

Posibilidades de modificar el tiempo atmosférico

Por I. FONT TULLOT

Meteorólogo (asimilado a Teniente Coronel).

En estos últimos años han tenido lugar una serie de hechos que han llegado a hacer pensar en la posibilidad de que algún día el hombre alcanzará el sueño dorado de poder gobernar el tiempo atmosférico. Entre estos hechos hay que señalar, en primer lugar, dos grandes acontecimientos, verdaderamente sensacionales: el descubrimiento de la energía atómica y la producción de la "lluvia artificial". Principalmente, el primero ha levantado gigantescas olas de fantasía sobre sus aplicaciones futuras, después de haber demostrado su enorme eficacia como agente de destrucción. Y entre el sinnúmero de artículos periodísticos, más o menos científicos pero siempre sensacionalistas, no han faltado los que han dado como cosa segura el que en un futuro cercano le será dado al hombre emplear ese ingente caudal de energía para habérselas con el tiempo, modificando la evolución y trayectorias de las depresiones, haciendo desaparecer los anticiclones responsables de las largas sequías, e incluso modificar el clima de extensas regiones, de forma que grandes superficies de la Tierra, hoy desérticas o heladas, puedan ponerse a disposición del hombre para su expansión y aumento de sus riquezas.

El hecho indiscutiblemente real de la "lluvia artificial" ha levantado también su correspondiente polvareda. Ambos hechos son consecuencia lógica, e incluso prevista, de un largo y laborioso proceso científico. Pero entre ambos existe la marcada diferencia que así como para haber llegado a la desintegración del átomo ha sido necesario un lujo extraordinario de medios que han requerido presupuestos de millones de dólares, que no se hubieran logrado jamás a no ser por el poderoso acicate de la guerra, en cambio el descubrimiento, también de pri-

mera magnitud, que supone el haber llegado a la producción artificial de la lluvia, ha requerido medios mas bien modestos, estando lo maravilloso del descubrimiento precisamente en la claridad y sencillez de los razonamientos teóricos y experimentos prácticos que lo han llevado a cabo. No obstante, también en este caso ha contribuido la guerra, al menos en acelerarlo; se dió con la "lluvia artificial", sin que se buscase, como resultado de los estudios realizados por eminentes meteorólogos americanos relativos al fenómeno de la formación de hielo en los aviones, el cual en ocasiones durante la guerra fué un serio obstáculo para el desarrollo de las operaciones bélicas realizadas por las Fuerzas Aéreas.

Nuestro objetivo es intentar exponer el estado actual de tan interesante cuestión dentro de sus justos cauces y ver las posibilidades que verdaderamente pueda ofrecer en el futuro. Examinaremos las probabilidades que presenta la modificación directa del tiempo actuando sobre el mismo mediante el consumo de grandes cantidades de energía, y luego examinaremos también los procedimientos indirectos de actuar sobre el tiempo mediante la desviación, aceleración y provocación de ciertos procesos fundamentales de la física de las nubes, en donde pequeñas circunstancias pueden ser causa de grandes efectos, siendo precisamente en estas pequeñas circunstancias donde le es dado al hombre actuar.

* * *

Con todo y ser la desintegración del átomo una fuente de energía incomparablemente superior a las que hasta ahora ha podido disponer el hombre, resulta aún casi insignificante al compararla con la que en-

tra en juego en la complicadísima máquina térmica atmosférica. Bastará el siguiente ejemplo para tener una idea clara de que hasta qué grado es ello cierto. Por ahora, la única forma de emplear esta energía es mediante la liberada por la explosión de las bombas atómicas; pues bien, para liberar tanta energía como la suministrada por una somera depresión de sólo 1.000 millas de diámetro y 10 milibares de profundidad, haría falta la explosión de nada menos 1.000 bombas atómicas del tamaño de las que actualmente construyen los americanos. Ahora bien; si se tiene en cuenta el gran número de depresiones que se desarrollan sobre la superficie terrestre durante el transcurso del año, y el que gran parte de las mismas son mucho mayores y profundas que las del ejemplo, se comprenderá que para influir de un modo continuo sobre la marcha del tiempo haría falta disponer de cantidades enormes de bombas, para cuya fabricación no hay, y probablemente jamás habrá, posibilidades económicas ni industriales. Pero además, aunque se alcanzase esta posibilidad, debería haber avanzado extraordinariamente el estado actual de la ciencia meteorológica para conocer el lugar, modo y momento adecuados para la liberación de la energía. Una comparación con la energía suministrada por la radiación solar, causa original de todos los movimientos atmosféricos, nos servirá de ejemplo. Durante un día de verano, despejado de nubes, la superficie de la Península Ibérica recibe una energía superior a la que liberaría la explosión de 25.000 bombas atómicas, y ¡vaya problema difícil para un meteorólogo el tener que deslindar entre las influencias sobre la marcha de tiempo de estar el cielo de la Península cubierto a estar despejado! Y, por otra parte, no hay que olvidar el efecto que ejercería sobre toda clase de vida la enorme radioactividad desprendida.

Por consiguiente, después de lo expuesto, somos conducidos a aceptar la absoluta imposibilidad de actuar eficazmente sobre las depresiones mediante el empleo de bombas atómicas.

