

## EL PROYECTO "STORMFURY"

Por R. Cecil GENTRY\*

El *proyecto Stormfury* es el resultado de una audaz cooperación entre los Departamentos de Comercio y de Defensa de los Estados Unidos y la Administración de las Actividades Científicas Naturales (ESSA) y la Marina Militar, respectivamente, como principales participantes. Su propósito es el de averiguar hasta qué punto puede el hombre modificar favorablemente la evolución de los ciclones tropicales (Gentry y Edelstein, 1968). El proyecto adquirió carácter oficial en 1962, después que los mismos grupos citados intentaron modificar el huracán *Esther*, en 1961, con resultados prometedores aunque no decisivos; posteriormente se repitieron las experiencias de modificación con el huracán *Beulah*, en 1963, obteniéndose los mismos resultados dudosos. Desde aquella fecha los estudios realizados han aumentado considerablemente nuestros conocimientos sobre la estructura de los huracanes y de los fenómenos energéticos que en ellos se producen, así como sobre los fenómenos convectivos de las nubes tropicales. Además, actualmente se dispone de instrumentos perfeccionados para el recuento de núcleos de congelación y para medir el contenido en agua líquida y sólida de las nubes, así como de métodos más seguros para efectuar estas y otras medidas. Igualmente se han perfeccionado mucho los modelos teóricos de la configuración general de los ciclones tropicales y de los elementos teóricos cumuliformes y convectivos contenidos en ellos. A consecuencia de estos notables avances teóricos se ha desarrollado gradualmente el interés en los proyectos experimentales. El resultado ha sido el proyecto *Furia Tempestuosa*, STORMFURY. Resulta, pues, interesante, resumir el programa de propósitos y exponer el estado actual del Proyecto.

En este trabajo expondremos las razones que han llevado a redactar el proyecto, así como los resultados obtenidos hasta la fecha, describiremos los métodos empleados para resolver los problemas y bosquejaremos el programa de estudios propuesto para los próximos dos a cinco años.

Dos consideraciones generales justifican el *Proyecto Stormfury*: (1) recientemente se han ampliado mucho nuestros conocimientos sobre los fenómenos físicos responsables de la persistencia de los huracanes; esto ofrece ciertas vías de ataque prometedoras; y (2) en el caso de producirse alteraciones aún ligeras, la recompensa obtenida (en bienes y vidas ahorradas) puede ser extraordinaria. El primer razonamiento será desarrollado más adelante; el segundo puede ilustrarse con el siguiente esquemático análisis de *costo y beneficios*.

Los huracanes han causado a los Estados Unidos daños anuales valorados en un promedio de 13 millones de dólares en el decenio 1915-24; en el decenio 1959-68 aquella cifra ha subido a un valor medio de 295 millones de dólares anuales. Aún descontando la enorme inflación producida en el coste de los edificios en estos últimos años, en menos de cincuenta años el valor de las devastaciones anuales causadas por los huracanes ha aumentado en un 475 por 100

---

\* NOTA: El Sr. Gentry es director del *Proyecto Stormfury* en el Laboratorio Nacional para el Estudio de los Huracanes, en Miami, Florida, EE. UU.

(Gentry, 1966). Actualmente se construyen edificios costosísimos en zonas batidas por los ciclones tropicales; en consecuencia, el valor de las destrucciones debidas a los huracanes seguirá en aumento en los años próximos. Si el gobierno de los EE. UU. continúa soportando financieramente el proyecto Stormfury al coste actual durante los próximos diez años, y si hacia el fin de este plazo la alteración de un huracán violento como el *Betsy* (por ejemplo), es suficiente para reducir el valor de sus destrozos tan sólo en un 10 por 100, la nación recibiría ya un beneficio de más del 1.000 por 100 sobre sus inversiones en el Proyecto. Si esta reducción en el mismo plazo de diez años es sólo de un 1 por 100, la nación recuperaría un 100 por 100 de su inversión. El beneficio posible en vidas y sufrimientos humanos ahorrados en todo el mundo es, desde luego, incalculable.

Estudios efectuados en los últimos años sobre la estructura y dinámica de los ciclones han descubierto dos puntos fundamentales que sugieren futuros métodos de ataque: 1) Un ciclón necesita un manantial interno de energía para desarrollarse y para conservar su plena actividad; esta fuente de energía es el calor sensible y el latente transmitidos desde la superficie del mar al aire contenido en el huracán. 2) La energía térmica del huracán se transforma en cinética mediante circulaciones convectivas saturadas muy localizadas y situadas en el muro nuboso del ojo del ciclón y en las principales bandas de lluvia. El primer principio demuestra el por qué los huracanes se forman solamente sobre aguas tropicales calientes y por qué empiezan a disiparse en cuanto pasan a deslizarse sobre superficies sólidas o líquidas más frías; ninguna de éstas puede abastecer al ciclón de la enorme cantidad de energía necesaria para mantener su furia. El segundo principio explica el pequeño porcentaje de perturbaciones tropicales que se transforman en un ciclón, debido a la dificultad de organizarse las circulaciones convectivas en los puntos y del modo necesarios; si el único requisito fuese un mar caliente con su inmenso contenido de energía térmica, habría de cinco a diez veces más de ciclones de los que se forman. Durante la estación de los huracanes de 1967 y de 1968 fueron observadas con continuidad 130 ondas tropicales sobre el Atlántico y otros mares adyacentes en los que las temperaturas de la superficie líquida eran suficientes para la génesis de los huracanes; pero sólo se produjeron 13 tempestades ciclónicas (Simpson et al., 1968 y 1969). Si hay un número limitado de modos según los cuales los fenómenos a escala convectiva puedan actuar sobre los fenómenos a escala sinóptica —y recíprocamente— para aprovechar al máximo la energía térmica tomada del mar, resulta comprensible que sólo unas cuantas perturbaciones tropicales puedan desarrollarse hasta volverse huracanes.

