

# Las nubes

Jean-Pierre Chalon y Marc Gillet

*Para comprender los detalles de su formación y desarrollo hay que conjugar los resultados de las observaciones con las leyes de la dinámica de fluidos y las de La microfísica.*

**L**as nubes son múltiples y variadas. Las hay pacíficas, que anuncian un tiempo clemente. Otras provocan fenómenos violentos y desastrosos, como el granizo, el rayo, los vendavales y los tornados. El peligro que esto representa para vidas y haciendas nos atemoriza. Difieren también entre sí las nubes por el tamaño: las convectivas aisladas pueden ocupar unos cuantos kilómetros cuadrados, mientras que hay sistemas nubosos que se extienden sobre decenas y centenares de kilómetros; los sistemas multicelulares, los complejos convectivos y las líneas de turbonada cubren algunos miles de kilómetros. Para tratar de entenderlas, los investigadores estudian la electricidad atmosférica, la microfísica y la dinámica. También evalúan la redistribución de las nubes al equilibrio radiativo del planeta y a la redistribución de la energía entre el ecuador y los polos.

Si hacemos un rápido repaso histórico, el relámpago es el fenómeno tormentoso que se trató de explicar primero. Benjamin Franklin puso de manifiesto su naturaleza eléctrica en el siglo XVIII. Los conocimientos de electricidad atmosférica han progresado luego, pero las dificultades de medida *in situ* siguen dificultando el progreso de esta subdisciplina de la física de nubes. La comprensión de los mecanismos de electrización atmosférica no es imprescindible, por suerte, para el estudio de las nubes, que pueden describirse mediante la microfísica y la dinámica. Los fenómenos eléctricos atmosféricos dependen, por contra, de la naturaleza de los hidrometeoros, que son partículas de agua líquida o sólida presentes en las nubes y cuyos tamaños van de unos cuantos micrómetros a varios milímetros (*véase la figura 3*). La microfísica se dedica a describir la evolución de los hidrometeoros.

La condensación, la congelación y la solidificación del agua liberan una importante cantidad de energía bajo la forma de calor. La condensación producida en un cúmulo de buen tiempo de unos dos kilómetros cúbicos proporciona una energía de aproximadamente  $5 \times 10^{12}$  joule en diez minutos, equivalente a la producción de una central nuclear en una hora. Parte de este calor se transforma en energía cinética, es decir, en movimiento. Las velocidades verticales en el interior de las nubes pueden alcanzar 150 kilómetros por hora. Cerca del suelo se perciben golpes de viento y variaciones de temperatura rápidos y violentos. El estudio de estos movimientos del aire y de las variaciones de temperatura, humedad y presión asociadas con ellos es el objeto de la dinámica de nubes. La organización dinámica actúa indudablemente sobre la evolución microfísica, pues los vientos transportan las partículas de aire de unos a otros ambientes.

La manera que tienen las nubes de participar en el equilibrio radiativo es mediante el reflejo, la difusión y la absorción parciales de las radiaciones solar y terrestre. Su acción radiativa depende de sus características microfísicas. Así, los cirros, que son semitransparentes para la radiación visible y reflejan la mayor parte de la infrarroja, contribuyen al efecto de invernadero. Los estratocúmulos,

que son opacos a la radiación visible, reducen en cambio la cantidad de energía solar que llega al suelo y enfrían las capas más bajas de la atmósfera. El efecto que tendría sobre la temperatura media del planeta una variación del cinco por ciento de la cobertura de estratocúmulos sería equivalente al de la duplicación del dióxido de carbono contenido en la atmósfera.

## La formación de las nubes

Cuando se contempla una fotografía de la Tierra tomada por satélite, llama la atención el aspecto organizado de las masas nubosas. Las nubes cubren permanentemente la mitad del globo y sus cimas alcanzan 20 kilómetros de altitud en las regiones tropicales y 10 kilómetros en Europa. La disposición y la naturaleza de las formaciones nubosas dependen del estado de la atmósfera, es decir, de las variaciones que presentan la temperatura, la humedad y el viento en función de la altura y de la velocidad vertical media del aire situado encima de la región considerada.

La evolución de las nubes se describe de manera simplificada mediante las leyes termodinámicas y el concepto de "partícula de aire". Consideremos una partícula de aire (una burbuja de gran tamaño) que contenga vapor de agua y se eleve a través de la atmósfera. Si es suficientemente voluminosa, los intercambios de materia y calor con el exterior serán despreciables. En una primera aproximación se razona como si la partícula estuviera encerrada en una envoltura elástica e impermeable al calor, de modo que la presión interna se ajuste instantáneamente a la presión atmosférica circundante. Como la presión disminuye conforme la partícula de aire asciende, su temperatura desciende y aumenta su volumen.

La cantidad máxima de vapor de agua que puede contener un metro cúbico de aire depende de la presión y de la temperatura. Durante la elevación llega un momento en que la cantidad de vapor contenido en la partícula supera dicho máximo, lo que hace que el vapor excedente se condense alrededor de ciertos aerosoles, llamados núcleos de condensación. Siempre hay en la atmósfera suficientes núcleos de estos para que nunca se supere el valor de saturación en más de un uno o un dos por ciento. Si la temperatura es superior a cero grados Celsius, el vapor se condensa en una multitud de gotículas de agua líquida. Si fuese inferior a cero grados (como sucede en los cirros), se formarían cristales de hielo por condensación sólida alrededor de cierta clase de aerosoles, los núcleos de congelación.

Una partícula de aire cargada de gotículas que continúe elevándose terminara alcanzando una zona de temperaturas negativas. No es forzoso que las gotículas se condensen por ello; los núcleos glaciógenos que actúan a temperaturas relativamente altas (entre 0 y -10 grados Celsius) son raros, no formándose hielo más que a temperaturas muy bajas. El promedio de núcleos glaciógenos activos es de uno por litro de nube a -20 grados Celsius. Este número se multiplica por diez cada vez que la temperatura disminuye cuatro grados más. En cambio se forman entre cien mil y cinco millones de gotículas de agua líquida por condensación, siempre en un litro de nube. Luego examinaremos el efecto que estas diferencias tienen sobre las precipitaciones.

