos en tiempos de exposición limitados, pues hacen posibles las mutaciones necesarias para el proceso de selección natural. Además, estimulan en nuestra piel a los precursores de la vitamina D, que combate el raquitismo. Sin embargo, en dosis elevadas originan efectos nocivos: daños en los tejidos vegetales, mutaciones, cáncer de piel y cataratas.

### + Más datos

#### Nubes noctilucentes

Se llaman también **nubes mesosféricas polares**. Son las más altas de nuestra atmósfera. Se forman entre los 75 y los 85 km de altitud, cerca de la mesopausa, por lo que están constituidas por hielo y brillan al ser atravesadas por la luz del Sol.

### 3. Dinámica atmosférica vertical

Los movimientos verticales que tienen lugar en la troposfera se denominan de **convección** y se deben a variaciones de temperatura, humedad o presión atmosféricas.

#### A. Convección térmica

Son movimientos originados por el contraste de la temperatura del aire en la parte inferior en contacto con el suelo (más caliente y menos denso), que tiende a elevarse formando corrientes térmicas ascendentes, y el superior (más frío y denso), que tiende a descender.

#### B. Convección por humedad

Se origina por la presencia de vapor de agua en el aire, que lo hace menos denso que el aire seco, ya que, al contener más agua, contiene una menor proporción de los otros componentes atmosféricos,  $N_2$ ,  $O_2$  y  $CO_2$ , de mayor peso molecular, que son desplazados por el vapor de agua. Aunque no lo veamos, el vapor de agua está presente en la atmósfera. Podemos medirlo de dos maneras:

- **Humedad absoluta.** Es la cantidad de vapor de agua que hay en un volumen determinado de aire y se expresa en  $g/m^3$ .

Esta cantidad no es un dato significativo, porque la cantidad de vapor de agua que puede contener el aire depende de la temperatura. El aire frío puede contener muy poca humedad, mientras que el caliente puede admitir mucha. Por eso recurrimos a un nuevo parámetro: la humedad relativa.

- **Humedad relativa.** Es la cantidad en tanto por ciento de vapor de agua que hay en  $1 m^3$  de aire en relación con la máxima que podría contener a la temperatura en la que se encuentra.

Por ejemplo, si decimos que la humedad relativa es del 25%, queremos expresar que a una determinada temperatura el aire podría contener cuatro veces más vapor del que contiene. La humedad relativa del 100% se corresponderá con un valor en la **curva de saturación** (Fig. 6.4). A cada punto de esta curva le corresponderá una temperatura de saturación (en abscisas), denominado **punto de rocío**, y un valor en el eje de la humedad absoluta (en ordenadas), que corresponde al máximo de vapor de agua que puede contener en aire, sin que se dé condensación.

**Punto de rocío** es la temperatura a la que debe enfriarse una masa de aire para que se condense el vapor de agua que contiene y se genere, de acuerdo con la temperatura, escarcha, neblina o rocío.

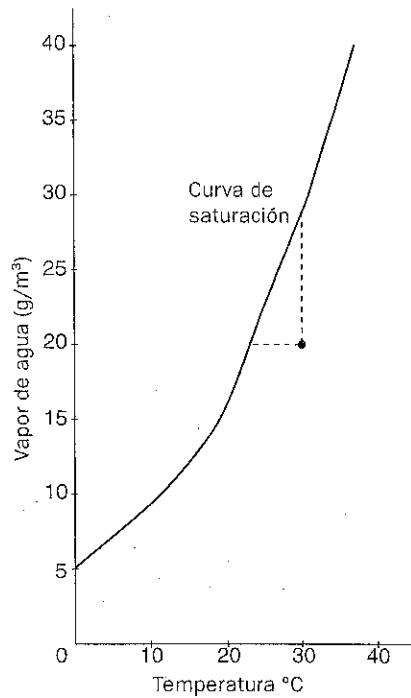
Quando se alcanza el punto de rocío, el aire no puede contener más vapor de agua del que contiene. Entonces decimos que está **saturado de humedad**, lo que se corresponde con una humedad relativa del 100%.

Quando una masa de aire cálido y/o húmedo se eleva, se va enfriando progresivamente a medida que asciende, hasta que llega a alcanzar la temperatura del punto de rocío. Entonces, el vapor de agua comienza a condensarse y se hace visible en forma de nube. A la altura donde esto sucede se la denomina **nivel de condensación** (Fig. 6.5).

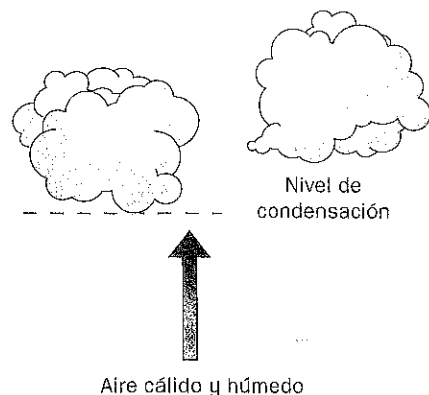
Las **nubes** están constituidas por millones de pequeñas gotitas de agua (de unos 0,02 mm de diámetro) o por pequeños cristales de hielo que, debido a su poco peso, se encuentran suspendidos en el aire. El hielo se forma en la parte más elevada de las nubes altas.

Pero para que se forme la nube es necesario que, además de alcanzar el nivel de condensación, existan en la atmósfera unos **núcleos de condensación**: partículas de polvo, humo,  $H_2S$ ,  $NO_x$  y  $NaCl$ , sobre los que precipitar.

- Si existen muchos de estos núcleos, la condensación puede comenzar incluso antes (puede ocurrir con un 98% de humedad relativa).
- Si existen muy pocos, el aire sobresaturado y sobreenfriado no podrá condensarse.



**Fig. 6.4.** Representación de la curva de saturación correspondiente a cada masa de aire a una temperatura y humedad absoluta determinadas.



**Fig. 6.5.** Formación de una nube.

### C. Convección por cambios de presión atmosférica

La presión ejercida por una columna de aire sobre la superficie terrestre se mide con el barómetro (inventado por Torricelli en el siglo XVII) y su valor estándar, a nivel del mar y en condiciones normales, es de **1 atmósfera**, que equivale a **760 mm** de mercurio y a **1.013,3 milibares (mb)**.

La presión en un punto geográfico determinado no es siempre la misma, sino que varía en función de la humedad y la temperatura del aire. Debido a ello, en los mapas del tiempo se trazan una serie de **isobaras**, líneas que unen los puntos geográficos de igual presión, en un momento dado, lo que da lugar a la aparición de *borrascas* y *anticiclones*, lo que nos permite localizar zonas de bajas presiones y zonas de altas presiones.

- **Borrasca, condición ciclónica o inestabilidad atmosférica.** Es una zona de baja presión «B» rodeada de isobaras cuyos valores van aumentando desde el centro hasta el exterior de la misma (Fig. 6.7).

Se producen cuando existe una masa de aire poco denso (por ser cálido y/o húmedo) en contacto con la superficie terrestre, lo que hace que se eleve por convección empujada por unas corrientes térmicas ascendentes. Como consecuencia de su elevación, en el lugar que previamente ocupaba la masa se crea un vacío en el que el aire pesa menos (tiene menos presión). Entonces, el aire frío de los alrededores se mueve originando un viento que sopla desde el exterior hasta el centro de la borrasca (Fig. 6.6) y gira en sentido opuesto a las agujas del reloj, o antihorario, o levógiro en nuestro hemisferio, el norte. En resumen, las borrascas o ciclones están asociados a una elevación convectiva de las masas de aire y también a la formación de un viento convergente.

Las condiciones de inestabilidad atmosférica son propicias para la eliminación de la contaminación, ya que el aire ascendente provoca la elevación y dispersión de la misma. Las borrascas se asocian a cielos cubiertos y suelen venir acompañadas por precipitaciones. Las precipitaciones contribuyen a la limpieza atmosférica porque, al caer, arrastran las sustancias contaminantes y las depositan sobre la superficie terrestre.

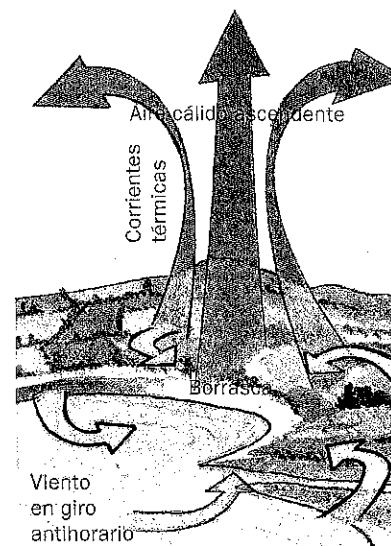


Fig. 6.6. Formación de una borrasca

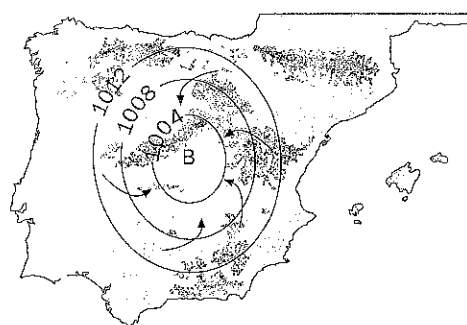


Fig. 6.7. Mapa del tiempo correspondiente a una borrasca.

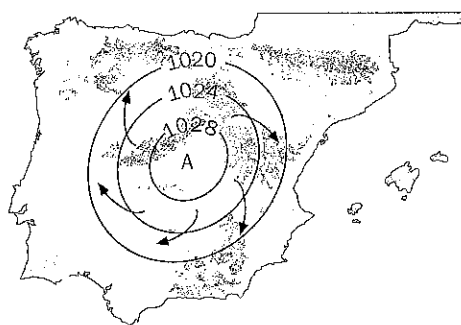


Fig. 6.8. Mapa del tiempo correspondiente a un anticiclón.

- **Anticiclón o condición de estabilidad atmosférica.** Es una zona de alta presión «A» rodeada de una serie de isobaras cuya presión disminuye desde el centro hacia el exterior de la misma (Fig. 6.8).

Se originan cuando una masa de aire frío (y por tanto más denso) se halla situada a cierta altura, por lo que tiende a descender (por **subsistencia**) hasta contactar con el suelo. En la zona de contacto se acumula mucho el aire (hay mucha presión) y el viento tiende a salir desde el centro hacia el exterior (Fig. 6.9), girando en el sentido de las agujas del reloj u horario, o dextrógiro en nuestro hemisferio, antihorario en el hemisferio sur.

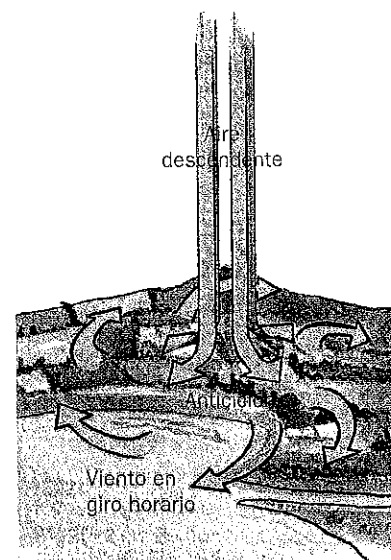


Fig. 6.9. Formación de un anticiclón



Los anticiclones siempre se relacionan con la ausencia de precipitaciones; también se suelen asociar a situaciones de buen tiempo. Sin embargo, durante las altas presiones invernales son frecuentes las nieblas y las heladas. Las subsidencias más intensas suelen producirse en invierno, con viento en calma, cuando las noches son largas y la atmósfera está muy fría, sobre todo en los primeros metros en contacto con el suelo. Se dan situaciones especialmente peligrosas si se produce una inversión térmica, pues aumenta mucho la concentración de contaminantes en el aire.

- **Inversión térmica.** Recuerda que, como vimos en el apartado 2, el valor medio del gradiente vertical de temperatura (GVT), en los primeros kilómetros de la troposfera, suele ser de  $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  (lo que significa que, por cada 100 m de ascenso en la troposfera, la temperatura disminuye  $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; esta es la cantidad que se debe ir restando cada 100 m de ascenso). Este valor es muy variable: con la altura, con la latitud, con la estación, etc. (Fig. 6.10). En ocasiones puede cambiar de signo, originando una inversión térmica.

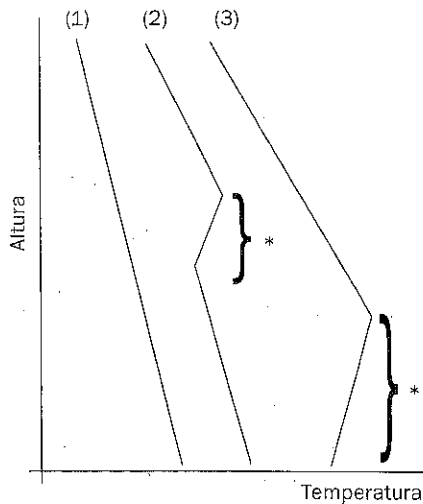


Fig. 6.10. Diferentes tipos de gradiente vertical (\* inversión térmica).

**Inversión térmica** es el espacio aéreo en el cual la temperatura aumenta con la altura en vez de disminuir, es decir, en el que el GVT es negativo.

Las inversiones térmicas impiden los movimientos verticales del aire y se pueden presentar a cualquier altura de la troposfera (la tropopausa representa una inversión térmica permanente).

Existen también inversiones térmicas ocasionales, como las de las noches despejadas de invierno, en las que el suelo está muy frío y enfría la atmósfera inmediata, siendo esta más fría que la superior.

Los anticiclones invernales están asociados a un descenso del gradiente de temperatura y a la formación de inversiones térmicas en la atmósfera inferior. Esta situación es nefasta para la contaminación porque, al impedir la circulación vertical del aire, los contaminantes quedan atrapados contra el suelo, acumulándose en el espacio aéreo en el que existe la inversión térmica. La dispersión de contaminantes solo es posible los días en los que el sol tiene la suficiente intensidad como para calentar la superficie terrestre, que a su vez calentará el aire, provocando su ascenso por convección térmica.

## Actividades

1> Mira el ciclo del agua (Fig. 6.1) y responde:

- ¿Qué tipo de sistema caja negra constituye dicho ciclo? ¿Por qué?
- Explica el camino o caminos posibles seguidos por una gota de agua desde que sale del mar hasta que vuelve a él.
- ¿De qué factores naturales (clima, tipo de suelo, pendiente o vegetación) dependen la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración y la escorrentía?
- ¿De qué partes del ciclo obtenemos el agua como recurso? Recuerda a qué tres tipos de uso se destina.
- Explica cómo modificamos el ciclo del agua mediante la deforestación, la construcción de embalses, el asfaltado de suelos, la extracción de agua subterránea o el exceso de riego, señalando en cada caso si aumentan o disminuyen la evaporación, la infiltración o la escorrentía.

2> Observa el dibujo y el texto de la Figura 6.3 y contesta las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es la causa de que la presión atmosférica descienda tan bruscamente hasta alcanzar la tropopausa? ¿Por qué en la troposfera la temperatura disminuye con

la altura? ¿Hasta qué altura pueden llegar generalmente las nubes? ¿Por qué? ¿Qué nombre recibe esta capa por ello?

- Sitúa aproximadamente la altura a la que se registra la máxima concentración de ozono. ¿Por qué la temperatura es alta cuando se alcanzan altitudes superiores al kilómetro 30?
- ¿Qué carga posee la ionosfera? ¿Por qué? ¿Qué papel desempeña en las comunicaciones? ¿Qué se forma entre la ionosfera y la superficie terrestre?
- ¿Dónde y cómo se filtran las radiaciones de onda corta? ¿Cómo repercute sobre la temperatura de las diferentes capas? ¿Qué radiaciones consiguen alcanzar la superficie terrestre? ¿Qué ventajas supone este hecho para la vida en la Tierra?
- ¿Dónde se destruyen la mayoría de los meteoritos? ¿Cómo afectaría al clima planetario que cayera sobre la Tierra uno de grandes dimensiones? ¿Por qué? (Puedes repasar la Unidad 1 para resolver estas preguntas).
- ¿Cómo y dónde se forman las auroras boreales?

3> Explica claramente por qué tras las noches de invierno estrelladas se producen las mayores heladas.

## 4. Dinámica de las masas fluidas a escala global

La irradiación solar es mucho mayor en el ecuador que en los polos, por lo que, de no existir la atmósfera y la hidrosfera, la diferencia de temperatura entre ambas zonas sería extremadamente grande. Sin embargo, la presencia de las masas fluidas hace posible el transporte de calor necesario para amortiguar dichas diferencias. El transporte de calor desde las zonas de superávit a las de déficit se ve facilitado por la acción de los vientos y de las corrientes oceánicas y dificultado por la presencia de masas continentales.

### 4.1. Dinámica atmosférica

La circulación atmosférica horizontal es llevada a cabo por el viento. Ya vimos anteriormente que el viento superficial es divergente en los anticiclones y convergente en las borrascas. Por lógica, si un anticiclón y una borrasca se encuentran próximos, el viento superficial sopla desde los anticiclones hasta las borrascas; y por la parte superior, el viento de altura lo hace en sentido contrario (Fig. 6.11). Sin embargo, la trayectoria del viento no suele ser rectilínea, sobre todo en los continentes, ya que el relieve puede frenarla, amplificarla o formar torbellinos. También influye en su trayectoria el efecto Coriolis.

#### A. El efecto Coriolis

El efecto Coriolis consiste en una fuerza que fue explicada por Gaspard-Gustave de Coriolis en 1835 y que es una consecuencia del movimiento de rotación terrestre y de su giro en sentido antihorario (de oeste a este). La fuerza de Coriolis no tiene un valor constante, sino que es máxima en los polos y disminuye progresivamente hasta alcanzar el ecuador, donde se anula.

La circunferencia correspondiente al ecuador terrestre es mucho más grande que la formada por cada uno de los paralelos terrestres, cuya longitud va disminuyendo a medida que nos acercamos a los polos. Sin embargo, todas ellas dan una vuelta completa con cada movimiento de rotación (cada 24 h), por lo que las más pequeñas tienen que girar a menor velocidad que las más grandes.

Debido a este efecto, si consideramos un móvil que sale del ecuador y se dirige al Polo Norte, a medida que va avanzando en latitud se va encontrando con un suelo que cada vez gira más despacio, por lo que tiende a adelantarse en rotación; como consecuencia, se desvía hacia la derecha de su trayectoria inicial.

Si el móvil parte del Polo Norte y se dirige hacia el ecuador, se encontraría con un suelo que cada vez gira más deprisa, por lo que iría quedando rezagado respecto a la velocidad de rotación de cada punto, desviándose también a su derecha. Si utilizas un razonamiento similar para un móvil situado en el hemisferio sur, la desviación, en este caso, será hacia la izquierda.

Los vientos circulan desde los anticiclones hacia las borrascas en sentido radial, siguiendo el gradiente de presión (Fig. 6.12). Sin embargo, al ser desviados por la fuerza de Coriolis, el resultado es un giro en sentido horario en torno a los anticiclones y antihorario en torno a las borrascas en el hemisferio norte (al revés en el hemisferio sur).