Quizá otro medio más factible de empleo de dicha energía consistiría en actuar indirectamente sobre la circulación general de

la atmósfera, como, por ejemplo, intentando modificar, disminuyéndola, la extensión de las superficies heladas sobre los casquetes polares, fuentes de las masas de aire ártico que tan gran papel juegan en la dinámica de la atmósfera. Ello sería más fácil en el casquete ártico, dado su carácter oceánico, donde a la disminución de la superficie helada podría contribuir el sistema de corrientes marinas, llevando a la deriva hacia latitudes más templadas enormes témpanos previamente desprendidos del núcleo central mediante el empleo de bombas atómicas. Sin duda este procedimiento sería más económico que el anterior; pero con todo, exigiría el empleo de la energía atómica en una escala fantástica. Y también, al igual que antes, se plantearía el difícil problema de ver el modo de emplearla para lograr el efecto deseado en lugar del contrario. Precisamente en estos últimos años se ha investigado mucho sobre las indiscutibles influencias de las condiciones de los hielos árticos en el tiempo mundial, principalmente en trabajos de índole estadística, buscando coeficientes de correlación entre el hielo de dichas regiones y las condiciones de temperatura y presión en distintas partes del planeta, destacando entre éstos el debido últimamente a sir G. Walker (1), siendo uno de los objetivos de dicho trabajo el buscar posibles reglas de predicción del tiempo a largo plazo. Pero hasta ahora no sólo no se ha llegado a un resultado práctico, sino que también se ha puesto en evidencia lo difícil que sería el deducir cómo repercutiría en el tiempo una modificación en gran escala de dicho casquete de hielos. Y el intentar deducir dicha repercusión por medios experimentales mediante el empleo de la energía atómica se hace por ahora, y por mucho tiempo, irrealizable, dadas las dificultades expuestas y la necesidad previa de un problemático acuerdo internacional, principalmente entre los Estados Unidos y Rusia.

Por último, otro modo de influir en el tiempo empleando energía atómica sería emprenderla con las corrientes marinas, ya que sólo ligeros cambios en su temperatura

(1) WALKER, SIR G. (1947): "Arctic Conditions and World Weather." *Quart. J. R. Met. Soc.*, volumen 73, pág. 226. Londres.

y curso, susceptibles de mantenerse durante períodos largos, supondría cambios radicales en el clima de varios países. Pero aquí surgen los mismos inconvenientes que antes, quizá aún mayores.

Concretando, dado el estado actual de la energía atómica, el pensar en su empleo para intentar gobernar el tiempo, no pasa de ser una lucubración fantástica que no presenta ningún síntoma de que pueda llegar a ser una realidad. Y tampoco parece factible emplearla en pequeña escala para lograr ciertas modificaciones locales de las condiciones atmosféricas, dado su coste y los peligros radioactivos.

Respecto a las cinco bombas que hasta la fecha han hecho explosión, no tuvieron más efecto meteorológico que el dar origen a las correspondientes grandes corrientes convectivas, las cuales fueron responsables las personas, no las cosas (Lacalle) de que la "nube de humos" alcanzase alturas estratosféricas, hasta ser dispersadas por los vientos superiores. Precisamente el profesor O. G. Sutton (2) ha estudiado el proceso de la explosión de la primera bomba atómica en Nuevo México como un experimento a gran escala de convección artificial, deduciendo por procedimientos teóricos que a los 5.000 metros la velocidad ascensional era de 30 m-s, para ir disminuyendo progresivamente a alturas mayores.

Respecto al empleo de otras formas de energía, durante la pasada guerra se empleó con éxito la resultante de la combustión de la gasolina vaporizada para despejar de niebla los aeropuertos. Se trata del procedimiento oficialmente conocido por FIDO (Fog, Intensive Dispersion Of), y comúnmente por "The Grand Canyon" entre los aviadores anglosajones. Aquí sólo se trata de una modificación local y en pequeña escala del tiempo atmosférico; pero que será interesante analizar para poner en evidencia el gran consumo de energía requerido al intentar la modificación de las condiciones meteorológicas por procedimientos energéticos artificiales.

(2) SUTTON, O. G. (1947): "The Atom Bomb Trail as an Experiment in Convection." *Weather*, volumen 2, pág. 105. Londres.

Como es sabido, el procedimiento FIDO consiste en un sistema rectangular cerrado de quemadores, rodeando, unos 50 metros separados de los lindes, la pista principal de un aeropuerto. Al encender el FIDO se producen previamente nubes negras de humo; pero a medida que la gasolina se evapora por su propio calor, la combustión se transforma en una intensa llama blanca amarillenta, sin humo. El considerable calor desprendido da lugar a la evaporización de las gotitas que constituyen la niebla, la cual acaba por desaparecer sobre la pista, contribuyendo a ello también la agitación del aire producida por dicho calentamiento. Es decir, el FIDO no presupone ningún descubrimiento meteorológico, ni siquiera puede considerarse como un invento, ya que en sí no es más que un gigantesco hornillo de cocina con muchos quemadores. Lo que sí es un alarde o atrevimiento que sólo las inapelables exigencias bélicas podían llevar a cabo. Pues el consumo de combustible es enorme. Así, una instalación FIDO, cubriendo un perímetro de sólo 2.500 metros, consume durante una hora de funcionamiento más de 350.000 litros de gasolina. Lo cual quiere decir que para lograr limpiar de niebla los aeropuertos de España, en todas las ocasiones que exigiese el tráfico actual durante un año, haría falta gastar una cantidad de dinero superior a la mitad de la totalidad del presupuesto del Ministerio del Aire. Pero si el FIDO es un procedimiento enormemente caro, e incluso prohibitivo para economías como la nuestra, para emplearlo con fines pacíficos, en cambio, bajo el aspecto bélico, resultó para los aliados una de las inversiones más lucrativas de la pasada guerra. Bastará con recordar la ofensiva, magníficamente planeada, del Mariscal von Rudstedt en la semana navideña del año 1944, pues se contaba con que los aliados se verían impedidos de emplear su Aviación debido a la espesa capa de niebla que cubriría la totalidad de los aeródromos ingleses, donde tenían sus bases las grandes formaciones de bombarderos aliados, circunstancia pronosticada por el Servicio Meteorológico alemán, de acuerdo con la maravillosa eficiencia demostrada por dicho servicio durante la guerra. Pero fue en esta ocasión cuando se empleó por primera vez el FIDO en gran escala, de forma que du-

