

POSIBILIDADES Y  
 LIMITES DE LA  
 INFLUENCIA  
 ARTIFICIAL  
 SOBRE EL  
 TIEMPO

Aviones siembran hielo seco sobre las  
 nubes y provocan "lluvia milagrosa"

Sólo el perfeccionamiento próximo  
 de esta técnica se precisa para  
 convertir la lluvia artificial en  
 realidad práctica

por el DR. LEOPOLD KLETTNER

Del Instituto Central de Meteorología y Geodinámica  
 de Viena

Los americanos V. I. Schaefer e I. Langmuir hicieron en 1946 un descubrimiento fundamental al demostrar experimentalmente que partículas de hielo seco lanzadas sobre una nube enfriada a una temperatura bajo cero grados centígrados provocaban espontáneamente una especie de reacción en cadena, formándose, como consecuencia de ésta, en el lapso de una fracción de minuto, una enorme cantidad de cristales de hielo finísimos, los llamados gérmenes del hielo.

Con ello se lograba por vez primera producir artificialmente en una nube condiciones aptas para que, con la pérdida de su "equilibrio coloidal", desprendiera parte de su humedad en forma de lluvia. Alfred Wegener, el conocido meteorólogo y explorador polar austriaco, ya en 1911 y en su obra "Termodinámica de la atmósfera" se había referido al hecho de que es imposible la "coexistencia" de hielo y agua en una nube muy enfriada, pues traería consigo una inestabilidad coloidal que provocaría un aumento rápido de las partículas de hielo. Con la yuxtaposición en una nube de gotículas muy enfriadas y partículas de hielo —tal como ocurre por lo menos en las partes superiores del tipo de nubes predominante en las latitudes medias y extremas—, dada una temperatura igual, la presión del vapor sobre el hielo es menor que sobre el agua, con lo que los cristales de hielo aumentan a costa de las gotículas y caen con creciente tamaño. El físico alemán W. Findeisen, especialista en nubes, en el curso de sus ensayos de laboratorio, realizados en Praga durante la Segunda Guerra Mundial, se acercó ya mucho a la solución del problema. Coincidiendo con otros especialistas en nubes y por la experiencia de numerosos vuelos a través de nubes y formaciones nubosas del más diverso carácter, había llegado a la convicción de que sólo la existencia de "gérmenes de hielo" en una nube puede provocar abundantes lluvias. Desdichadamente Findeisen no sobrevivió al fin de la contienda, pereciendo en los tumultos de los últimos días de la guerra en Praga. Su Instituto de investigación fue totalmente destruido.

El procedimiento descubierto en 1946 para provocar lluvia por medio de la "inoculación

de nubes" con hielo seco despertó el más vivo y general interés. Parecía brindarse por primera vez la asequible posibilidad de influir en el estado del tiempo con propósito regular y subordinarlo a la voluntad humana. La utilidad práctica inmediata del aumento de la provisión de agua en zonas de escasas precipitaciones y de la superación de períodos de sequías en regiones aptas para la agricultura, pareció abrir la fascinante perspectiva de un mundo con el estado del tiempo modificado por la razón humana en forma impresionante. El experimento, que en el laboratorio había salido tan bonito, sólo necesitaba, para justificar los gastos que operaciones en gran escala evidentemente exigirían, ser repetido con éxito en las condiciones naturales de la libre atmósfera. Sin embargo, los ensayos no dieron el convincente resultado que se esperaba. El optimismo, que hoy casi nos parece ingenuo, hubo de verse muy decepcionado a medida que las pruebas se repetían. La principal dificultad de los experimentos realizados directamente en las nubes consistía en que no era nada fácil saber si la lluvia que se producía era de origen natural o artificial.