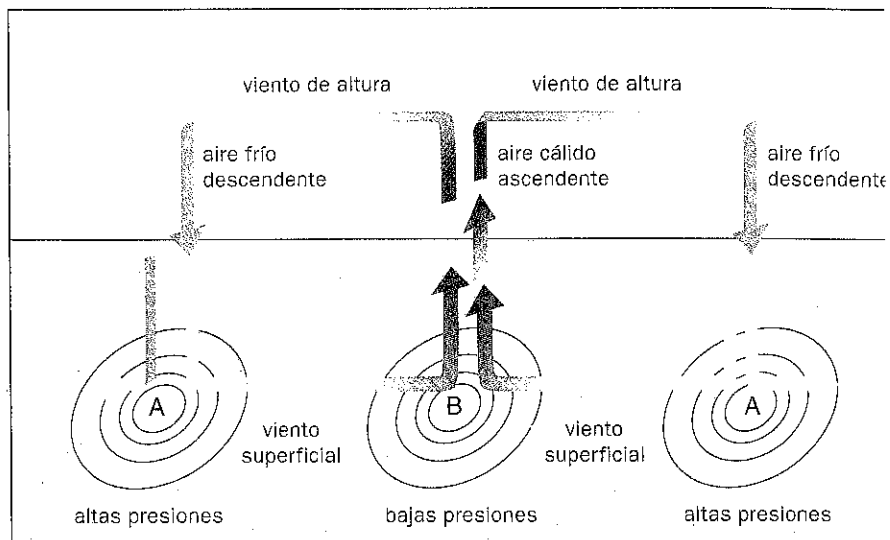


Fig. 6.11. El viento superficial va desde los anticiclones a las borrascas; el de altura circula en sentido contrario.

#### ! Importante

Cuanto más juntas estén las isobras, más fuerte soplará el viento.

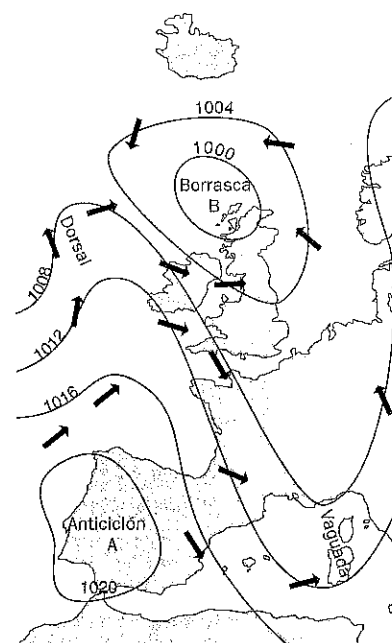


Fig. 6.12. Circulación del viento. Las dorsales son similares a los anticiclones y las vaguadas a las borrascas.

## B. Circulación general de la atmósfera

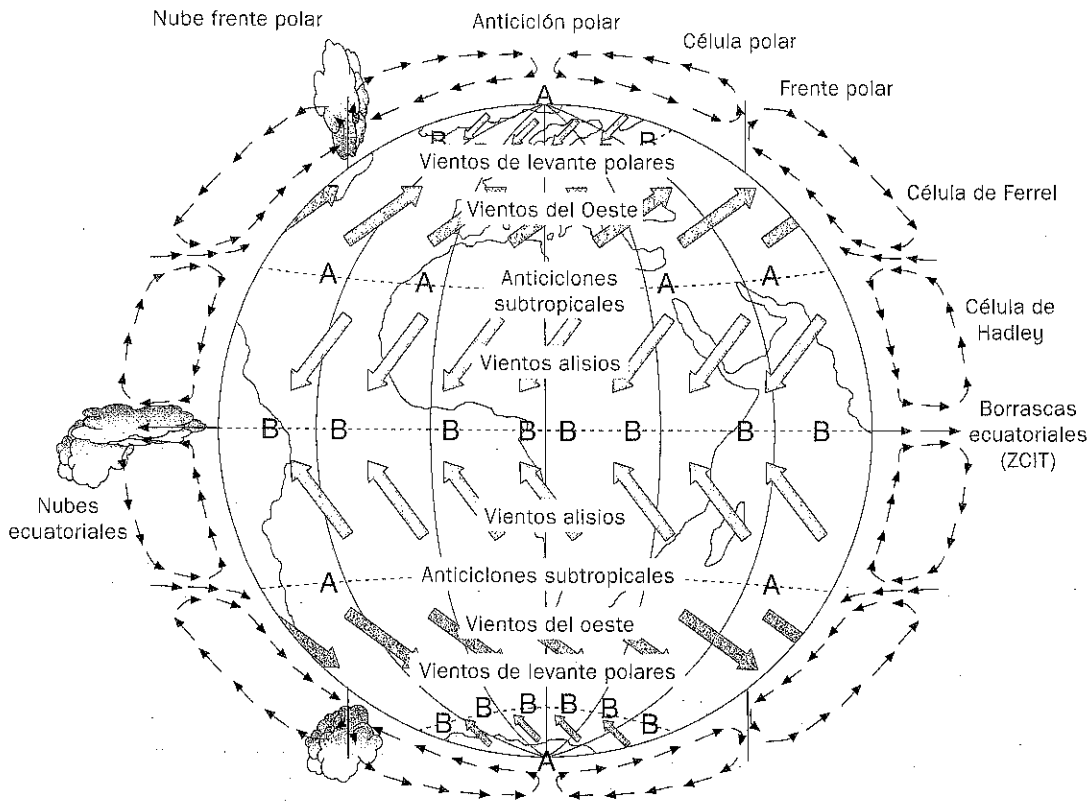


Fig. 6.13. Movimientos atmosféricos.

En las zonas ecuatoriales, el calentamiento es intenso, debido a que los rayos solares inciden verticales. Por ello, el aire caliente por contacto con la superficie terrestre tenderá a ascender, dando lugar al cinturón de **borrascas ecuatoriales (B)** (Fig. 6.13 y portada de esta unidad).

En las zonas polares, las bajas temperaturas van a provocar el aplastamiento del aire frío contra el suelo y el asentamiento de un **anticiclón polar (A)** permanente sobre ellas.

Al menos teóricamente, el viento que sopla en la superficie del planeta tenderá a recorrer el globo terrestre desde los anticiclones polares hasta las borrascas ecuatoriales, y el de las capas altas de la atmósfera podría hacerlo en sentido inverso. Sin embargo, la fuerza de Coriolis va a producir su desviación hacia la derecha en el

hemisferio norte (hacia la izquierda en el sur), provocando que el transporte se lleve a cabo mediante tres células:

**1. Célula de Hadley.** Es la más energética de las tres, por la incidencia vertical de los rayos solares. En las borrascas ecuatoriales, se produce una elevación del aire cálido hasta alcanzar la tropopausa, donde se dirige hacia ambos polos como viento horizontal en altura. El efecto Coriolis produce su desviación.

Al llegar a los 30° de latitud N o S, la desviación de los vientos es tan grande que la célula se fragmenta: parte del aire seguirá su camino hacia los polos, pero la mayoría descenderá hacia el suelo, originando un cinturón de **anticiclones subtropicales** que, cuando se asientan sobre un continente, originan los mayores **desiertos** del planeta.

El **anticiclón subtropical de las Azores** es el que más influye sobre el clima de nuestro país.

La célula se cierra debido a los **alisios**, vientos superficiales que soplan (del **NE** en el hemisferio norte; del **SE** en el hemisferio sur) desde estos anticiclones subtropicales hacia el ecuador, donde convergen los de ambos hemisferios, originando la **ZCIT** (zona de convergencia intertropical).

### ! Importante

En verano del hemisferio norte tanto la ZCIT como todos los cinturones de borrascas y anticiclones representados en la Figura 6.13 se desplazan hacia el Polo Norte; y en invierno, de dicho hemisferio, se desplazan hacia el Polo Sur.

**2. Célula polar.** El viento de superficie que parte de los anticiclones polares, el **levante polar** (sopla del **NE** en el hemisferio norte y del **SE** en el hemisferio sur) solo alcanzará, aproximadamente, los 60° de latitud, donde se eleva de nuevo, formando entonces el cinturón de **borrascas subpolares**.

**3. Célula de Ferrel.** Está situada entre las dos anteriores y se forma por la acción de los vientos superficiales del oeste o **westerlies** (provenientes del **SO** en el hemisferio norte del **NO** en el hemisferio sur), que soplan desde los anticiclones desérticos hacia las zonas de las borrascas polares.

## 4.2. Dinámica de la hidrosfera

El 97,3% de la hidrosfera lo constituyen los océanos que, junto con la atmósfera, desempeñan un importantísimo y determinante papel en el clima terrestre.

La hidrosfera actúa como **regulador térmico**, porque, gracias a su elevado calor específico, es capaz de absorber y almacenar por más tiempo una gran cantidad de energía calorífica. Así, los océanos se calientan y enfrían más lentamente que los continentes; debido a ello, a la misma latitud, los lugares emplazados junto al mar tendrán una menor **amplitud térmica** (diferencia entre las temperaturas máxima y mínima diarias y estacionales) que los situados en el interior de un continente.

Las zonas limítrofes a la costa poseen una menor amplitud térmica que el interior de los continentes, debido al efecto termorregulador de las masas de agua y a la acción de las **brisas marinas**. Durante el día el viento sopla del mar a la tierra y durante la noche se invierte su sentido (Fig. 6.14).

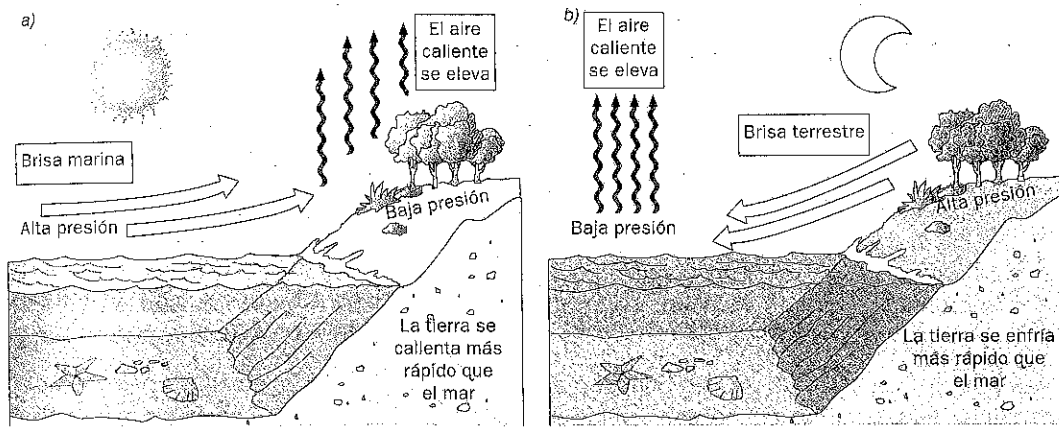


Fig. 6.14. Brisas marinas: a) día; b) noche.

### A. El agua oceánica

El agua oceánica, debido a su abundancia (ocupa tres cuartas partes de la superficie), a su gran poder calorífico y a las corrientes oceánicas, constituye un mecanismo de transporte de calor muy eficaz. Y aunque las masas de agua son más lentas en su desplazamiento que las masas de aire y además pueden ser frenadas y desviadas por la presencia de los continentes, su eficacia en el transporte de calor es mucho mayor que la de la atmósfera, por lo que su papel sobre el clima terrestre es de gran importancia.

Clasificaremos las corrientes en dos tipos diferentes en función de su origen: las *superficiales* y las *profundas*.

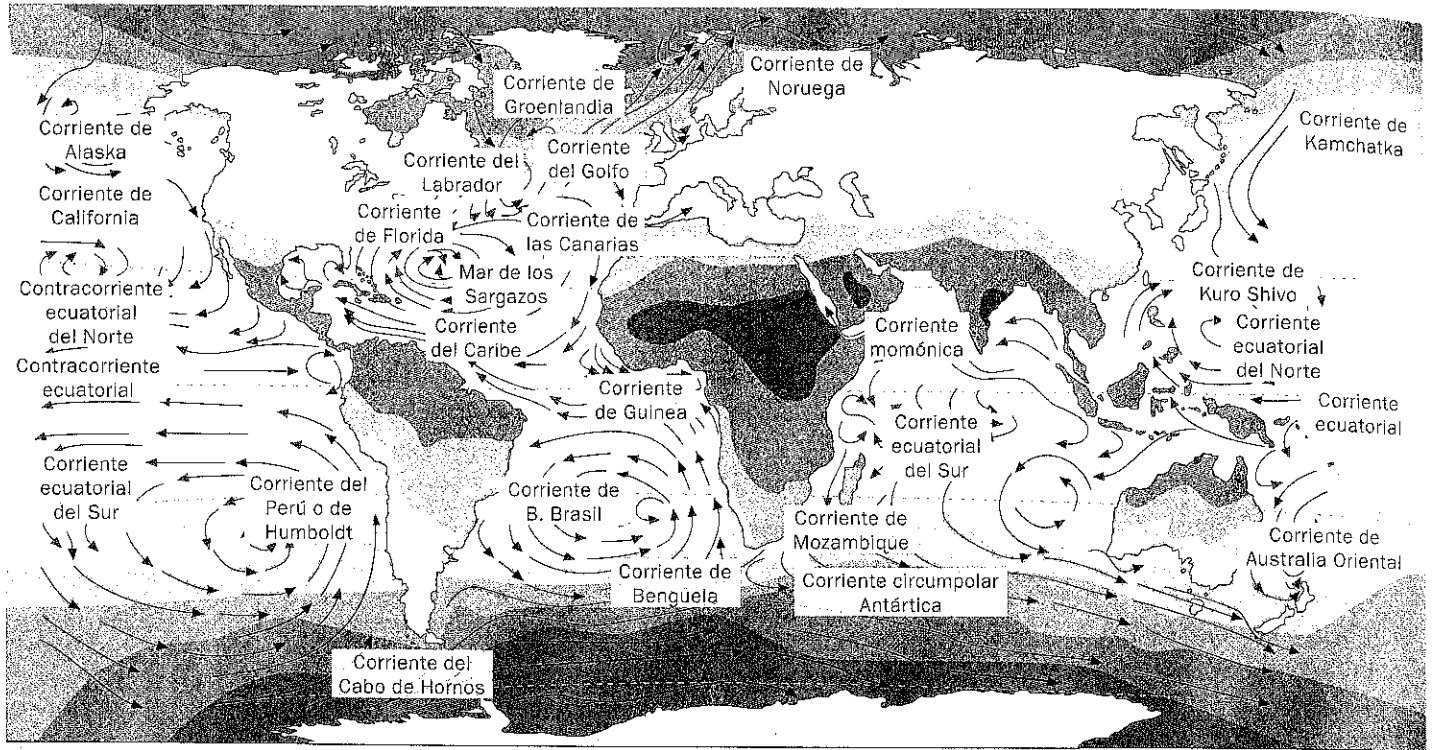
#### Las corrientes oceánicas superficiales

Las principales que recorren la zona central de los grandes océanos realizan una trayectoria que está condicionada al giro del viento en torno a los anticiclones (en sentido horario en el hemisferio norte y antihorario en el sur).

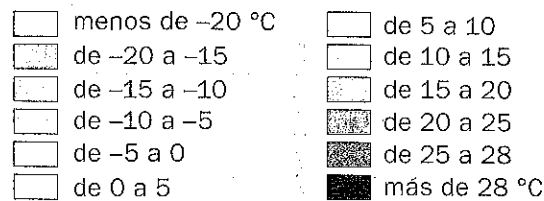
Este giro lo inician los vientos alisios que soplan de este a oeste, arrastrando las aguas del océano en ese mismo sentido. A la vez, arrastran las nubes y las precipitaciones hacia el oeste, originando aridez en el margen continental que abandonan (el situado al este) (Fig. 6.15).

### ! Importante

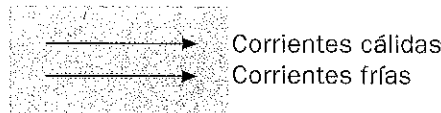
Debido a su lejanía respecto de océanos, el interior de los continentes situados en las latitudes medias y altas se enfría mucho durante invierno (consecuencia de su gran amplitud térmica), lo que da lugar al enfriamiento del aire que los contacta. Así, el aire frío tiende a aplastarse contra el suelo, originando un **anticiclón continental permanente** sobre su zona central, lo que propicia condiciones de estabilidad e impulsa vientos hacia el exterior, impidiendo la entrada de las precipitaciones, favoreciendo las heladas y las nieblas.



Temperaturas continentales en °C.  
Media anual



Dirección de las principales corrientes marinas



Temperaturas marinas en °C  
(verano en el hemisferio norte)

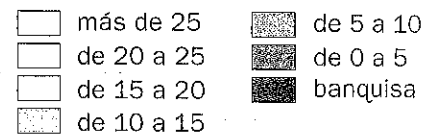


Fig. 6.15. Corrientes oceánicas superficiales.

Cuando las corrientes alcanzan la costa oeste, retornan a su lugar de origen, constituyendo corrientes de **deriva del oeste**. Cuando alcanzan las costas orientales, sufren una doble desviación: hacia las altas latitudes (llevando calor y suavizando su clima; por ejemplo, la **corriente del Golfo**) y hacia las zonas tropicales y ecuatoriales (refrescándolas; por ejemplo, la **corriente de Canarias** y la corriente de Benguela).

En la zona ecuatorial se suele formar la **contracorriente ecuatorial**, situada entre los giros anticiclónicos del hemisferio norte y sur, que circula de oeste a este.

Otras corrientes importantes son: las frías del Polo Norte, que discurren paralelas a las costas occidentales, como la **corriente del Labrador**, que alcanza las costas de Terranova; la de **Kamchatka**, que discurre a través de estrecho de Bering, y la de **Groenlandia**, que procede del océano glacial Ártico. También está la **corriente circumpolar Antártica**, que rodea sus costas en sentido horario, extendiéndose hasta los 60° de latitud sur, aproximadamente.

**Las corrientes oceánicas profundas**

La densidad del agua aumenta si está más fría y/o salada, lo que origina una circulación vertical **termohalina** (condicionada por la diferencia de temperatura y/o salinidad): el agua fría y/o salada de la superficie es más densa, por lo que tiende a descender, lo que provoca que la del fondo aflore para ocupar su lugar.

Sin embargo, si hay un aporte de agua dulce en la superficie, como en la desembocadura de un río, si se funde un iceberg o si la precipitación es superior a la evaporación, el agua no puede hundirse. Por el contrario, cuando existe un enfriamiento superficial, la evaporación es mayor que la precipitación o aumenta la salinidad, el agua se hundirá alcanzando el fondo.

**Más datos**

En el mar Mediterráneo, la evaporación es superior a la precipitación, por lo que el agua será más salada y densa que la del océano Atlántico. Debido a ello, a través del estrecho de Gibraltar circulan dos corrientes: una profunda desde el Mediterráneo hacia el Atlántico y otra superficial en sentido inverso.

## B. Océano global

Es el conjunto formado por todos los mares y océanos del planeta. La denominación resulta adecuada debido a la comunicación existente entre todos ellos. Su estudio es muy necesario para responder a muchos interrogantes sobre el clima global, ya que es un importante almacén de  $\text{CO}_2$ , y un medio de transporte muy eficaz de calor o nubosidad.

