

colmo para revisar los proyectos existentes y representantes de una docena de países presentaron sus planes preliminares de investigación asociados con el FGGE.

Sin embargo, los conjuntos de datos del FGGE permitirán, igualmente, emprender estudios sobre los fundamentos físicos del clima, que es el segundo objetivo del GARP, y empezar los trabajos que se realizarán durante el próximo decenio en el marco del Programa Mundial sobre el Clima.

Los progresos que suscitará el FGGE repercutirán sobre el concepto y la efectividad de la VMM así como sobre su impacto en las economías nacionales. En particular, estos progresos deberán contribuir en gran medida a resolver los problemas sociales asociados con la producción de alimentos, los recursos hídricos y la calidad del medio ambiente. Por tanto, es nuestro deber extraer los máximos beneficios de este gran experimento cargado de promesas. No podemos sino desear a esta empresa un éxito completo.

PROYECTO STORMFURY: ESTADO ACTUAL, PLANES FUTUROS

Por Robert C. SHEETS y Noel E. LASEUR*

El proyecto STORMFURY es un programa científico realizado por la NOAA, creado para investigar la estructura y dinámica de los ciclones tropicales y las posibilidades de su modificación. Un artículo anterior sobre STORMFURY, contribución del Dr. R. Cecil Gentry, apareció en el *Boletín de la OMM*, Vol. XVIII, N.º. 3 (julio 1969). El programa consiste en una gama de actividades que incluyen: desarrollo de modelos matemáticos [Rosenthal y Moss (1971), Jones (1976)]; investigaciones teóricas y sobre diagnóstico y cálculos [Hawkins y Rubsom (1968)]; investigaciones experimentales de la estructura, variabilidad y dinámica de los huracanes [Sheets (1973)] y, por supuesto, las propias experiencias actuales sobre modificación de huracanes [Gentry (1970), Sheets (1973) y (1975)].

La hipótesis STORMFURY

Los experimentos STORMFURY están concebidos para producir una reducción en la velocidad máxima del viento mediante una alteración en la localización de la energía liberada cerca del centro del huracán. Un ciclón tropical extrae la mayor parte de su energía del calor latente liberado durante la subversión convectiva de la atmósfera. En los niveles bajos, el aire caliente y húmedo asciende en especial desde el mar tropical hacia el centro del huracán transportando grandes cantidades de calor latente y sensible. Entre tanto, el aire que fluye hacia el huracán, absorbe algo de energía adicional desde el océano. Girando ya, lentamente, con la rotación de la tierra, antes de empezar su espiral hacia dentro, el aire gana velocidad tangencial por la conservación parcial de su momento cinético absoluto a medida que se

* El Dr. Sheets es Scientific Director of the STORMFURY project en el National Hurricane and Experimental Meteorology Laboratory, Coral Gables, Florida, EE. UU. El Dr. Laseur pertenece al Department of Meteorology de la Florida State University, Tallahassee, EE. UU.

acerca al centro del huracán y produce vientos de destructora violencia antes de ascender y, después se aleja del núcleo del huracán en los niveles altos (ver el recuadro superior de la Figura 1). El movimiento ascendente