Tuvo gran importancia la serie de ensayos del llamado "proyecto Cirrus" del año 1947, llevado a término bajo las más precisas instrucciones y las pruebas críticas más severas. En combinación con la fuerza aérea y el Comité nacional norteamericano para la aeronáutica, la Oficina meteorológica de los Estados Unidos preparó un gran programa de investigación de nubes en el que se pusieron a contribución, en una serie de experimentos, el mayor número posible de controles de observación y el más variado instrumental. Los primeros tests se llevaron a efecto en la zona de Wilmington, Ohio, con un ideal estado del tiempo. Fueron llevadas a cabo otras series en Sacramento, California, en Sierra Nevada y en Mobile, Alabama, a lo largo de la costa. Los 170 tests de este proyecto en gran escala son las mejor documentadas series de pruebas de que disponemos hasta hoy sobre los intentos de influir artificialmente en el estado del tiempo.

Para las operaciones se emplearon aviones del tipo B-17, que volaron sobre las nubes y esparcieron hielo seco. La cantidad de "se-

milla" esparcida sobre las nubes y la duración del proceso de inoculación fueron constante y exactamente medidas y comprobadas, y lo mismo otros importantes parámetros como temperatura, presión atmosférica, campo eléctrico y altura de vuelo. Se había montado además en los aviones un sensible radar meteorológico, apto para registrar las precipitaciones más ligeras. La nube tratada con hielo seco era fotografiada desde el avión tanto antes como después de la siembra. Otros aviones que participaban en la operación obtenían fotografías verticales y transversales de los grupos de nubes tratados con la siembra y de grupos próximos no tratados. Todas las operaciones de vuelo en torno a la nube inoculada eran controladas desde una estación central de radar instalada en tierra. El radar de 10 cm. provisto de energía electromagnética de alta intensidad fue de extraordinaria importancia en la realización del experimento. No sólo registraba la estela de los aviones, sino que descubría en el acto si el campo de precipitaciones que se producía era de origen natural o resultado de la inoculación.

En torno a la zona investigada se había instalado en tierra una red de 55 pluviómetros que deberían registrar constantemente la cantidad de lluvia caída. También se instalaron dos estaciones de radiosondas que deberían suministrar informaciones sobre presión atmosférica, temperatura, humedad del aire y régimen de vientos.

Los resultados de la inoculación de las nubes fueron comprobados, pues, desde distintos puntos: por el radar en tierra y en el avión, por aviones sobre y bajo la nube inoculada y por observadores en tierra. Las observaciones en la nube misma se referían a la determinación de los límites superior e inferior, de la humedad relativa sobre y bajo la nube, de los densos de la temperatura, de los indicios ópticos y finalmente del origen, extensión y tipo de las precipitaciones.

Los primeros experimentos en la gran serie de ensayos del "Proyecto Cirrus" se realizaron con formaciones nubosas del tipo stratus. En la zona de Wilmington se verificaron 37 inoculaciones en nubes de este tipo y en la región de Sacramento 15 en stratus condicionados orográficamente. Con cuánta cautela,

con qué extremado rigor crítico fueron llevados a término estos experimentos queda demostrado con la simple información sobre un experimento logrado y otro fallido.

El 5 de octubre de 1948 cubrió a Wilmington una capa de stratus: su límite inferior quedaba a 2.500 m, el superior a 3.500 y la temperatura en la nube era de 5 grados centígrados bajo cero. Desde aviones fueron esparcidos sobre la capa de stratus gránulos de hielo seco en una línea con forma de L. La cantidad de material empleado ascendió a 2 kg. por kilómetro de vuelo. Poco después de la siembra se modificó la estructura de la nube y al mismo tiempo empezó a producirse una ligera ebullición a lo largo de la L inoculada. A las 14.45 horas, exactamente 30 minutos después de la inoculación, registró la pantalla del radar un ligero eco de precipitación en la zona de la nube inoculada, adquiriendo la forma de una L en el lapso de 5 minutos, extinguiéndose 5 minutos después. Los aviones de reconocimiento comunicaron que llovía ligeramente, coincidiendo exactamente con el instante en que el eco en el radar era más fuerte. La lluvia fue de corta duración, y tan escasa, que se evaporó antes de llegar al suelo. Este experimento —como la mayoría de los realizados en el curso de esta serie de ensayos con nubes del tipo stratus— no fue de muy impresionantes resultados si se tiene en cuenta la magnitud de la precipitación. Se le puede considerar como perfectamente logrado, no obstante, y típico de la experimentación con stratus, ya que las modificaciones en la nube eran evidente consecuencia de la intervención artificial.