### La cinta transportadora oceánica

Se denomina así a una especie de río de agua que recorre la mayoría de los océanos del planeta (Fig. 6.16): en la primera mitad de su trayectoria, lo hace como corriente profunda, condicionada por la densidad, y en la segunda, en forma de corriente superficial, supeditada a la acción de los vientos dominantes. El inicio de esta circulación se halla en las proximidades de Groenlandia, cerca del límite de los hielos, donde el agua tiende a hundirse por ser salada, fría y, por consiguiente, densa.

Esta corriente recorre el fondo del Atlántico de norte a sur hasta que entra en contacto con las gélidas aguas del océano glacial Antártico y asciende, retornando parte de ella a su lugar de origen.

El resto se sumerge de nuevo, debido al intenso enfriamiento superficial, y discurre por el fondo del océano Índico, donde parte asciende y parte llega hasta el Pacífico, donde definitivamente asciende y se calienta.

Posteriormente realiza el trayecto en sentido inverso en forma de corriente superficial, arrastrando con ella las aguas cálidas y las nubes formadas en los océanos cálidos, originando lluvias a su paso y elevando las temperaturas de las costas atlánticas noreuropeas por las que discurre.

La cinta transportadora oceánica compensa el desequilibrio de salinidad y temperaturas existentes entre el Atlántico y el Pacífico, ya que este último es menos salado y más cálido por su mayor aislamiento respecto a las zonas polares.

Esta corriente se encarga, además, de regular la cantidad de  $\text{CO}_2$  atmosférico, ya que este gas se disuelve mejor en agua fría y, al hundirse el agua fría en las proximidades de Groenlandia, arrastra consigo una gran carga del mismo, liberándolo unos mil años después en las zonas de afloramiento.

### Más datos

La salinidad del agua del mar es variable. En las proximidades del ecuador al recibir una mayor cantidad de lluvia, su salinidad es relativamente baja. Por el contrario, en las proximidades de los polos, al congelar el agua marina durante los inviernos para formar los hielos, y puesto que el hielo marino es dulce, todas las sales que el agua tenía disueltas permanecen en la fase líquida. Eso provoca una elevación de la salinidad del agua situada por debajo de los hielos y un aumento de su densidad, por lo que tenderá a hundirse, gobernando así el movimiento de las corrientes oceánicas profundas.

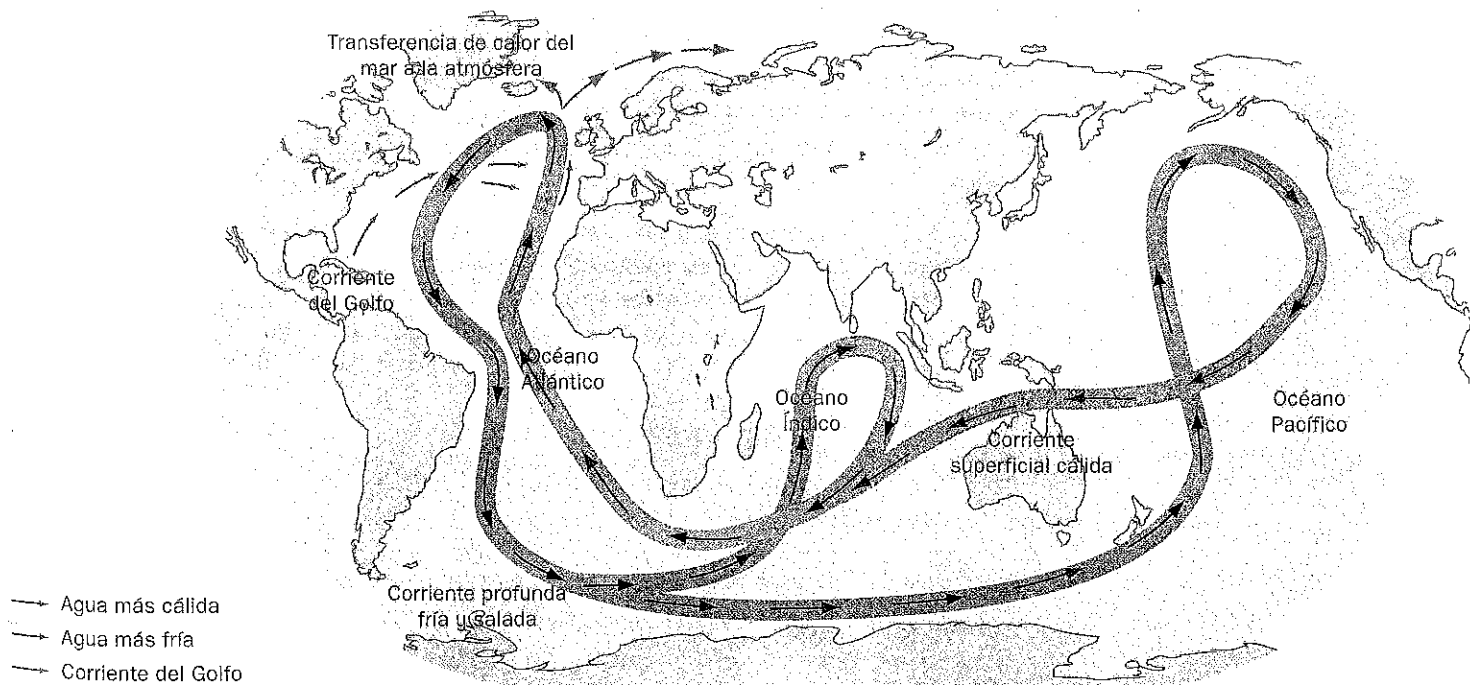


Fig. 6.16. Cinta transportadora oceánica.

### C. El fenómeno de El Niño

Denominado también **Oscilación Meridional** (o **ENSO**, *El Niño Southern Oscillation*), se llama así a una fluctuación acoplada entre la atmósfera y el océano Pacífico austral. Vamos a estudiar tres situaciones posibles:

- **ENSO neutral.** Es la situación normal (Fig. 6.17.a) en la que los alisios, que soplan de este a oeste, empujan hacia el oeste al agua superficial del Pacífico sur. Por ese motivo, el nivel del mar en Indonesia es aproximadamente medio metro más elevado que junto a las costas de Perú y Ecuador. Este descenso del nivel del mar produce un efecto de succión que da lugar a un afloramiento del agua profunda y rica en nutrientes procedentes del fondo, lo que fertiliza el fitoplancton y hace que la pesca aumente. Los alisios parten de un anticiclón situado sobre la isla de Pascua (formado porque la atmósfera se enfría por contacto con el agua fría de la zona de afloramiento) y concluyen en una borrasca situada en el lado occidental del Pacífico ecuatorial, en las proximidades del continente asiático, donde la baja presión meteorológica produce precipitaciones y tifones.
- **El Niño.** Fenómeno debido al calentamiento superficial (de unos 0,5 °C) de las aguas del Pacífico oriental junto a las costas de Perú (Fig. 6.17.b). Ocurre cada 3-5 años aproximadamente, alcanzando valores máximos en Navidad (a eso se debe su nombre: por el Niño Jesús), y suele durar 9-18 meses.

Se produce cuando los vientos alisios amainan, por lo que el agua oceánica no se desplaza hacia el oeste y entonces se caldea, calentando, a su vez, el aire situado sobre ella y dando lugar a una borrasca. Por ello, las nubes se quedan rezagadas junto a las costas peruanas, que, en condiciones normales, son áridas. No hay afloramiento de las aguas profundas porque persiste la **termoclina** (superficie que separa arriba/abajo las aguas de diferente temperatura y densidad, impidiendo su mezcla) y la riqueza pesquera decae.

Sobre las costas de Indonesia, Australia y Filipinas se produce un anticiclón, lo que da lugar a intensas sequías.

Hoy en día se ignora su causa, pero algunos científicos achacan este fenómeno a que los alisios sean poco intensos, debido a una disminución del contraste térmico entre las costas oriental y occidental del Pacífico, originada a consecuencia del cambio climático.

Otros, en cambio, buscan la explicación en un aumento de la actividad volcánica en las dorsales oceánicas próximas, lo que incrementaría la temperatura del agua, impidiendo el afloramiento y favoreciendo la formación de una borrasca en ese lugar. Se ha podido demostrar la coincidencia de los años de El Niño con un aumento de la actividad sísmica y de la temperatura del agua de la zona; pero, a pesar de ello, el origen sigue sin esclarecerse.

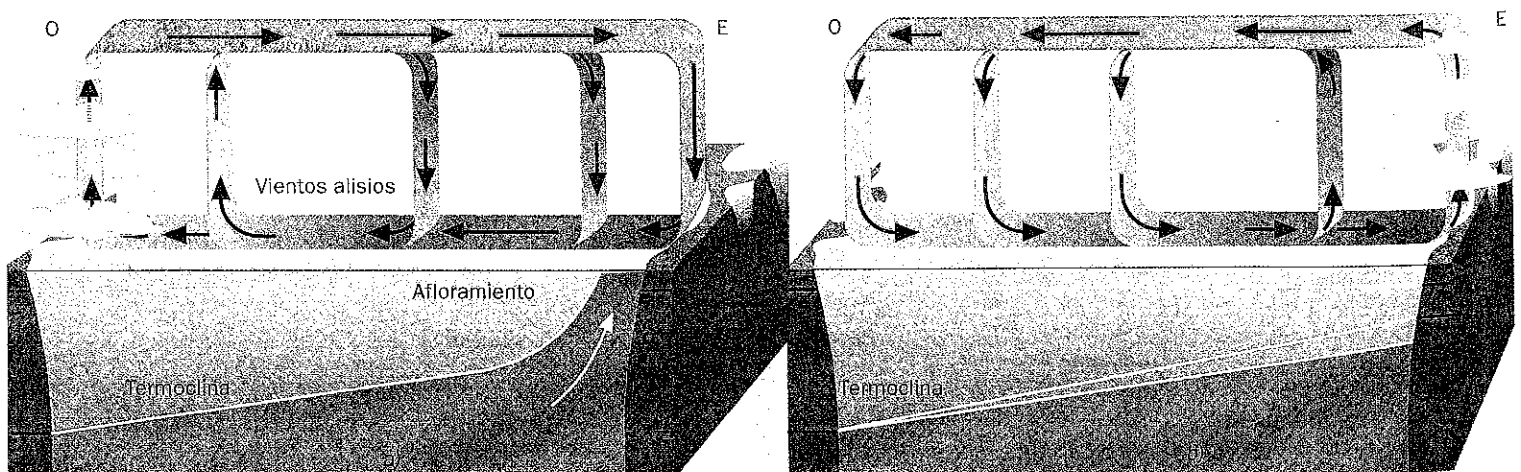


Fig. 6.17. a) Situación normal (ENSO neutral); b) situación anómala: El Niño.

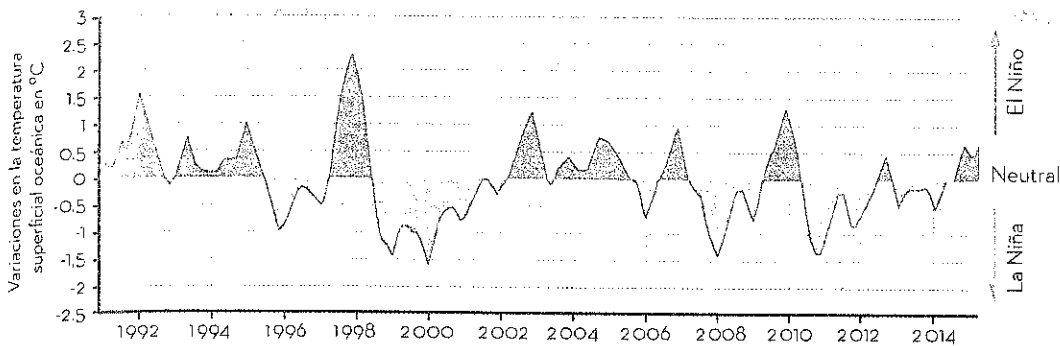


Fig. 6.18. Frecuencia de ENSO desde 1990 hasta 2015.

- **La Niña.** Se llama así a una exageración de la situación normal, que ocurre cuando los alisios soplan con más intensidad de lo habitual. Se asocia con descensos superficiales en la temperatura media del océano Pacífico oriental-central (de unos  $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Se produce cada 3 a 5 años, más o menos, y suele durar 1-3 años.

El Niño y La Niña rigen la distribución geográfica y la intensidad de las lluvias tropicales y causan cambios en los patrones climáticos en todo el mundo. El Niño se suele asociar a una reducción de los huracanes del Atlántico Norte tropical, y a un aumento de los del Pacífico tropical del norte. Por su parte, La Niña origina lluvias torrenciales y un aumento de los tifones en Indonesia y Australia, así como con un incremento del número y de la intensidad de ciclones tropicales del Atlántico.

En la Figura 6.18 se puede observar la periodicidad con la que se han repetido los episodios Niño-Niña, así como la intensidad y duración de cada uno de los mismos.

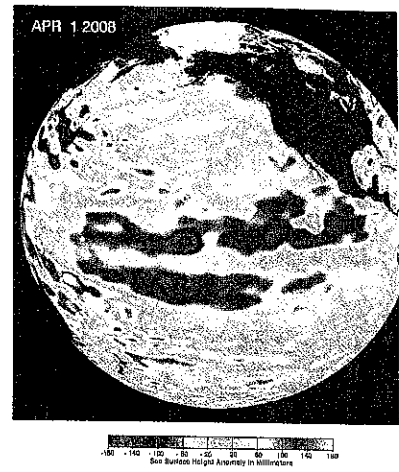


Fig. 6.19.

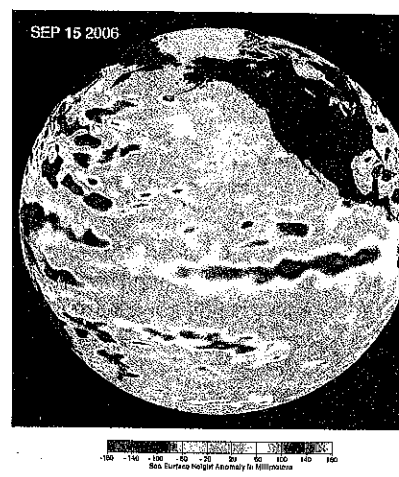


Fig. 6.20.

**Actividades**

- 4> Observa las situaciones que se muestran en la Figura 6.17 y contesta a las siguientes cuestiones:
  - a) ¿En qué consiste una situación normal? ¿Cómo se pasa a la situación de El Niño? ¿Y de La Niña? Describe las diferencias en la circulación atmosférica y oceánica que se observan en ambas figuras.
  - b) Explica por qué en condiciones normales las costas peruanas son anticiclónicas, áridas y frías, mientras que las de Indonesia son las más cálidas y húmedas del globo terrestre.
  - c) ¿Por qué los grandes desiertos de California, Perú, Sahara y Namibia coinciden con zonas de afloramiento pesquero? Recuerda lo estudiado en la Figura 4.18 y explica cómo influye El Niño sobre la pesca peruana y por qué.
  - d) Observa las imágenes de las Figuras 6.19 y 6.20 y explica lo que observas en ellas. ¿Cuál corresponde a El Niño? ¿Cuál a La Niña? ¿Por qué?
- 5> ¿De dónde sopla el viento que afecta a nuestra península en el mapa de comienzos de febrero de la Figura 6.21? ¿El viento es fuerte o débil? ¿Frío o cálido?

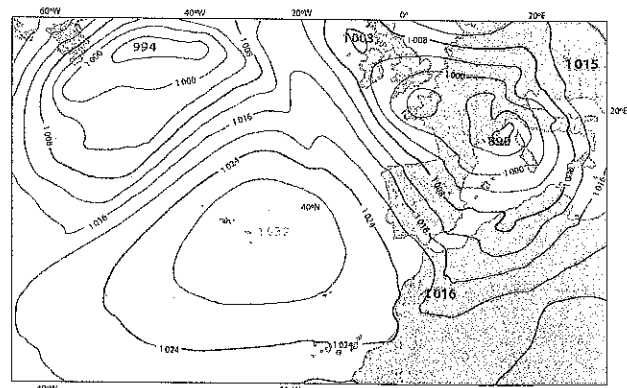


Fig. 6.21.

- Coloca una A (anticlón) o una B (borrasca) en el lugar que corresponda. ¿Qué situación meteorológica hay sobre la península ibérica, una borrasca o un anticlón?
- ¿Qué temperatura cabe esperar en nuestro país?
- Razona si se prevén precipitaciones y de qué tipo pueden ser, en función de las fechas y del carácter de los vientos. ¿Como afectará a la contaminación de nuestras ciudades?



## 5. El clima: concepto y parámetros

La **climatología** es la ciencia que se ocupa del estudio del *clima*.

Denominamos **clima** al conjunto de fenómenos de tipo meteorológico que caracterizan la situación y el tiempo atmosférico en un lugar determinado de la Tierra.

No debemos confundir el clima con el tiempo atmosférico (temperatura, humedad, nubosidad, precipitación y viento) en un momento determinado. El clima de una zona se calcula a partir de los valores medios del tiempo atmosférico, recogidos durante 20 o 30 años. El clima surge como resultado de una serie de interacciones entre la latitud, la altitud, la continentalidad y la orientación respecto a la acción de los vientos. Su estudio es de suma importancia para la humanidad, pues su cambio drástico podría provocar, por ejemplo, malas cosechas, y habría que adoptar nuevas prácticas agrarias.

Para comprender el clima debemos saber elaborar e interpretar **climogramas** (Fig. 6.22), gráficas que representan los climas de diferentes zonas de la Tierra; además, hemos de conocer conceptos tales como *precipitación* y *frente*.

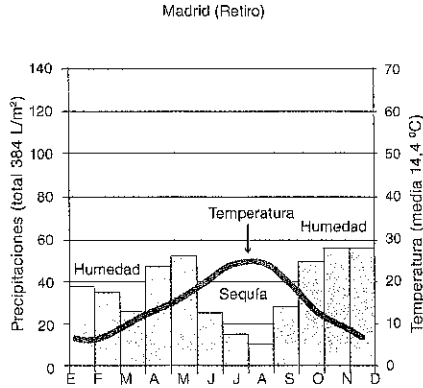


Fig. 6.22. Climograma de Madrid.

### 5.1. Precipitación y sus tipos

La precipitación es la caída de agua líquida o sólida sobre la superficie terrestre. Para que tengan lugar las precipitaciones, antes deben generarse nubes, lo que ocurre de cuatro maneras diferentes:

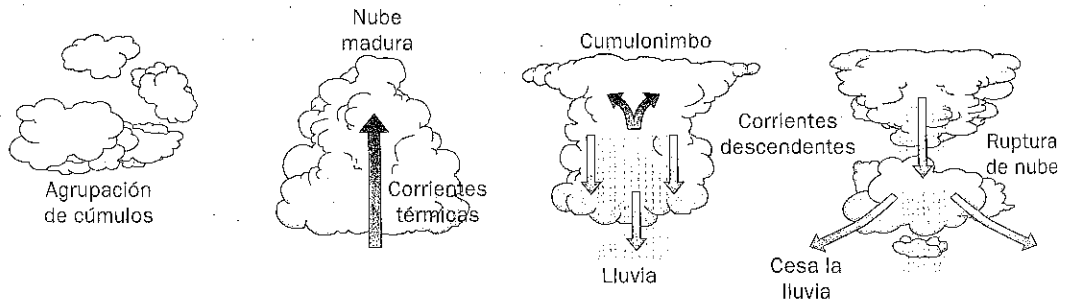


Fig. 6.23. Borrasca originada por convección térmica,

**1. Nubes de convección térmica.** Se forman en casos de inestabilidad atmosférica, debido a ascenso convectivo de aire cálido y húmedo hasta alcanzar el nivel de condensación, en donde forma una pequeña nube, un **cúmulo**. Si hace el suficiente calor y humedad, se forman varios cúmulos, que se agrupan originando una gran nube de desarrollo vertical en forma de torreón, llamada **cumulonimbo** (Fig. 6.23). En estas nubes hay mucha diferencia de temperatura entre su base y su congelada cima. Por ello, en su interior se forman unas fuertes corrientes térmicas ascendentes, que elevan desde la base las minúsculas gotas de agua que la constituyen. Durante el ascenso, las gotas chocan y se unen, formando otras de mayores dimensiones (0,5-5 mm de diámetro), cuyo peso las hace caer en forma de lluvia. Al caer el agua, se crea una corriente descendente en el interior de la nube que interrumpe el ascenso de aire cálido y la borrasca se deshace. Estas borrascas suelen originar lluvias intensas, pero poco duraderas.