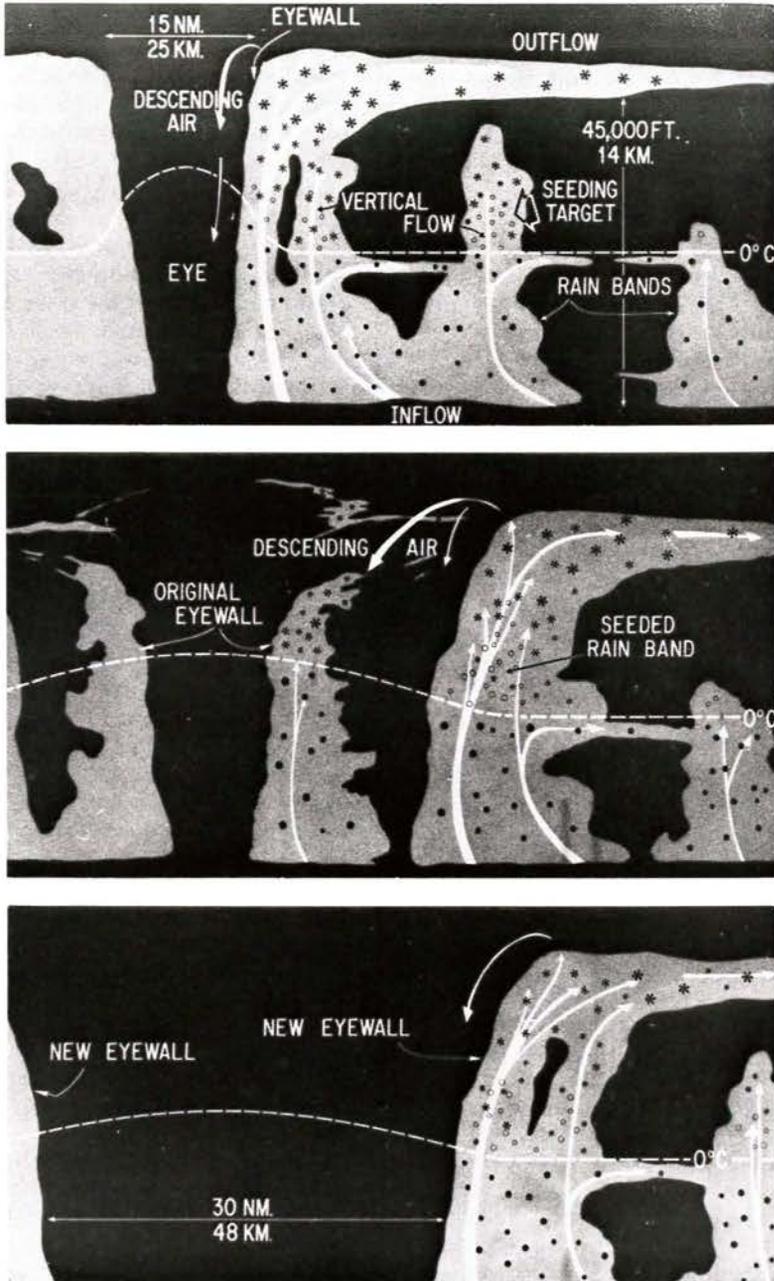


Figura 1 — Sección vertical transversal de un huracán que ilustra esquemáticamente su estructura antes (arriba), durante (en el centro) y después (abajo) de la operación de siembra

tiene lugar, en su mayor parte, en la pared del ojo, que es una banda de nubes que circunda el ojo que está relativamente en calma, y en las nubes de la banda de lluvias que lo rodea. El calor latente contenido en el aire que entra se libera en estas nubes y suministra la mayor parte de la energía que activa el huracán.

La pequeña magnitud de este ascenso convectivo del aire, desde el nivel de entrada hasta la capa del flujo troposférico superior de salida, no se tiene en cuenta generalmente cuando se compara con el área total del huracán. Simples consideraciones geométricas, unidas a la continuidad de masa, conducen a resultados que muestran que sólo una parte de una pared del ojo anular puede contener corrientes convectivas ascendentes comprendidas entre 10 y 20 m s^{-1} como se ha podido medir en varios huracanes. Además, si consideramos la relación entre la zona convectiva de la pared del ojo y el área total del huracán, obtenemos, normalmente, valores de menos del 1 por 100. Esto tiene importantes consecuencias para los experimentos propuestos para el STORMFURY. En primer lugar, sólo se necesita modificar una pequeña zona para producir un resultado significativo, por tanto, el experimento es logísticamente factible. En segundo lugar, existen buenas razones para creer que el ascenso convectivo puede ser modificado en localización e intensidad mediante la siembra dinámica, cuya efectividad ha quedado ya demostrada en las regiones tropicales [Simpson, Brier y Simpson (1967)].