rante aquella crítica semana a intervalos se abrían grandes agujeros rectangulares en la espesa capa blanca de niebla, saliendo de ellos centenares y más centenares de bombarderos para ir a pulverizar sistemas ferroviarios, puentes, depósitos de suministros, detrás de las líneas de von Rundstedt. Cuando los aviones aliados regresaban a sus bases aparecía, de un modo casi maravilloso, "The Grand Canyon" enmarcando con lenguas de fuego la pista de aterrizaje, completamente despejada.

Otro procedimiento de la misma naturaleza del FIDO, aunque en escala mucho menor, para lograr modificaciones artificiales de las condiciones atmosféricas locales, consiste en el empleo de hornillos fumígenos para impedir que las heladas dañen los cultivos. Pero aquí, al contrario de lo que ocurre con el FIDO, el desprendimiento de humos tiene tanta o más importancia que la propia acción calorífica. Ello es especialmente cierto cuando la helada es debida a la irradiación local, pues entonces, al extenderse el humo sobre los cultivos, forma una especie de capa que impide el enfriamiento superficial por irradiación. Pero cuando la helada sea producida por irrupciones de masas de aire frío, no basta con la acción protectora de la capa de humo, sino que además ha de calentarse efectivamente el ambiente alrededor de las plantas que se trate de proteger. El coste del procedimiento es entonces mucho mayor, porque no estando el aire en calma y pudiendo durar la situación cuatro o cinco días, el consumo de combustible (generalmente alquitrán o petróleo) ha de ser abundante; pero así y todo, es remunerador cuando se trata de frutos escogidos de invierno, como la naranja, para los cuales el riesgo alcanza al fruto y al árbol. Este método ha demostrado ser verdaderamente útil, de forma que es en realidad el único procedimiento que por ahora dispone el hombre para lograr mejorar su economía mediante la modificación artificial de las condiciones meteorológicas locales. Donde se emplea en gran escala y con gran resultado es en el Oeste de los Estados Unidos, donde solamente los propietarios de los naranjales de California consumen, en una sola vez de llenar los hornillos, cerca de 3.000 vagones de petróleo. Naturalmente, el éxito del procedimiento descansa en las

predicciones del Servicio Meteorológico de dicha nación, el cual cuenta en su haber muchas predicciones famosas que han salvado cosechas por valor de muchos millones de dólares.

También tenemos que indicar que el intento de evitar el granizo mediante explosiones no está desechado, habiendo vuelto a la actualidad gracias a los experimentos que se realizan en Francia. En ellos se intenta evitar el granizo, destruyendo mediante explosiones el órgano del cúmulo-nimbus que lo produce, y que, según parece, es una localización muy estrecha y visible de la corriente ascendente, la cual conserva en suspensión enormes cantidades de agua subfundida.

Respecto a la pretendida acción de la artillería, y en general de todas clases de explosiones, sobre la lluvia nada nos queda por añadir a lo expuesto en esta misma revista por el meteorólogo Jansa (3).

* * *

Casi todo lo que vamos a exponer a continuación girará alrededor del espectacular experimento de la "lluvia artificial", el cual, como ya dijimos al principio, no es más que uno de los hechos más sobresalientes de un largo proceso científico, que sólo pudo realizarse gracias a la ayuda de la Aviación, la cual ha demostrado con ello, una vez más, ser de una eficacia extraordinaria para la investigación científica del tiempo atmosférico. Sin la Aviación, indudablemente no hubiera sido posible iniciar una serie de experimentos en el seno de la atmósfera, indispensables no sólo como comprobación de las modernas teorías de la física atmosférica, sino también para orientar y dirigir su futuro desarrollo, para el cual se abren actualmente espléndidos horizontes.

Como ya expuso claramente Jansa en esta revista, cuando los meteorólogos Bergeron y Findeisen llegaron a establecer una luminosa teoría para explicar las causas y

(3) JANSÁ, J. M. (1947): "Lluvia artificial." *Revista de Aeronáutica*, núm. 84, pág. 74. Madrid.

mecanismos de las precipitaciones atmosféricas, se vió la posibilidad de que el hombre llegase a intervenir en su producción, de forma que cuando los norteamericanos lograron producir nieve y lluvia artificiales corroboraron con dichos experimentos la veracidad de la teoría previamente establecida.