**2. Nubes por ascenso orográfico y efecto Foehn.** Si una masa de aire húmedo choca contra una montaña, asciende orográficamente por la ladera de barlovento (Fig. 6.24). Al alcanzar el nivel de condensación, origina una nube de desarrollo horizontal, un **estrato**, que precipita por contacto con la ladera, lo que se conoce como **precipitación horizontal**. Una vez culminada la cima de la montaña, la nube ha perdido la mayor parte de agua que contenía y la que aún le queda se convierte en vapor al calentarse a medida que desciende por la ladera de sotavento, originando un viento cálido y secante, llamado efecto **Foehn** o **Föhn**. Esta ladera permanece seca, por lo que se dice que está situada en una zona de **sombra de lluvias**.

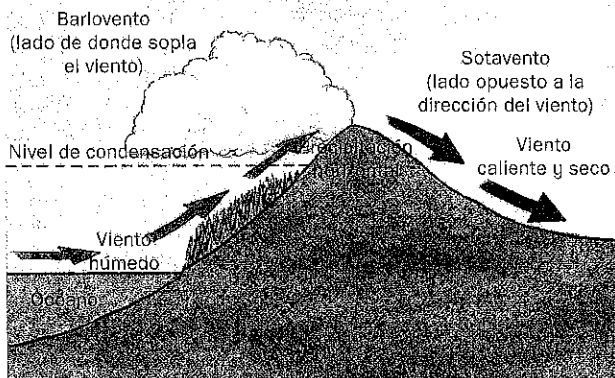


Fig. 6.24. Ascenso orográfico y sombra de lluvia.

**! Importante**

En un climograma se pueden observar los periodos de sequía y humedad y las oscilaciones térmicas anuales (la escala de humedad es doble que la de temperatura).

3. **Nubes de convección en un frente.** Un frente es una zona de contacto entre dos masas de aire de distinta temperatura y humedad, es decir, con un gran contraste térmico. Las dos masas se comportan como sistemas aislados, por lo que no se mezclan, sino que chocan y la más fría se mete en cuña por debajo de la cálida, obligándola a ascender por el frente. Durante el ascenso, el aire cálido y húmedo se condensa y se forma una nube. Los frentes dan lugar a un tipo de **borrascas frontales** o **móviles** generadoras de lluvias. Existen tres tipos de frentes:

- **Fríos.** Cuando una masa de aire frío es movida por el viento hasta que entra en contacto con otra de aire cálido (Fig. 6.25.a). Se forman **cumulonimbos** que provocan intensas precipitaciones.
- **Cálidos.** En este caso es la masa de aire cálido la que se desplaza hasta encontrarse con la fría (Fig. 6.25.b). El ascenso de aire cálido por el frente no es tan vigoroso y rápido como en el caso anterior, por lo que se forman nubes de desarrollo horizontal: **nimbostratos**, **altostratos** y **cirros** (de abajo a arriba). Las precipitaciones son débiles pero persistentes.
- **Ocluidos.** Aparecen por la superposición de ambos frentes (Fig. 6.25.c). Como es lógico, la oclusión de frentes da lugar a precipitaciones de los dos tipos.

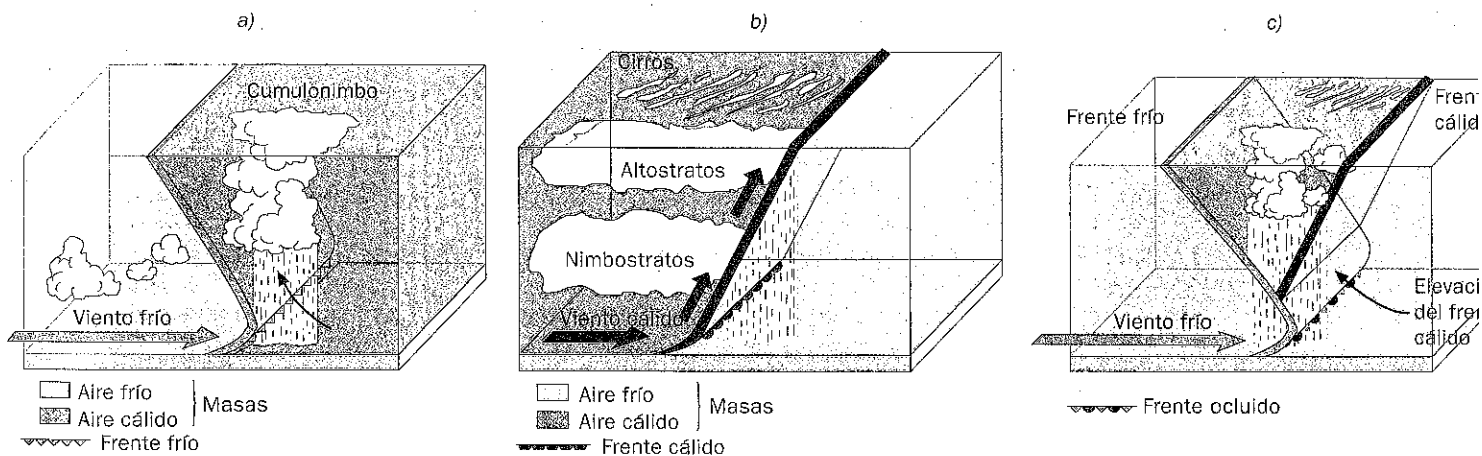


Fig. 6.25. Tipos de frentes: a) frío; b) cálido; c) ocluido.

4. **Precipitación por convergencia de vientos.** En la ZCIT convergen los alisios (del NE y de SE) de ambos hemisferios (Fig. 6.13). Estos arrastran dos masas de aire de características de humedad y temperatura muy parecidas. A causa de esta similitud, en la zona de contacto entre ambos vientos se forma una borrasca que da lugar a un ascenso convectivo y a la formación de elevadísimos cumulonimbos que originan las intensas precipitaciones (Fig. 6.26), tan típicas de latitudes ecuatoriales.

## 5.2. Precipitaciones más frecuentes

Las precipitaciones más frecuentes son la *lluvia*, el *granizo* y la *nieve*:

- **Lluvias.** Son precipitaciones en forma líquida; si la lluvia es suave se denomina **llovizna**, como la originada por un altostrato; la **lluvia persistente** abarca una gran superficie y procede de un nimbostrato, y el **chubasco**, lluvia fuerte y poco duradera, procede de un cumulonimbo. Estos dos últimos tipos de lluvia pueden originar inundaciones, pero su peligro aumenta si lo hace su **intensidad** (la cantidad de lluvia caída por unidad de tiempo) o su **frecuencia** (periodo de tiempo con el que se repiten las precipitaciones).

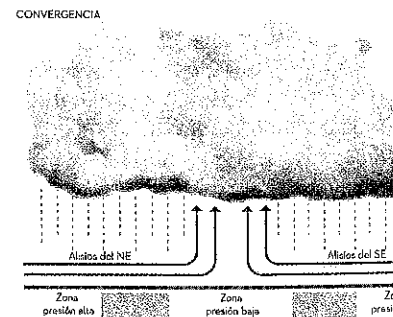


Fig. 6.26. Precipitación por convergencia.

**Lluvias torrenciales.** Se llaman así a las precipitaciones superiores a los 200 litros por metro cuadrado durante un período de 24 horas. Son especialmente peligrosas, porque pueden dar lugar a inundaciones desastrosas.

En función de la cantidad de lluvia caída durante 12 horas, se establecen tres tipos de sistemas de **alerta**, en los que se determinan las medidas adecuadas para hacerles frente: **blanca** (hasta 15 L/m<sup>2</sup>), **amarilla** (entre 16- 50 L/m<sup>2</sup>) y **roja** (entre 51- 100 L/m<sup>2</sup>).

- **Tormentas.** Se forman siempre en un cumulonimbo, tipo de nube que, como vimos con anterioridad, se origina tanto por convección térmica como por frentes fríos, pero a veces también resultan de un ascenso orográfico. Las de convección térmica y orográfica suelen durar unos 30 a 60 minutos y abarcan un territorio muy pequeño (entre 25 y 50 km<sup>2</sup>); si embargo, las frontales pueden durar horas y ocupan mayor territorio.

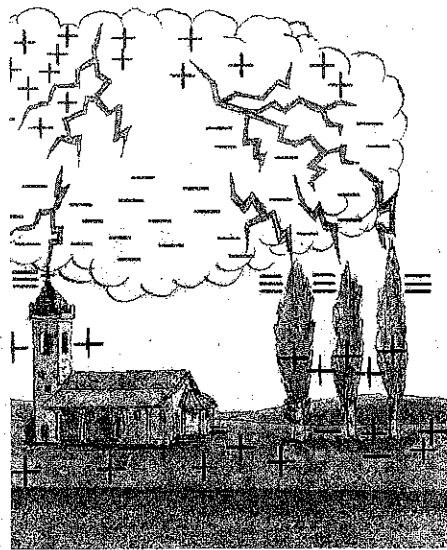
Para que haya una tormenta tiene que existir una intensa convección y unas fuertes corrientes térmicas ascendentes que originan procesos de electrificación mediante los cuales los cristales de hielo de la cima de la nube se quedan con carga positiva y las gotitas de agua de la base con carga negativa.

La superficie terrestre que hay justamente debajo de la nube también se carga positivamente (Fig. 6.27). Estas cargas positivas se acumulan en los lugares puntiagudos, como árboles, torres, postes o antenas. Como consecuencia del exceso de cargas, el pelo de los animales y de las personas se electriza y en los mástiles de los barcos pueden aparecer resplandores (los llamados *fuegos de San Telmo*).

Además, se genera una fuerte corriente eléctrica que da lugar a los **rayos** (la luz del rayo viaja a una velocidad de 300.000 km/s). Estos trasladan electrones hacia los lugares donde se encuentran las cargas positivas: entre la base y la cima de la nube, entre nube y nube y, lo que resulta más peligroso para nosotros, entre nube y tierra. Posteriormente se oye el **trueno** (el sonido viaja a 340 m/s), que es el resultado de la onda expansiva producida al calentarse el aire en contacto con el rayo hasta unos 8.000 °C.

Como ya vimos en la Unidad 4, los **rayos** de las tormentas constituyen un mecanismo eficaz de fijación del nitrógeno atmosférico, pero también constituyen un riesgo, ya que son la causa de la muerte de personas y animales y de numerosos incendios forestales. Para evitar sus daños, Benjamín Franklin inventó el **pararrayos**, y es conveniente que conozcamos las **medidas adecuadas** para poder afrontarlos:

- Si es posible, refugiarse en un edificio y no tocar las cañerías, teléfonos ni aparatos eléctricos. Desconectar la antena de la televisión y cerrar puertas y ventanas.
- Los automóviles son un buen refugio, ya que las ruedas son aislantes, pero hay que cerrar bien las ventanillas y las entradas de ventilación. Los aviones también son lugares seguros por estar herméticamente cerrados.
- En el campo no conviene caminar ni correr (las turbulencias iónicas atraen a los rayos), ni permanecer en lugares elevados o situarse cerca de los sitios puntiagudos (árboles, rocas, postes).
- Es conveniente ponerse en cuclillas, no se deben levantar nunca los brazos ni abrir un paraguas.
- Si se va en grupo, lo mejor es dispersarse, ya que si un rayo alcanza a un individuo, los demás podrían quedar afectados. Lo mismo hay que decir respecto a los rebaños de animales.
- Alejarse de objetos metálicos: antenas de radio, cables eléctricos, instrumentos de labranza, etc., ya que son buenos conductores.
- No correr con calzado o ropa mojada ni bañarse, porque la humedad es buena conductora de la electricidad.



**Fig. 6.27.** Distribución de cargas durante una tormenta.

### ! Importante

#### Riesgos climáticos en nuestro país

En España, se incluyeron en el Plan Nacional de Predicción y Vigilancia (1995) ciertos fenómenos meteorológicos adversos (lluvias torrenciales, nevadas, vientos superiores a los 75 km/h, tormentas, olas de frío y calor, marejadas con olas superiores a los 3 m de altura y nieblas) porque pueden dar lugar a riesgos climáticos. El objetivo es establecer los sistemas de vigilancia y alerta adecuados para hacerles frente.

• **La nieve y el granizo.** Si los cristallitos de hielo de la cima de un cumulonimbo chocan con otros cristallitos se forman los cristales hexagonales que constituyen la nieve. Los cristales se unen entre sí formando copos que generalmente se funden antes de llegar al suelo y originan lluvia; pero si hace frío caen en forma de nieve. La nieve es peligrosa, sobre todo en las zonas de montaña, ya que su acumulación puede acarrear riesgo de **aludes** (Fig. 6.28.a).

El granizo se forma en las tormentas cuando los cristales de hielo de la cima caen hasta la zona intermedia de la nube y los envuelve la humedad. Si las corrientes térmicas lo elevan de nuevo, se añade una capa más de hielo, haciendo que aumente su diámetro (Fig. 6.28.b). Cuando el proceso se repite varias veces, crece el número de capas de cristal, con lo que aumenta su tamaño y cae. El granizo de gran tamaño se denomina **pedrisco** y puede llegar a tener varias capas de hielo. Este tipo de precipitación supone un riesgo para la agricultura, porque golpea las cosechas y las daña. También origina destrozos en los automóviles, y cuando alcanza grandes dimensiones, puede provocar muertes por impacto (en Bangladesh en 1986 cayeron pedriscos de un kilogramo que mataron a 92 personas).

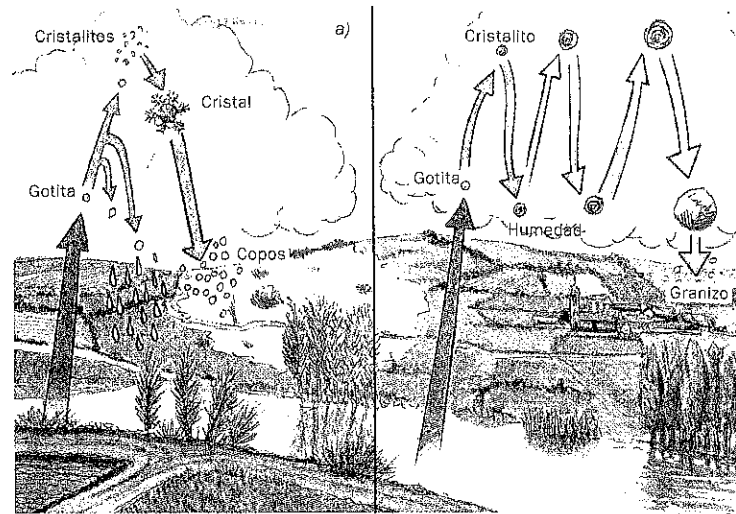


Fig. 6.28. Formación: a) de la nieve, y b) del granizo.

**Actividades**

- 6> Observa el mapa del tiempo de la Figura 6.29 y responde a las siguientes preguntas:
- ¿De dónde sopla el viento que afecta a nuestra península? ¿Será fuerte o débil? ¿Será frío o cálido?
  - ¿Qué es un frente? ¿Cuántos tipos de frente observas en el mapa? Defínelos.
  - ¿Qué tipo de frentes afectan a la península? ¿Qué previsiones meteorológicas se pueden hacer en función del mismo? ¿Cómo afecta esta situación a la contaminación?
  - ¿Qué tiempo se espera en Canarias?
- 7> a) Señala en los climogramas (Fig. 6.30) los periodos de sequía (cuando las precipitaciones son menores que el doble de las temperaturas) y los de humedad (cuando las precipitaciones son mayores que el doble de las temperaturas).
- ¿En qué periodos temporales hay agua en abundancia en cada una de esas ciudades? ¿Cuál o cuáles de ellas presentan un mayor riesgo de padecer sequías prolongadas?
  - Clasifícalos, incluyendo el de Madrid (Fig. 6.22), en función de los climas: templado-húmedo, continental, mediterráneo, mediterráneo-seco (semiárido) y cálido subtropical (subdesértico).

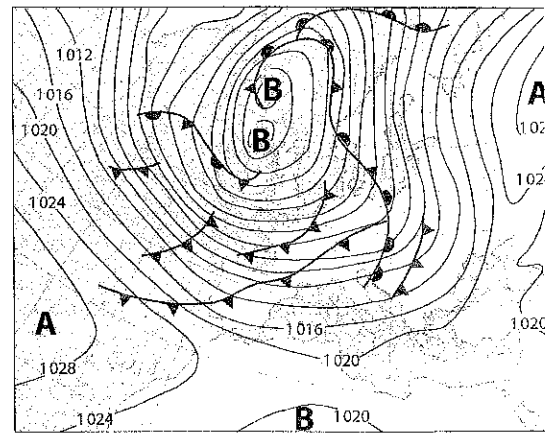


Fig. 6.29. 15 de enero de 2006.

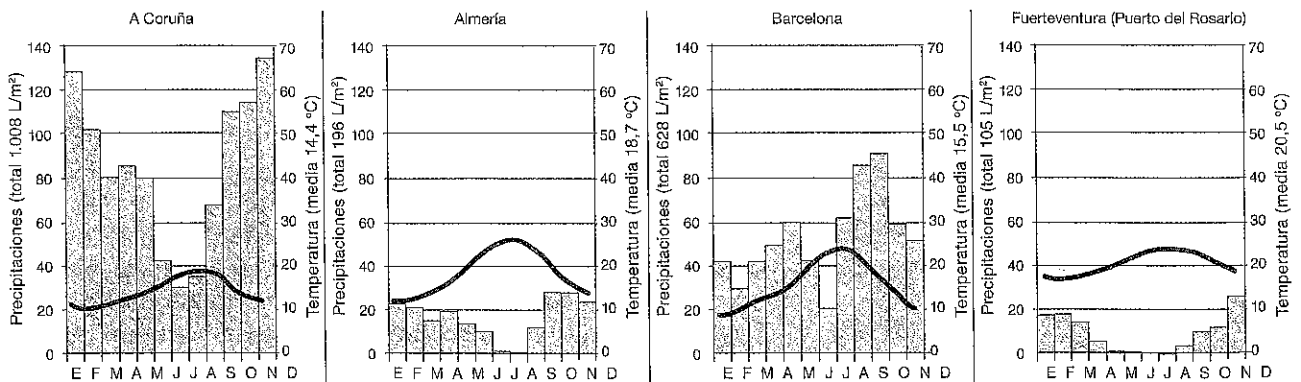


Fig. 6.30.

