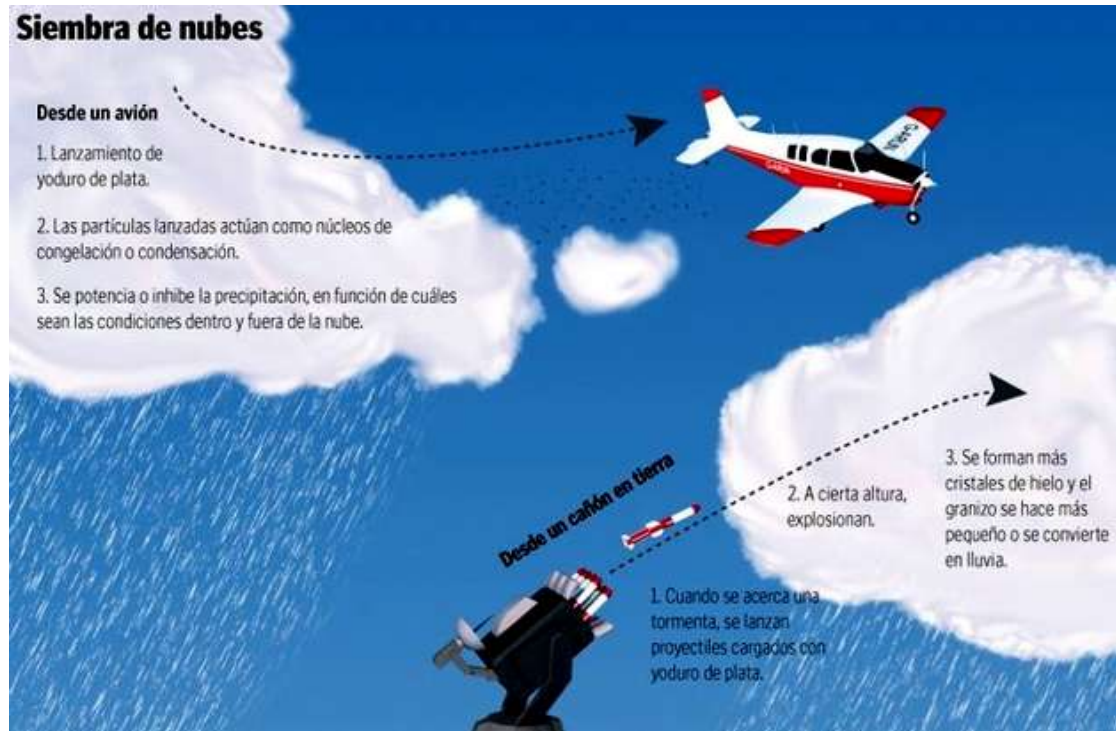


10

Modificación artificial de nubes y precipitaciones



Las microestructuras de las nubes son influenciadas por las concentraciones de CCN y núcleos de hielo, y el crecimiento de las partículas de precipitación es resultado de las inestabilidades que existen en las microestructuras de las nubes. Estas inestabilidades son de dos tipos principales:

1. En nubes calientes las gotas más grandes aumentan de tamaño a expensas de las gotitas más pequeñas debido al crecimiento por colisión-coalescencia.
2. Si existen partículas de hielo en un cierto rango óptimo de concentraciones en una nube mixta, éstas crecen por deposición a expensas de las gotitas (y posteriormente por escarchado y agregación).

A la luz de estas ideas, se han sugerido técnicas por las cuales las nubes y la precipitación pueden ser modificadas artificialmente mediante la llamada *siembra de nubes*.

- La introducción de grandes partículas higroscópicas o gotas de agua en nubes calientes para estimular el crecimiento de las gotas de agua por colisión-coalescencia.
- La introducción de algunos núcleos de hielo artificial en nubes frías (que pueden ser deficientes en partículas de hielo) para estimular la producción de precipitación.
- La introducción de altas concentraciones de núcleos de hielo artificial en nubes frías para reducir drásticamente las concentraciones de gotitas sobreenfriadas y con ello inhibir el crecimiento de partículas de hielo por deposición y riming, disipar las nubes y suprimir el crecimiento de partículas precipitantes.