Ambos hallazgos sugieren varias líneas experimentales para modificar en sentido favorable la evolución de los huracanes. Sobre la base del primero puede intentarse la reducción del flujo de energía térmica procedente del mar «inhibiendo» la evaporación de la superficie marina. Basándose en el segundo puede también ensayarse la destrucción de la pequeña región, muy organizada (con una extensión del 1 al 5 por 100 de toda la superficie abarcada por el ciclón), en donde la energía térmica se libera mediante movimientos convectivos, haciendo que éstos se distribuyan por todo el ciclón, debilitándose éste. A continuación se discuten las posibilidades materiales y científicas de ambos tipos de actuación *in situ*.

¿Se puede investigar teóricamente la posibilidad científica de estos experimentos, imitándolos en los modelos matemáticos teóricos desarrollados en

estos últimos años? Los investigadores de la ESSA y de un cierto número de Universidades han creado modelos numéricos para configurar el ciclo vital de un ciclón tropical (Ooyama, 1969; Rosenthal, 1968; Yamasaki, 1968, y Kuo, 1965). Todos estos modelos muestran que los huracanes son sensibles a la temperatura de la superficie del mar y al flujo vertical de calor desde el océano al aire (Ooyama, 1969), así como a la distribución vertical del desprendimiento de calor latente (Rosenthal y Koss, 1968; Yamasaki, 1968). Sin embargo, los modelos numéricos actuales son capaces de imitar solamente ciclones con simetría axial y tienen una escasa sensibilidad en sentido vertical; analizan de un modo relativamente sencillo el efecto de la influencia mutua aire-mar y el transporte de energía térmica mediante la convección cumuliforme y NO pueden predecir los efectos de una intervención artificial sobre el movimiento del ciclón. Para eliminar muchas de estas restricciones se están ideando modelos mucho más complejos y evolucionados.

En los últimos años se han hecho grandes progresos en el campo de los modelos teóricos de ciclón; sin embargo, sus creadores no consideran que los actuales reproduzcan la naturaleza con bastante precisión como para permitir valorar los resultados de los experimentos de modificación propuestos. Se han empleado dos de los modelos más evolucionados para efectuar sencillos experimentos y sus resultados sugieren que las perturbaciones del ciclón se intenten por uno u otro de los métodos mencionados más arriba: (1) o reduciendo la velocidad del transporte de calor desde la superficie del mar hacia la atmósfera; (2) o disgregando los fenómenos físicos producidos en las nubes convectivas principales, para alterar la relación entre los movimientos convectivos y los generales del ciclón (a escala sinóptica).

#### *Modificación de la velocidad de transmisión de calor desde el mar al aire*

El primer modelo numérico-dinámico que imitaba muchas de las características de un ciclón (Ooyama, 1969) indicó que la violencia del huracán era directamente proporcional a la velocidad de transmisión de calor desde el océano hasta el aire contenido en el ciclón. Ya se habían obtenido resultados análogos con cálculos empíricos anteriores (Palmén y Riehl, 1957) sobre el balance de energía y en estudios teóricos y experimentales (Miller, 1964). Todos estos resultados hacen suponer que la furia del huracán disminuiría notablemente si se pudiera rebajar significativamente el flujo de calor sensible y/o latente desde el océano a la circulación convectiva. En particular, la violencia del ciclón sería mucho menor si se pudiese evitar la evaporación.

Se han hecho estudios para limitar la evaporación de una lámina de agua en muchas regiones deficitarias de agua. Los experimentadores que lograron los mayores éxitos emplearon películas monomoleculares de alcoholes grasos; uno de los experimentos más completos y documentado fue el efectuado por Bean y Florey (1968) en el lago Hefner, en Oklahoma, en el que se logró una reducción del 58 por 100 de la evaporación con una capa monomolecular durante un período de ensayo de tres días. Sin embargo, en todos los experimentos conocidos la película inhibidora se rompía en cuanto el viento sobrepasaba una cierta velocidad crítica, por ejemplo, de unos 25 nudos o menos.

Para modificar eficazmente un ciclón la película tiene que extenderse en regiones en donde soplan vientos con velocidades muy superiores a los 30 nudos; por ello, es necesario continuar los trabajos experimentales para ver de obtener películas más resistentes para la superficie del océano y estudiar el

efecto que esta película pueda tener sobre la evaporación de las gotitas y los rociones.