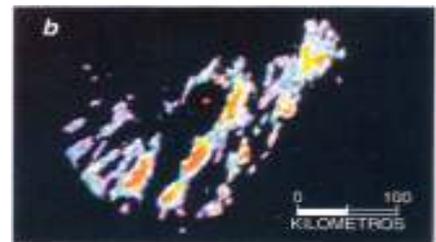
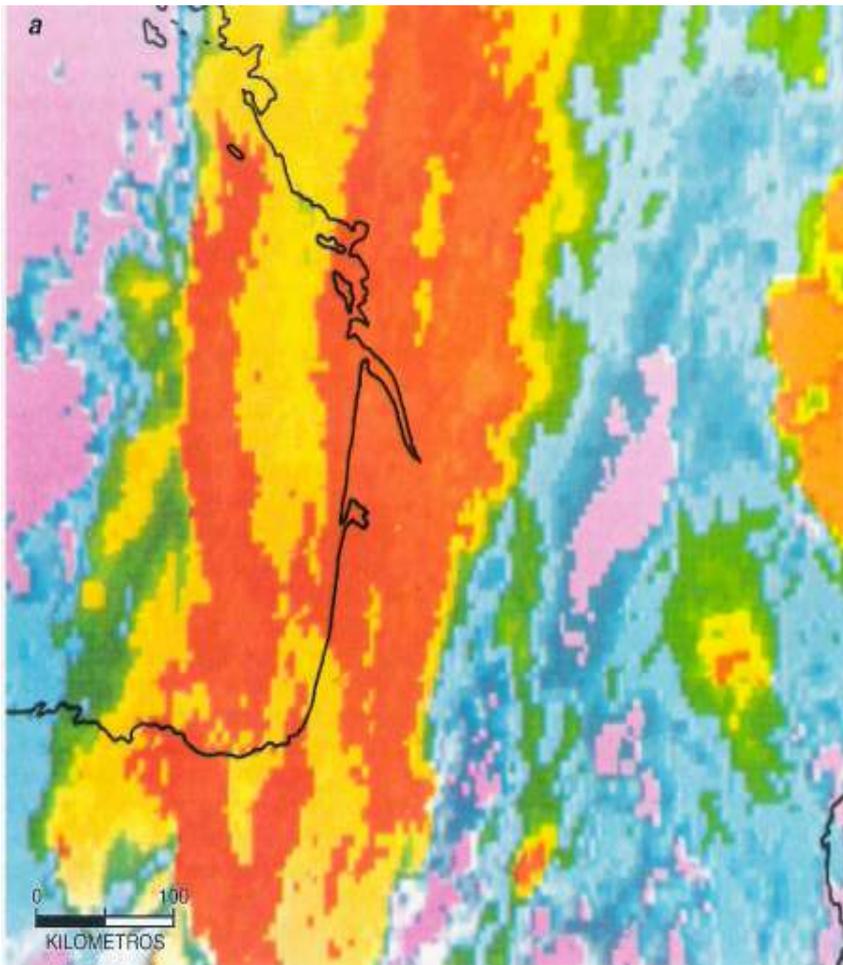
La ascensión de las partículas puede ser forzada o espontánea. Es forzada cuando el aire húmedo remonta una cadena montañosa (*véase la figura 4*) y también cuando el aire cálido y húmedo tropieza con aire frío en terreno llano o sobre el mar, situación en la que el aire frío penetra como una cuña por debajo del cálido, menos denso, y lo eleva. Es así como se forman los frentes. Cuando las partículas de aire cálido superan el nivel de condensación al remontar la pendiente fría, el vapor se condensa; la atmósfera es entonces hidrostáticamente estable y se observan capas de nubes, las nubes estratiformes.

La elevación espontánea produce nubes de tipo convectivo, como son los cúmulos y los cumulonimbos. La convección aparece en las condiciones termodinámicas que los meteorólogos llaman de "inestabilidad absoluta". Las células de Bénard son un ejemplo de convección obtenida

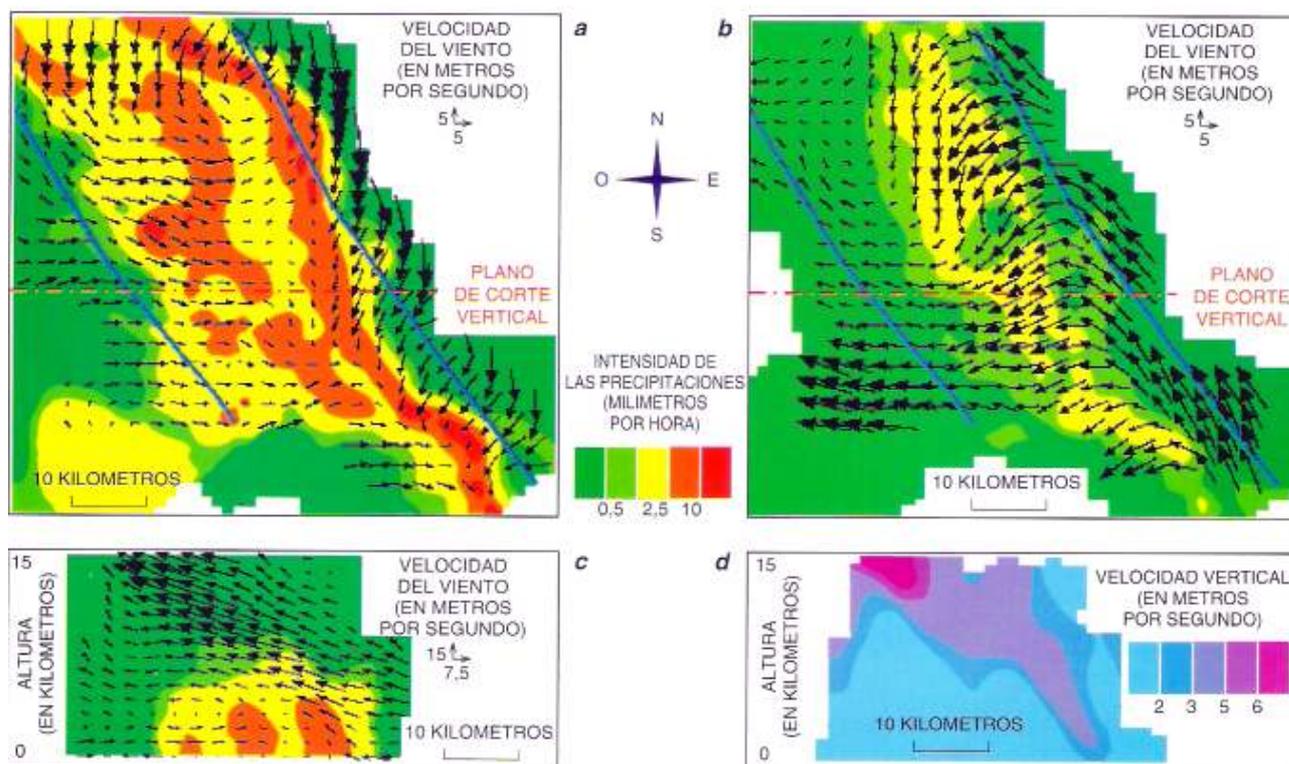
calentando el fondo del recipiente de un fluido: la temperatura de las partes inferiores aumenta y su densidad disminuye, lo que las hace ascender como globos, mientras que las situadas por encima se mantienen más frías y descienden (*véase la figura 5*).

La convección atmosférica es frecuente en días soleados, cuando las capas inferiores se calientan. Aparecen entonces chimeneas ascendentes, o "térmicas", de las que se sirven los aficionados al vuelo a vela para planear durante largas horas. Las térmicas tienen diámetros de algunos centenares de metros y velocidades ascensionales comprendidas entre uno y tres metros por segundo. A medida que el aire sube, sufre una dilatación adiabática y se enfría, deteniéndose cuando se vuelve más frío que el aire circundante, lo que sucede a unos dos mil metros de altura en la mayoría de los casos. En la cima de las térmicas se forman pequeños cúmulos por haberse superado el nivel de condensación. La condensación libera importantes cantidades de calor (unos 2500 joule por gramo de agua líquida formada), lo que refuerza la convección.