Modificación de nubes cálidas

Incluso en principio, la introducción de gotas de agua en la parte superior de las nubes no es un método muy eficiente para la producción de lluvia, ya que se requieren grandes cantidades de agua. Una técnica más eficaz podría ser la introducción de pequeñas gotas de agua (de $\sim 30 \mu\text{m}$ de radio) o partículas higroscópicas (por ejemplo NaCl) en la base de una nube; estas partículas pueden luego crecer por condensación y luego por la colisión-coalescencia, a medida que se elevan y posteriormente caen a través de una nube.

En la segunda mitad del siglo pasado, se llevaron a cabo una serie de experimentos de siembra en nubes calientes utilizando gotas de agua y partículas higroscópicas. En algunos casos, la lluvia parecía ser iniciada por la siembra, pero debido a que no se llevaron a cabo ni extensas evaluaciones físicas ni estadísticas rigurosas, los resultados no fueron concluyentes. Recientemente, ha habido algún renacimiento del interés en la siembra de nubes calientes con núcleos higroscópicos para aumentar la precipitación pero, hasta ahora, la eficacia de esta técnica no ha sido probada.

La siembra con partículas higroscópicas se ha utilizado en intentos para mejorar la visibilidad en nieblas cálidas. Debido a que la visibilidad en una niebla es inversamente proporcional a la concentración en número de gotitas y a su superficie total, la visibilidad se puede mejorar al disminuir ya sea la concentración como el tamaño de las gotitas. Cuando partículas higroscópicas se dispersan en una niebla caliente, crecen por condensación (causando la evaporación parcial de algunas de las gotas de niebla) y las gotitas así formadas caen de la niebla lentamente. El barrido de niebla por este método no se ha utilizado ampliamente debido a su costo y falta de fiabilidad. En la actualidad, los métodos más eficaces para disipar nieblas calientes son los procedimientos de "fuerza bruta", mediante la evaporación las gotitas de niebla por calentamiento en tierra.

Modificación de nubes frías

Cuando gotas sobreenfriadas y partículas de hielo coexisten en una nube, las partículas de hielo pueden aumentar hasta el tamaño de precipitación con bastante rapidez. En algunas situaciones las concentraciones de núcleos de hielo pueden ser menores que las requeridas para la iniciación eficaz del mecanismo de cristales de hielo para la formación de la precipitación. En estas condiciones, se dice que las nubes pueden ser inducidas a la lluvia mediante la siembra con núcleos de hielo artificiales o algún otro material que pudiera aumentar la concentración de partículas de hielo. Esta idea fue la base para la mayoría de los experimentos de siembra de nubes llevadas a cabo en la segunda mitad del siglo XX.

Un material adecuado para la siembra de nubes frías fue descubierto por primera vez en julio de 1946 en el Proyecto Cirrus, que se llevó a cabo bajo la dirección de Irving Langmuir. Uno de los ayudantes de Langmuir, Vincent Schaefer, observó en experimentos de laboratorio que cuando un pequeño pedazo de hielo seco (es decir, dióxido de carbono sólido) se deja caer en una nube de gotitas sobreenfriadas, se producían numerosos pequeños cristales de hielo y la nube se congelaba rápidamente. En esta transformación, el hielo seco no actúa como núcleo de hielo en el sentido habitual del término, sino más bien, debido a que es tan frío ($-78\text{ }^{\circ}\text{C}$) que induce la formación de numerosos cristales de hielo que se desarrollan a su paso por nucleación homogénea. Por ejemplo, una pastilla de hielo seco de 1 cm de diámetro que cae a través del aire a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ produce alrededor de 10^{11} cristales de hielo.

Las primeras pruebas de campo utilizando hielo seco se hicieron a partir del Proyecto Cirrus, el 13 de noviembre de 1946, cuando alrededor de 1,5 kg de hielo seco triturado se dejó caer a lo largo de una línea de aproximadamente 5 km de largo en una capa nubosa de altocumulus superenfriada. Se observó nieve cayendo desde la base de la nube sembrada por una distancia de aproximadamente 0,5 km antes de que se evapora en el aire seco.