El empleo de estas películas monomoleculares para inhibir la evaporación por debajo de un huracán presenta grandes problemas logísticos. Extender una película sobre una superficie de mar de área análoga a la de un ciclón normal de intensidad moderada, podría exigir más de 50 aviones de carga y productos químicos que costarían unos 500.000 dólares EE. UU.; si, como es probable, la película fuese arrastrada fuera de la región tempestuosa, deberían añadirse productos químicos, en tanto se necesite dicha capa protectora. Esto resulta de un coste y de un trabajo desproporcionados, salvo si la película resultase eficaz para aminorar apreciablemente la violencia de la

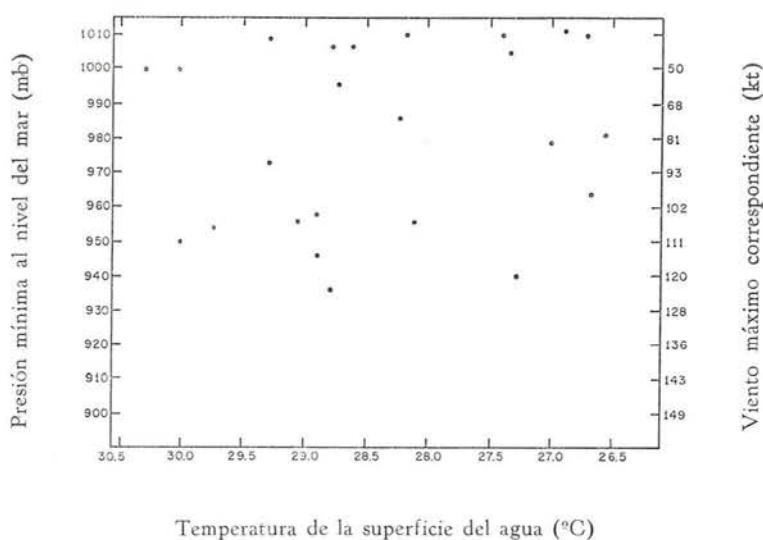


Figura 1.—Relación entre las presiones mínimas al nivel del mar en ciclones tropicales y las temperaturas de la superficie del mar. (Cada punto representa la relación para una tempestad seleccionada de las estaciones de ciclones de 1955 a 1967)

tempestad; en este caso, todo lo anterior resultaría un precio y un trabajo muy pequeños si sirviese para reducir la fuerza de un ciclón que amenazase devastar una región costera densamente poblada. El resultado obtenido con modelos teóricos indica que este procedimiento sería muy eficaz si se pudiese reducir suficientemente la evaporación; por lo tanto, se debe fomentar la investigación dedicada a reducir dicha evaporación. Además, es necesario aprender más propiedades de las películas que se hayan empleado; no sabemos, por ejemplo, hasta qué proporción conservan las películas su facultad de inhibir la evaporación, una vez que han sido fraccionadas por el fuerte oleaje. Deberán disponerse experiencias factibles para comprobar si las películas ya usadas en principio en agua dulce sirven también con agua salada, para determinar su pérdida de eficacia en función de la velocidad creciente del viento y para averiguar si presentan efectos secundarios perjudiciales.

Gran parte de este trabajo puede hacerse en el laboratorio, por lo que, teniendo en cuenta además el equipo de máquinas necesario, el coste de la operación y métodos prohibitivos que se deberían emplear, no es posible autorizar actualmente la realización de experimentos a escala real, en el mar, con el propósito de reducir la entrada de calor desde el mar en el aire de un huracán; sin embargo, debe ayudarse a la investigación de estas posibilidades.

Hay sospechas vehementes de que la intensidad de un huracán es regulada también por otros factores: la velocidad de transmisión del calor desde el océano a la atmósfera es una función de varias variables, como la velocidad del viento, las temperaturas del aire y del mar y la humedad relativa. Si la temperatura del aire y la humedad son relativamente altas, se frena la velocidad de paso de calor; claro que, entonces, el aire que penetra en el ciclón contiene ya los calores sensible y latente necesarios para alimentar un huracán violento. Cuando los vientos son fuertes la temperatura de la superficie del mar es el parámetro fundamental, relacionado con los fenómenos de transmisión y convección de calor al aire, por lo cual regulará decisivamente la intensidad del huracán. La figura 1 relaciona la violencia máxima de varios ciclones tropicales con la temperatura de la superficie del mar subyacente; se ve que con temperaturas elevadas de la superficie marina pueden desarrollarse lo mismo ciclones intensos que débiles. Esto hace suponer que en la intensidad de un huracán influyen otros parámetros además de la transmisión de calor desde el océano; lo que nos lleva a considerar la segunda línea de acción sugerida por el estudio de la estructura interna del huracán.