Las características de la capa inestable son, pues, las que determinan el tipo de nubes. Cuando la estratificación de la atmósfera es estable, no se forman nubes más que en presencia de elevaciones forzadas. El resultado son nubes estratiformes, es decir, extendidas horizontalmente. En presencia de inestabilidad absoluta, las nubes se desarrollan verticalmente, adoptando el aspecto de cúmulos o de cumulonimbos. Las brisas marinas pueden originar tormentas a lo largo de las costas. El calentamiento del suelo por el sol provoca una disminución de la presión atmosférica y genera un viento, la brisa marina. Los movimientos ascendentes del aire situado sobre el suelo crean una zona de convergencia propicia a la formación de capas nubosas y al desencadenamiento de la inestabilidad convectiva (*véase la figura 6*).



**1. FRENTE FRIO** procedente del Atlántico fotografiado en infrarrojo por el satélite Meteosat (*a*). Los colores indican las temperaturas en la cima de las nubes: rojo para las inferiores o iguales a  $-40$  grados Celsius, violeta para  $+20$  grados Celsius. La circulación atmosférica impone su dirección norte-sur al sistema. El mapa de ecos del radar Melodie, de Burdeos-Merignac, muestra células organizadas en bandas de precipitación orientadas de sur-suroeste a norte-nordeste (*b*). Las zonas que reflejan el radar con fuerza (precipitaciones abundantes) aparecen en naranja y las de escasa reflectividad, en violeta. Las bandas se mantenían casi inmóviles mientras que las nubes se movían hacia el norte-nordeste arrastradas por los vientos de las alturas. Esta estructura es frecuente delante de los frentes fríos. Los máximos de eco en el centro de las células corresponden a una intensidad de precipitación en el suelo de diez milímetros por hora.



2. LINEA DE TURBONADA observada con ayuda de radares Doppler embarcados en dos aviones (*trayectorias azules*). Dos cortes horizontales (*a*: a 1,5 kilómetros de altitud y *b*: a 5,6 kilómetros de altitud) y un corte vertical (*c*) muestran la intensidad de las precipitaciones (*en colores*) así como los vientos relativos horizontales y transversales a la línea de turbonada (*flechas*). En el mismo corte vertical se ha indicado el reparto de las velocidades verticales en este sistema nuboso (*d*). El sistema está alimentado con aire cálido y húmedo por la parte baja y por su borde este; las masas de aire lo abandonan por el oeste.

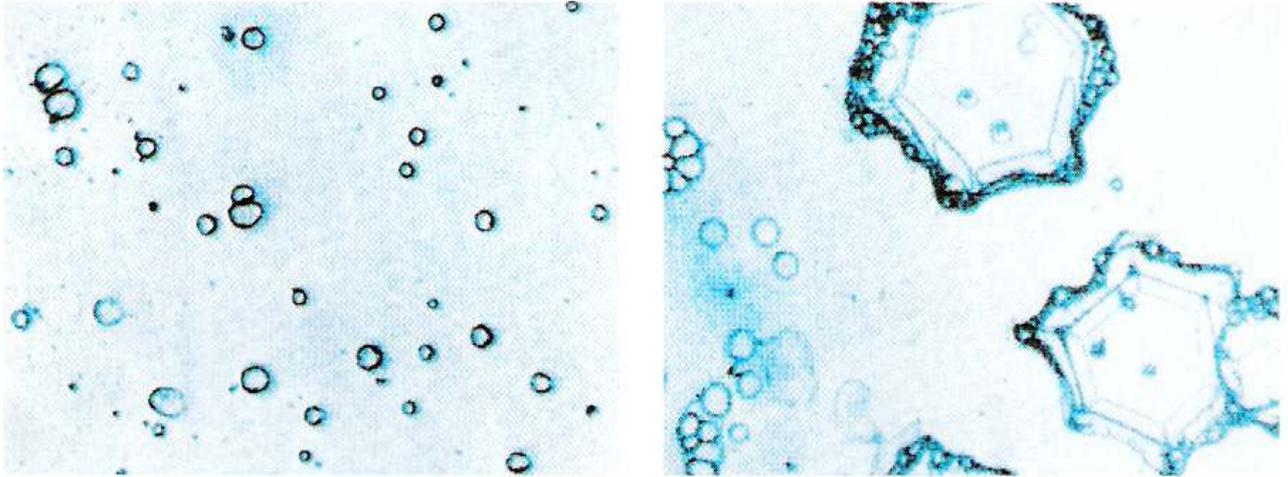
## Las precipitaciones

Hemos visto que las nubes se forman cuando se excede el umbral de saturación del aire respecto al vapor de agua. Pero hay un gran trecho entre la aparición de una nube y la formación de un chubasco. El radio de las gotículas de agua de una nube es de diez micrómetros, mientras que el de las gotas de lluvia tiene un milímetro de promedio; un factor de cien respecto al tamaño implica un factor de un millón respecto a la masa.

La condensación por sí sola no explica el paso de gotícula de nube a gota de lluvia en las nubes naturales. La velocidad de crecimiento de una gotícula es proporcional a la sobresaturación del medio e inversamente proporcional a su radio. En consecuencia, siendo las gotículas numerosas, la sobresaturación se mantiene pequeña y el crecimiento por condensación es limitado. Cálculos realizados sobre una ascendencia en un cúmulo muestran que se necesitan unos cinco minutos para alcanzar el radio de diez micrómetros y varias horas para llegar a veinte micrómetros. Una gota de agua no sobrevive durante tanto tiempo en una nube, mientras que ciertos cúmulos alcanzan el estado de precipitación en menos de quince minutos. Tiene que haber, por tanto, otros mecanismos que intervengan en la formación de la lluvia.

Uno de ellos podría ser la "fusión", es decir, la aglutinación de un millón de gotículas en una gota de lluvia. La fusión se realiza en dos etapas: el choque y la soldadura. El choque es la etapa más delicada. Las gotas grandes, que caen más deprisa, tienen tendencia a capturar las gotas más pequeñas. Por desgracia, el hecho de que una gotícula se sitúe en la trayectoria de una gota más grande no implica necesariamente que choquen: la caída de la gota grande provoca un desplazamiento del aire que repele a las gotículas menores de 20 micrómetros. La nube tiene que contener inicialmente

algunas gotas grandes para que se produzcan choques (alrededor de una gota de más de 40 micrómetros de radio por litro) y, como hemos visto, la formación de tales gotas por condensación exige en teoría tiempos superiores a la duración de las gotículas nubosas.



**3. LOS HIDROMETEOROS** constituyen la parte visible de las nubes. Se trata de partículas de agua líquida o de hielo cuyos tamaños se escalonan entre algunos micrómetros y cinco o seis milímetros, en el caso de las gotas de lluvia, y hasta de varios centímetros cuando se trata de granizo. La fotografía de la izquierda representa gotículas de niebla, cuyo diámetro medio es de 20 micrómetros. La fotografía de la derecha muestra cristales de hielo de forma hexagonal obtenidos sembrando una niebla subfundida con propano.