Debido a la gran cantidad de cristales de hielo que una pequeña cantidad de hielo seco puede producir, es más adecuado para la *sobresiembr*a de nubes frías que para producir cristales de hielo en las concentraciones óptimas ($\sim 1 \text{ liter}^{-1}$) a fin de aumentar la precipitación. Cuando se sobresiembr a una nube se convierte completamente en cristales de hielo (es decir, se congela). Los cristales de hielo en una nube congelada son generalmente bastante pequeños y, debido a que no hay gotas sobreenfriadas presentes, la sobresaturación con respecto al hielo es baja o inexistente.



Fig. 6.47 A γ -shaped path cut in a layer of supercooled cloud by seeding with dry ice. [Photograph courtesy of General Electric Company, Schenectady, New York.]

Por lo tanto, los cristales de hielo en lugar de crecer (como lo harían en una nube mixta con saturación respecto al agua) tienden a evaporarse. En consecuencia, la siembra con hielo seco puede disipar grandes áreas de nube o niebla sobreenfriada (Fig. 6.47). Esta técnica se utiliza para limpiar nieblas sobreenfriadas en varios aeropuertos internacionales.

Tras la demostración de que las nubes sobreenfriadas pueden ser modificados con hielo seco, Bernard Vonnegut, que también estaba trabajando con Langmuir, inició la búsqueda de núcleos de hielo artificial, guiado por el conocimiento de que un núcleo de hielo eficaz debe tener una estructura cristalográfica similar a la del hielo. El examen de las tablas cristalográficas reveló que el yoduro de plata cumple este requisito. Pruebas de laboratorio posteriores demostraron que el yoduro de plata podría actuar como núcleo de hielo a temperaturas tan altas como $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La siembra de nubes naturales con yoduro de plata fue evaluada por primera vez como parte del Proyecto Cirrus, el 21 de diciembre de 1948. Piezas de carbón quemado impregnado con yoduro de plata fueron lanzadas desde un avión en aproximadamente 16 km^2 de nubes estratos sobreenfriadas de $0,3\text{ km}$ de espesor a una temperatura de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. La nube se convirtió en cristales de hielo con menos de 30 g de yoduro de plata!

Muchos materiales de nucleación de hielo artificiales son ahora conocidos (por ejemplo, yoduro de plomo, sulfuro de cobre), y algunos materiales orgánicos (por ejemplo, el floroglucinol, metaldehídos) son más eficaces como núcleos de hielo que el yoduro de plata. Sin embargo, el yoduro de plata se ha usado en la mayoría de los experimentos de siembra de nubes.

Desde los primeros experimentos de siembra de nubes en la década de 1940, muchos más experimentos se han llevado a cabo en todo el mundo. Ahora está bien establecido que las concentraciones de cristales de hielo en las nubes se pueden aumentar mediante la siembra con núcleos de hielo artificial y que, bajo ciertas condiciones, la precipitación se puede iniciar artificialmente en algunas nubes. Sin embargo, la pregunta importante es: ¿en qué condiciones (si existen) la siembra con núcleos de hielo artificiales puede emplearse para producir un aumento significativo de la precipitación en el suelo de una manera predecible y sobre un área grande? Esta pregunta sigue sin respuesta.

Hasta ahora hemos discutido el papel de los núcleos de hielo artificial en la modificación de las microestructuras de las nubes frías. Sin embargo, cuando grandes volúmenes de una nube son congelados por la resiembra, esto da como resultado la liberación de calor latente que proporciona flotabilidad añadida al aire nuboso. Si antes de la siembra la altura de una nube estaba limitada por una capa estable, la liberación del calor latente de fusión causada por la siembra artificial podría proporcionar suficiente flotabilidad para empujar la nube a través de la inversión hasta la altura del nivel de libre convección. La cima de la nube podría entonces elevarse a alturas mucho mayores de las que hubiera alcanzado de forma natural.

La figura 6.48 muestra el crecimiento explosivo de un cúmulo de nubes que pueden haber sido producidos por la resiembra.