Según la teoría de Bergeron, universalmente aceptada, normalmente no puede explicarse el crecimiento de las gotitas de una nube, hasta alcanzar el tamaño que le permita caer en forma de lluvia, simplemente por condensación directa del vapor de agua sobre las mismas, estando esta verdad plenamente demostrada teórica y experimentalmente. También se ha demostrado la imposibilidad de que las gotas de tamaño suficiente para precipitar puedan formarse por coagulación de varias gotas pequeñas. Por otra parte, es un hecho bien conocido y explicado que las gotitas de agua que forman la nube no se hielen, aunque la temperatura descienda muchos grados por debajo de cero, diciéndose entonces que las gotitas de agua se encuentran superenfriadas o subfundidas. Si ahora en una nube semejante aparecen cristallitos de hielo, ocurrirá que, puesto que la tensión del vapor sobre el agua subfundida es mayor que sobre el hielo, habrá una notable supersaturación con respecto al hielo. Entonces el vapor de agua disponible deberá sublimarse sobre los cristallitos de hielo, los cuales crecerán rápidamente. Con ello el aire dejará de estar saturado con respecto a las gotitas subfundidas, las cuales se verán obligadas a evaporarse. Cuando los cristallitos hayan aumentado lo suficiente, caerán, recogiendo en su camino más agua por colisión con las partículas de la nube, para al fin llegar a niveles inferiores en forma de nieve o lluvia, según sea la distribución vertical de la temperatura del aire.

Ahora, para completar la teoría, había que ver cuál era la causa de que aparecieran en la nube los cristallitos de hielo necesarios para dar lugar a la precipitación. La explicación está, según Findeisen, en que en el seno de la nube subfundida estén presentes ciertos tipos muy específicos de partículas sobre las cuales y bajo ciertas circunstancias deba sublimarse el vapor de agua saturado, dando lugar a la formación de cris-

talitos de hielo. A estas partículas las llamó "núcleos de sublimación", por analogía con los "núcleos de condensación", imprescindibles para que el vapor de agua se condense en gotitas líquidas al llegar a la saturación. Pero así como los núcleos de condensación constituyen un problema de física atmosférica satisfactoriamente resuelto, conociéndose su naturaleza física y estando siempre presentes en el aire en cantidad suficiente para explicar el que prácticamente siempre se produzcan nubes cuando se alcanza la saturación, y a veces incluso antes de llegar a ella, en cambio, con los núcleos de sublimación la cuestión es completamente distinta, siendo asunto de debate su naturaleza, manera de comportarse, cantidad e incluso su existencia, puesta en duda por algunos meteorólogos. Por de pronto el mismo Findeisen reconoce que frecuentemente son muy escasos, habiendo descubierto dos clases de dichos núcleos: un tipo que produce cristales cuando la temperatura ambiente está comprendida entre -7° y -32° C., y que generalmente son muy poco numerosos, aunque la cantidad varíe mucho de una a otra circunstancia; y los núcleos de la segunda clase que empiezan a actuar cuando la temperatura es de unos -32° C. o inferior, los cuales son mucho más numerosos. El que a temperaturas superiores a -7° C. no sean activos dichos núcleos explica que en ninguna de las numerosas ocasiones en que durante treinta y cinco años de observaciones ha estado el Observatorio de Izaña (altura 2.400 metros en la isla de Tenerife) envuelto por nubes subfundidas no se haya notado en las mismas ni el menos rastro de cristallitos de hielo.

Para conocer con mayor detalle la teoría de Bergeron y Findeisen recomendamos la obra de Morán (4), que ocupa un primerísimo lugar entre los mejores libros de termodinámica de la atmósfera escritos hasta la fecha.

Durante los inviernos de 1943-44 y 1944-45 trabajaban juntos en el problema de la formación de hielo en las aeronaves en el Observatorio de Monte Washington (Estados

(4) MORÁN, F. (1944): "Apuntes de termodinámica de la atmósfera." *Servicio Meteorológico Nacional*. Madrid.

Unidos), los dos hombres que habían de dar lugar a la producción artificial de la lluvia, por primera vez en la historia de la Humanidad. Ellos eran Irving Langmuir y Vincent J. Schaefer, el teórico y el práctico, respectivamente. Irving Langmuir era ya sobradamente conocido en el mundo científico, pues antes de dedicarse a la Meteorología había ganado como químico el premio Nóbel. En 1942, unos trabajos relativos a la fabricación de generadores de humo para el Ejército le llevaron a cálculos teóricos sobre el comportamiento de las nieblas, desarrollando la teoría, denominada por él mismo de la "evaporación-condensación", que gobierna el crecimiento de las gotas de las nubes (5). Esta teoría le fué luego de gran valor en sus trabajos del Monte Wáshington, y le ha servido de base para la mayoría de sus estudios relativos a la precipitación.



Potente cúmulo generado después de haberse efectuado una "siembra" de hielo seco, en Nueva Gales del Sur, Australia.

Los trabajos de Langmuir fueron completados por los ingeniosos experimentos de Schaefer, quien ideó una serie de nuevos aparatos meteorológicos de gran utilidad para el estudio de la física de las nubes. Así nos encontramos ante una prueba evidente de los magníficos resultados a que pueden dar lugar la teoría y la práctica cuando trabajan juntas con semejante armonía.