## 6. El clima en nuestras latitudes

El clima en las zonas templadas del hemisferio norte viene determinado por la posición que ocupe el dúo formado por el **frente polar** y la **corriente del chorro polar**, que hacen de frontera entre el aire frío polar (vientos de levante polares) y el cálido subtropical (los vientos del oeste o *westerlies*) (ver de nuevo la Fig. 6.13).

### Más datos

#### ¿Cómo se forma el chorro polar?

El chorro polar se sitúa en la tropopausa y el frente polar por debajo de él. Este frente se forma por el choque de los vientos fríos del NE con los cálidos *westerlies*. Los fríos se meten en cuña bajo los cálidos, obligándolos a ascender por el frente polar hasta la tropopausa, donde no pueden seguir ascendiendo, porque en la estratosfera solo hay movimientos horizontales. El ascenso no lo hacen por la línea de máxima pendiente sino que, por el efecto Coriolis, se van desviando progresivamente hacia la derecha, de forma que, al llegar a la tropopausa, giran en torno a la Tierra de oeste a este, originando el chorro.

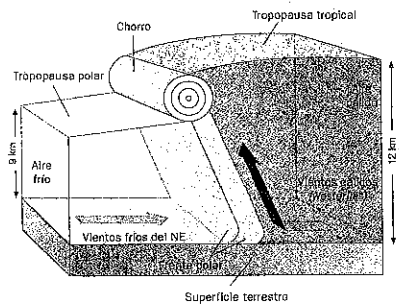


Fig. 6.32.a.

#### • El frente polar

El frente polar está formado por una serie de frentes cálidos, fríos y ocluidos, que rodean la Tierra como si fueran un frente único (Fig. 6.31) y, como cualquier otro frente, es una zona imaginaria que separa dos masas de aire de distinta temperatura: fría al norte y cálida al sur. En él convergen los vientos de levante polares (NE), procedentes del anticiclón polar, con los *westerlies* (SO), procedentes de los anticiclones subtropicales (ver de nuevo la Fig. 6.13). En esa zona se forma una banda de borrascas subpolares.

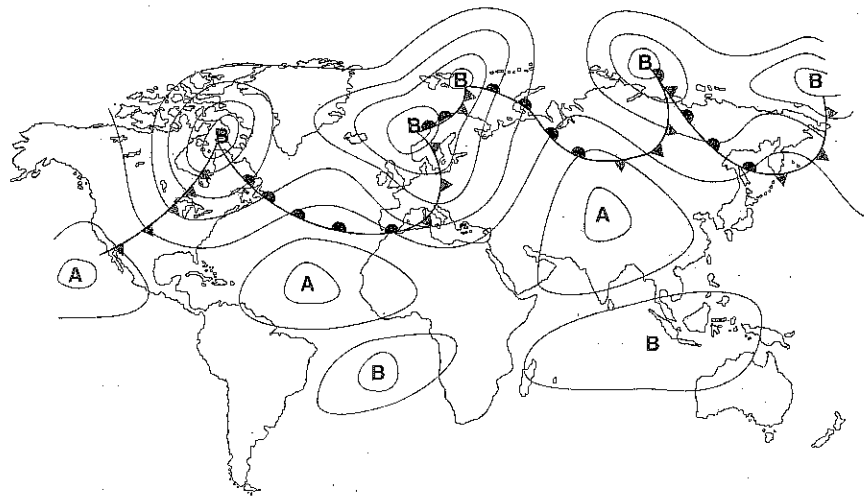


Fig. 6.31. El frente polar. (Fuente: Mariano Medina, modificada).

#### • El chorro polar

Los *jets stream* o **chorros** son unas intensas corrientes canalizadas, de unos pocos kilómetros de espesor, que circunvalan la Tierra. Soplan de oeste a este a la altura de la tropopausa (Fig. 6.32).

Concretamente, el que más afecta al clima de nuestro país es el **chorro polar**, situado aproximadamente a unos 9.000 m de altura, separando el aire frío polar (situado a su izquierda) del cálido subtropical (situado a su derecha).

El chorro puede adoptar forma rectilínea o llegar a ondularse de forma acusada formando meandros, denominados **ondas de Rossby**, que pueden incluso llegar a estrangularse.

El chorro y el frente polar son dinámicos porque giran en torno a la Tierra, se ondulan y varían de latitud a lo largo del año (Tabla 6.2). Las ondulaciones descendentes se llaman **vaguadas**, y las ascendentes, **dorsales**.

Durante el verano del hemisferio norte (de junio a septiembre), el frente polar y el chorro se sitúan en las proximidades del Polo Norte. Desde octubre hasta mayo, con la llegada del frío, comienzan a descender y a alejarse del Polo Norte, recorriendo toda Europa y pudiendo llegar a alcanzar la latitud correspondiente al norte de África. Como es lógico, a la latitud donde se sitúen se producirán las borrascas frontales, denominadas **borrascas ondulatorias**, que darán lugar a precipitaciones en las áreas afectadas. El tipo de precipitación de cada momento dependerá del tipo de frente (cálido, frío u ocluido) que la provoque.

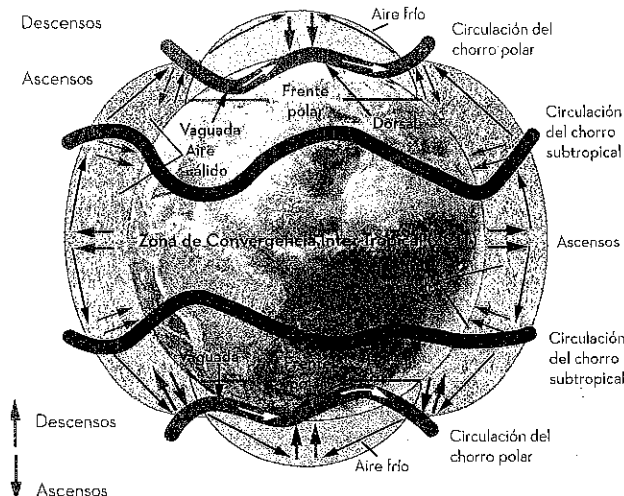
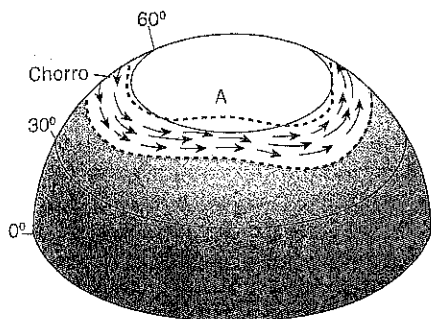


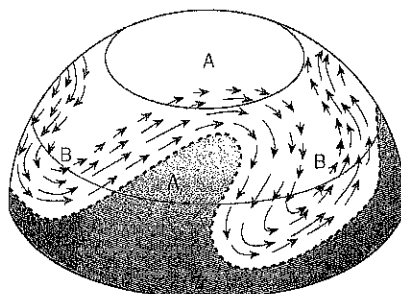
Fig. 6.32.b. Corrientes en chorro. (Fuente: Agencia Estatal de Meteorología, AEMET, modificada).



**Situación A:**

En esta situación, el cinturón de borrascas subpolares, el frente polar y el chorro se sitúan en las proximidades del Polo Norte (a unos 60° de latitud norte), formando un círculo cerrado en torno al anticiclón polar, que se encuentra comprimido sobre el polo. Por ello, las lluvias se producirán en los países nórdicos y sobre Islandia.

Esto ocurre porque la ZCIT y los anticiclones subtropicales, entre los que se encuentra el de las Azores (el que más afecta a la península ibérica), se desplazan hacia el norte durante la estación cálida.

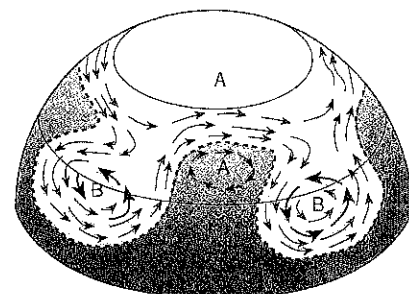


**Situación B:**

La ZCIT, los anticiclones subtropicales y las borrascas subpolares se desplazan hacia el sur.

Por ese motivo, el frente polar y el chorro descienden (pueden bajar hasta los 30° de latitud norte durante el invierno). En esas ocasiones, el giro del chorro se ondula en ondas Rossby. Las ondulaciones descendentes originan borrascas; las ascendentes, anticiclones.

Las ondas de Rossby se dirigen hacia abajo si los vientos fríos polares de levante (del NE) soplan más fuerte que los cálidos westerlies (del SO), por lo que se forma un frente frío entre ambos tipos de viento. Por el contrario, si los westerlies soplan con más intensidad, se forma un frente cálido y una ondulación hacia el norte.



**Situación C:**

Si la situación B se mantiene y los meandro se dilatan, pueden llegar a estrangularse más y más hasta que se rompen, originando borrascas si pasan al sur llevando aire frío; anticiclones si pasan al norte llevando aire cálido.

Este conjunto de altas y bajas presiones, que se denominan borrascas ondulatorias, constituyen el frente polar que, como vimos antes, origina precipitaciones en forma de frentes cálidos y fríos. Además, el desplazamiento de estas borrascas es, al igual que el del chorro situado sobre ellas, de oeste a este.

Tabla 6.2. Posición de las borrascas subpolares, el frente polar y el chorro a lo largo del año.

### 6.1. El clima de España

El clima de la península ibérica está determinado por la posición geográfica que ocupe el anticiclón subtropical de las Azores (Fig. 6.13), porque puede «bloquear» la entrada de precipitaciones.

**Anticiclones de bloqueo** son aquellos que se localizan en las latitudes medias y persisten en un mismo lugar durante semanas e incluso meses y, como cualquier otro anticiclón, la alta presión y el viento divergente desde el interior del mismo hace que actúen a modo de colinas, impidiendo la entrada de las lluvias y originando así intensas sequías en los lugares sobre los que se asientan. Además, desvían las borrascas hacia otras regiones, donde producen precipitaciones torrenciales e inundaciones.

- **Durante el verano** (Fig. 6.33) está más cerca del Polo Norte y bloquea la entrada de borrascas a nuestro país, desviándolas al norte de Europa. Las lluvias de verano son de carácter tormentoso, originadas por nubes de desarrollo vertical que se forman a partir de la convección térmica de aire cálido y húmedo. En esta época del año es frecuente que nos lleguen vientos procedentes del anticiclón subtropical situado sobre el desierto del Sahara. Estos vientos son cálidos, secos y, a veces, cargados de polvo; por eso dan lugar a las calimas.

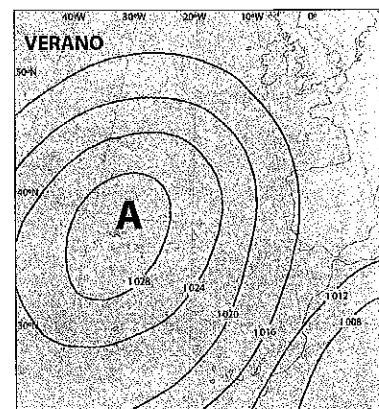


Fig. 6.33. Anticiclón de las Azores su posición durante el verano.

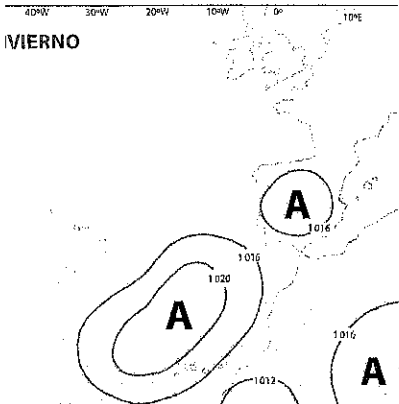


Fig. 6.34. Anticiclón de las Azores en posición de invierno.

- **Durante el invierno**, el anticiclón de las Azores se desplaza hacia el sur (Fig. 6.34), por lo que, en principio, no habría impedimento alguno para la entrada de las borrascas ondulatorias; sin embargo, nuestro país se comporta en esta estación como un continente, ya que, como resultado del intenso frío invernal, se forma un **anticiclón continental** por subsidencia vertical del aire frío que, como cualquier otro anticiclón, bloquea la entrada de las precipitaciones, originando intensas sequías, acompañadas de nieblas o heladas, y desvía las lluvias hacia la cornisa cantábrica y hacia el norte de Europa. Las lluvias invernales son de tipo frontal; pero, para que se produzcan, se ha de deshacer el anticiclón continental, hecho que solo es posible cuando el viento sopla muy fuerte y empuja las borrascas ondulatorias para que puedan entrar.
- **En primavera y otoño**, el anticiclón continental desaparece, y entonces es frecuente que entren las borrascas ondulatorias frontales. Sin embargo, si el anticiclón subtropical del Sahara se sitúa al SE de nuestra península, bloquea también la entrada de precipitaciones y el tiempo será inusualmente cálido y seco.

### A. La gota fría

Denominada también **DANA** (depresión aislada en niveles altos), es una situación frecuente en España, sobre todo a finales del verano y a comienzos del otoño. Su origen no tiene que ver con los frentes, sino que se trata de la entrada de aire frío en altura procedente de latitudes más altas y frías (por estar más próximas a los polos), que se ha colado debido a una ruptura de la corriente del chorro (Fig. 6.35.a y b). Este aire frío, situado a cierta altitud de la troposfera, se encuentra aislado y rodeado de un aire más templado y menos denso, por lo que va a tender a descender en espiral hasta alcanzar la superficie. A la vez se originará una borrasca por el ascenso convectivo del aire cálido y húmedo, y se formará una nube de rápido desarrollo vertical, que causará fuertes aguaceros, granizos o nevadas. Esto ocurre cuando la masa ascendente contiene mucha humedad, como sucede a finales de verano, ya que al enfriarse el mar más lentamente que la tierra, la evaporación en el Mediterráneo en esa época es muy intensa (Fig. 6.36).

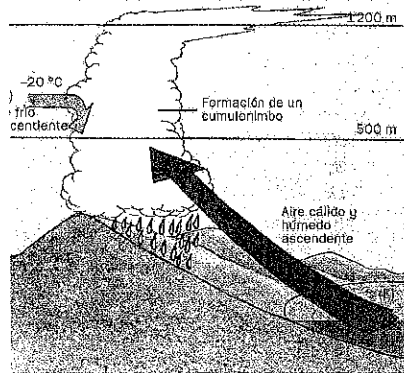


Fig. 6.36. La gota fría.



Fig. 6.35.a. 26 de septiembre de 2012.

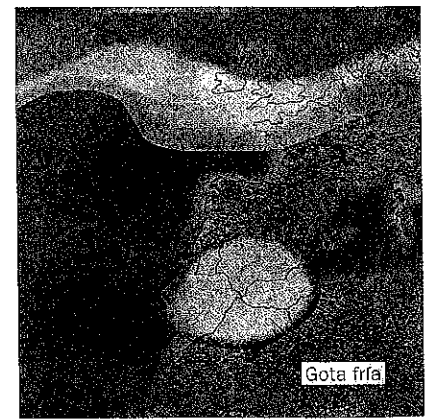


Fig. 6.35.b. 27 de septiembre de 2012.

### B. Los tornados

Son una especie de columna giratoria de viento y polvo de unos 50 metros de anchura, que se extiende desde el suelo hasta la base de un cumulonimbo. Se forman por un remolino que resulta de un calentamiento excesivo de la superficie terrestre. El giro suele comenzar cuando el viento de las capas altas sopla con mayor intensidad y en distinto sentido que el de las capas bajas. La velocidad del viento, de hasta 500 km/h, hace de los tornados uno de los fenómenos climáticos más peligrosos, rápidos y devastadores que existen (Tabla 6.3), pudiendo incluso hacer estallar las casas (debido a una brusca bajada de presión en su interior), romper cristales y aspirar vagones de tren cargados de mercancías. A esos peligros hay que añadir las lluvias torrenciales y las intensas granizadas que producen. Son típicos los tornados norteamericanos, pero pueden aparecer en otros lugares de latitudes templadas, entre ellos España, sobre todo en las costas del sur y del este peninsular.

0	64-117	Ligeros
1	118-180	Moderados
2	181-251	Considerables
3	252-330	Graves
4	331-417	Devastadores
5	Más de 418	Increíbles

Tabla 6.3. Escala de Theodore Fujita (Universidad de Chicago) para medir la intensidad de los tornados.

**Actividades**

8> Mira la imagen de la portada de esta unidad (pág. 138) y señala la posición geográfica ocupada por la ZCIT y por los cinturones de borrascas y anticiclones según los datos de la Figura 8.13. ¿Se trata de una situación de invierno o de verano en nuestro país? Razona tu respuesta.

- En una situación de verano, ¿en qué posición se encuentran las borrascas subpolares, el frente polar y el chorro (Tabla 6.2)? ¿Nos afectará un cinturón de borrascas o uno de anticiclones? ¿Cuál o cuáles de ellos en concreto? ¿Qué tiempo atmosférico cabe esperar?
- En una situación de invierno, ¿en qué posición se encuentran las borrascas subpolares, el frente polar y el chorro (Tabla 6.2)? ¿Nos afectará un cinturón de borrascas o uno de anticiclones? ¿Cuál o cuáles de ellos en concreto? ¿Qué tiempo atmosférico cabe esperar?

9> Mira el mapa de la Figura 6.37, correspondiente al 5 de noviembre de 2015, durante el «veranillo de san Martín», que se celebra el 11 de noviembre.

- Observa qué situación se produce en nuestra península y señala cuál es su origen. ¿Cómo se llama este tipo de situación? ¿Por qué?
- ¿Los vientos que nos afectan son fuertes?
- ¿Qué tiempo se espera?
- ¿Cómo repercute todo ello en la contaminación de las grandes ciudades españolas?
- ¿De dónde soplan los vientos en Canarias? ¿A qué situación se enfrentarán a consecuencia de ello?
- ¿En qué lugar del mapa están situadas las borrascas ondulatorias? ¿Dónde podrá llover? ¿De dónde sopla el viento en esos lugares? ¿Será frío o cálido? ¿Húmedo o seco?

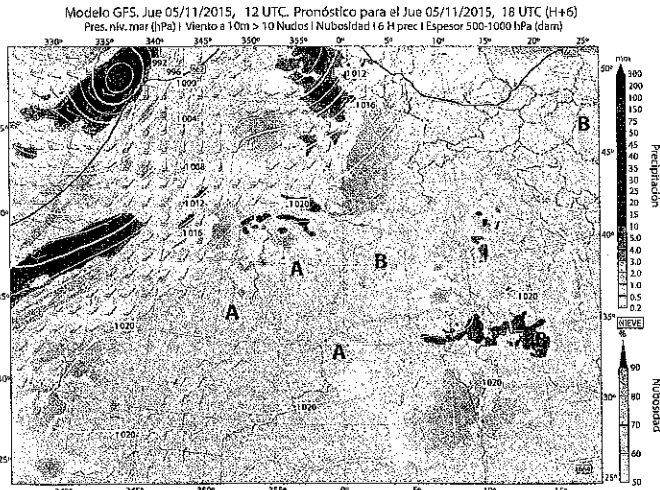


Fig. 6.37. Fuente: AEMET, modificado.