#### *Modificación de los fenómenos físicos de las nubes convectivas*

Las observaciones de los ciclones muestran con claridad que los fenómenos físicos esenciales para conservar el huracán como una unidad meteorológica coherente se producen en regiones muy reducidas del ciclón, que presentan una convección cumuliforme muy activa, en el muro del ojo y en las principales bandas de lluvia; pero aún en el muro nuboso del ojo del ciclón los elementos convectivos más importantes no están desparramados uniformemente sino concentrados en una pequeña parte y aún en un cuadrante. En general ocupan menos del 5 por 100 del volumen total del ciclón y, en algunos casos, menos del 1 por 100. Están localizados en las nubes del muro nuboso del ojo y en las bandas lluviosas principales, que pueden identificarse fácilmente con el radar.

Los fenómenos convectivos esenciales para el saldo energético de los movimientos del huracán producen la liberación de la energía latente que corresponde a los cambios de fase del agua (el paso del vapor de agua a la fase líquida —gotillas de la nube— y aún sólida —cristales de hielo—); estos fenómenos han sido alterados mediante la coagulación artificial, por siembra de núcleos en cúmulos tropicales aislados (Simpson et al., 1967). Es necesario aumentar nuestros conocimientos sobre los mecanismos mediante los cuales la energía liberada en estos pequeños cúmulos se aprovecha para mantener la intensa circulación de todo el huracán.

Ciertamente, los experimentos de siembra de núcleos de congelación para modificar los fenómenos convectivos naturales en los ciclones son materialmente posibles aún a escala real: el grupo *Stormfury* ha efectuado ya un pequeño

número de ensayos en 1961 y 1963 (Simpson y Malkus, 1964) y recientes perfeccionamientos en las bengalas pirotécnicas hacen aún más fácil la siembra masiva de las nubes de los ciclones; además, algunos razonamientos cualitativos verosímiles permiten creer que la alteración de los fenómenos convectivos podría dar lugar a algunos cambios en el campo de temperaturas del ciclón y, posiblemente, a toda la macroestructura del mismo.

Como los actuales modelos numéricos de huracanes reproducen muchas características del ciclo evolutivo de los huracanes con considerable preci-

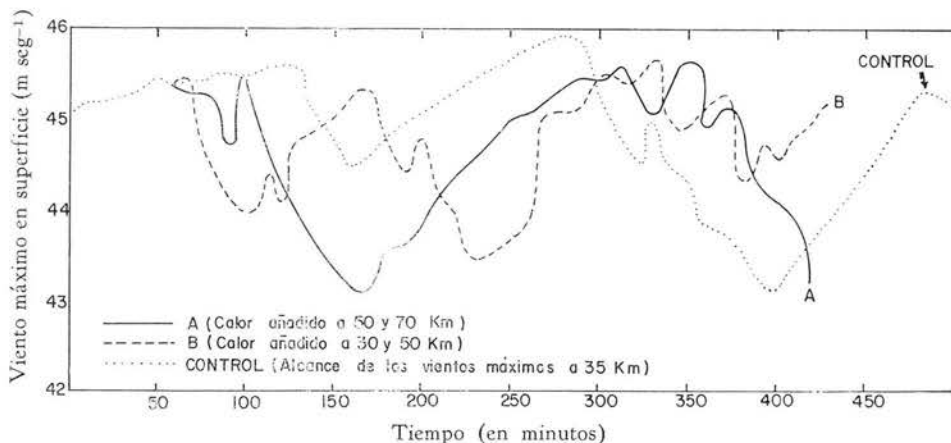


Figura 2.—Variación de los vientos máximos en superficie con el transcurso del tiempo: Siembra simulada de núcleos a la hora  $t_0 + 60 \text{ min}$ . (Representación basada en los datos leídos cada diez minutos;  $t_0 = 177,9$  horas). La línea de puntos representa la evolución del modelo sin modificar (Rosenthal, 1969); la línea de trazos da los resultados de la siembra simulada a ambos lados del círculo de vientos máximos; y la línea continua representa la evolución a consecuencia de una siembra simulada en dos zonas por fuera del círculo de vientos máximos (Las líneas de trazos y continua están en un trabajo no publicado efectuado por Stanley L. Rosenthal)

sión, podemos preguntarnos cuál sería su respuesta ante un intento de modificar un ciclón alterando sus fenómenos convectivos. Los creadores de estos modelos no creen que imiten suficientemente a la realidad como para poder dar una respuesta segura a tal pregunta; sin embargo, estamos empleando el primitivo modelo de ecuaciones integrales a siete niveles, ideado por el Dr. Rosenthal (1969) en el Laboratorio Nacional para el Estudio de los Huracanes, con el fin de obtener datos que permitan mejorar el programa de experimentos reales. En los experimentos de siembra de las nubes del muro del ojo, efectuados en 1961 y 1963 por el grupo del *Proyecto Storm-fury*, se introdujeron los núcleos de congelación a lo largo de una recta perpendicular al muro, desde el interior del círculo de vientos furiosos, a lo largo de varios kilómetros, hacia afuera. Estudios posteriores han hecho pensar que se obtendrían mejores resultados sembrando las nubes por fuera del círculo de vientos huracanados. Empleamos el modelo de Rosenthal para imitar este experimento de siembra en dos bandas circulares distintas, para lo cual aumentamos la función de calor a 500 mb y a 300 mb a un ritmo de  $4^\circ \text{C}$  por hora, durante media hora; cuando los vientos más intensos estaban a 35 kilómetros del centro, se eligieron dos bandas, a 30 y a 50 kilómetros del centro, en un caso y a 50 y a 70 kilómetros en el otro, para

la imitación de siembra en ensayos efectuados en el computador electrónico con el modelo de huracán. En el primer caso las bandas sembradas englobaban el círculo de vientos máximos, en el segundo estaban por fuera de este círculo. Los resultados de los sucesivos ensayos aparecen en la figura 2 y se puede deducir que la reducción de los vientos fue mayor en el segundo caso.