Al abandonar el Monte Wáshington, des-

(5) LAGMUIR, I.; SCHAEFER, V. J.; VONNEGUT, B., y otros (1947): "First Quarterly Progress Report, Meteorological Research." *Department of Commerce*. Wáshington, D. C.

pues de haber observado muchas veces cómo la cumbre era barrida por nubes líquidas a temperatura de -20° y -25° C., siguieron investigando acerca de las gotitas subfundidas y de la formación de los cristallitos de hielo, llegando Schaefer a su famoso experimento de la nevera. Adquirió una nevera eléctrica cuyo recipiente tenía una cabida de aproximadamente 4 m^3 . Sin la tapa, la temperatura del fondo era de -23° , y a unos pocos centímetros del borde superior era de unos -10° . Exhalando su aliento unas cuantas veces dentro de la nevera, lograba que se llenase de una nube constituida por gotitas de agua líquida semejantes a las de las nubes naturales, pero sin que se apreciase la existencia de ningún cristal de hielo, ni aun en el fondo, que estaba a -23° . Forró la caja de terciopelo negro e iluminó la nube desde encima mediante un intenso haz luminoso, con el fin de hacer visible a simple vista cualquier cristallito que apareciese, aunque su diámetro no fuese mayor de unos pocos micrones. Después ensayó gran número de materiales, espolvoreándolos dentro de la nevera, para ver si daba con alguno que actuase como núcleo de sublimación, pero normalmente no aparecía ni traza de cristal alguno. Sólo en raras ocasiones, a las más bajas temperaturas, lograban aparecer algunos cristallitos diseminados. Luego introdujo en la nevera una aguja metálica suspendida de un hilo, la cual había sido previamente enfriada mediante aire líquido. Inmediatamente vió que el camino recorrido por la aguja, al sumergirse en la nube, contenía una espesa bruma constituida por partículas demasiado pequeñas para poderlas diferenciar, pero al cabo de diez a veinte segundos estos cristales se extendían por todo el recipiente.

Estos experimentos demostraron que para obtener tal efecto bastaba que la aguja estuviese enfriada a menos de -35° . Entonces Schaefer tuvo la feliz idea de dejar caer fragmentos de hielo seco (CO_2 solidificado, cuya temperatura es inferior a -70°), viendo cómo un fragmento diminuto de hielo seco dejaba tras sí una estela de cristallitos de hielo. Agitando el aire, los cristallitos de hielo formados acababan por ocupar uniformemente todo el recipiente, estando separados unos de otros en menos de un milímetro; de modo que debían haberse pro-

ducido más de 10^8 cristalitas. Con este experimento de laboratorio Schaefer había abierto el camino hacia la producción de la "lluvia artificial", ya que de ser cierta la teoría de Bergeron al repetir este experimento en la Naturaleza, dejando caer fragmentos de hielo seco en el interior de una nube subfundida, debían formarse los cristalitas de hielo indispensables para el mecanismo de la precipitación. A estos cristalitas primarios, formados espontáneamente en el seno de la nube, se les denomina "núcleos de hielo", los cuales, una vez formados, crecen muy rápidamente de acuerdo con la teoría "condensación-é vaporación", de Langmuir. Según los cálculos de Langmuir, una píldora de hielo seco de un centímetro de diámetro, cayendo a través de una nube subfundida, produciría alrededor de 10^9 núcleos de hielo.

Indistintamente de Schaefer, el científico británico Cwilong (6) encontró que el vapor de agua saturado en aire ordinario se condensaba directamente en cristales de hielo cuando el enfriamiento llegaba a $-32,2^\circ$. Y también anteriormente Findeisen, en otro experimento, encontró que la temperatura crítica para esta formación espontánea era de -30° . Pero, aunque estos experimentos demostrasen, al igual que el de Schaefer, la posibilidad de producir núcleos de hielo por enfriamiento hasta cierta temperatura crítica, difirieron notablemente de aquel puesto que en ellos las bajas temperaturas se alcanzaban enfriando la totalidad de un pequeño volumen de aire húmedo, no conduciendo, por consiguiente, al descubrimiento del modo de proceder para lograr la producción de cristales de hielo en las nubes naturales subfundidas. Estas diferencias encontradas en las temperaturas críticas probablemente se deban a las diferentes técnicas empleadas.

Schaefer realizó el primer ensayo de "lluvia artificial" el 13 de noviembre de 1946, elevándose en un pequeño avión "Faichild" desde el aeródromo de Schenectady (Estados Unidos). Había pocas nubes, pero al fin encontró una a propósito, a una altura

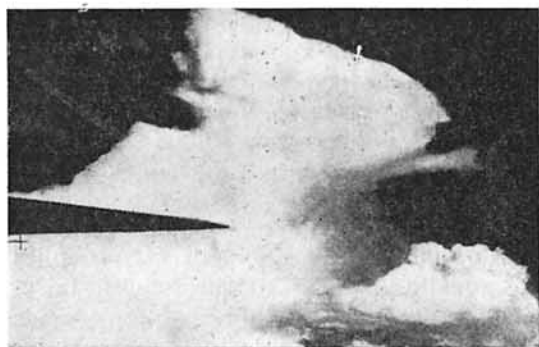
de 4.000 metros y a la temperatura de -20° . Efectuó la "siembra" de la nube lanzando sólo seis libras de hielo seco desde la carlinga del avión, con lo cual consiguió hacer precipitar la nube por completo en forma de nieve, aunque ésta no llegó a alcanzar el suelo debido a que antes se evaporó en la capa inferior de aire seco. El éxito había sido absoluto.