10> En el mapa de la Figura 6.38 se puede observar una situación típicamente invernal del clima de nuestra península.

- ¿Qué situación se observa sobre nuestra península: borrasca o anticiclón?
- ¿En qué sentido sopla el viento que nos afecta en el centro peninsular? ¿Y en Levante? ¿De dónde procede? ¿En qué lugares del mapa el viento sopla con mayor intensidad?
- ¿Lloverá en algún lugar de nuestra península? ¿Puede afirmar que, si no se esperan lluvias, significa que ha buen tiempo? ¿En qué condiciones no llueve pero, a pesar de ello, puede hacer mucho frío o incluso helar?
- El fenómeno de inversión térmica resulta muy común en estas situaciones. Explica en qué consiste con claridad y cómo afecta a la contaminación del aire.

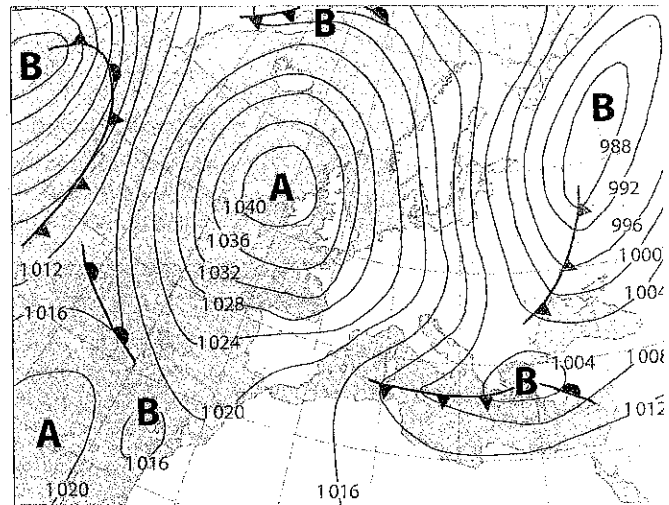


Fig. 6.38. Mapa del tiempo (18-1-2000).

11> Lee con atención una noticia recogida en prensa. Se trata de un riesgo bastante frecuente en España a comienzos del otoño (sobre todo entre el 17 y el 25 de octubre), por ejemplo, en Alicante (1/10/1997) cayeron 220 L/m<sup>2</sup> en seis horas. Las vías de comunicación permanecieron cerradas durante varias horas, se produjeron cortes de luz, graves inundaciones en Orihuela, Elche, Alicante, San Juan de Santa Pola, y hubo que lamentar seis muertes.

- ¿Cuál es la causa de esta situación? ¿En qué época del año y en qué zonas españolas se produce con mayor frecuencia? ¿Por qué? Explica su modo de acción.
- ¿A qué tipo de precipitaciones dan lugar? ¿Qué características de las mismas aumentan el peligro de inundaciones? Cita los daños originados por ellas.



## 7. El clima de las bajas latitudes

En este apartado vamos a describir las principales características climáticas de las zonas más próximas al ecuador, es decir, los monzones y los huracanes.

### 7.1. Los monzones

#### Más datos

Si observas la Figura 6.39.b, comprobarás que en el continente africano la ZCIT no asciende tanto y se queda rezagada más al sur. Esto es debido a que los vientos que soplan procedentes desde el desierto del Sahara lo impiden.

La palabra *monzón* deriva del árabe *mausim* y significa «estación» (del año). Se define el **monzón** como el cambio estacional a gran escala en la dirección del viento. Estos cambios son más notables en Asia, aunque también afectan al continente africano.

Los monzones son una especie de brisa marina a gran escala (Fig. 6.14) en la que la alteración de movimientos tierra-mar es semestral en lugar de diaria. Para comprenderlo mejor has de recordar que los continentes se calientan y enfrían más rápidamente que los océanos. Por ello, las zonas del interior de un continente ubicado en las latitudes medias se enfrían mucho durante la estación invernal, y el aire situado justo por encima de las mismas también se enfría mucho. Esto hace que sea más pesado y tienda a aplastarse contra el suelo, originando un anticiclón continental permanente. Recuerda que los vientos soplan desde el centro del anticiclón hacia el exterior, por lo que serán de carácter seco y, además, bloquearán e impedirán la entrada de las lluvias. Podemos diferenciar dos tipos de monzones:

- **Monzón seco.** En el invierno del hemisferio norte (Fig. 6.39.a), cuando la ZCIT está en su posición más al sur, el intenso frío hace que se instale sobre Asia un anticiclón continental que, como el resto de los anticiclones, expulsa desde el centro hacia el exterior vientos fríos y secos que proceden del noreste (NE). Esta es la época más seca en la India y el sudeste asiático.
- **Monzón húmedo.** En verano del hemisferio norte (Fig. 6.39.b) el sol calienta el continente y se deshace el anticiclón asiático. La ZCIT asciende mucho en latitud y se sitúa sobre Asia. Entonces los vientos húmedos del SO soplan desde el mar hacia la tierra y comienzan las lluvias monzónicas en la India y en el sureste de Asia.

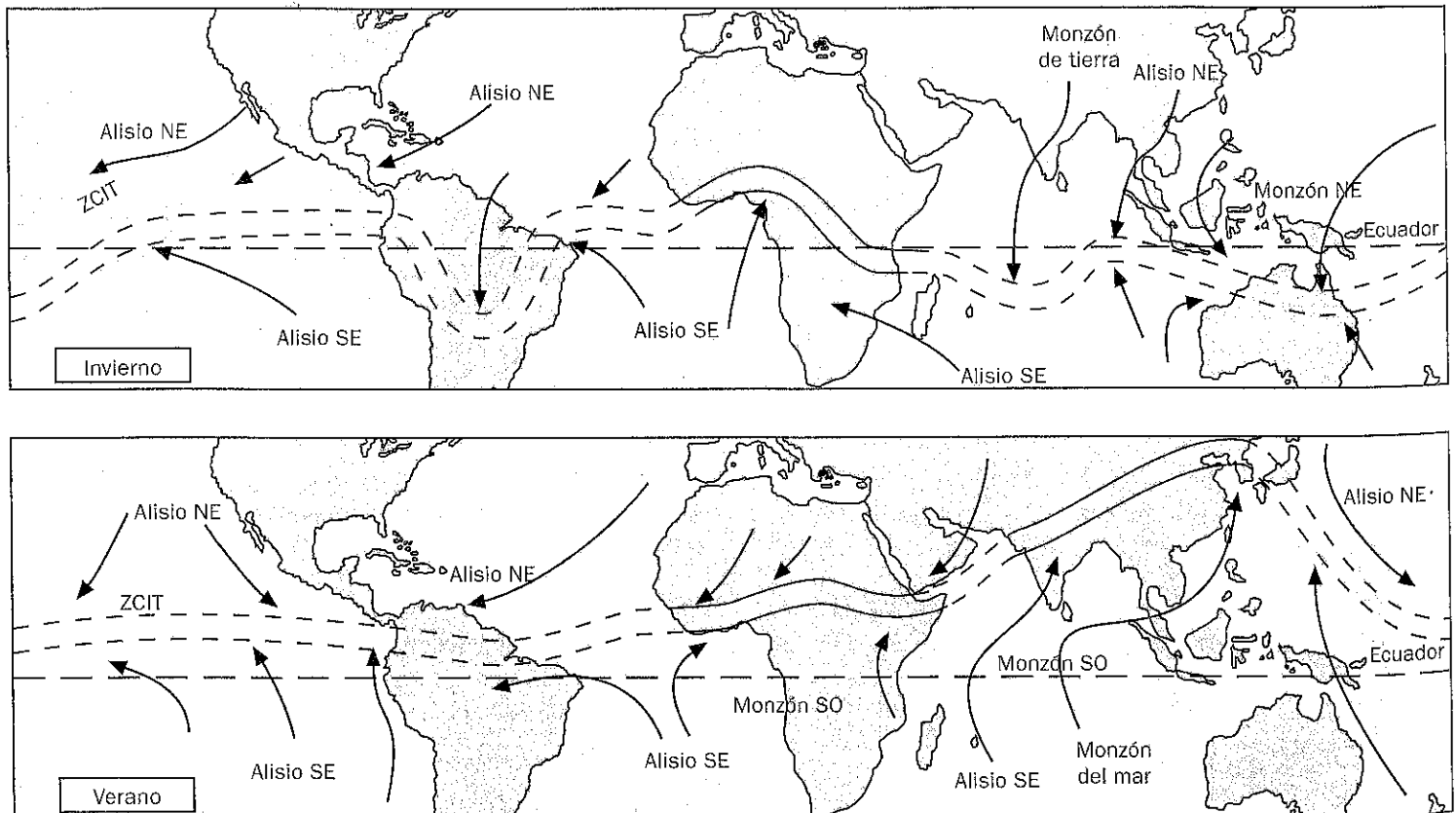
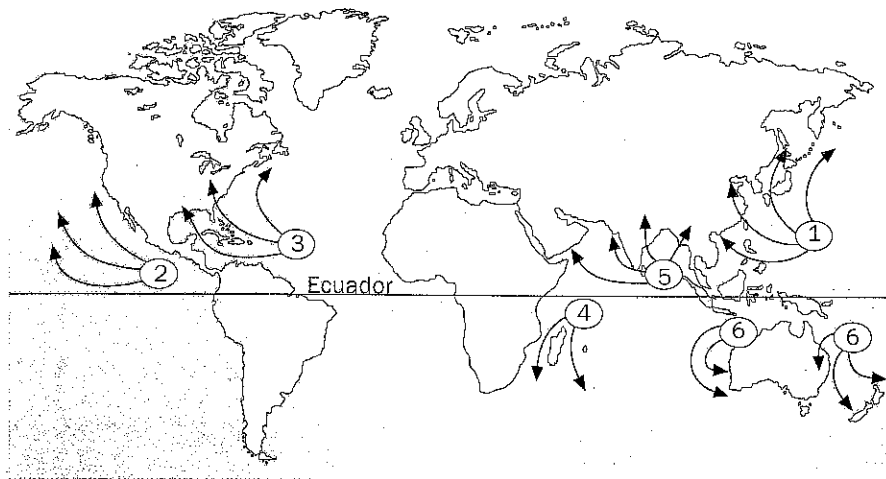


Fig. 6.39. Distribución mundial de los monzones: a) en invierno del hemisferio norte; b) en verano del hemisferio norte.

## 7.2. Huracanes, ciclones y tifones

Estos términos se utilizan en distintas partes del mundo, pero significan lo mismo (Fig. 6.40).

Un **huracán** es un grupo de tormentas muy próximas entre sí que ocupan un diámetro medio de 500 km y que giran en espiral en torno a una parte central: el **ojo del huracán**, de aproximadamente unos 40 km de ancho, que se encuentra en calma (Fig. 6.41). Los huracanes se originan sobre los océanos de latitudes comprendidas entre los 8° latitud norte y 15° latitud sur, donde la fuerte insolación calienta el agua del mar al menos a 26,5 °C, originando una intensa evaporación y una fuerte convección, que forma nubes de tormenta de un enorme desarrollo vertical.



**Fig. 6.40.** Distribución geográfica de los huracanes: cada año se forman unos 18 **tifones** en las costas de Filipinas, China y Japón (1); cinco o seis en la costa pacífica de América central (2); ocho **huracanes** en el Caribe y costa oriental de Estados Unidos (3); diez **ciclones** en la costa oriental de África (4); dos ciclones en las costas de Bengala y Arabia (5), y dos en el norte de Australia (6).

El giro en espiral es debido al efecto Coriolis, que aumenta a medida que se aleja del ecuador. El sentido de giro es contrario a las agujas del reloj en el hemisferio norte (al revés que en el hemisferio sur). Debajo del ojo del huracán, y como consecuencia de la fuerza de succión ejercida por las borrascas, se produce una elevación del agua del mar que da lugar a olas que pueden llegar a tierra y asolar las costas. Además del movimiento de rotación, también se desplazan de este a oeste, assolándolo todo a su paso. Posteriormente, los del hemisferio septentrional se dirigen hacia el norte y luego hacia el nordeste; los del hemisferio meridional se dirigen al suroeste y, por último, al sur (Fig. 6.40).

Cuando los huracanes penetran en tierra, se debilitan al cortárseles el suministro de humedad y se convierten en borrascas tropicales; pero si retornan al mar, pueden volver a reactivarse.

Los mayores peligros de un huracán se deben a la velocidad de rotación del viento en torno al ojo (ver la Tabla 6.4), a las inundaciones debidas al oleaje y a las fuertes lluvias (300-600 litros/m<sup>2</sup>), que causan cuantiosos daños materiales. Por eso, tradicionalmente se utilizaron aviones para su detección, método bastante arriesgado. En cambio, hoy día se efectúa un seguimiento por vía satélite (Fig. 3.28) y existen sistemas de alerta a la población.

Otra medida para luchar contra el riesgo de huracanes es la construcción de viviendas adecuadas, que son caras y que solamente poseen los países ricos.

Número de categoría	Velocidad del viento (km/h)	Velocidad del viento (m/s)	Clase
1	118-152	1,2-1,6	Mínimos
2	153-176	1,7-2,5	Moderados
3	177-208	2,6-3,7	Importantes
4	209-248	3,8-5,4	Extremos
5	Más de 248	Más de 5,4	Catastróficos

### Más datos

Los meteorólogos bautizan a los ciclones con nombres que varían de región a región y son determinados con años de anticipación por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) o por los servicios meteorológicos nacionales o regionales. Desde 1953, la OMM utiliza listas de veintinueve nombres ordenadas alfabéticamente (pero sin incluir las letras Q, X, Y, Z). Al principio eran nombres femeninos, pero desde 1978 se incluyen también masculinos. Para los del Caribe existen seis listas que se aplican una cada año y después se repiten. Si algún huracán fue especialmente devastador se puede retirar de la lista; en su lugar se pone otro que comience con la misma letra. Cuando se acaba la lista, se recurre a las letras tras del alfabeto griego: alfa, beta, gamma, etc., para nombrarlos.



**Fig. 6.41.** Mecanismo de formación de los huracanes. Se trata de varias nubes de desarrollo vertical próximas entre sí.

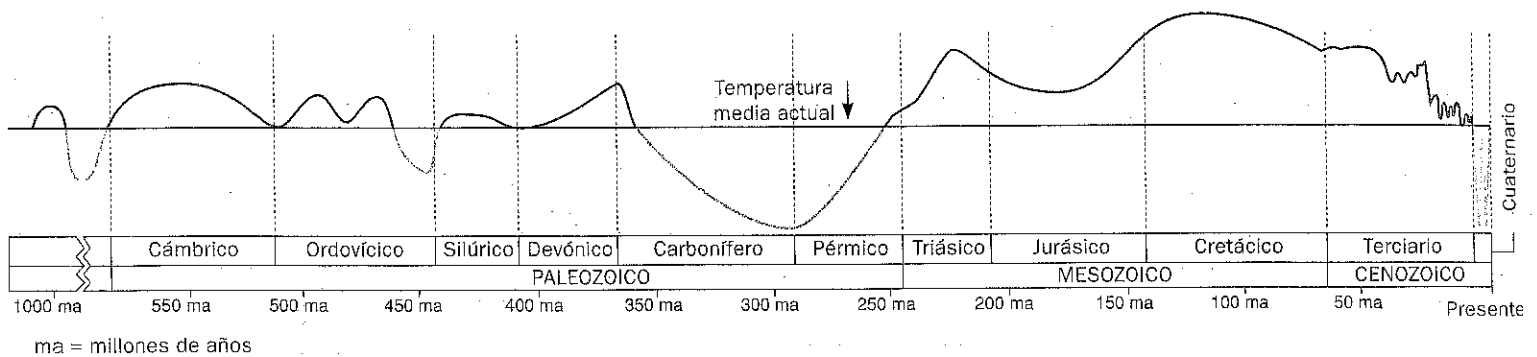
**Tabla 6.4.** Escala de Safir-Simpson para valorar la potencia de los huracanes. Entre 62 y 118 km/h no se considera huracán, sino tormenta tropical.

## 8. Cambios climáticos pasados

En la Unidad 1 estudiamos los modelos del clima como resultado de las interacciones entre los diferentes subsistemas terrestres, así como las repercusiones sobre el mismo de las variaciones de la radiación. Ahora explicaremos las causas de las principales variaciones en las temperaturas medias terrestres registradas desde el Precámbrico hasta la actualidad.

### A. Antes del Cuaternario

Conocemos el papel desempeñado por las corrientes oceánicas en el transporte de calor hacia las zonas polares y el efecto de frenado de las mismas llevado a cabo por las masas continentales. Así pues, si hoy sabemos que desde comienzos de la historia de la Tierra la distribución de tierras y mares ha sido diferente, resulta indudable su repercusión sobre el clima terrestre. En la gráfica de la Figura 6.42 podemos observar, a grandes rasgos, las variaciones de temperatura terrestre más significativas:



**Fig. 6.42.** Variaciones en la temperatura media terrestre en comparación con la actual hasta comienzos del Cuaternario. (Fuente: *Observar el tiempo*. William J. Burroughs; modificado).

La existencia de un gran continente llamado Pangea impediría que las corrientes oceánicas pudieran alcanzar las latitudes medias y altas, que por ello permanecerían muy frías. Esto concluiría en una glaciación que afectaría a las cumbres montañosas más elevadas. Así se puede explicar tanto la **glaciación precámbrica** como la **glaciación carbonífera** (Fig. 6.43), ya que se corresponden, respectivamente, con las Pangeas I y II. Sin embargo, en el tiempo transcurrido entre ambas, se produce la fragmentación de la Pangea I, permitiendo una intensa circulación de las corrientes oceánicas, con lo que las temperaturas medias a lo largo de Paleozoico, salvo un breve periodo de enfriamiento acaecido a finales del Ordovícico, fueron superiores a las actuales.

Por otra parte, ya sabemos que los continentes tienen una mayor amplitud térmica, por lo que en los inviernos el frío es muy intenso y el aire frío se aplasta contra el suelo, originando un **anticiclón permanente**. En los anticiclones, el viento frío y seco parte de su interior y se dirige hacia sus bordes, bloqueando la entrada de las lluvias, por lo que el clima se torna árido y desértico. Esto parece que ocurrió durante la **desertización del Pérmico**, por influencia del anticiclón de gran tamaño formado sobre el supercontinente Pangea II. Esta desertización se prolongó hasta el Triásico medio (primer periodo del Mesozoico), cuando la Pangea comenzó de nuevo su fragmentación.



**Fig. 6.43.** Glaciación carbonífera.

Durante el Mesozoico y el Terciario, la temperatura se elevó aún más, sobre todo en el **Jurásico** y **Cretácico**, cuando la Pangea II se parte en dos continentes, uno al norte y otro al sur, y con la apertura del océano, se hace posible el transporte de calor hacia los polos. Por ello el clima se volvió tropical y muy favorable para el desarrollo de los grandes reptiles. Parece que se mantuvo así hasta bien entrado el Terciario (hace unos 40 millones de años). Sin embargo, a pesar de esta bonanza climática, a finales del Mesozoico, hace 65 millones de años tiene lugar la extinción de los dinosaurios, lo que parece que fue debido al impacto de un meteorito que ocultó la luz solar y provocó un ligero descenso de las temperaturas medias.