Las observaciones en huracanes, con una pared de ojo bien formada, indican que muchas de las zonas localizadas exteriormente a la pared del ojo (es decir, más alejadas del centro del huracán) contienen nubes que no alcanzan el nivel del flujo saliente. Otras observaciones muestran que muchas de esas nubes contienen grandes cantidades de agua sobre-enfriada. Cálculos numéricos basados en el empuje hidrostático muestran que se puede hacer crecer estas nubes a través de un proceso dinámico de siembra (Sheets, 1969). La inyección de partículas de ioduro de plata en la parte superior provoca la congelación de las gotitas, liberando el calor latente de fusión. Este calor adicional calienta esa parte de la nube que, por tanto, se vuelve más ligera que el aire circundante, produciéndose así un incremento en el flujo ascendente. A medida que el aire asciende, expande y se enfría, el vapor de agua se condensa o sublima, liberando mucho más calor latente. El resultado es que la nube sembrada crece hasta el nivel de salida, proporcionando un nuevo conducto convectivo que intercepta el aire de entrada en el nivel inferior. Este proceso aparece dibujado esquemáticamente en la *Figura 1* que nos muestra un corte de parte del huracán en los tres estados que se supone se producirían antes, durante y después del proceso de siembra (el cambio en el diámetro del ojo se ha exagerado para mayor claridad). El resultado es que forma una nueva pared del ojo a mayor distancia del centro del huracán.

La magnitud en que sería posible reducir la velocidad máxima del viento se indica en la siguiente Tabla, donde R_e y R son, respectivamente, los radios *inicial* y *alterado* correspondientes al máximo de la velocidad del viento y x es el exponente que aparece en la ecuación $V\theta R^x = \text{constante}$, donde $V\theta$ es la velocidad tangencial del viento a la distancia R del centro del vórtice. Existen pruebas, tanto de observación como teóricas, que apoyan la fórmula utilizada en la deducción de esta Tabla. Si no hubiera pérdida de momento cinético en el océano mientras el aire entra en el huracán, la variación

R/Re	Exponente X					
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1.2	9	10	12	14	15	17
1.4	15	18	21	24	26	29
1.6	21	25	28	31	35	37
1.8	25	30	34	38	41	44
2.0	29	34	38	43	46	50

Porcentaje potencial de reducción del viento máximo para $R > Re$
si $V \propto R^x = \text{constante}$

del viento con el radio, al alejarse del máximo en la pared del ojo, sería, muy aproximadamente, inversamente proporcional al radio. Sin embargo, como hay pérdida de momento cinético por rozamiento con el mar, la variación es aproximadamente inversamente proporcional a R^x donde x varía entre 0,4 y 0,8, dependiendo de la proporción de la pérdida de momento cinético por rozamiento. Recientes exploraciones sobre el huracán *Anita* sugieren una mejor concordancia de $x = 0,6$ para radios de hasta 50 km, y de $x = 0,5$ para radios mayores. En cualquier caso, si el aire de entrada pudiera ser inducido a elevarse en corrientes convectivas ascendentes con radios que fueran un 40 a un 80 por ciento mayores que el preexistente de la pared del ojo, ello supondría una reducción entre un 15 o un 40 o más por 100 en los vientos máximos. Tales reducciones fueron observadas en el huracán *Debbie* (1969), el único huracán que fue «sembrado» casi en la misma forma que la propuesta para futuros experimentos. Incluso, aunque no es razonable atribuir toda la reducción de la velocidad observada a la siembra, los análisis indican que una proporción significativa puede ser el resultado de ésta. Por tanto, la hipótesis STORMFURY requiere un huracán con un mecanismo de la pared del ojo claramente definido, tal como aparece representada en la *Figura 1*. En la zona externa a la pared del ojo tiene que haber nubes extendiéndose por encima del nivel de congelación, pero sin alcanzar el nivel de salida. Estas nubes deben ser de una naturaleza convectiva tal que se las pueda hacer crecer por siembra.