El 21 de enero de 1948 cayeron en los alrededores de Wilmington más de 2,5 cms. de nieve 18 horas después de una operación de siembra, cayendo la nieve exactamente en la zona donde se habían tratado las nubes con hielo seco. La nevada, además, tuvo un carácter totalmente local, lo que indicaba su origen artificial en forma concluyente. Sin embargo, el análisis detallado de las informaciones obtenidas durante la operación de siembra evidenció que la nevada había obedecido a causas naturales. El examen de las observaciones sobre las corrientes superiores eficaces demostró que horas antes ya habían abandonado la zona las nubes inoculadas.

Mientras la intervención que genera artificialmente al inestabilidad coloidal había provocado en los stratus precipitaciones apenas mensurables o que no alcanzaron al suelo, se confiaba en que experimentos con formaciones nubosas del tipo cumulus serían de mayor efecto y de mayor éxito desde el punto de vista de su aprovechamiento práctico. La nube más apta para provocar lluvia artificial es evidentemente la formación cumulus en la fase en que la parte superior de la nube toca la linde de congelación. Las sumidades de esta nube constan ya de gotículas de agua muy enfriada, pero aún no contienen cristales de hielo. La nube se mantiene, pues, todavía en estado de equilibrio coloidal y no desprende precipitaciones apreciables. Si en las muy frías sumidades de la nube se siembran gérmenes de hielo sobreviene la reacción en cadena que engendra la inestabilidad coloidal de las partes muy enfriadas de la nube, provocando precipitaciones. En ciertos casos la formación de precipitaciones es aún favorecida por el efecto que se produce con la transformación de las gotículas de agua en cristales de hielo, que al desprender calor, trae consigo una reforzada "convección" (elevación del aire por calentamiento) en la nube inoculada que podría provocar más copiosa lluvia.

Las intervenciones artificiales en las formaciones de cumulus son por lo tanto cuantitativamente más prometedoras, pero la observación y comprobación de los resultados ofrece dificultades incomparablemente mayores que con el tipo stratus. En la capa de stratus extendida en una superficie horizontal las partes no inoculadas de la nube pueden servir para controlar y comparar, mientras las formaciones cumulus en proceso de constante modificación y generalmente en viva actividad de efervescencia impiden la observación comparada de las partes inoculadas y no inoculadas de la nube. En total se realizaron 79 inoculaciones en formaciones nubosas del tipo cumulus en la zona de Ohio y 44 en cumulus de carácter semitropical a lo largo de la costa.

De la serie de pruebas realizadas elegiremos también dos ejemplos típicos. El 5 de junio de 1949 la nube de cumulus investigada tenía la base a 1.700 m. y la cima a 7.500, siendo

su temperatura en las muy frías sumidades de 6 grados centígrados bajo cero. Desde el avión se sembró dos veces hielo seco, unos 2 kg. por kilómetro. En el primer vuelo a través de la nube sólo se observó la presencia de agua muy enfriada, que se adhirió al avión como formación de hielo. Al mismo tiempo se disolvieron las menudas torrecillas superiores de la nube. En el segundo vuelo, transcurridos 13 minutos, se observaron tanto gotículas de agua muy enfriadas como cristales de hielo. Inmediatamente después de formarse las partículas de hielo se registró un débil eco en la pantalla del radar, pero se observó también otro eco de precipitación en una nube que flotaba a unos 3 kilómetros de distancia. Este eco "natural" aumentó en mayor medida que el de la nube inoculada. Poco después se disolvió el cumulus hasta solo quedar el resto de una pequeña nube estratificada.