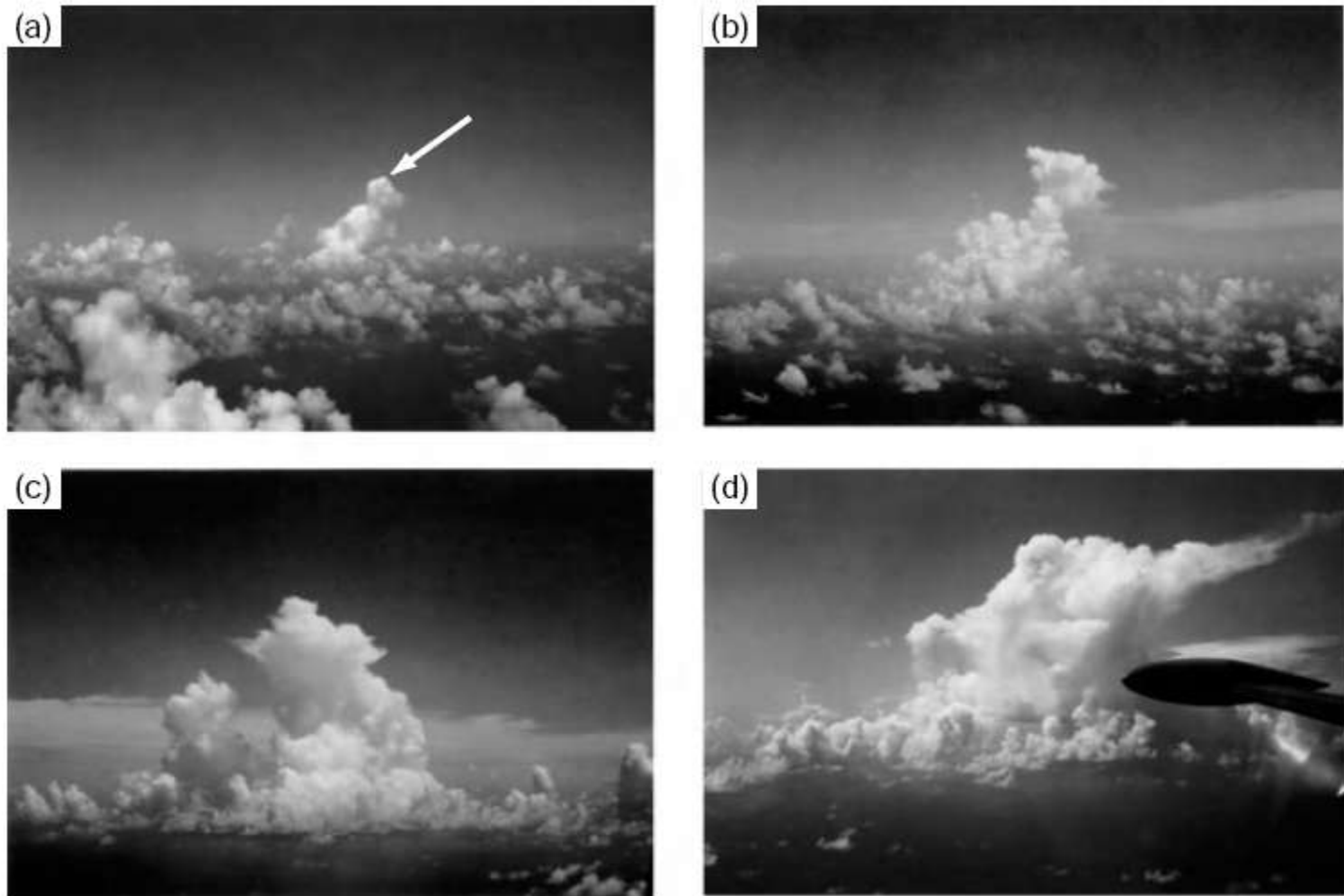


Fig. 6.48 Causality or chance coincidence? Explosive growth of cumulus cloud (a) 10 min; (b) 19 min; 29 min; and 48 min after it was seeded near the location of the arrow in (a). [Photos courtesy of J. Simpson.]