La figura 2 puede explicarse diciendo: o que la siembra de núcleos reduce temporalmente la violencia de la tormenta o que produce un cambio de fase en la variación cuasi-periódica de los vientos máximos generados por el modelo. En la extensión en que los resultados indican un cambio en la intensidad de la tempestad, este cambio es a disminuir. Las destrucciones debidas a los huracanes son tan extraordinarias que la relación entre el beneficio potencial obtenible al modificar el huracán y el costo pagado para modificarlo es muy grande, de modo que aún en las pequeñas reducciones de intensidad que se pueden suponer ante los resultados experimentales de la figura 2 serían muy valiosos, aunque es difícil considerar estos resultados como la respuesta final. Debido a que ni este modelo ni los de los otros investigadores están tan perfeccionados que se pueda hacer una imitación verídica de estos ensayos de siembra de las nubes, la experimentación directa en la naturaleza es el único procedimiento seguro de que se dispone para determinar si la alteración de los fenómenos convectivos repercutirá en un cambio cuantitativamente importante y beneficioso de la evolución del ciclón. Recientes trabajos teóricos sobre el proyecto de los modelos de huracanes refuerzan la esperanza de que en los próximos años se podrán imitar las experiencias reales con calculadores hábilmente programados; hasta ahora, por el contrario, lo mejor que se puede hacer es emplear el modelo para mejorar en lo posible el programa de experimentos de siembra real, utilizando a continuación los resultados de éstos para introducir perfeccionamientos en el programa del modelo.

Ya se han hecho algunos ensayos de siembra sobre cúmulos tropicales aislados, alterando nubes en situación de inestabilidad tropical, por J. Simpson y sus colaboradores, quienes han confeccionado un modelo numérico para predecir la evolución de los grandes cúmulos aislados en atmósfera normal o con siembra de núcleos de congelación (Simpson et al, 1967). Hemos hecho cálculos con el modelo numérico de Simpson, empleando los valores medios de los sondeos de huracanes publicados por Sheets en 1969, para determinar el efecto de la siembra sobre las dimensiones de los cúmulos; los cálculos indican que las nubes del ciclón crecerán después de la siembra de núcleos, al igual que muchos de los cúmulos tropicales sembrados. La magnitud de sobredesarrollo del cúmulo del ciclón, contaminado con núcleos parece variar con su distancia al centro del huracán, de modo que cuanto más cerca del centro, menor será el desarrollo adicional de la nube obtenido por la siembra.

#### *Anteproyecto Stormfury*

Los primeros ensayos de alteración de los huracanes (Simpson y Malkus, 1964) y otros estudios más recientes insinúan la posibilidad de alterar la evolución de los huracanes sembrando las nubes con núcleos de congelación; algunos estudios muy recientes sugieren que los resultados más favorables podrán obtenerse modificando las líneas de actuación del programa inicial: se ha propuesto sembrar de núcleos distintas partes del ciclón, o bien hacer la siembra en fases diferentes de su evolución, o si no, sembrar las bandas

lluviosas en puntos lejanos en donde el desarrollo excesivo de las nubes serviría para desviar parte de la energía liberada del centro principal.

La primera y más urgente tarea del proyecto *Stormfury* y uno de sus objetivos es recoger datos de nuevos ciclones tropicales sobre la estructura de las nubes convectivas para determinar con qué frecuencia, en qué extensión y en qué circunstancias existe en los ciclones tropicales un estado físico adecuado para que la introducción de núcleos de congelación altere perceptiblemente aquéllos; esta tarea exige que se continúen las medidas de contenido de agua líquida, distribución de tamaños de las gotas en la nube, características de las precipitaciones, composición de las fases líquidas y sólida, campo de temperaturas y movimientos verticales en el muro del ojo, en las bandas lluviosas y en las zonas de nubes sin precipitaciones que se encuentran en los ciclones recientes o en los ya declinantes.