Fue realizado otro experimento el 7 de junio de 1949. Una nube con base a 1.500 m. y cima a 7.300 con temperatura de 25 grados centígrados bajo cero, fue sembrada con 2 kg. de hielo seco por kilómetro. Diez minutos después de la inoculación se observó un pequeño eco de precipitación en la nube, al mismo tiempo que un avión que volaba bajo ella comunicó la presencia de fajas de precipitación. Media hora después del proceso de siembra se había disuelto el cumulus en un 75% de su volumen.

Tampoco los experimentos con formaciones del tipo cumulus respondieron, pues, a lo que de ellos se esperaba. Contra lo que se presumía, la inoculación de la nube con hielo seco contribuyó más a su disolución que a su desarrollo. Este resultado, por lo pronto decepcionante, ha sido después de utilidad para combatir la asolación del granizo, lo que se hace impidiendo la formación de nubes de granizo precisamente.

En un informe que resume los resultados del "Proyecto Cirrus" se nos dice que si bien el método utilizado para provocar la lluvia artificial en los ensayos descritos ha enriquecido nuestros conocimientos sobre el problema con nuevos y valiosos datos teóricos, desde el punto de vista económico son de dudoso valor. Pues si bien los experimentos han contribuido evidentemente a aumentar nuestros

conocimientos sobre los procesos que provocan las precipitaciones, en modo alguno justifican la esperanza de que pueden ser de utilidad para combatir la aridez o la sequía en ninguna zona del mundo.

Después de estos primeros ensayos fundamentales, un creciente número de científicos, técnicos, organizaciones y equipos de investigación, se consagraron al estudio de esta arduísima, pero fascinante materia, en casi todos los países del mundo. Ni descubrimientos sensacionales, ni avances a saltos se han hecho, ciertamente, después de la primera reacción en cadena provocada con gérmenes de hielo. Pero al aumentar los conocimientos obtenidos experimentalmente en la esfera de la física de las nubes y proseguirse con esfuerzo continuado en todo el mundo los ensayos para producir artificialmente nubes y precipitaciones, impedir la formación de granizo, debilitar las tempestades y disolver las nieblas bajas, el viejo sueño del hombre de intervenir con influjo regulador en el acaecer del tiempo atmosférico ha recibido nuevo aliento con la esperanza de su metamorfosis en realidad.

La Organización Mundial Meteorológica (WMO, World Meteorological Organization) que tiene su sede en Ginebra y a la que pertenecen, como miembros, 91 Estados, ha confiado la tarea coordinadora de toda clase de investigaciones en la esfera de los ensayos para influir artificialmente en el estado del tiempo atmosférico a un comité internacional de expertos formado por las siguientes personalidades: H. R. Byers (USA), H. Dessens (Francia), I. Gajvoronsky (URSS) y B. C. V. Oddie (Inglaterra). Nos referimos a continuación al informe de este comité, hace poco tiempo publicado.

Después de la primera operación de ensayo en gran escala, el "Proyecto Cirrus", se ha mejorado y desarrollado metódicamente, en forma esencial, la técnica de la inoculación de nubes. De acuerdo con la más nueva fase de investigación, en el estímulo artificial de precipitaciones deben tenerse en cuenta, principalmente, los siguientes cuatro factores:

1. el tipo de nube que va a tratarse,
2. el material de inoculación que debe aplicarse,
3. el procedimiento técnico en la inoculación de nubes,

4. el método de comprobación de los resultados. Tipo de nube: se ha decidido experimentar casi exclusivamente con cumulus, por ser el único tipo de nube en el que, con los medios de que hoy se dispone, pueden provocarse precipitaciones apreciables.