¿Cómo llegan las gotículas a producir partículas de tamaño superior a 20 micrómetros? Un posible mecanismo de formación se descubrió en Suecia hacia 1930; es el llamado proceso de Bergeron. Se produce cuando coexisten en la nube algunos cristales de hielo con un gran número de gotículas subfundidas. Esta coexistencia es frecuente en latitudes medias, donde la temperatura de la cima de las nubes suele ser inferior a -20 grados Celsius. Si la temperatura es negativa, la presión de vapor saturante sobre hielo es inferior a la presión de vapor saturante sobre el agua. Esta diferencia aumenta cuando la temperatura disminuye. En un medio que contenga mucha agua líquida y poco hielo, la fase líquida impone la presión del vapor de agua. La sobresaturación respecto al hielo se hace así importante y algunos de los cristales presentes crecen por condensación sólida. En menos de media hora se forman cristales de hielo de alrededor de un milímetro de diámetro.

La masa de los cristales de este tamaño equivale a la de una gota de llovizna de unos cien micrómetros de diámetro. Su velocidad de caída (varios decímetros por segundo) es suficiente para capturar gotículas de agua subfundida, con formación de granizo, o para aglutinarse con otros cristales (formación de un copo de nieve), con lo que se alcanza la masa de una gota de lluvia media. Si la partícula de hielo llegase a una región donde la temperatura sea positiva, se fundirá y se transformará en gota de lluvia. Si continuase a temperatura negativa, llegara al suelo en forma cristalina, como bola de granizo o copo de nieve. Cuando actúa el proceso de Bergeron, un solo cristal por litro basta para ocasionar precipitaciones importantes en el suelo.



**4. FORMACION DE UNA NUBE por elevación forzada sobre el relieve.** El aire cálido y húmedo es obligado a elevarse a lo largo de la pendiente. A cierta altitud, se satura de vapor de agua, que se condensa y forma una nube. Si el ascenso del aire se hace inestable, se forma una nube convectiva.

## La formación de cristales de hielo

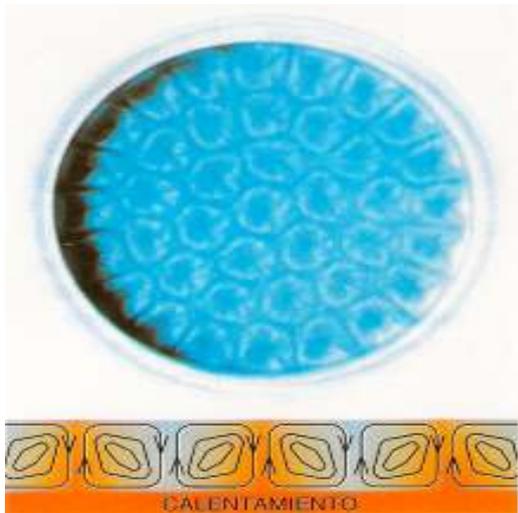
Este tipo de precipitaciones son frecuentes en invierno, precediendo a los frentes fríos que atraviesan nuestra geografía. Desde que empezó a utilizarse el radar meteorológico se detectaron células generatrices, características de los procesos de Bergeron (*véase la figura 7*). Las cimas de las células están a temperaturas bajas, favorables al crecimiento rápido de los cristales de hielo, en un medio donde las gotículas subfundidas controlan la presión de vapor saturante. Los radares meteorológicos detectan muy bien los cristales así formados cuando su diámetro supera algunos centenares de micrómetros y su número alcanza un cristal por litro. Las trayectorias de estas precipitaciones en formación aparecen como regueros oblicuos en la pantalla del radar, condicionados por las variaciones del viento en función de la altitud. Los ecos de radar se intensifican a lo largo de algunas centenas de metros por debajo de la isoterma de cero grados Celsius en las nubes estratiformes, en corte vertical. Es lo que se llama la "banda brillante": los cristales se funden y la película de agua que los recubre aumenta su poder reflector.

Durante mucho tiempo se creyó que los procesos de Bergeron bastaban para explicar la formación de las precipitaciones. Pero se ha observado que también se produce lluvia en cúmulos de las regiones tropicales en los que toda la nube está por encima de cero grados Celsius. Los hidrometeoros de tales nubes no pueden crecer más que por procesos de condensación y captura. Se ha tratado de explicar la formación de las gotas iniciadoras, de más de 40 micrómetros de diámetro, mediante la presencia de núcleos de condensación gigantes, de campos eléctricos o de microturbulencia, tentativas que han sido vanas. Trabajos recientes de J.-L. Brenguier, del Centro Nacional de Investigaciones Meteorológicas francés, muestran que las condiciones de sobresaturación de una misma partícula de aire fluctúan a lo largo de cortas distancias. Cada gotícula, dependiendo de su trayectoria, evoluciona de forma diferente; estas diferencias explican por qué se observan tamaños de gotas bastante distintos de lo previsto por la teoría de la condensación de las gotículas, y no excluyen la presencia de gotas de tamaño superior a 20 micrómetros.

Algún progreso se ha logrado gracias a abundantes observaciones de las nubes realizadas con ayuda de sondas aerotransportadas, unidas a medidas más clásicas de temperatura, humedad y velocidades verticales y horizontales. Pero hay fenómenos que siguen sin conocerse bien, como

sucede con la formación del hielo. Experimentos realizados sobre todo en los Estados Unidos y en Australia han puesto de manifiesto concentraciones de cristales más de mil veces superiores a las de núcleos de congelación. También se han comprobado glaciaciones rápidas y generalizadas en las cimas de cúmulos bien desarrollados. Existen, pues, procesos de multiplicación capaces de producir grandes cantidades de cristales sin núcleos glacígenos. Este fenómeno sería raro en las nubes continentales y frecuente en las marítimas de bastante edad que contuvieran grandes gotas de agua. Según los estudios llevados a cabo en el laboratorio, esta multiplicación rápida de los cristales de hielo resultaría del estallido y la congelación de las gotículas al chocar con partículas de nieve o de granizo.

Disponer de una buena descripción de los mecanismos de formación del hielo resulta capital por varias razones. Se sabe que la glaciación desempeña un papel determinante en la formación de las precipitaciones. Proporciona también, en ciertos casos, una energía suplementaria a las nubes bajo forma de calor. Finalmente, la glaciación controla en buena medida el reparto de las cargas eléctricas en el seno de las nubes.