Experimentos de siembra se han llevado a cabo en intentos tendientes a reducir los daños producidos por el granizo. La siembra con núcleos artificiales debería tender a aumentar el número de pequeñas partículas de hielo que compiten por las gotitas superenfriadas disponibles. Por lo tanto, la siembra debería resultar en una *reducción en el tamaño medio de las piedras de granizo*. También es posible que, si una tormenta de granizo fuera sobresemebrada con un número muy grande de núcleos de hielo, se nuclearía la mayoría de las gotitas de superenfriadas en la nube, y el crecimiento de granizo por riming se reduciría significativamente. A pesar de que estas hipótesis son plausibles, los resultados de los experimentos sobre la inhibición del granizo no han sido alentadores.

Experimentos exploratorios se han llevado a cabo para investigar si las *nevadas orográficas* podrían ser redistribuidas por la sobresemebra. Las partículas de hielo escarchadas tienen relativamente grandes velocidades terminales de caída ($\sim 1 \text{ m s}^{-1}$), por lo que siguen trayectorias empinada a medida que caen al suelo. Si las nubes en el lado de barlovento de una montaña son artificialmente sobresemebradas, las gotas superenfriadas pueden ser virtualmente eliminadas y el crecimiento por escarchado puede reducirse significativamente (Fig. 6.49).

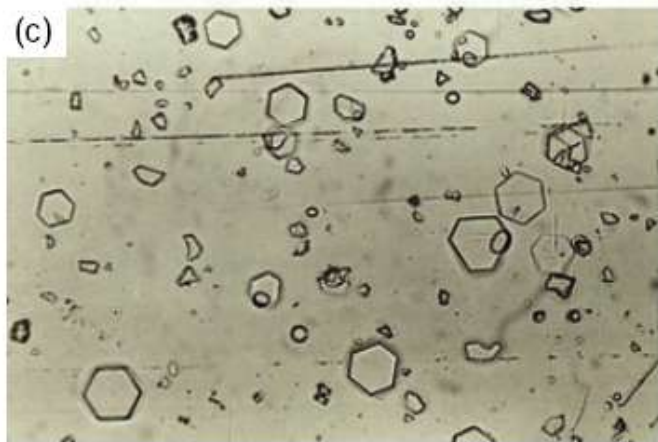


Fig. 6.49 (a) Large rimed irregular particles and small water droplets collected in unseeded clouds over the Cascade Mountains. (b) Cloud bow produced by the refraction of light in small water droplets. Following heavy seeding with artificial ice nuclei, the particles in the cloud were converted into small unrimed plates (c) which markedly changed the appearance of the clouds. In (d) the uniform cloud in the foreground is the seeded cloud and the more undulating cloud in the background is the unseeded cloud. In the seeded cloud, optical effects due to ice particles (portion of the 22° halo, lower tangent arc to 22° halo, and sub-sun) can be seen. [Photographs courtesy of Cloud and Aerosol Research Group, University of Washington.]

En ausencia de riming, las partículas de hielo sólo crecen por deposición desde la fase de vapor y su velocidad de caída se reduce en aproximadamente un factor de 2. A continuación los vientos en altura, pueden llevar estos cristales más lejos antes de que lleguen al suelo. De este modo, se argumenta, podría ser posible desviar las nevadas desde las laderas a barlovento de las cadenas montañosas (donde la precipitación es a menudo fuerte) a las laderas de sotavento más secas.

Modificación involuntaria

Algunas industrias liberan grandes cantidades de calor, vapor de agua y aerosoles activadores de nubes (CCN y núcleos hielo) a la atmósfera. En consecuencia, estos efluentes pueden modificar la formación y la estructura de las nubes y afectar a la precipitación. Por ejemplo, los efluentes de una única fábrica de papel pueden afectar profundamente la zona circundante en alrededor de 30 km (Fig. 6.50).



Fig. 6.50 The cloud in the valley in the background formed due to effluents from a paper mill. In the foreground, the cloud is spilling through a gap in the ridge into an adjacent valley. [Photograph courtesy of C. L. Hosler.]