Material de inoculación: además de hielo seco se emplean ahora sobre todo compuestos de yodo, partículas higroscópicas sólidas, gotículas de agua de distintas temperaturas y también hollín.

La producción y transporte de hielo seco tropieza con dificultades en zonas tórridas y áridas, en Africa, por ejemplo, es decir, en aquellas zonas del mundo donde tendría especial importancia la lluvia producida artificialmente. Los cristales de yoduro de plata como medio de sublimación producen efecto a una temperatura que se sitúa entre los 5 y 10 grados centígrados bajo cero, dimensión de temperatura relativamente estrecha, que en las partes muy enfriadas del tipo cumulus frecuentemente no se da. Añádase que los cristales de yoduro de plata pierden rápidamente su actividad a la luz del sol. Estas cualidades no permiten su empleo en zonas tropicales. Se prefiere, en cambio, el yoduro de plata, en las latitudes medias. Experimentos realizados en Kongwa, Tangañica, en 1952, demostraron que con el empleo de partículas higroscópicas como material de inoculación en formaciones del tipo cumulus se había producido evidentemente más lluvia de lo que por proceso natural podía esperarse. En las zonas tropicales casi siempre se observan precipitaciones de nubes con temperaturas que se sitúan sobre el punto de congelación.

Es de presumir que la inestabilidad necesaria para provocar esta lluvia puede lograrse también por la diferencia de la presión del vapor en las distintas gotículas de agua. Para mantener diferencias iguales en la presión del vapor, según rige para el proceso de precipitación en las latitudes templadas, con altas temperaturas, dado el fuerte aumento del vapor de saturación con la temperatura, bien escasa diferencia de temperatura de las gotículas es suficiente. Con 12 grados centígrados bajo cero, por ejemplo, la diferencia de la presión del vapor entre hielo y agua es de 0,27 mb. La misma diferencia se da, con

12 grados centígrados bajo cero, sobre dos superficies de agua con una diferencia de temperatura de 0,29° C. Dada la fuerte turbulencia que se observa generalmente en las formaciones del tipo cumulus, parece de todo punto probable que se yuxtapongan gotículas con tal diferencia de temperatura del agua, iniciando el mencionado proceso. Si esta presunción es certera, con la introducción de fuentes o depresiones de calor será posible influir artificialmente en el desarrollo de las nubes. Como medio para generar estas fuentes o depresiones de calor se ha pensado en el hollín. Como el hollín absorbe muy fuertemente la radiación solar, puede servir de fuente de calor durante el día, mientras de noche, al irradiar con más fuerza que su contorno, genera frío. Es fácil preparar hollín menudísimo, apto para mantenerse largo tiempo en la atmósfera y formar una gran sección transversal. Por lo tanto sólo escasas cantidades son necesarias para producir en la atmósfera un efecto apreciable. Una detallada prueba de la exactitud de la hipótesis y de las posibilidades prácticas del procedimiento, podrán inferirse del proyecto de investigación puesto en marcha por el Naval Research Laboratory de los Estados Unidos, bajo el nombre de "Blackbody".

Procedimiento de inoculación: en todos los experimentos hasta hoy conocidos para la introducción del material de inoculación en la nube se emplean tres procedimientos: aviones, cohetes y generadores. Desde los aviones puede esparcirse material de toda clase en la nube, en el lugar deseado. Las desventajas de este método son el alto gasto en dinero y el personal necesario, así como la indispensable y perfecta coordinación entre las tripulaciones y el equipo de tierra durante la intervención. Para el empleo de cohetes es necesaria una completa organización en tierra que permita disparar simultáneamente un gran número de cohetes. El empleo de generadores es el método de inoculación de nubes más sencillo y barato. Los generadores trabajan en tierra y con ellos sólo puede emplearse yoduro de plata, cuyos cristales, al ser despedidos, son llevados a la nube por el viento. Izados por el viento ascendente de la nube misma, son elevados y alcanzan así las partes de la nube con una temperatura que

se sitúa entre los 5 y los 10 grados centígrados bajo cero.