Resultados de anteriores experimentos de siembra

El primer huracán sembrado en este programa fue el *Esther* en 1961. Las nubes próximas a la pared del ojo se sembraron los días 16 y 17 de septiembre con cantidades relativamente pequeñas de yoduro de plata. El primer día, después de la siembra, se registró una reducción evidente del 10 por 100 en la velocidad máxima del viento, sin embargo, el segundo día, se observó poco cambio, cuando se lanzó en una zona sin nubes. Los días 23 y 24 de agosto de 1963 se realizaron experimentos de siembra con resultados similares en el huracán *Beulah*. El segundo día se apreció una reducción evidente en la velocidad máxima del viento, del 10 al 14 por 100, mientras que el primer día apenas se observó cambio. Análisis posteriores al experimento mostraron que la siembra del día 23 de agosto se realizó en una zona relativamente poco nubosa. Estos errores en la distribución del agente de siembra se debieron principalmente a las imperfecciones de los sistemas de radar.

El conjunto de los experimentos que, con mucho, parecen haber tenido más éxito fueron los de la siembra del huracán *Debbie*, los días 18 y 20 de agosto de 1969. El 18 de agosto, antes de comenzar la siembra, las velocidades del viento eran de unos 50 m s^{-1} (100 nudos). Después, el huracán se sembró un total de cinco veces, a intervalos de dos horas, en las 8 horas siguientes. Al final del período de control, 4 a 6 horas después de terminada la siembra, los vientos máximos registrados eran de unos 25 m s^{-1} (70 nudos), lo que supone una reducción del 30 por 100.

El 19 de agosto no se sembró el huracán *Debbie* y recobró su intensidad. El 20 de agosto, a primera hora de la mañana, la velocidad máxima del viento era otra vez próxima a los 50 m s^{-1} (100 nudos). Una vez más el huracán se sembró un total de cinco veces, con un intervalo aproximado de dos horas entre cada siembra. Después de dicha siembra se observó una reducción en la velocidad máxima del viento, registrándose al término del período de control vientos máximos de 42 m s^{-1} (85 nudos), lo que supone una reducción del 15 por 100.

La exploración del huracán Anita

Todos los científicos relacionados con el proyecto STORMFURY habían manifestado hacía tiempo la necesidad de unas medidas cuantitativas más directas y demás información sobre la microfísica de las nubes, así



Figura 2 — Reflectividades del radar PPI de 5 cm analizadas con ordenador, del huracán *Anita*, a las 0627 TMG, el 2 de septiembre de 1977

como de la distribución espacial y cronológica de las nubes en los huracanes que se sembraran en el futuro. Estas necesidades y las recomendaciones resultantes, junto con el gran beneficio potencial que supondría una tecnología segura para reducir la fuerza destructora de los huracanes,

llevó a una asignación de 30 millones de dólares de los EE. UU., para adquirir los aviones y los instrumentos más modernos para este programa. Este proceso comenzó en 1973 y dio frutos finalmente en 1977 con los vuelos de reconocimiento en el huracán *Anita*, que supusieron la primera utilización importante de los nuevos aviones y sistemas instrumentales actualmente disponibles en el Research Facilities Center de la NOAA. Entre 1973 y 1977 se habían interrumpido los experimentos con huracanes.

La mejora instrumental más importante y la nueva capacidad investigadora de que se dispone con el avión P-3 son los sistemas de radar numérico de indicador de posición en un plano (PPI) e indicador de distancia-altitud (RHI). Ahora es posible determinar y documentar la distribución espacial y cronológica de las nubes tan necesaria para una evaluación precisa de los experimentos de siembra y para el estudio de la escala de las interacciones dentro del huracán. La importancia de estas observaciones, unido a la capacidad de observaciones dinámicas y termodinámicas de que dispone este avión de investigación, es muy grande, no sólo para el programa de modificación, sino también para una mejor comprensión básica y predicción de la formación, el movimiento, la intensidad y la escala de las interacciones de los huracanes.