En 1968 se lograron registrar los primeros datos sobre la distribución de tamaños de gotas y sobre la repartición del vapor condensado entre las fases líquida y sólida obtenidos por observación directa de un huracán a un nivel por encima de la isoterma de 0° C; en tres pasadas a lo largo de una banda lluviosa en el huracán *Gladys*, a temperaturas comprendidas entre 5 y 8 grados bajo cero, los datos del Repetidor Formvar mostraron la existencia solamente de gotas de agua en la mayoría de las nubes. Este es un resultado muy prometedor para las ideas de alterar los huracanes sembrando de núcleos de congelación las nubes, pero se necesitan muchas más mediciones de otros ciclones tropicales: se dispone de algunas medidas del contenido de agua líquida, pero se necesitan más datos de otras tempestades para determinar su frecuencia y en qué condiciones esta materia prima (el agua sobreenfriada) es apta para la siembra de núcleos. Los aviones de investigación de la ESSA disponen actualmente de elementos para medir muchos de los parámetros necesarios de la física de nubes y se estudian nuevos perfeccionamientos del instrumental. Finalmente, queremos reclutar un físico de nubes para que trabaje en este proyecto y nos ayude a recoger datos y a interpretarlos.

En segundo lugar, el proyecto *Stormfury* deberá determinar los efectos físicos de los diversos tipos de siembra de las nubes contenidas en los sistemas meteorológicos tropicales; esto exige el estudio de toda la variedad de los sistemas nubosos tropicales, grupos de cúmulos independientes, bandas nubosas, estructura de las nubes asociadas con las *perturbaciones* tales como las ondas de levante, las bandas lluviosas internas y exteriores y las nubes componentes del muro del ojo.

Para lograr los dos objetivos antedichos, el proyecto *Stormfury* deberá aprovechar todas las oportunidades posibles para lanzar núcleos de congelación y para observar sistemas convectivos de nubes sobre los océanos intertropicales. Las perturbaciones atmosféricas en todas las fases de su desarrollo, son blancos muy adecuados para la siembra de núcleos siempre que se hayan hecho mediciones adecuadas de la estructura de las nubes antes y después de la siembra. Las aeronaves disponibles para el proyecto *Stormfury* están equipadas para hacer estas observaciones y se trabaja constantemente en la mejora de los instrumentos, de los métodos de observación y en el adiestramiento del personal, de modo que las medidas sean de gran precisión y de mayor seguridad. La observación de las variaciones experimentadas por nubes próximas no contaminadas con núcleos presenta también un gran interés.

Tercero, el proyecto *Stormfury* deberá intensificar los estudios generales



sobre los ciclones tropicales; será necesario acelerar el desarrollo de modelos teóricos más y más completos; habrá de continuarse el estudio de la estructura y de los fenómenos de intercambio de energía en los huracanes, mediante programas bien organizados de observaciones y de análisis. Deberán descubrirse, si existen, estados de la tempestad o puntos de ella en donde la alteración de una zona nubosa —por siembra— dé lugar a la debilitación del huracán o a un cambio de trayectoria.

Una dificultad importante en la interpretación de los resultados de los ensayos de alteración de los ciclones es la carencia de medios de comprobación adecuados; esta dificultad se acentúa a causa de la gran variabilidad natural de los huracanes y de las pocas oportunidades que tenemos de experimentar con ciclones viejos. Si los cambios producidos en un huracán por un experimento de siembra de núcleos fueran de la magnitud mostrada en la figura 2, los aviones del proyecto podrían medirlos, pero aún quedaría pendiente la cuestión de si fueron debidos a la acción de los núcleos de congelación añadidos.

En los vuelos de estudio de estos últimos años hemos desarrollado métodos de medida y modos de agrupación de los datos, que ayudan a filtrar las variaciones naturales debidas a los elementos componentes del huracán, haciendo más fácil la identificación de la tendencia de variación de la intensidad del ciclón sobre períodos breves de tiempo. Los aviones del proyecto van ahora provistos de instrumentos aptos para medir variaciones en la estructura y tamaño de las nubes; para registrar variaciones en la presión, temperatura y viento de las nubes afectadas y en sus cercanías; y para registrar cambios de fase del agua y las cantidades de agua líquida total, continuándose en la actualidad los trabajos para perfeccionar estas últimas medidas y efectuar registros de las componentes verticales del viento. Si se proyectan planes de vuelo para efectuar mediciones antes y después de la siembra, se espera poder determinar si los cambios de estado físico de las nubes afectadas se producen en el orden adecuado y con los lapsos aproximados de tiempo necesarios en el caso de que se deban a la siembra de núcleos. Finalmente, pueden hacerse observaciones, a escalas sinóptica y convectiva, del huracán, para determinar si estos cambios están de acuerdo con las previsiones de los diversos modelos teóricos.

El programa de actividades de campo previstas para las estaciones de los huracanes de los años 1969 y siguientes, está basado no sólo en las consideraciones anteriores sino también en los recursos disponibles. Los planes prevén: (1), siembra de las nubes alrededor del ojo del huracán, cinco veces en un período de ocho horas; (2), siembra de las bandas lluviosas; (3), siembra de las líneas de nubes tropicales no asociadas a ciclones ni otras tempestades tropicales; (4), nuevos esfuerzos para recoger datos de los tipos discutidos anteriormente; (5), estudios de laboratorio sobre la posibilidad de extender películas antievaporación sobre la superficie del mar; y (6), identificar el estudio de los modelos numéricos teóricos de imitación de huracanes para predecir su evolución.