## Durante el Cuaternario

Desde el comienzo del Cuaternario hasta hoy la distribución de tierras y mares apenas ha variado, por lo que las variaciones climáticas desde entonces no tienen que ver con dicha distribución; para su explicación se ha recurrido a las variaciones de la radiación solar incidente debida a los ciclos de Milankovitch, estudiados en la Unidad 1 (Fig. 1.43).

Durante los 800.000 últimos años, la Tierra ha pasado por periodos glaciales de unos 100.000 años de duración, separados por periodos interglaciales de unos 10.000 años (Fig. 6.45). La existencia de dichas glaciaciones se ha estudiado a partir del análisis de las burbujas de aire atrapadas entre los hielos glaciares. Se ha comprobado que, durante los periodos de enfriamiento, dicho aire contenía una menor proporción de CO<sub>2</sub> (Fig. 6.44).

Además, existen numerosos estudios que avalan la existencia de las glaciaciones. Entre ellos destacamos los basados en el estudio del polen encontrado en algunos sedimentos, que sirven para indicar el tipo de vegetación y, por tanto, el clima de la época en la que se depositaron.

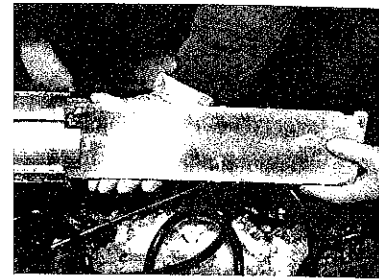


Fig. 6.44. Testigo de hielo para estudiar las variaciones en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera a través de los tiempos.

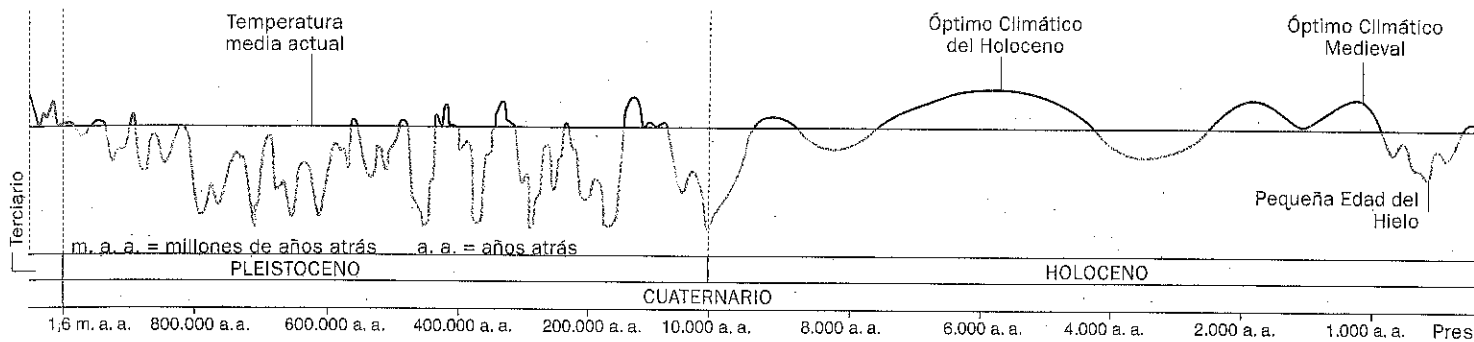


Fig. 6.45. Glaciaciones del Cuaternario y variaciones de la temperatura hasta la actualidad. (Fuente: *Observar el tiempo*, William J. Burroughs modificado).

## B. Cambios en las temperaturas durante el pasado histórico

Hace aproximadamente 10.000 años (Fig. 6.45) acabó la última glaciación del Cuaternario y comenzó un periodo interglacial cálido. Sin embargo, las condiciones climáticas no han sido uniformes, sino que han estado sometidas a oscilaciones.

Se denomina **Óptimo Climático** (hace entre 7.000 y 5.000 años) al periodo de máximo calentamiento acaecido durante el Holoceno, con temperaturas 2 o 3 grados superiores a las actuales en latitudes templadas, lo que produjo el retroceso de los hielos de los países nórdicos, el avance hacia el norte de los bosques de Canadá y Siberia y una elevación del nivel del mar de unos tres metros. Las borrascas ecuatoriales ascendieron hasta latitudes inusuales, por lo que las lluvias monzónicas afectaron tanto al desierto del Sahara como a las regiones de Oriente Medio, lo que repercutió en el auge histórico de Egipto y Mesopotamia.

Tras esta época cálida se produjo una alternancia de épocas cálidas y frías, predominando estas últimas hasta los años 1000-1200 d. C., que tuvo lugar el **Óptimo Climático Medieval**, en el que se produjo la fusión del Ártico, lo que permitió a los vikingos la exploración del Atlántico Norte, la colonización de Groenlandia e Islandia y la llegada a América del Norte.

Después tiene lugar un periodo de enfriamiento más marcado, la **Pequeña Edad del Hielo** (entre los años 1200-1900 d. C.), con una especie de pequeña glaciación que supuso el avance de los hielos polares. En el siglo XIV el intenso frío y la sequía provocaron unas malas cosechas que dieron lugar a grandes hambrunas y causaron la muerte o debilitaron a la población europea hasta hacerla víctima de la peste negra. Desde entonces hasta la actualidad, las temperaturas se han ido suavizando.

Todas estas fluctuaciones son más rápidas que las del Cuaternario, por lo que no pueden achacarse a los ciclos de Milankovitch, sino que parecen causadas por las manchas solares originadas por las variaciones de la actividad solar interna.

### Más datos

Las **manchas solares** son unas zonas oscuras que aparecen sobre la superficie solar y van en aumento hasta alcanzar un máximo cada 11 años aproximadamente. La intensidad de la radiación solar que incide sobre la Tierra es de 1.370 W/m<sup>2</sup> como promedio, y en el máximo de manchas solares puede aumentar en 1,2 W/m<sup>2</sup>. Sin embargo, la cantidad total de manchas solares es variable en ciclos de 80 y 180 años, en los que se produce una disminución o un aumento del máximo número de manchas. Estos intervalos pueden ser causados por todas las variaciones térmicas acaecidas durante el pasado histórico.

## 9. Cambios climáticos presentes y futuros



Fig. 6.46. Variaciones del CO<sub>2</sub> a lo largo de los tiempos y nivel actual (Fuente: NOAA, gráfico original de www.nasa.gov).

Ya hemos visto que las variaciones del clima en el pasado se han mantenido dentro de unos límites. Sin embargo, desde 1900 hasta la actualidad, la temperatura media del clima terrestre no ha dejado de ascender, sobre todo desde 1950 hasta hoy, años en los que se ha producido un calentamiento climático extraordinariamente rápido (Fig. 6.46). Además, en las dos últimas décadas se encuentran los años más cálidos de los registrados desde 1950.

El calentamiento climático actual es un problema de gran envergadura, ya que es global, es decir, afecta a la totalidad del planeta. Por ello, las soluciones adecuadas para hacerle frente se han de llevar a cabo a escala global, con el consenso de todos los países del mundo.

Se sabe que en los últimos miles de años la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico se mantuvo alrededor de 280 ppm, pero a partir de la Revolución industrial, con la quema de combustibles fósiles, comenzó su vertiginoso ascenso hasta unas 400 ppm en 2015.

El CO<sub>2</sub> es el principal **gas de efecto invernadero (GEI)** (Fig. 6.47), pero no es el único, ya que existen otros más potentes; sin embargo, dada su baja concentración, su incidencia sobre el efecto invernadero es menor. Los principales responsables son el **metano** y el **óxido nítrico**, cuyas emisiones vimos en los ciclos del carbono y del nitrógeno, respectivamente; los **F-gases**, como los hidrofluorocarbonos (**HFC**) y los hidrocarburos perfluorados (**PFC**), y otros hidrocarburos, como el hexafluoruro de azufre (**SF<sub>6</sub>**), que son utilizados en las industrias del frío y el aire acondicionado.

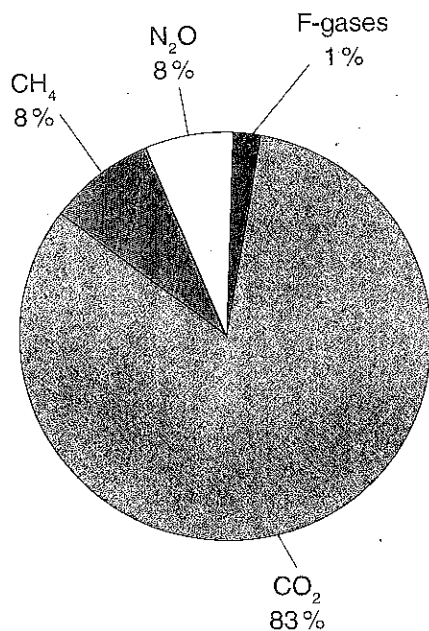


Fig. 6.47. Porcentaje de participación en el efecto invernadero de los diferentes GEI en 2006, según la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA).

**El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC)**, creado por la ONU en 1988, es un grupo internacional de científicos cuya misión es hacer un seguimiento del riesgo de cambio climático provocado por la actividad humana, sus potenciales consecuencias y las posibles formas para poder afrontarlo.

Según un informe del IPCC correspondiente al año 2014, lo observado y las previsiones que se hacen para finales del siglo XXI, de continuar así las cosas, son las siguientes:

- Aumento de la temperatura global. Se ha observado que la temperatura media terrestre ha aumentado 0,74 °C en los últimos 100 años. Se prevé un aumento de 1,1 a 6,4 °C.
- El aumento de la temperatura provocará la fusión generalizada de los hielos polares, un retroceso de los glaciares (Fig. 6.48) y un aumento de los peligrosos icebergs.
- Al fundirse el hielo disminuirá el albedo, con lo que se elevarán aún más las temperaturas

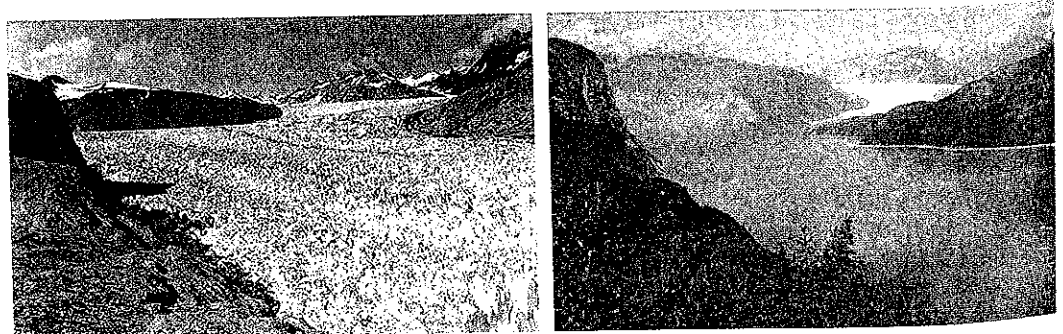
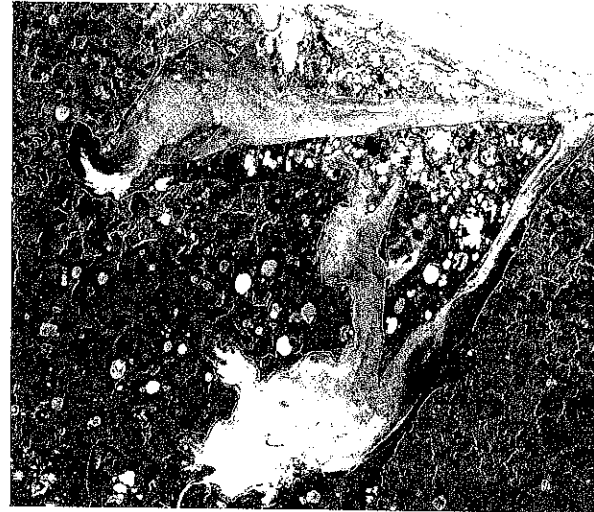


Fig. 6.48. Retroceso de los hielos de los glaciares. A la izquierda, fotografía del glaciar de Muir (sureste de Alaska) tomada el 13-8-1941; a la derecha, otra del 31-8-2004. Entre una fecha y otra el glaciar se había retirado más de 12 km. El agua del océano ha llenado el valle glaciar [Fuente: National Snow and Ice Data Center (NSIDC), de EE. UU., WO Camp, B. F. Molnia].

- Se desplazarán las zonas climáticas hacia los polos, a un ritmo de unos 5 km/año, lo que provocará cambios en los ecosistemas y el avance de los desiertos subtropicales (afectando en este caso a España).
- La tundra ártica puede llegar a descongelarse, acarreado consecuencias aún más drásticas, ya que las turberas actúan como sumidero de unos 2.400 km<sup>3</sup> de gases de efecto invernadero, metano y CO<sub>2</sub>. Si llegara a descongelarse el *permafrost* (suelo helado) que las recubre, los gases serían liberados hacia la atmósfera, realimentando positivamente el efecto invernadero. Se ha constatado un aumento de la temperatura de la capa de *permafrost* de más de 3 °C a partir de la década de 1980 y se ha comprobado mediante teledetección una fusión generalizada del *permafrost* en Siberia y en Alaska (Fig. 6.49).
- Se producirán alteraciones en el clima, sobre todo en los continentes del hemisferio norte. Habrá más días de calor y menos días de frío al año. Ya han aumentado mucho los fenómenos meteorológicos extremos (precipitaciones torrenciales, sequías, olas de frío y calor) en muchas zonas del planeta y se han alterado los patrones de distribución de los mismos. En julio de 2015 se vivió en España la ola de calor más intensa y también la más larga desde 1975, produciendo numerosos enfermos o muertos por golpes de calor o a causa de la contaminación del aire asociada. La cantidad de huracanes en el Atlántico Norte fue superior a lo normal desde 1995 y también se observó un incremento de su potencial de destrucción.
- Habrá alteraciones en el ciclo del agua, con una reducción de su cantidad y calidad.
- Problemas de salud a causa del hambre y las enfermedades derivadas de una disminución de las cosechas, o debidos a cambios en la distribución geográfica, consecuencia de la reactivación de ciertas enfermedades intestinales y las producidas por mosquitos (salmonelosis, dengue, malaria), y un aumento de enfermedades respiratorias y alérgicas en Europa.
- El nivel del mar ha subido 17 centímetros durante el siglo xx. Se prevé un aumento de 18 a 38 cm para los próximos 100 años, lo que puede llegar a causar la inundación de zonas costeras. La subida será causada por la dilatación térmica del agua y por el deshielo en tierra firme (caso de la Antártida), ya que el deshielo de los flotantes no repercute en el nivel del mar (por el principio de Arquímedes). Si el recalentamiento de la temperatura llegara hasta los 3 °C en los próximos mil años, se fundirían todos los hielos de Groenlandia y el nivel del mar podría ascender siete metros.
- Interrupción o ralentización del movimiento de la cinta transportadora oceánica, a causa de la descongelación total del océano Ártico (prevista para el año 2080), lo que dará lugar a la formación superficial de un agua poco densa por contener menos sal, lo que dificultará el hundimiento de la cinta. También puede alterarse el curso normal de otras corrientes oceánicas.



**Fig. 6.49.** Lagos helados de color azulado junto al océano también helado; en verde, los producidos por la fusión del *permafrost*; en marrón, antiguos lagos ya desaparecidos. Bahía de Khromskaya, al norte de Siberia. (Cortesía: Landsat-5 N 2011).

## 9.1. Acuerdos internacionales

En el **Convenio sobre el Cambio Climático** de la **Conferencia de Río de 1992**, se apuntó el origen antropogénico como responsable del mismo. Hoy nadie duda de la relación causal establecida entre las emisiones de gases de efecto invernadero provocadas por las actividades humanas y el aumento de la temperatura media del planeta. Se concluyó que, si los países en vías de desarrollo siguen nuestro modelo de explotación incontrolada en cuanto al consumo de los recursos, las emisiones de gases de efecto invernadero se dispararán. La solución que se propuso fue la de propiciar su desarrollo económico mediante el uso de energías renovables, limpias y sostenibles, siendo esta una labor global que habrían de subvencionar los países ricos.

A partir de 1995 la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático instituyó la **Conferencia de las Partes (COP)**, órgano encargado de revisar y tomar decisiones respecto al cambio climático, integrado por los Estados firmantes de la **Convención sobre Cambio Climático**, que se reúne anualmente.

### Más datos

**COP celebradas hasta la fecha:** Berlín, 1995; Ginebra, 1996. Kíoto, 1997; Buenos Aires, 1998.; Bogotá, 1999; La Haya, 2000; Bonn, 2001; Marrakech, 2001; Nueva Dehli, 2001; Milán, 2003. Buenos Aires, 2004; Montreal, 2005; Nairobi, 2006. Bali, 2007; Pozdan, 2008; Copenhague, 2009; Cancún, 2010; Durban, 2011; Doha, 2012; Lima, 2014; París, 2015.

En la III COP del año 1997 se firma el **Protocolo de Kioto**, lo que supone un primer paso para poner un límite a las emisiones de gases de efecto invernadero. Su objetivo era «reducir las emisiones de GEI en los países desarrollados una media de un 5,2% hasta el año 2012, respecto a las emisiones correspondientes a 1990, con el fin de estabilizar su concentración en la atmósfera». Sin embargo, no se impuso ningún límite a las emisiones de los países pobres.

### Mecanismos de flexibilidad

Fueron propuestos en diferentes cumbres con el fin de que las reducciones no fueran tan drásticas. Son tres:

- **La compraventa de emisiones.** Un país puede comprar a otro los derechos de las emisiones, de forma que pueda alcanzar sus objetivos.
- **Mecanismos de desarrollo limpio (MDL).** Los países desarrollados pueden promover e invertir en proyectos de desarrollo limpio del Sur con asistencia financiera y tecnológica, descontándose las unidades de reducción de emisiones en el país receptor como si fueran propias.
- **Inclusión de sumideros de carbono.** Consiste en contrarrestar una parte de las emisiones plantando árboles y otros vegetales capaces de absorber el CO<sub>2</sub>.

En la **Cumbre de Nairobi** de 2006 se propusieron unas **Medidas de Mitigación** del Cambio Climático y la creación de un **Fondo de Adaptación**, con el que ayudar a luchar contra los efectos adversos del mismo a los países afectados.

En la **Cumbre de Bali** de 2007 se estableció un nuevo **Protocolo Pos-Kioto**, que se firmaría en 2012, una vez expirado aquel, y se acordó potenciar la transferencia de tecnologías limpias (referidas a la energía solar y eólica) a los países en vías de desarrollo, con el fin de facilitar su adhesión voluntaria al nuevo protocolo Pos-Kioto, sobre todo a los países emergentes, como India o China.

Con la **Enmienda de Doha** (2012) se prorrogó el Protocolo de Kioto hasta el 2020 y se propuso elevar la reducción de las emisiones de GEI hasta el 18%, respecto al año base (1990).

La UE suscribió dicha enmienda y se comprometió a reducir en un 21% sus emisiones, en lugar del 8% firmado en Kioto. Sin embargo, a algunos Estados miembros que no cumplían ese objetivo se les recomendó aplicar políticas y medidas adecuadas para lograrlo. Para conseguirlo, se requiere una fuerte voluntad política que pasase por invertir en energías renovables y mejorar la producción de vehículos con un consumo más eficiente, por ser la energía y el transporte las actividades que más emisiones producen (Fig. 6.50).