El nuevo equipo se utilizó por primera vez en vuelos a través del huracán *Anita* en septiembre de 1977. Las Figuras 2 y 3 nos muestran, respectivamente, los análisis numéricos de las reflectividades por radar PPI y RHI. En ellas aparece dibujado un marcado mecanismo de pared del ojo en el

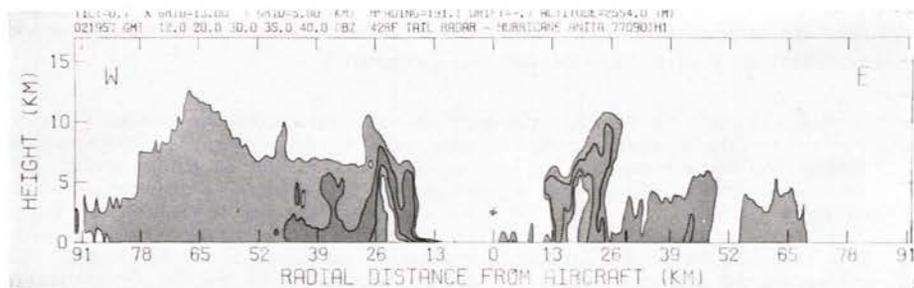


Figura 3 — Descripción de la pared del ojo y de la nubosidad que le rodea, en el huracán *Anita*, obtenida por análisis con ordenador de los datos del radar RHI de 3 cm.

lado Este del huracán y también muestran claramente la naturaleza convectiva de los sistemas nubosos y la presencia de un espectro completo de nubes, varias de las cuales reúnen las características espaciales y dimensionales requeridas por la hipótesis STORMFURY. Hay pocas o ninguna «banda brillante» (alta reflectividad del radar debida a hielo húmedo, lo que sugiere zonas de convección menos vigorosa). La velocidad máxima del viento era de cerca de 80 m s^{-1} y la presión mínima en la superficie del mar en ese momento era de 927 mb.

Planes futuros

Actualmente está reunida toda la flota de aviones y casi toda la instrumentación necesaria para realizar experimentos de siembra STORMFURY.

Está formada por dos aviones P-3 y un avión C-130 dependientes de la NOAA, otro avión C-130 adicional utilizado para controlar la estructura de los niveles bajos del huracán y un avión CV-990 de la NASA utilizado para sembrar y controlar las zonas superiores del huracán, Aunque actualmente hay sólo cinco aviones, en comparación con los 16 utilizados en los experimentos realizados con el huracán *Debbie*, el aumento de la capacidad operativa e instrumental permite experimentos científicos más completos y definitivos.

La reanudación completa del programa de siembra está prevista para 1979 con la intención de sembrar tantos huracanes como sea posible. La duración de los experimentos necesarios para probar la hipótesis depende del número de huracanes adecuados que se presenten en la región en que se realicen los experimentos (que todavía no se ha fijado). Aproximadamente, se necesitarían 10 casos de siembra. Si los experimentos se realizaran exclusivamente en el Atlántico serían precisos varios años, pero combinando varias zonas tales como el Atlántico, la zona oriental del Pacífico Norte y la zona occidental del Pacífico Norte o Australia, se podría obtener el número necesario de casos en sólo 2 ó 3 años.

Resumen

El programa STORMFURY, que se ha esbozado anteriormente, fue revisado recientemente por una comisión patrocinada por la U. S. National Academy of Sciences. Creemos que los siguientes párrafos extraídos del informe de esta comisión de expertos ajenos al proyecto, resume mejor la importancia y el estado actual del programa:

“La Comisión ha llegado unánimemente a la conclusión de que el Proyecto STORMFURY ahora puede producir más información sobre las características físicas y el comportamiento de los huracanes que la que ha habido nunca. Los aviones equipados con los instrumentos de que actualmente se dispone son superiores a cualquier otro que haya volado nunca en los huracanes. El grupo STORMFURY ha desarrollado un plan y un programa excelentes para el análisis y la modificación de los huracanes y para la evaluación de los resultados... La evaluación del Proyecto STORMFURY debería basarse en los nuevos conocimientos adquiridos en vuelos posteriores. La nueva información sobre las características y la dinámica interna de los huracanes conducirá a mejorar la predicción de la formación, el desarrollo y el movimiento de los huracanes”.