La siembra de núcleos en los ciclones se restringirá a las tempestades ecuatoriales que se prevé continuarán evolucionando sobre el mar al menos durante veinticuatro horas después de la siembra; esto simplificará la recogida de datos y la valoración de los resultados y dará tiempo a cualquier huracán para volver a su estado natural antes de alcanzar cualquier zona costera habitada.

Se espera tener la oportunidad de repetir cada uno de los experimentos de siembra más de una vez. Los objetivos del primer tipo son los de determinar: (1), si los cúmulos de las regiones principales del huracán reaccionarán a la siembra de la manera predecible, como lo hacen los cúmulos aislados; (2), si la reacción de la estructura general del ciclón es apreciable y si sigue las líneas de perturbación predichas por los razonamientos cualitativos y por los ensayos teóricos simples efectuados en el computador electrónico con modelos numéricos; (3), si las respuestas a siembras independientes son periódicas, y (4), si las respuestas a siembras repetidas están en fase con ellas y son acumulativas. Para facilitar la valoración de los resultados experimentales se harán muchas medidas del estado en las nubes sembradas para determinar si los cambios de fase del agua, de la temperatura, de la presión y del viento se producen en el orden adecuado para haber sido causados por la siembra de núcleos.

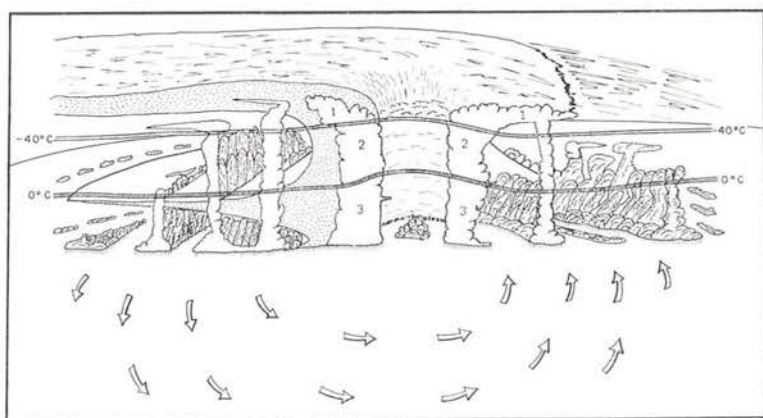


Figura 3.—Corte transversal esquemático de un ciclón mostrando la situación de las nubes del muro del ojo y de las bandas lluviosas. Las bengalas que producen los núcleos de congelación se sueltan en las nubes al nivel de  $-15^{\circ}$  a  $-30^{\circ}$  C y van bajando mientras arden, repartiendo los núcleos contaminantes hasta el nivel de  $0^{\circ}$  a  $-4^{\circ}$  C (1 = hielo; 2 = hielo + agua; 3 = agua)

Los propósitos de los experimentos segundo y tercero son: (1), determinar en qué condiciones la evolución de los sistemas nubosos convectivos (cúmulos) puede ser alterada por el hombre; (2), averiguar si la reacción de los enjambres de cúmulos a la contaminación con núcleos es análoga a la producida en los cúmulos aislados; (3), establecer en qué extensión los modelos numéricos de cúmulos individuales pueden ser usados para predecir la reacción de una familia de nubes convectivas a la siembra; y (4), estudiar el efecto que las perturbaciones de las nubes afectadas por la siembra tienen sobre las nubes vecinas de la misma línea nubosa y sobre nubes situadas en zonas nubosas contiguas. Cuando sea posible se observarán simultáneamente elementos testigos y elementos sembrados análogos (nubes, zonas de nubes o bandas de lluvia) y se emplearán los métodos estadísticos para valorar los resultados, cuando sea conveniente y posible.

Debe subrayarse, sin embargo, que el proyecto *Stormfury* no es un experimento de laboratorio, capaz de ser sometido a una valoración estadística

total. La escasa frecuencia de aparición de huracanes útiles para la experimentación bloquea toda posibilidad de obtener una gran cantidad de datos experimentales en un breve lapso de tiempo, que permitieran la aplicación de las técnicas estadísticas para comprobar todas las hipótesis previas. El proyecto está aún en la fase exploratoria y tiene como finalidad la de obtener un mejor conocimiento físico de la dinámica de los ciclones tropicales, así como hacer eventuales ensayos de modificación de alguna tempestad. Los beneficios teóricamente posibles que pueden obtenerse de la alteración artificial de los ciclones tropicales son tan grandes en relación con los costos experimentales, que la continuación de los trabajos en aquel sentido es un anhelo científico perfectamente justificable que podría dar resultados de gran valor para la Humanidad.

### Agradecimientos

Antes de terminar queremos agradecer a los miembros del Consejo Asesor del Proyecto *Stormfury* la cuidadosa revisión y aprobación concedidas a este informe: El Dr. Noel E. La Seur (presidente), y los Dres. Eduardo N. Lorenz, Santiago E. McDonald, Daniel F. Rex y Jerónimo Spar. También propusieron muchas ideas sobre el contenido y la presentación.

Finalmente, el Dr. Stanley L. Rosenthal, Enrique F. Hawkins, Guillermo D. Mallinger y Maximino Edelstein colaboraron notablemente en la preparación del escrito, y Juan Tracy recogió los datos necesarios para realizar la figura 1.