Posteriormente se realizaron siete experimentos de "siembra" de nubes, teniendo lugar el último de la serie el 7 de abril de 1947. En todos se alcanzó también el éxito. Dos de estas pruebas se emprendieron con pequeñas nubes cumuliformes, las cuales se convirtieron por completo en nieve al cabo de cinco minutos de efectuarse la "siembra". Los experimentos más interesantes fueron los realizados con capas de estrato-cúmulos, donde se abrieron grandes boquetes de cielo despejado siguiendo el recorrido de la "siembra". Esta serie de experimentos está expuesta con todo detalle en un informe del Office of Technical Services de Washington (5). Al principio, estas experiencias fueron patrocinadas por la poderosa Compañía General Electric; pero actualmente, y bajo la denominación de Project Cirrus, existe en los Estados Unidos una Comisión que dirige oficialmente todas las experiencias relativas a la modificación y precipitación artificiales de las nubes, donde junto a la General Electric intervienen de un modo eficazísimo el Ejército y la Marina. La operación más espectacular del Project Cirrus de que tenemos noticias es cuando se intentó modificar el huracán del 10 al 15 de octubre de 1947, mientras se desarrollaba a 350 millas al oeste de Florida. Mediante tres aviones (un B-29 y dos B-17) se realizaron tres recorridos de "siembra" a cierta distancia del "ojo" del ciclón, dejando caer un total de 180 libras de hielo seco. La nube "sembrada" sufrió considerables modificaciones; pero no existe seguridad de que se consiguiese con ello cambiar el curso del huracán, el cual azotó Savannah, en Georgia.

A los experimentos realizados por los norteamericanos les siguen en orden de importancia los llevados a cabo en Australia. El más espectacular de éstos ha sido des-

(6) CWILONG, B. M. (1947): "Sublimation in a Wilson Chamber. Proc. Roy. Soc., A. vol. 190, página 137. Londres.

crito por Kraus y Squires (7), quienes relatan cómo mediante la "siembra" de un gran cúmulo lograron no sólo hacerle precipitar, sino que aumentó considerablemente de tamaño, convirtiéndose en un auténtico cúmulo-nimbus, cuya cima se remontaba casi 6.000 metros por encima de las otras nubes no sembradas, manteniéndose en actividad durante el resto de la tarde. Lo notable de este experimento fué que, en contra de la tendencia normal de las nubes a disiparse después de la siembra, en esta ocasión aumentase tan considerablemente de tamaño. También en algunos de los experimentos realizados últimamente en los Estados Unidos se ha producido algo semejante. En el proceso físico que explica este fenómeno entra en juego el calor latente de sublimación, y ha sido debidamente explicado por Bannon (8).



Yunque turbulento después de una "siembra" de hielo seco, en Nueva Gales del Sur, Australia.

La simplicidad de dicho procedimiento de producir la "lluvia artificial" ha sido causa de que los ensayos se hayan extendido rapidísimamente por los más diversos países, de forma que actualmente deben de haberse efectuado varios millares de ellos. Naturalmente, donde más experiencias se llevan hechas es en los Estados Unidos, no sólo por ser el país de su origen, sino que a la gran importancia de la lluvia para su agricultura se une la facilidad en disponer

de aviones y de hielo seco. Así, en sus "magazines" se han podido leer un sinfín de artículos relativos a cómo las cámaras agrícolas de ciertos distritos, e incluso simples agricultores, se han dedicado a producir "lluvia artificial" por cuenta propia. Donde no esté industrializado el hielo seco, puede emplearse simplemente la nieve carbónica, obtenida de las botellas corrientes de CO₂ en estado líquido. Pero el empleo de esta nieve es menos eficaz debido a que, por su rápida evaporación, sólo puede lograrse la formación de cristales de hielo en una capa de poco espesor de la nube; en cambio, empleando hielo seco pueden prepararse píldoras del tamaño adecuado para que antes de evaporarse hayan podido atravesar toda aquella parte de la nube que esté en estado de subfusión. Respecto al procedimiento de preparar las píldoras, su almacenaje, tamaños adecuados para espesores dados, modo de efectuar la "siembra", cantidad que debe emplearse, etc., se expone con toda claridad en el mencionado informe (5) de la Office of Technical Services.

Respecto a los resultados prácticos obtenidos hasta ahora, aun no se ha publicado ningún informe oficial; pero de lo que no cabe duda es de que el hombre dispone actualmente de un instrumento eficiente para modificar las nubes y lograr su precipitación, siempre y cuando las condiciones sean favorables. No obstante, respecto a la modificación de las nubes, debemos hacer constar que con anterioridad a los primeros experimentos de lluvia artificial, el hombre había logrado producir de un modo accidental e involuntario, más bien perjudicándole, nubes por medios artificiales. Nos referimos a las "estelas nubosas" que, bajo ciertas circunstancias atmosféricas, dejan los aviones tras sí, y que durante la pasada guerra resultaban bastante molestas, ya que facilitaban el tiro antiaéreo y atraían la caza enemiga. Estas estelas son de varias clases: en una, contribuyen a su formación, en primer lugar, el vapor de agua producido por la combustión de la gasolina, siendo necesario que la temperatura del aire sea del orden de -42° ; otra es debida a los núcleos de sublimación, también resultantes de dicha combustión, debiendo entonces estar el aire supersaturado.

(7) KRAUS, E. y SQUIRES, P. (1947): "Experiments on the Stimulation of Clouds to Produce Rain." *Nature*, vol. 159. Londres.

(8) BANNON, J. K. (1947): *Met. Magazine*, volumen 76, pág. 169. Londres.

de vapor con respecto al hielo, pero no con respecto al agua, pues en tal caso se formarían las nubes naturales; y, por último, hay otras estelas menos importantes debidas a efectos aerodinámicos. Este interesante fenómeno de formación artificial de nubes ha sido estudiado en todos sus aspectos por A. W. Brewer (9).