Las fábricas de papel, la quema de desechos agrícolas e incendios forestales, etc, emiten grandes cantidades de CCN ($\sim 10^{17} \text{ s}^{-1}$ activos al 1% de sobresaturación), que puede cambiar las concentraciones de gotitas en las nubes que se encuentran a favor del viento. Altas concentraciones de núcleos de hielo se han observado en las plumas de las fábricas de acero.

Las grandes ciudades pueden afectar el clima en sus proximidades. Allí las posibles interacciones son extremadamente complejas, ya que, además de ser fuentes areales de aerosoles, trazas de gases, calor y vapor de agua, las grandes ciudades modifican las propiedades de radiación de la superficie de la Tierra, el contenido de humedad del suelo, y la rugosidad de la superficie. La existencia de “islas de calor urbano”, varios grados más calientes que las regiones menos pobladas adyacentes, está bien documentada. En los meses de verano, la precipitación aumenta un 5-25% sobre los valores de fondo, 50-75 km a sotavento de algunas ciudades. Las tormentas eléctricas y granizadas pueden ser más frecuentes, con la extensión areal y la magnitud de las perturbaciones relacionadas con el tamaño de una ciudad. Las simulaciones con modelos indican que el aumento de las velocidades del aire ascendente, asociados a las variaciones en la rugosidad de la superficie y el efecto de isla de calor, es el factor responsable más probable de estas anomalías.

Agujeros en nubes

Las fotografías de los agujeros (es decir, grandes regiones relativamente claras) en capas delgadas de nubes superenfriadas, más comúnmente altocumulus, datan de al menos 1926. Los agujeros pueden variar en forma desde casi circular (Fig. 6.51a) a pistas lineales (fig. 6.51b). Los orificios se producen por la eliminación de las gotitas sobreenfriadas por copiosas cantidades de cristales de hielo (~100-1000 por litro), de manera similar a la formación de agujeros en las nubes sobreenfriadas por siembra artificial (Fig. 6.41).

Fig. 6.51 (a) A hole in a layer of supercooled altocumulus cloud. Note the fallout of ice crystals from the center of the hole. [Copyright A. Sealls.] (b) A clear track produced by an aircraft flying in a supercooled altocumulus cloud. [Courtesy of Art Rangno.]



Sin embargo, los agujeros de interés aquí se forman por siembra natural desde arriba, una nube sobreenfriada que es interceptada por una ráfaga descendente que contiene numerosas partículas de hielo (Fig. 6.45) o por una aeronave que penetra en la nube.

En el caso de la formación por un avión, las partículas de hielo responsables de la evaporación de las gotitas superenfriadas son producidas por la rápida expansión, y consecuente enfriamiento, de aire en los vórtices producidos en la estela del avión (*partículas de hielo producidas por aeronaves* o APIPS). Si el aire se enfría por debajo de aproximadamente $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, las partículas de hielo se producen por nucleación homogénea. Con enfriamiento algo menor, pero aún significativo, los cristales de hielo pueden ser nucleados heterogéneamente. Los cristales producidos de este modo son inicialmente bastante pequeños y de tamaño uniforme, pero posteriormente crecen bastante uniformemente a expensas de las gotitas superenfriadas de la nube (ver Fig. 6.36). El intervalo de tiempo entre que una aeronave penetra una nube sobreenfriada y la aparición visible de un área clara es $\sim 10\text{-}20$ min.

Los APIPS son más propensos a formarse a baja temperatura ambiente (por debajo de $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$) cuando una aeronave vuela a máxima potencia pero con el equipo y las aletas (flaps) extendidas; esto se traduce en una velocidad relativamente baja y de alta resistencia. No todos los aviones producen APIPS.

La forma del agujero en una nube depende del ángulo de intercepción de la corriente descendente o de la ruta de vuelo de la aeronave con la nube. Por ejemplo, si un avión desciende abruptamente a través de una nube se producirá un agujero casi circular (Fig. 6.51a), pero si la aeronave vuela casi horizontalmente a través de una nube se producirá una pista lineal (Fig. 6.51b).