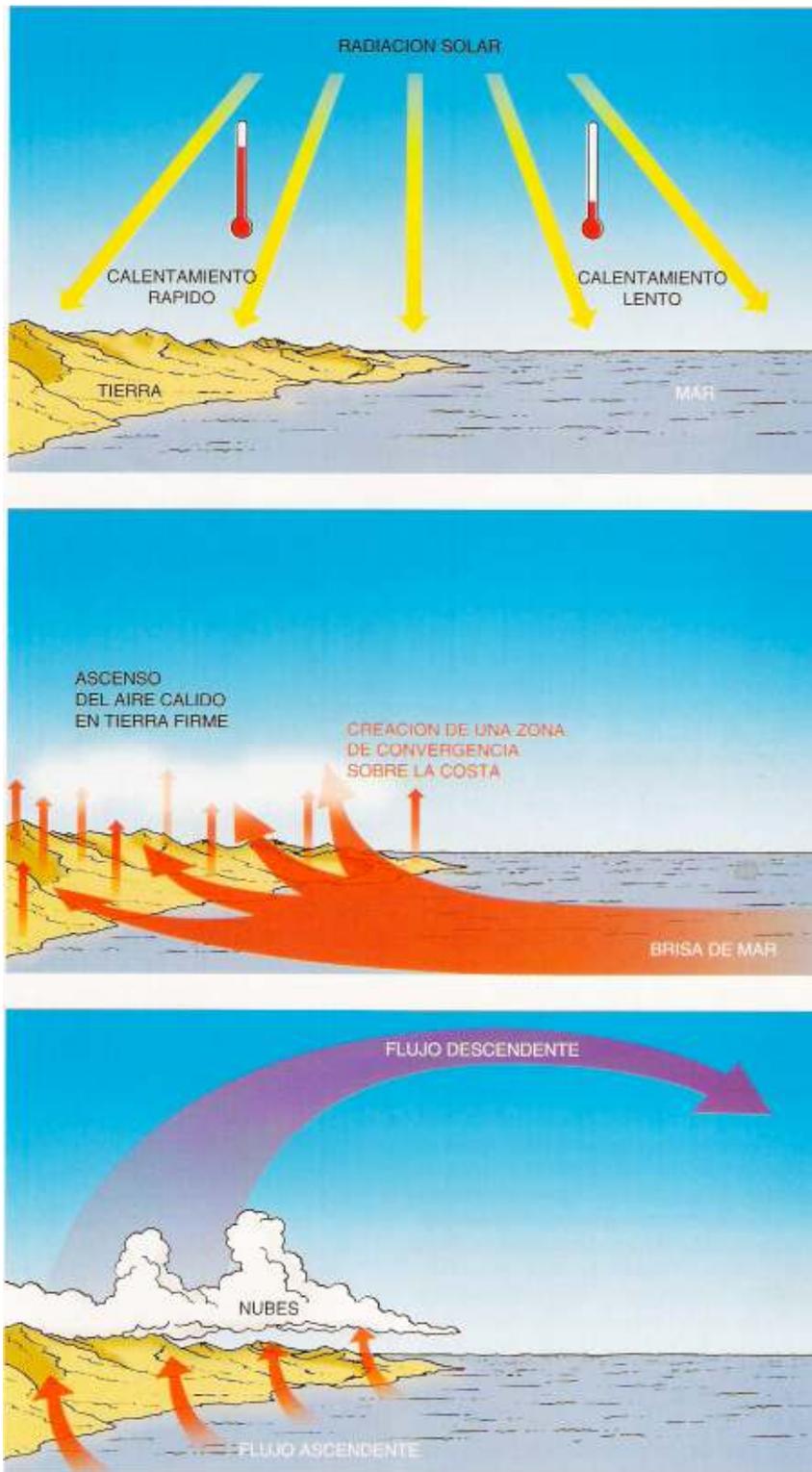


**5. LAS CELULAS DE BENARD** son un ejemplo de movimiento convectivo. Se las reproduce en el laboratorio calentando el fondo de un recipiente que contenga un fluido. A partir de una cierta temperatura, se observa una yuxtaposición de células poligonales (*arriba*). La periferia de las células corresponde a zonas de ascendencia y el centro (*en color oscuro*), a las de descenso.

## La dinámica de las nubes

Uno de los primeros estudios de mecanismos tormentosos por medio del radar, el *Thunderstorm Project*, ejecutado a finales de los años cuarenta en Florida y en Ohio, logró establecer una descripción detallada de las células convectivas. Se ocupó especialmente de las tormentas llamadas de "masa de aire", que se producen en verano, en masas de aire inestables y en situación meteorológica no perturbada. Están formadas por varias células elementales que se desarrollan y desaparecen sucesivamente. Una tal célula evoluciona a lo largo de tres etapas: la de cumulo, la de madurez y la de disipación (*véase La figura 8*). El ciclo total dura unos treinta minutos, durante los cuales el diámetro de la célula no sobrepasa los diez kilómetros.

Las tormentas más devastadoras proceden de una estructura convectiva más amplia, la "supercélula", que perdura durante varias horas y se extiende a lo largo de medio centenar de kilómetros. La circulación del aire en ella es estacionaria, mientras que los flujos ascendentes y descendentes se refuerzan mutuamente (*véase La figura 9*). La descripción de este tipo de tormenta se ha afinado al cabo de los años, en particular como consecuencia de análisis detallados de datos de radar y gracias a los trabajos de K. Browning y de G. Foote.