Vonnegut (5), otro miembro del Project Cirrus, ha efectuado diversos experimentos con el fin de dar con alguna sustancia que pudiera actuar de igual forma que los núcleos de sublimación, que se supone existen en la Naturaleza, en la formación de cristales de hielo en las nubes. Al fin, descubrió que las partículas de yoduro de plata servían al efecto, probablemente a causa de la gran semejanza entre su estructura cristalina y la del hielo. En sus experimentos de laboratorio demostró que las partículas del humo de yoduro de plata, producidas por la evaporización de dicha sustancia sobre un filamento calentado eléctricamente al rojo, se comportaban como núcleos muy activos de sublimación. El diámetro de estas partículas era del orden de un micrón, y se volvían activas a partir de la temperatura -4° . Mediante otros procedimientos, también llegó a producir partículas mucho menores, siendo su diámetro del orden de 0,01 micrón; pero éstas necesitaban para ser efectivas temperaturas inferiores a -8° . La gran ventaja es que, dado lo pequeño de su tamaño, con solo un miligramo de yoduro se producen de 10^{12} a 10^{13} núcleos efectivos, con lo cual, de generalizarse este procedimiento para lograr la lluvia artificial bastaría el empleo de pequeñas cantidades de yoduro para tratar grandes volúmenes de nube. No obstante, aun no se han hecho experimentos en gran escala con nubes naturales, y además existe la sospecha de que ciertos gases e impurezas de la atmósfera puedan dar lugar a que las partículas de yoduro pierdan su efectividad como tales núcleos.

* * *

Respecto a las posibilidades prácticas de la lluvia artificial, por el momento, el único medio efectivo consiste en el procedi-

miento del hielo seco. Pero para que la lluvia o nieve producidas sean lo suficientemente abundantes para que puedan resultar de utilidad se requieren ciertas condiciones especiales, no bastando con que la parte superior de la nube a tratar se encuentre en estado de subfusión. En países de la zona templada, como España, las nubes a propósito para hacer precipitar notables cantidades de agua se presentan precisamente bajo aquellas condiciones favorables para que la lluvia pueda producirse por sus propios medios naturales. Entonces, naturalmente, se presentará muchas veces la duda de si la lluvia se hubiera producido igualmente de no haberse efectuado la "siembra". En cambio, cuando tienen lugar largos periodos de sequía, como el últimamente sufrido por España, dado las condiciones anticiclónicas entonces reinantes, resulta que sólo se presentan someras formaciones nubosas, que a lo sumo pueden dar lugar a ligeras precipitaciones. En cambio, lo que sí pueda tener tal vez un resultado práctico, es hacer que, bajo condiciones lluviosas naturales, sea estimulada artificialmente la producción de la lluvia, de forma que ésta llegue a precipitar antes de lo que hubiera hecho por sus medios propios. Con ello podría conseguirse que aquellos lugares en que hubiese un especial interés en que lloviese copiosamente, como las cuencas de los pantanos, fuesen favorecidos a expensas de otros.

Donde se ofrecen mayores probabilidades de éxito económico es, probablemente, en los países más cálidos que los de la zona templada, donde muchas veces el límite superior de potentes formaciones nubosas logra estar a temperaturas de algunos grados bajo cero, suficientes para que cierto espesor de la nube se encuentre en estado de subfusión, pero siendo insuficiente el grado de enfriamiento para que resulten activos los núcleos de sublimación que existan en el aire. En estas condiciones es de esperar que la "siembra" de hielo seco diera resultados notables. Esto sería especialmente importante para aquellos países como, por ejemplo, las Islas Canarias, donde la riqueza agrícola es muy grande y la tierra muy agradecida, bastando modestas lluvias para obtener grandes resultados.

Respecto a las grandes nubes cumulifor-

(9) BREWER, A. W. (1946): "Condensation Trails". *Weather*, vol. I. Londres.

mes en que su temperatura sea superior a 0°, Langmuir (10) ha establecido la posibilidad de hacerlas precipitar regándolas simplemente desde un avión. Para ello es necesario que la nube tenga un espesor superior a unos 1.000 metros, que el contenido de agua sea considerable y que en su seno haya una corriente ascendente, al menos, de 3 m/seg. Bajo estas condiciones, las gotitas procedentes del riego artificial crecerían al ir chocando con las gotitas de la nube hasta llegar a cierto tamaño crítico en que, debido a la disminución de la tensión superficial, se disgregarían en varias gotitas. Estas serían impulsadas hacia arriba por la corriente ascendente hasta llegar a ser lo suficientemente grandes para volver a caer. Este proceso se extendería rápidamente por toda la nube, hasta que toda el agua contenida en la misma se reuniese en gotas demasiado grandes para poder permanecer en suspensión, lo cual daría lugar a la precipitación de la nube. Algunos experimentos realizados en Hawai parecen haber comprobado la exactitud de la teoría de Langmuir.



Estelas de un combate aéreo en Europa occidental. A la izquierda, dos formaciones de bombarderos, con sus cazas, surcan el cielo de invierno rumbo a Bremen.