### BIBLIOGRAFÍA

- BEAN, B. R. y FLOREY, O. L. (1968): *A field study of the effectiveness of fatty alcohol mixtures as evaporation reducing monomolecular films*. «Water Resources Research», 4, 206-208.
- GENTRY, R. Cecil (1966): *Nature and scope of hurricane damage*. Simposio sobre huracanes, 10-11, octubre 1966, «American Society for Oceanography», Houston, Texas, 229-254.
- GENTRY, R. C. y ELDESTEN, M. W. (1968): *Project STORMFURY, a hurricane modification experiment*. Actas de la primera Conferencia Nacional sobre modificación del tiempo, «Am. Meteor. Soc.», 296-305.
- KUO, H. L. (1965): *On the formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection*. «J. Atmos. Sci.», 22, 40-63.
- MILLER, B. I. (1964): *A study of the filling of Hurricane Donna (1960) over land*. «Mon. Wea. Rev.», 92, 389-406.
- OYAMA, K. (1969): *Numerical simulation of the life cycle of tropical cyclones* «J. Atmos. Sci.», 26, 3-40.
- PALMÉN, E. y RIEL, Herbert (1957): *Budget of angular momentum and energy in tropical cyclones*. «J. of Meteor.», 14, 150-159.
- ROSENTHAL, Stanley L. (1968): *Preliminary results from numerical experiments with a primitive equation model designed to simulate the development of tropical cyclones*. Actas de OMM/UGGI. Conferencia sobre predicción numérica del tiempo, 26 noviembre a 4 diciembre de 1968. Pendiente de publicación por Servicio Meteorológico japonés, Tokio.
- ROSENTHAL, Stanley L. (1969): *Numerical experiments with a multilevel primitive equation model designed to simulate the development of tropical cyclones. Experiment 1*.

«ESSA Technical Memorandum ERLTM-NHRL», 82. Environmental Science Services Administration, 36 págs.

ROSENTHAL, S. L. y KOSS, W. J. (1968): *Linear analysis of a tropical cyclone model with increased vertical resolution*. Pendiente de publicación en «Mon. Wea Rev.».

SHEETS, R. C. (1969): *Some mean hurricane soundings*. «J. Appl. Meteor.», 8, 134-146.

SIMPSON, J., BRIER, G. W., y SIMPSON, R. H. (1967): *STORMFURY cumulus seeding experiment 1965: Statistical analysis and main results*. «J. Atmos. Sci.», 24, 508-521.

SIMPSON, R. H. y MALKUS, J. S. (1964): *Experiments in hurricane modification*. «Sci. Am.», 211, 27-37.

SIMPSON, R. H.; NEIL Frank, SHIDLER, David, y JOHNSON, H. M. (1968): *Atlantic tropical disturbances, 1967*. «Mon. Wea Rev.», 96, 251-9.

SIMPSON, R. H.; NEIL, Frank, SHIDLER, David y JOHNSON, H. M. (1969): *Atlantic tropical disturbances, 1968*. «Mon Wea Rev.», 97, 240-255.

YAMASAKI, M. (1968): *A tropical cyclone model with parameterized vertical partition of released latent heat*. «J. Meteor. Soc. Japan», 46, 202-214.

## LA METEOROLOGIA Y LA CONTAMINACION ATMOSFERICA DE LAS CIUDADES

Por Robert A. McCORMICK\*

### Consideraciones sanitarias

Las consecuencias de exceso de suciedad del aire son muy amplias y complicadas, pudiendo influir en la economía de las civilizaciones hasta interferir en los fenómenos físicos de la atmósfera y el clima. Sin embargo, es su efecto sobre la salud de los seres humanos el motor de la mayor parte de los intentos actuales para reducir los problemas de la contaminación. Los deletéreos efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud de los seres humanos dependen de su constitución química y de la concentración alcanzada en el aire. Al analizar los diversos tipos de agentes contaminadores se pueden agrupar en varias categorías importantes: cuerpos granulados, como partículas carbonosas, alquitranes, vapores ácidos, aceites, polvos metálicos y minerales, restos orgánicos, etc.; cuerpos de efecto irritante, como algunos gases y vapores y también algunos sólidos muy finamente divididos; oxidantes; y los venenos orgánicos, como la nicotina, el monóxido de carbono, los insecticidas agrícolas, cianuros y el ácido sulfhídrico. Naturalmente, esta clasificación ni es exclusiva ni pretende abarcar todos los agentes contaminantes del aire; tampoco permite adscribir determinados efectos patógenos a un solo agente aislado. De hecho no existen pruebas de que un solo contaminante sea responsable de alguna enfermedad humana producida por la suciedad de la atmósfera; por el contrario, es casi cierto que los efectos perjudiciales de la contaminación atmosférica son debidos a mezclas de impurezas de diversos tipos.

(\*) NOTA: El Sr. McCormick ha sido cedido por la Administración del Servicio de Ciencias Naturales (ESSA) a la Sección de Meteorología de la Administración Nacional para el estudio de la contaminación del aire.