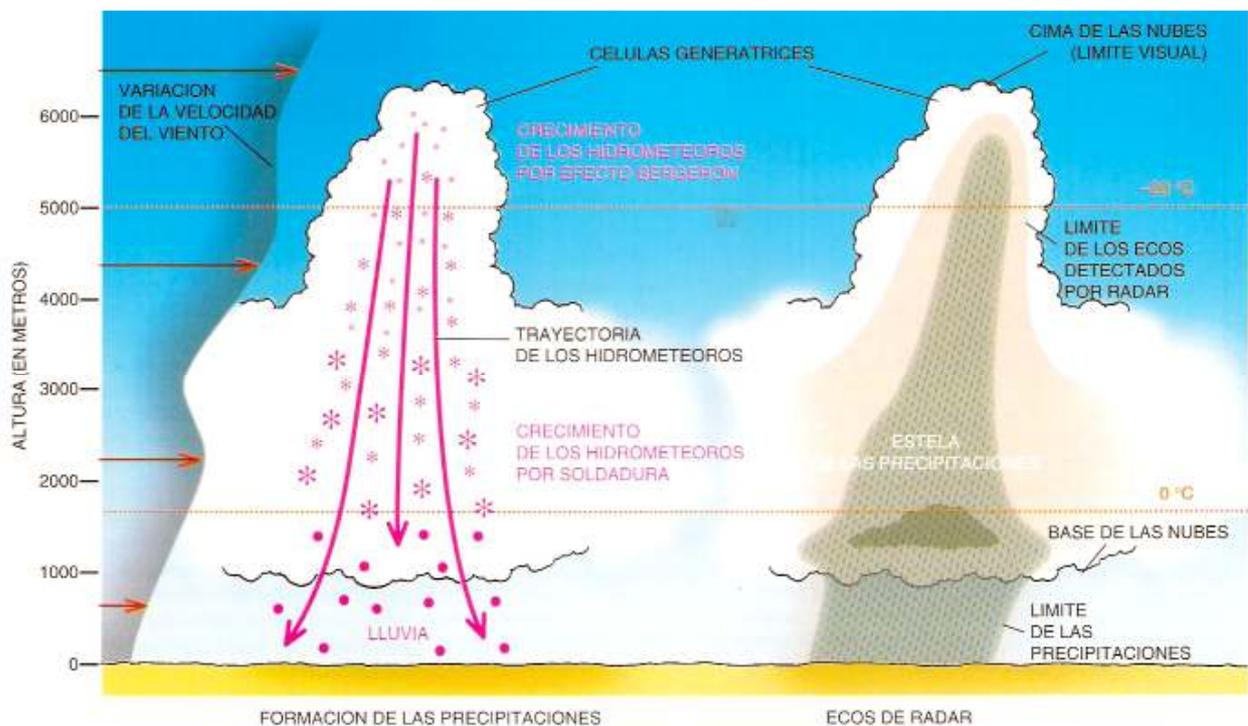


6. LA BRISA DE MAR se produce por el calentamiento solar de la tierra. El suelo se calienta más deprisa que el agua y transmite una parte de su calor a las capas bajas del aire (*arriba*). El calentamiento del aire reduce la presión atmosférica sobre el continente y, por consiguiente, aspira aire marino (*centro*). El resultado es una zona de convergencia y la aparición de un flujo ascendente encima de la costa. Estos movimientos se compensan por la formación de otro descendente encima del agua. Las velocidades ascensionales, aun si son pequeñas, bastan para elevar el aire hasta el nivel de condensación y dar lugar a la formación de nubes a lo largo de la costa (*abajo*). Si el aire es inestable, las nubes son de tipo convectivo. Pueden observarse entonces velocidades verticales importantes en algunos puntos concretos. La situación se invierte tras la puesta del Sol, formándose las nubes encima del mar.

La imagen de radar de una supercélula es característica. La parte ascendente está señalada por una zona de ecos débiles rodeada de ecos muy intensos. La velocidad hacia arriba es tan grande que las gotículas no tienen tiempo de alcanzar un tamaño apreciable; ni la lluvia ni el granizo penetran allí, pues son rechazados hacia las alturas o hacia los lados. No se encierra en ella ningún objeto susceptible de producir ecos de radar importantes. Los grandes hidrometeoros confinados a su alrededor provocan, en cambio, ecos intensos que dibujan una vasta bóveda.

Las supercélula se originan en condiciones meteorológicas precisas, caracterizadas por la presencia de una fuerte cizalladura vertical del viento horizontal, la existencia de aire cálido y

húmedo cerca del suelo y de aire seco en las alturas. Los vientos exteriores, perturbados por la nube que les cierra el camino, dan lugar a movimientos verticales en su periferia y refuerzan la convección. Cuando aumentan con la altura, el flujo ascendente se inclina y las precipitaciones se alejan. Parte de esas precipitaciones se evapora y humedece el aire circundante. Esta evaporación consume calor, lo que enfría el aire de alrededor y lo hace más pesado. Cuanto más seco este inicialmente este aire, tanto más se enfriará y aumentará de densidad. Al llegar cerca del suelo, el aire frío se extiende y encuentra al aire cálido y húmedo que alimenta la nube. En los casos extremos, la diferencia de temperatura alcanza una decena de grados. El pseudofrente frío así formado refuerza todavía más el flujo ascendente. El granizo se forma a gran altura en este tipo de tormentas, en la parte de la bóveda que precede al flujo ascendente. Los granizos dan vueltas antes de ser impulsados hacia atrás y proyectados hacia el suelo. Es muy probable que la zona de formación de granizo sea pequeña, razón por la que los diversos métodos utilizados para combatirlo (siembra de nubes, cohetes antigranizo) tienen un efecto casi nulo sobre la evolución de las tormentas supercelulares.



**7. FORMACION DE PRECIPITACIONES en una nube de tipo nimbostrato.** Los nimbostratos aparecen frecuentemente en latitudes medias delante de los frentes fríos. Los cristales se forman a temperaturas muy bajas, en pequeñas células convectivas (las células generatrices) que culminan las nubes estratiformes. Después crecen rápidamente en un medio rico en gotículas subfundidas que imponen una presión de vapor de agua netamente superior a la presión de vapor saturante respecto al hielo (*izquierda*). Cuando estos cristales son suficientemente grandes para adquirir una velocidad de caída apreciable, crecen por soldadura de gotas o de cristales en suspensión. Al pasar la isoterma de cero grados Celsius, se funden y se transforman en gotas de lluvia. Esta evolución de los hidrometeoros explica la estructura de los ecos de radar obtenida en estas nubes (*derecha*). Así, la isoterma de cero grados Celsius está marcada por una banda brillante correspondiente a un aumento de la efectividad radárica debida a la fusión parcial de los cristales de hielo. El perfil vertical del viento determina la forma de las estelas de precipitación.

Algunas tormentas constituyen vastos conjuntos nubosos: sistemas multicelulares, complejos convectivos, líneas de turbonada, etc. Estos sistemas comportan células convectivas, cada una de ellas asociada a una corriente de aire ascendente en la que se forman las precipitaciones. La disipación de las células más antiguas queda sistemáticamente compensada por el nacimiento de otras nuevas; así, el sistema perdura varias horas y da lugar a fenómenos frecuentemente más violentos que las tormentas ordinarias. Se han estudiado mucho estos sistemas. Laboratorios franceses

y de Costa del Marfil observaron la estructura de las líneas de turbonada que afectan a las regiones tropicales durante la experiencia COPT81. Estos sistemas abarcan mil kilómetros de longitud y entre trescientos y cuatrocientos kilómetros de anchura. En su parte anterior están formados por varias decenas de células convectivas renovadas sin cesar, mientras que en la posterior forman un gran yunque estratiforme. Estas estructuras se mueven a lo largo de miles de kilómetros en varios días. En las regiones casi desérticas del África subsaheliana, las líneas de turbonada proporcionan la mayor parte de las precipitaciones.