En la **Conferencia sobre el Cambio Climático de París** (diciembre de 2015), la mayoría de los 195 países ya habían presentado previamente sus **Contribuciones Nacionales o INDC** (Intended Nationally Determined Contributions) (serie de acciones climáticas concretas con las que se comprometen a adoptar medidas para reducir sus emisiones y adaptarse a los impactos derivados del cambio climático). Y se comprometieron a implantar en sus industrias y demás sectores económicos las medidas tecnológicas necesarias para combatir el cambio climático y que, a la vez, sean compatibles con el desarrollo sostenible y con la reducción de la pobreza. Estas contribuciones han de ser revisadas y controladas quinquenalmente.

En París se fijó como objetivo que el aumento de las temperaturas medias para finales de siglo sea inferior a los 2 °C con respecto a los niveles preindustriales. Además, se creó un **Fondo Verde**, subvención de 100.000 millones de dólares anuales, que habrán de pagar los países desarrollados para contribuir a que el desarrollo económico de los países en desarrollo se haga de forma sostenible y que, a la vez, puedan reducir sus emisiones, adaptarse a las consecuencias adversas del cambio climático y promover la resiliencia al clima de todas las personas que puedan verse afectadas por el mismo.

Este **Protocolo de París**, a diferencia del de Kioto, que firmaron solamente los países desarrollados, se consideró universal, porque ha sido suscrito de forma vinculante por los 195 países participantes, lo que significa que tanto los países en vías de desarrollo como los emergentes lo han asumido.

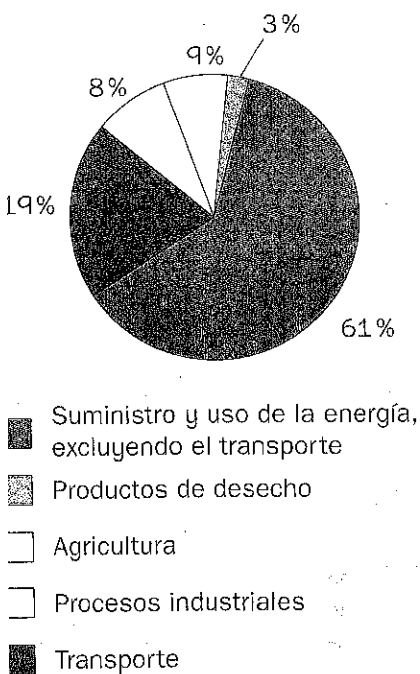


Fig. 6.50. Porcentaje de emisiones de GEI en distintas actividades. (Fuente: Agencia Europa de Medio Ambiente).

**! Importante**

**Países emergentes**  
Países en vías de desarrollo cuyas economías se encuentran en un proceso de expansión, lo que les permite comenzar a competir con las grandes potencias. Algunos ejemplos en 2015 son: China, India, Malasia, Corea del Sur, Catar, Emiratos Árabes, Brasil, Chile, Argentina, Perú, etc.

**Actividades**

12> Lee el apartado 9 y contesta de forma razonada a las siguientes preguntas:

- ¿Qué datos confirman la participación humana en el calentamiento climático?
- ¿Cuáles son los gases que producen este efecto? ¿En qué porcentaje influye cada uno de ellos? ¿Cuáles son sus principales fuentes de emisión?
- Señala las conferencias que representan un hito para el problema del cambio climático, explicando los principales objetivos de cada una de ellas.
- ¿En qué valor está la media de las reducciones establecidas en la Cumbre de Kioto? ¿Cuáles son los países que más han de rebajar sus emisiones? ¿Cuáles son los que pueden elevarlas? Haz un pequeño comentario al respecto.
- ¿En qué consisten los mecanismos de flexibilidad? Explícalos y haz una valoración crítica.
- ¿En qué consisten las medidas de adaptación propuestas en la Cumbre de Nairobi de 2006?
- ¿Qué propuestas se contemplan en el Protocolo Pos-Kioto para el año 2012? ¿Cómo afectan las mismas a los países en vías de desarrollo?
- De no alcanzarse los objetivos de Kioto, ¿cuáles serían las consecuencias ambientales? ¿Qué hábitos estarías dispuesto a cambiar para contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero?
- ¿Cuál es la tendencia en Europa en cuanto a las emisiones?

13> Mira las fotografías de la Figura 6.48 y explica:

- ¿Cómo puede contribuir el aumento del CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero en el retroceso de los glaciares?
- Cita dos fuentes, una antrópica y otra natural, de emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.
- Cita y explica dos efectos del deshielo glaciar a escala mundial.
- Busca información sobre algún método para el estudio del avance o retroceso de los sistemas glaciares en el mundo.

14> España se encuentra entre los países menos cumplidores de la UE y, sin embargo, se prevé que seamos los más afectados por las consecuencias del cambio climático.

- Observa el diagrama causal (Fig. 6.51) que representa los efectos del calentamiento climático sobre el agua disponible para la agricultura de nuestro país, explica los hechos encadenados que producen un efecto adverso sobre los recursos agrícolas y enumera sus consecuencias, tanto ecológicas como económicas y sociales.

b) Observa la Figura 6.50 e indica qué actividades humanas producen una mayor cantidad de emisiones de G<sub>de</sub>

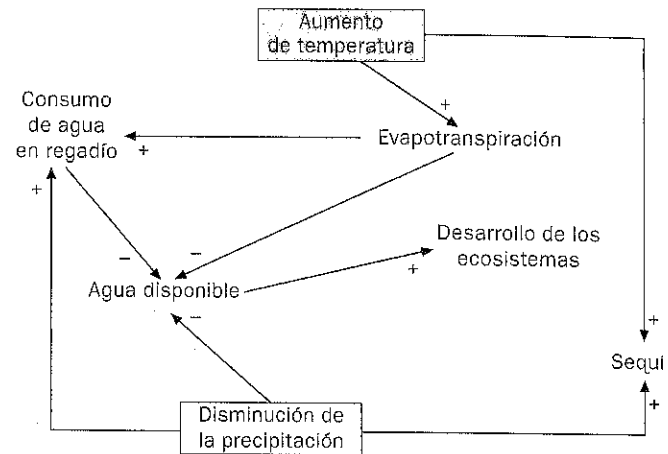


Fig. 6.51.

15> Durante el Jurásico los océanos eran 15 °C más cálidos que hoy y las latitudes templadas se prolongaban hasta los polos, impidiendo la formación de casquetes de hielo.

Parece que esta situación se mantuvo así hasta bien entrada el Terciario (hace 40 millones de años, aproximadamente). Por este motivo resulta difícil demostrar la extinción de los dinosaurios a partir de las glaciaciones y otros cambios climáticos.

- Observa la Figura 4.44 y relaciónala con la Figura 6.42. ¿Cuál es la mayor extinción masiva? ¿Cuál es su causa posible?
- Busca información en prensa y en libros sobre las causas de la extinción de los dinosaurios y de otras especies hace 65 millones de años.

16> Lee atentamente la lectura final de esta unidad y responde a las siguientes preguntas:

- Mira la Figura 6.37 de la actividad 9, en la que se observa sobre nuestra península una situación atmosférica conocida como «veranillo de san Martín». ¿Con qué movimientos verticales del aire y con qué situaciones atmosféricas de las representadas en las Figuras 6.54 a 6.55.a y 6.55.b puede estar relacionada esta situación? ¿Por qué? Explícalo con claridad.
- Ahora mira el mapa del tiempo correspondiente a un día frío de enero (Fig. 6.38 de la actividad 10) y responde a las mismas preguntas del apartado anterior.
- Haz lo mismo con el mapa de la Figura 6.29 de la actividad 6.
- De las Figuras 6.54, 6.55.a y 6.55.b, ¿cuáles son las situaciones más favorables y las más desfavorables para la contaminación del aire? ¿Por qué?



**Actividades**

17> Observa la Figura 6.52, rellena los espacios señalados y contesta a las preguntas que se formulan.

a) Radiación de onda corta incidente:

• Sobre la atmósfera:	• Sobre la superficie terrestre:
Absorbida .....	Absorbida .....
Reflejada .....	Reflejada .....
Total .....	Total .....
TOTAL INCIDENTE .....	

b) Radiación emitida por la Tierra

• Onda corta:	• Onda larga:
Reflejada por la atmósfera .....	Emitida por la atmósfera .....
Reflejada por el suelo .....	Emitida por el suelo .....
Total .....	Total .....
TOTAL SALIENTE .....	

c) Balance de radiación de la superficie terrestre:

• Radiación recibida:	• Radiación emitida:
De onda corta .....	De onda corta .....
De onda larga .....	De onda larga .....
Total recibida .....	Total emitida .....

BALANCE TOTAL (entradas - salidas) .....

¿Está en equilibrio la relación entradas-salidas?

d) Balance de radiación de la atmósfera:

• Radiación recibida:	• Radiación emitida:
De onda corta .....	De onda larga al espacio .....
De onda larga .....	De onda larga al suelo .....
Total recibida .....	Total emitida .....
BALANCE TOTAL (entradas - salidas) .....	

¿Se halla en equilibrio la relación entradas-salidas? ¿Y el sistema superficie-atmósfera? ¿Y este último respecto al espacio?

e) ¿Qué es el albedo? ¿Cuál es el albedo terrestre? ¿Crees que es invariable para toda la Tierra? ¿Cómo le afectaría la deforestación masiva?

f) Explica en qué consiste el efecto invernadero natural ¿Qué gases lo producen? ¿Qué ventajas tiene para el clima? ¿En qué consiste el incremento del mismo?

g) Repasa en las Unidades 1 y 4. ¿Qué actividades humanas provocan el aumento de gases de efecto invernadero siguientes: CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, y CH<sub>4</sub>. ¿Qué problemas se derivan de ello?

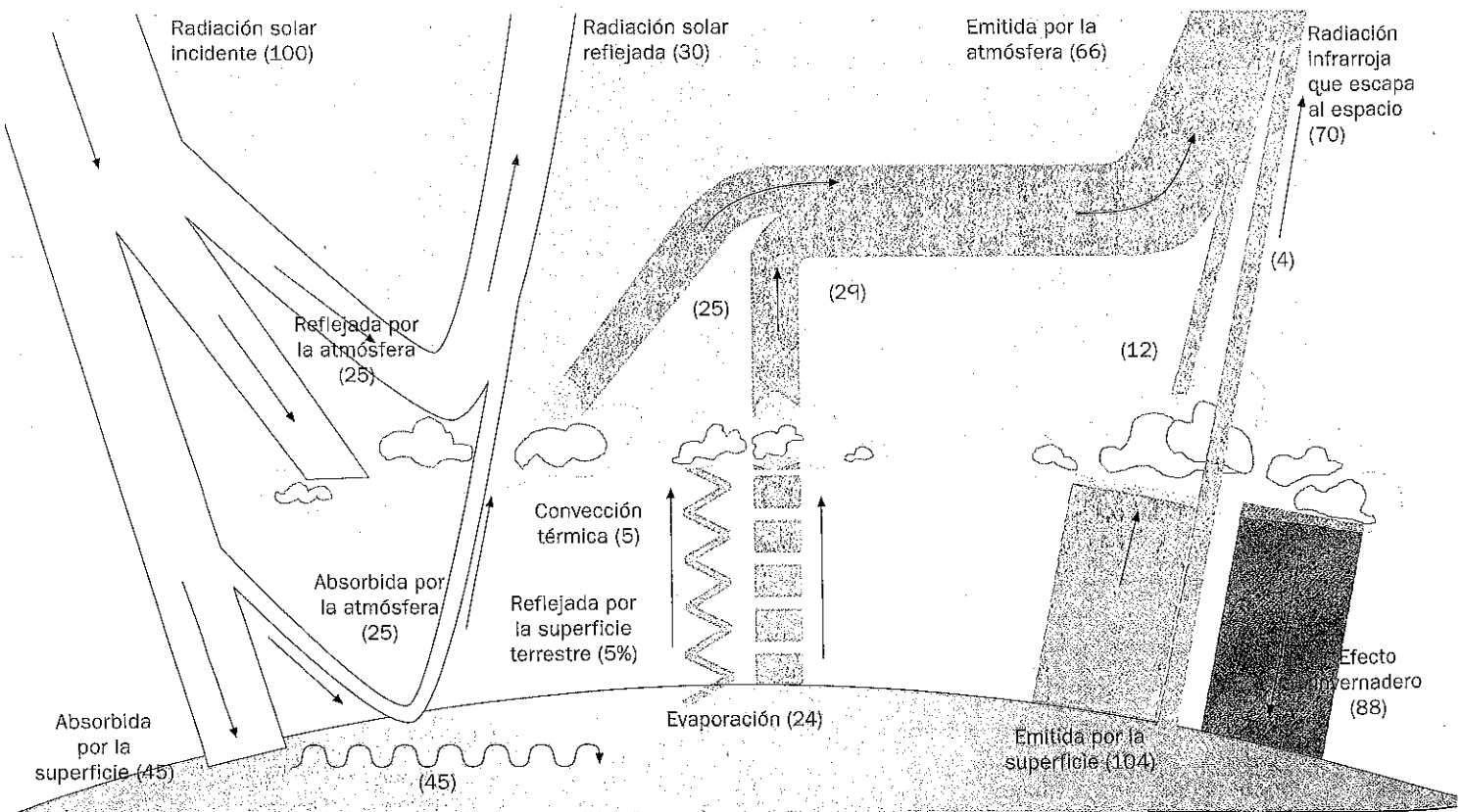
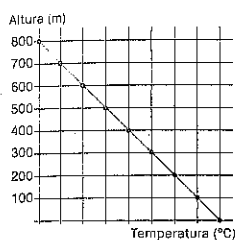


Fig. 6.52. Efecto invernadero. Datos en porcentaje. (Fuente: Investigación y Ciencia, n.º 130).

## Gradientes verticales

Ya sabemos que el GVT supone una variación de temperatura en el aire con la altura cuyo valor es variable. Además, existen otros dos gradientes que afectan exclusivamente a una masa de aire que asciende o desciende en el seno de la troposfera y cuya temperatura interior se mantiene independiente de la del aire circundante porque se comporta de manera adiabática.

Diabático (del griego diabatikós, que significaba «que puede atravesar o traspasar») en física se aplica a los procesos que llevan consigo intercambio de calor. Su antónimo, adiabático, se dice de los recintos entre cuyo interior y exterior no es posible el intercambio térmico.



**Fig. 6.53.** Gradiente adiabático seco (GAS) (sigue la diagonal de los recuadros).

### El gradiente adiabático seco (GAS).

Su valor es siempre de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , denominándose «seco» por llevar el agua en forma de vapor. Este gradiente, a diferencia del GVT, es dinámico, ya que afecta a una masa de aire que se encuentra realizando un movimiento vertical por estar en desequilibrio (diferente temperatura) con el aire que la rodea. Por ello, se ve obligada a ascender o descender hasta alcanzar el equilibrio dentro/fuera. Como el aire es un mal conductor de calor, la masa ascendente puede considerarse como un «sistema aislado» o adiabático, ya que no intercambia calor con el aire circundante.

Con la altitud disminuye progresivamente la presión atmosférica, por lo que la masa ascendente aumenta de volumen y se expande, lo que provocará la disminución de su temperatura interior (de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ). Por el contrario, durante los descensos, al aumentar la presión, el volumen de la masa se reduce y aumenta su temperatura interior ( $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ).

Entre tanto, el aire exterior que rodea la masa no se mueve (es estático) y su temperatura varía con arreglo al GVT (de valor variable). Por ello, si el aire del interior de la masa está a mayor temperatura que la del aire de su exterior, la masa subirá hasta que ambas temperaturas dentro/fuera se igualen. De la

misma manera, si su temperatura es inferior a la del aire circundante, descenderá la masa en el seno del aire.

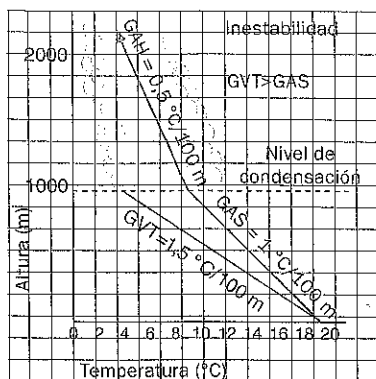
Al ascender y enfriarse llega un momento en el que la masa de aire alcanza la temperatura interior de su punto de rocío, condensándose el vapor de agua que contenía y formándose una nube. Al liberarse calor en el proceso, el gradiente deja de ser de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  y será más reducido (inferior a 1). Así, la masa proseguirá su ascenso, pero con ese gradiente rebajado, que recibe el nombre de **gradiente adiabático saturado o húmedo (GAH)**, cuyo valor aumentará progresivamente a medida que va perdiendo humedad, hasta que todo el vapor se haya condensado. Entonces, su valor será nuevamente de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , es decir, el del GAS.

### • Condiciones atmosféricas

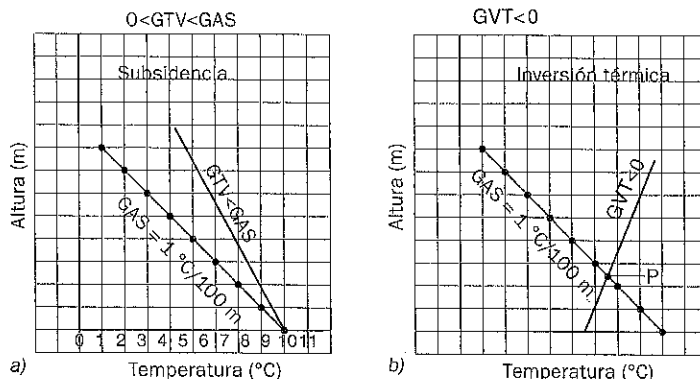
**Inestabilidad o borrasca.** Ocurren cuando existen movimientos ascendentes (o de convección) de una masa de aire cuya temperatura interior varía conforme al gradiente dinámico GAS ( $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ), en el seno de una masa aérea estática ambiental, cuyas variaciones térmicas verticales se correspondan con el GVT. Para que el ascenso sea posible, se tiene que cumplir la relación **GVT > GAS**, lo que es lo mismo, que el aire exterior se enfríe más deprisa (sea más denso) que el interior. Representándolo gráficamente, se observa que la línea que representa el GVT está a la izquierda de la que representa el GAS (Fig. 6.54).

**Condiciones de estabilidad o subsidencia anticiclónica.** Es la situación inversa a la anterior: la masa de aire desciende hacia la superficie por estar más fría que el aire que la rodea. A la vez, se va secando por calentamiento (recuerda que su temperatura va aumentando  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ). Pueden ocurrir dos situaciones distintas:

- **Que el GVT sea positivo y menor que el GAS ( $0 < \text{GVT} < 1$ )** (Fig. 6.55.a). Es una situación anticiclónica.
- **Que el GVT sea negativo ( $\text{GVT} < 0$ )**. En este caso nos encontramos ante una inversión térmica que forma nubes a ras del suelo, llamadas comúnmente niebla (Fig. 6.55.b).



**Fig. 6.54.** Inestabilidad atmosférica.



**Fig. 6.55.** a) Condiciones anticiclónicas; b) situación de inversión térmica.