Los ciclones tropicales ocasionan gran número de víctimas, por ejemplo, 20.000 en la India en 1977, 10.000 en Honduras en 1974 y por lo menos, 250.000 en Bangla Desh en 1970. Lo más frecuente es que los daños totales producidos por un huracán asciendan a 1.000 millones de dólares de los EE. UU. Las pérdidas indirectas pueden ser mucho mayores, por ejemplo en pérdidas de productividad.

La fuerza ejercida por el viento es proporcional al cuadrado de la velocidad; si se pudiese reducir la velocidad máxima del viento en un 15 por 100, como parece posible, la fuerza destructora se reducirá aproximadamente en un 30 por 100. El ahorro resultante en dólares para un huracán de tipo medio sobre los EE. UU. sería aproximadamente de 100 millones de dólares de los EE. UU.; ahorros similares podrían obtenerse en otras zonas del mundo. El ahorro potencial de vidas es imposible de estimar

debido a varios factores. Sin embargo, como señala la Comisión de la Academia de Ciencias, este programa conduciría a mejorar la predicción de los ciclones tropicales, lo que daría como resultado mejores avisos que contribuirían substancialmente en este aspecto.

Se han completado muchos estudios básicos, entre los que se incluyen cálculos teóricos, simulaciones de siembra en modelos teóricos de huracanes, estudios de sensibilidad y otros. Estos estudios han mostrado que no se producen cambios apreciables en la precipitación total o en el movimiento del huracán. La precipitación sufre una ligera redistribución cerca del centro del huracán, pero la precipitación total permanece prácticamente constante e incluso la precipitación acumulada en cualquier punto dado de la superficie no presentaría cambios apreciables entre un huracán sembrado y otro no sembrado. También se sabe, basándose en experimentos anteriores y en otros estudios, que cualquier efecto de la siembra desaparece en un plazo de 6 a 18 horas después de efectuada dicha siembra. Estos factores, junto con la precaución de que ningún huracán será sembrado experimentalmente, a menos que exista una probabilidad inferior al 10 por 100 de estar en un radio de 92 km (50 millas náuticas) de tierra habitada en las 24 horas siguientes al comienzo de la siembra, muestran que es altamente improbable que se produzcan daños como resultado de estos experimentos. Por el contrario, el beneficio potencial en relación con el costo es tan grande que lo único que parece razonable es completar esta investigación tan pronto como sea posible.

Limitaciones de espacio han hecho necesario reducir considerablemente el manuscrito original remitido sobre STORMFURY. Los autores tendrán mucho gusto en suministrar cualquier información suplementaria que se les pida.

REFERENCIAS

- GENTRY, R. C. (1970). Hurricane Debbie modification experiments, August 1969. *Science*, 168, pp. 473-475.
- HAWKINS, H. F. and D. T. RUBSON (1968). Hurricane Hilda, 1964: II-Structure and budgets the hurricane on 1 October, 1964. *Mon. Wea. Rev.* 96, pp. 617-636.
- JONES, R. W. (1976). *Integration of a tropical cyclone model on a nested grid*. NOAA Tech. Memo ERL WMPO-30, 37 pp.
- ROSENTHAL, S. L. and M. S. MOSS (1971). *Numerical experiments of relevance to Project STORMFURY*. NOAA Tech. Memo. ERLTM-NHRL 95, 52 pp.
- SHEETS, R. C. (1969). Computations of the seedability of clouds in a hurricane environment. *Project STORMFURY Annual Report for 1968*.
- SHEETS, R. C. (1973). *Analysis of STORMFURY data using the variational optimization approach*. NOAA Tech. Memo ERL 264-WMPO 1. 92 pp.
- SHEETS, R. C. (1975). Project STORMFURY; Hurricanes - can their destructive force be reduced? *Mar. Wea Long.* 19, pp. 269-276.
- SIMPSON, J. G. W. BRIER and R. H. SIMPSON (1967). STORMFURY cumulus seeding experiment 1965: Statistical analysis and main results. *J. Atmos. Sci.*, 24, pp. 508-521.

Las fotografías que acompañan a este artículo han sido reproducidas con autorización de la National Oceanic and Atmospheric Administration de los EE. UU.