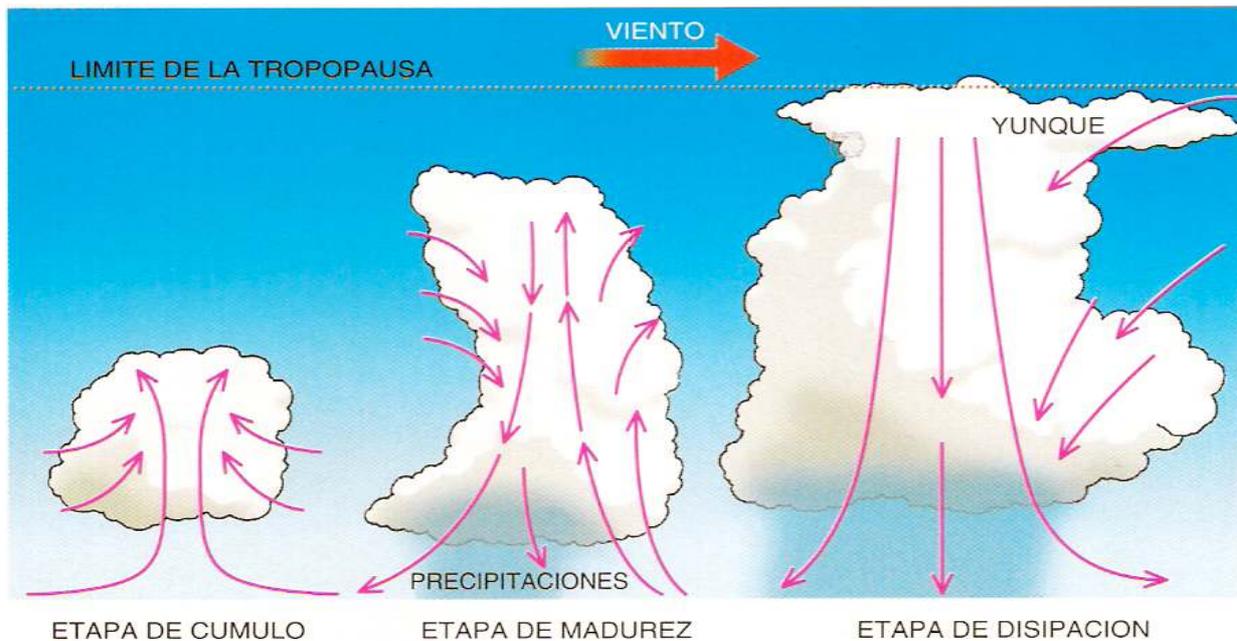
Los sistemas frontales son estructuras todavía más vastas, visibles en las imágenes retransmitidas por satélites meteorológicos. Tienen forma de lambda coronada por un arrollamiento. Los sistemas frontales se organizan como consecuencia de vastas circulaciones; resultan de los fuertes gradientes de temperatura que existen entre el ecuador y los polos. Para comprender los sistemas frontales y mejorar la previsión de las tormentas que producen, se preparó una experiencia internacional designada FASTEX (*Fronts and Atlantic Storm Track Experiment*), que tuvo lugar en enero y febrero de 1997 en el Atlántico Norte.

## La modificación del tiempo

La modificación del tiempo es un viejo sueño. Para defenderse contra los desastres atmosféricos, el hombre comenzó por dirigir sus armas contra el cielo. Herodoto cuenta que los tracios lanzaban flechas contra las tormentas "para amenazarlas y hacer cesar las perturbaciones atmosféricas". Desde su invención, la artillería ha combatido el granizo. A comienzos de siglo se instalaron en Francia redes de gigantescos pararrayos a fin de extraer la electricidad de las tormentas, a la que se consideraba responsable del granizo; era el método del "Niágara eléctrico". No dio mejor resultado que las campanas de sonido granífugo. Se han utilizado también gotículas de agua para iniciar la coalescencia, sal triturada para crear núcleos de condensación gigantes, obuses para agitar las nubes y numerosos otros medios.

Esta breve enumeración muestra que el hombre ha gastado considerables energías para defenderse contra el granizo y para aumentar la precipitación. Cierta número de iluminados y de charlatanes se han aprovechado de estas tentativas. El aumento de nuestra comprensión de los mecanismos de formación y evolución de las nubes y de las precipitaciones no ha modificado, por desgracia, esta situación. En muchas regiones del mundo se continúa sembrando las nubes sin evaluar los resultados eventuales, reemplazando simplemente la pólvora de los proyectiles o el humo de los fuegos de paja por el yoduro de plata o las partículas higroscópicas.

El agente que más se utiliza en las operaciones tendentes a aumentar la lluvia o reducir el granizo es el yoduro de plata. En noviembre de 1946, en los laboratorios de la General Electric, en los Estados Unidos, Bernard Vonnegut descubrió que el humo de yoduro de plata tenía un excelente poder glacígeno en las nubes cuya temperatura fuese inferior a -5 grados Celsius. Mostró que con esta substancia era posible producir una gran cantidad de núcleos glacígenos (hasta  $10^{14}$  núcleos por gramo de yoduro de plata). Casi al mismo tiempo, Shaeffer lanzó desde un avión nieve carbónica sobre estratocúmulos, con el resultado espectacular de que las nubes se disipasen y cayese nieve. Dos años más tarde, la General Electric consiguió un resultado similar empleando yoduro de plata. La posibilidad de actuar sobre la formación de hielo en las nubes quedaba así demostrada.



8. LA TORMENTA DE MASA DE AIRE está constituida por células convectivas de vida corta (unos treinta minutos). Evoluciona en tres etapas. Durante la fase de desarrollo, la organización dinámica evoca una célula de Bénard, con una parte ascendente central húmeda rodeada por una región descendente de aire limpio; es la etapa de cúmulo. La cima de la nube se eleva a razón de unos diez metros por segundo y las velocidades verticales en el seno de la ascendencia pueden llegar a los veinte metros por segundo. Las velocidades descendentes del aire claro que rodea la nube son mucho menores. La segunda etapa (etapa de madurez) está asociada a la lluvia, que crea una fuerte corriente descendente: el aire es arrastrado hacia abajo tanto por el peso de los hidrometeoros en suspensión como por el enfriamiento debido a la evaporación parcial de las gotas. La cima de la nube alcanza entonces la tropopausa, a casi veinte kilómetros de altura en los trópicos y a unos diez en nuestras latitudes. Durante la tercera etapa (la de disipación) la zona descendente ocupa prácticamente todo el volumen de la célula y corta su alimentación de vapor de agua. La cima de la nube se estrella contra la tropopausa y se extiende en forma de yunque bajo el efecto de los fuertes vientos presentes en las alturas. La nube pierde vigor y se disipa.

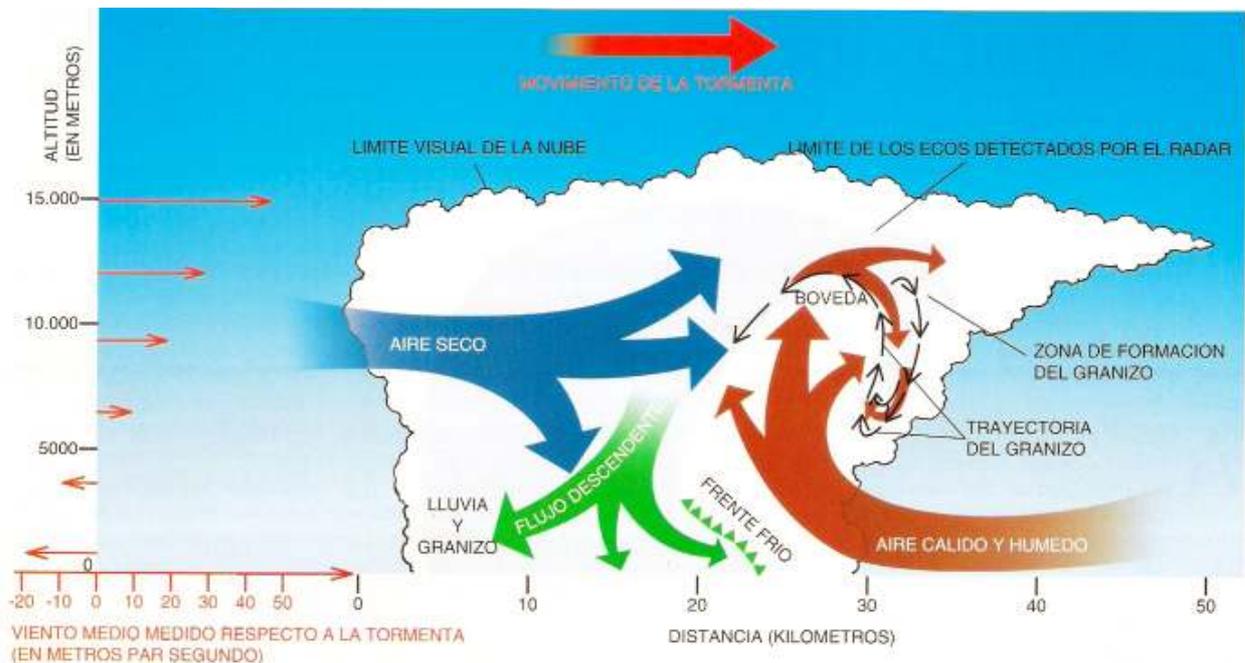
Las experiencias de modificación del tiempo realizadas desde entonces se cuentan por centenares. Se ha tratado de eliminar las nieblas, de disminuir las nefastas consecuencias del granizo y de provocar lluvias sobre regiones áridas o desérticas. Sin ninguna duda, se sabe hoy disipar localmente las nieblas subfundidas; varios aeropuertos han recurrido al procedimiento. Las experiencias dirigidas a aumentar la lluvia y a disminuir el granizo son menos convincentes.