Puesto que sólo estamos en los comienzos de la provocación artificial de la lluvia, hay que esperar para el futuro resultados mejores de los obtenidos hasta ahora. Además, téngase en cuenta que aún no se ha llegado a descubrir la naturaleza de

los auténticos núcleos de sublimación que actúan en la atmósfera real. Y, por otra parte, la teoría de Bergerón aún está abierta a la especulación por lo que respecta a aquellas nubes tropicales que dan lugar, a veces, a precipitaciones de cierta importancia, sin que ninguna de sus partes esté a temperaturas inferiores a 0°, y, por consiguiente, sin estar presente ningún cristallito de hielo. Es decir, es muy grande aún lo que falta por recorrer para llegar a un conocimiento más exacto de la física de las nubes y del mecanismo de la precipitación. Y, como dice Bannon (11), nadie puede poner en duda que los experimentos de estimulación artificial de la lluvia son de enorme importancia para lograr este conocimiento.

Una vez alcanzado dicho conocimiento, y principalmente cuando se haya descifrado el misterio de los núcleos de sublimación, se habrá avanzado un gran paso en las posibilidades de gobernar el tiempo atmosférico. De ello ya se dió cuenta el propio Findeisen cuando vió el gran papel que juegan los núcleos de sublimación en el mecanismo de la precipitación. Por ello, y dado el carácter irregular con que se presentan en la atmósfera, no son de extrañar las anomalías que con respecto a la lluvia presentan situaciones meteorológicas a primera vista semejantes. Ello dificulta extraordinariamente las predicciones del tiempo, ya que, aunque se haya seguido el criterio científico más rígido y tenido en cuenta las leyes termodinámicas de la atmósfera, la falta de los núcleos puede dar lugar a que falle una predicción de lluvia, puesto que no es posible tener "a priori" conocimiento de su existencia. Pero asimismo este papel de los núcleos de sublimación abre la posibilidad de llegar algún día a gobernar el tiempo en gran escala. Pues aquí ya no se trata de que el hombre mida sus fuerzas con las de la Naturaleza, como en el caso de la energía atómica, sino aprovecharse de ciertas inestabilidades naturales con el fin de hacer que entren en juego por medios artificiales aquellas grandes energías que en estado latente ya existían en las nubes, como son las que entrañan las presiones

(10) LANGMUIR, I. (1948): "Production of Rain by Chain Reaction in Cumulus Clouds at Temperatures Above Freezing". G. E. C. Nueva York.

(11) BANNON, J. K. (1948): "Rain Making". *Weather*, vol. 3, pág. 261. Londres.

capilares, osmóticas y también eléctricas. Es decir, no se trata de cargar y disparar el cañón, sino simplemente de dispararlo apretando el gatillo. Por ello, ya en 1938 Findeinsen pudo decir:

“Maravilla pensar que cantidades tan pequeñas de núcleos de sublimación puedan influir de un modo tan vital en los grandes procesos del tiempo... Esto prueba que con el tiempo la ciencia humana podrá controlar el curso del tiempo por medios técnicos... Podemos atrevernos a establecer que con un gasto relativamente pequeño será posible producir lluvia artificial, evitar el peligro del engelamiento en los aviones y la formación del granizo en las tormentas. También, dentro de ciertos límites, es posible que, como resultado del acompañamiento de las transformaciones de energía, se pueda llegar a modificar otros fenómenos del tiempo (temperatura, viento)...”

De la gran verdad que encierran estas predicciones, nos daremos aún mejor cuenta si consideramos que la atmósfera es en realidad una gigantesca máquina térmica, cuya fuerza motriz proviene del calor del sol y cuyo cuerpo activo es precisamente el vapor de agua. Pues bien; si se consigue por medios artificiales lograr modificaciones en gran escala del contenido y distribución del vapor de agua en la atmósfera (por ejemplo, obligando a precipitar las nubes), esta modificación en el cuerpo activo ha de repercutir en el funcionamiento general de la máquina térmica; es decir, en el tiempo atmosférico. Además, toda modificación en gran escala de las nubes supondría también un cambio en el albêlo de la tierra, y, por tanto, en la cantidad de calor absorbido por ella; es decir, una modificación en la propia fuerza motriz de la máquina se uniría a la que tuviese lugar en su cuerpo activo.

Pero también aquí, al igual que cuando hablamos de la energía atómica, para lograr el efecto apetecido en el tiempo atmosférico haría falta tener previamente un conocimiento tal de la máquina atmosférica del que aun estamos muy lejos. Así, vemos cómo, a pesar de la enorme ampliación en los medios de observación y de los numerosos trabajos de investigación, sólo se está consiguiendo avanzar muy lentamente en la difícilísima técnica de predecir el tiempo, aunque sólo se intente abarcar períodos menores de cuarenta y ocho horas. Y no digamos de las predicciones a largo plazo, meta que de alcanzarse supondría una verdadera revolución económica, aunque sólo se pudiese predecir simplemente si el año agrícola será lluvioso o seco, si la primavera suave o fría, etc. Pero, en fin, lo cierto es que todos los trabajos que de cualquier modo puedan influir al progreso de la Meteorología merecen la mayor atención, dada la influencia cada vez mayor de esta ciencia en la vida económica de las naciones. Y si no, baste el ejemplo de la última sequía, durante la cual toda la nación ha estado pendiente del tiempo. Por todo ello, esta nueva era de experimentación directa de los fenómenos meteorológicos mediante aviones que actúen como verdaderos laboratorios aéreos, abierta con los ensayos de “lluvia artificial”, merece toda la atención por parte de los servicios meteorológicos. Pero, ahora bien, no en forma de buscar inmediatamente la utilidad práctica, sino animados del más sano espíritu auténticamente científico, buscando simplemente el progreso de la Meteorología, pues obrando de esta forma no cabe duda que lo demás ya vendrá por sí solo y quizá de un modo esplendoroso.