Comprobación de los resultados: la interrogante fundamental en la comprobación de los experimentos del tipo descrito, es la siguiente: "¿qué hubiera ocurrido si no se hubiera realizado ningún ensayo para influir en el estado del tiempo?" Hasta hoy son conocidos dos procedimientos de comprobación aptos para dar una respuesta satisfactoria a la enunciada interrogante; 1. El método comparado, que puede aplicarse cuando en la vecindad de la zona de operación se dispone de un área con formaciones de nubes semejantes sin influencia artificial para provocar precipitaciones, lo que con la simple comparación de la cantidad de lluvia caída podrá comprobarse si en la zona de operación han aumentado las precipitaciones. Este método sólo tiene efectividad tras haber sido aplicado durante largo tiempo. 2. La observación directa: puede comprobarse también el éxito de la inoculación de la nube intentando observar el éxito del experimento en la nube misma. Se emplean para ello sensibles radares meteorológicos que reproducen fotográficamente las modificaciones

de la nube. Basta después el examen y la adecuada interpretación de las fotografías. Este procedimiento, que durante el "Proyecto Cirrus" se perfeccionó notablemente, ha demostrado ser hasta hoy el más seguro y objetivo.

El informe del Comité de expertos termina con los asertos siguientes:

1. Es perfectamente posible provocar artificialmente precipitaciones.
2. Los ensayos de más favorable resultado probable son los realizados en circunstancias en que pueden esperarse también precipitaciones naturales.
3. No se ha llegado a esclarecer satisfactoriamente si no hubiera llovido.
4. Las técnicas actuales no son satisfactorias. Su valor consiste probablemente en la posibilidad de aumentar una precipitación dada, ya sea en lugares donde naturalmente llueve poco o durante periodos de sequía en zonas de precipitaciones normales.
5. Deberán realizarse en el mundo entero nuevos esfuerzos y experimentos para lograr avances en esta importante esfera de la meteorología aplicada.

## UBICACION DE OBSERVATORIO ASTROFISICO

Un grupo de 12 astrónomos de los Estados Unidos, presididos por el Dr. Frank Edmondson, presidente de la Association of Universities for Research in Astronomy, llegó a nuestro país durante los últimos días de noviembre, para decidir el lugar más favorable para instalar un observatorio astrofísico.

Este observatorio —empresa científica conjunta chileno-norteamericana— será operado por la entidad científica mencionada, de cuyo directorio es miembro el Dr. Federico Rutllant, Director del Observatorio Nacional Astronómico de esta Universidad. Forman parte de esta institución los departamentos de astronomía de las Universidades de California, Chicago, Harvard, Indiana, Michigan, Ohio State, Princeton, Texas, Wisconsin y Yale. El nuevo observatorio contará con dos telescopios reflectores, uno de 90 centímetros y otro de 150. Su construcción se iniciará a principios de 1963 y los fondos serán propor-

nados por la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, como parte de sus programas para centros de investigación. Se estima que durante 1963 se invertirá un millón 50 mil dólares. De éstos, 50 mil dólares corresponderán a estudios previos de ingeniería y un millón cubrirá la adquisición del terreno, construcción de edificios, compra de equipo y gastos de operación durante el primer año.

Durante su estada los astrónomos estudiaron todos los datos acumulados desde mediados de 1959, en un completo análisis de cumbres aptas para la instalación del observatorio, realizado por el Dr. Jurgen Stock, en colaboración con el Observatorio Astronómico de la Universidad de Chile. Del estudio realizado han resultado con mejores condiciones de visibilidad astronómica, los cerros Tololo, Blanco y Morado, del área de Vicuña; y los cerros Checo y La Peineta, del área de Copiapó. Se consideran también entre los posibles lugares las cumbres de Farellones y los cerros Robles, Tabaco y Alto del Toro, cercanos a Santiago.