Para incrementar las cantidades de lluvia, se ha pensado en tres operaciones. La primera consiste en desencadenar el proceso de aglutinación inyectando grandes núcleos de condensación o gotas de agua que capturen las gotículas suspendidas en la nube. El segundo método se dirige a suscitar el proceso Bergeron mediante la introducción de algunos cristales de hielo en un medio poblado de gotículas de agua subfundida. El tercero tiende a provocar una glaciación masiva de la cima de la nube introduciendo allí grandes cantidades de yoduro de plata o de nieve carbónica; es el método llamado de "siembra dinámica", consistente en estimular el desarrollo vertical de la nube liberando el calor latente de congelación.

La evaluación de las modificaciones obtenidas en el área de siembra es difícil: el comportamiento de los sistemas afectados es variado, las situaciones favorables son raras y, sobre todo, los métodos utilizados son poco o nada eficaces. Son raros los testimonios que resisten a las críticas de los expertos. Solo mencionaremos aquí dos experiencias antiguas: el proyecto *Whitetop*, realizado en los Estados Unidos, en Missouri, entre 1960 y 1964, y una de las experiencias israelíes que se desarrollaron entre 1961 y 1967.

Brevemente, el proyecto *Whitetop* trató de incrementar las precipitaciones procedentes de

cúmulos estivales. La siembra se realizaba mediante un avión equipado con quemadores de yoduro de plata. Entre los numerosos análisis estadísticos efectuados con los datos obtenidos, los hay que indican un resultado incierto, pero la mayoría muestra una disminución de las precipitaciones de entre un veinte y un sesenta por ciento. Las nubes sembradas eran del tipo marítimo y la soldadura tenía allí probablemente un papel importante en la formación de la lluvia; ahora bien, la multiplicación de núcleos de condensación perturba la soldadura, lo que explicaría este resultado negativo.



9. LA SUPERCÉLULA produce una tormenta devastadora que se mueve a lo largo de centenares de kilómetros. El aire cálido y húmedo que proviene de las capas bajas de la atmósfera sube hacia la cima de la nube. En el curso de su ascensión, los hidrometeoros no tienen tiempo de crecer: los ecos de radar (*en gris*) se mantienen débiles. Las partículas líquidas o sólidas son expulsadas hacia la cima o a los lados de la zona ascendente, que está rodeada de ecos intensos que forman una bóveda. Los hidrometeoros líquidos se congelan en la cima de esta bóveda y los que caen hacia delante son de nuevo capturados por el flujo ascendente. En esta región, situada en la parte delantera de la supercélula (zona embrionaria), es donde se forma el granizo. Los movimientos probables de los granos de hielo reproducen la forma de la bóveda. Los hidrometeoros que escapan hacia la parte posterior del flujo ascendente llegan al suelo en forma de lluvia o de granizo. Su evaporación parcial en contacto con el aire seco de las alturas (*flecha azul*) enfría el aire y refuerza el vigor de la corriente descendente (*verde*). Al llegar a la proximidad del suelo, esta corriente se extiende y engendra un pseudofrente frío, que obstaculiza el paso del aire cálido y húmedo, lo rechaza hacia la zona ascendente y refuerza la convección.

La experiencia israelí se refirió a nubes de tipo continental, en las que abundan más los núcleos de condensación, por lo que la soldadura y la multiplicación del hielo hubieran tenido que desempeñar un papel más secundario. Un avión dispersaba yoduro de plata viento arriba de la zona de medida. Las precipitaciones de las nubes sembradas fueron un quince por ciento más abundantes que las de las nubes no sembradas. Este resultado es significativo, por lo que parece posible un aumento de las precipitaciones de entre un diez y un veinte por ciento. Por desgracia los resultados obtenidos en Israel no se han podido reproducir en ninguna otra parte del mundo.

La mayoría de los intentos de reducir las precipitaciones de granizo aprovecha la competencia que se da entre las partículas individuales mientras crecen. Se supone que la adición de núcleos glaciógenos limita la cantidad de agua captada por cada bolita, lo que origina un mayor número de ellas, pero más pequeñas, por lo que caen con menos velocidad y se funden parcialmente antes de llegar al suelo. El *National Hail Research Experiment* puso a prueba la credibilidad de estos resultados en los años setenta, mediante un programa de investigaciones sobre el granizo en

Colorado, Estados Unidos. Después de tres años de intensa actuación, el resultado de las siembras continúa siendo incierto. Las granizadas de Colorado provienen esencialmente de supercélulas: el granizo se forma en las alturas, delante de la zona de ascendencia. Una siembra de esta región sería eficaz a condición de ser muy abundante; si fuese insuficiente, se corre el riesgo de aumentar las cantidades de granizo. Pero resulta que no se conoce ninguna técnica lo suficientemente precisa para evitar la dispersión de los núcleos glacígenos. Las siembras se suspendieron en 1975, pues el resultado global de la experiencia había sido más granizo y menos lluvia, temiéndose una disminución de las precipitaciones en estas regiones áridas. El impacto económico de la sequía sería mayor que el del granizo.

Estos malos resultados se vieron confirmados por los de la experiencia *Grossversuch*, efectuada en Suiza entre 1977 y 1981. Después de estas vanas tentativas para modificar el tiempo, la comunidad científica se mantiene prudente. Está claro que se necesita una mejor comprensión de los mecanismos implicados y mayor refinamiento de los métodos de siembra. Nuevas técnicas de observación y de simulación nos ayudaran a hacer justicia a las nubes en la predicción de las precipitaciones, en el estudio del balance radiativo del planeta y en la comprensión de las evoluciones climáticas.