

III CONFERENCIA TÉCNICA SOBRE HURACANES Y METEOROLOGÍA TROPICAL TECHNICAL CONFERENCE ON HURRICANES AND TROPICAL METEOROLOGY

México, D. F., Jun. 6-12, 1963

2A. SESIÓN

2ND. SESSION

ESTRUCTURA DE LOS HURACANES STRUCTURE OF HURRICANES

CONTENIDO DE AGUA LÍQUIDA EN HURACANES *

BERNICE ACKERMAN * *

INTRODUCCION

Por varios años, el Laboratorio de Física de Nubes de la Universidad de Chicago, bajo contrato con el U. S. Weather Bureau, se ha dedicado a las fases de física de nubes del programa que desarrolla el Proyecto Nacional de Investigación de Huracanes. En este trabajo se consideran algunas mediciones del contenido de agua líquida logradas en vuelos de aviones B-50 PNIH, durante 1957 y 1958, dentro de huracanes y tormentas tropicales.

Las mediciones se llevaron a cabo usando un aparato de contención de agua líquida con cinta de papel y fueron continuamente registradas en un oscilógrafo Heiland con velocidad de cinta de 1-cm seg^{-1} (equivalente a 115-120 m de distancia de vuelo). Con apoyo en experiencias previas, pudieron distinguirse las medidas características de nubes convectivas y de nubes en capas. En las últimas el contenido de agua era en general de pocos décimos de gramo por metro cúbico o menos (mucho más bajo que en nubes convectivas) y bastante constante en magnitud. En elementos convectivos el contenido de agua era muy variable a lo largo de la línea de vuelo, distribuido en células de unos cuantos cientos a varios miles de pies de longitud sobre los cuales se superponían variaciones a menor escala. La magnitud del nivel medio del agua y el carácter de la variabilidad eran muy similares a las encontradas en anteriores estudios de nubes convectivas individuales en tiempo quieto.

Aunque los detalles de las distribuciones de nubes pueden variar de huracán a huracán y ciertamente durante la vida de un sola tormenta, en general los elementos convectivos tienden a disponerse en bandas bien espaciadas o líneas en varios grados de organización. Estas bandas generalmente están incluidas en puentes de nubes muy anchos, aunque separados, que ocurren a diversos niveles. Los volúmenes de agua reflejan esa distribución de nubes; secciones de medi-

* El trabajo que se relata ha sido patrocinado por el U. S. Weather Bureau y la National Science Foundation.

* * Universidad de Chicago.

LIQUID WATER CONTENTS IN HURRICANES *

BERNICE ACKERMAN * *

INTRODUCTION

For several years the Cloud Physics Laboratory of the University of Chicago, under contract to the U. S. Weather Bureau, addressed itself to the cloud physics phases of the program being carried out by the National Hurricane Research Project. This paper describes some of the measurements of liquid-water content obtained on flights made into hurricanes and tropical storms by the NHRP B-50 airplanes during 1957 and 1958.

The measurements were obtained using a paper-tape liquid-water content meter and were continuously recorded on a Heiland oscillograph recorder with paper speed of 1-cm sec^{-1} (equivalent to 115-120 m of traverse distance). By drawing on previous experience it was possible to distinguish between the measurements characteristic of convective clouds and those characteristic of layer clouds. In the latter the water contents were generally a few tenths of a gram per cubic meter or less (much lower than in convective clouds) and fairly constant in magnitude. In convective elements the water contents were highly variable along the line of flight, occurring in cells of a few hundred to a few thousand feet in length upon which were superimposed smaller-scale variations. The magnitude of the mean level of the water and the character of the variability were very similar to that found in earlier studies of individual convective clouds of undisturbed weather.

Although the details of the cloud distributions may vary from hurricane to hurricane, and indeed during the life of a single storm, generally the convective elements tend to be arrayed in well-spaced bands or lines having varying degrees of organization. These bands are usually embedded in widespread, though broken, cloud decks occurring at several levels. The water measurements reflected this cloud distribution: sections of convective-type measurements covering one

* The research reported here in has been sponsored by the U. S. Weather Bureau and the National Science Foundation.

* * University of Chicago.

das de tipo convectivo cubren de una a cinco millas de distancia de vuelo de avión, periódicamente interrumpidas por largos tramos de medidas de tipo estratiforme.

Las medidas del contenido de agua estaban sujetas también a gran variabilidad temporal causada tanto por movimiento del sistema de nubes como por la escala de relativa corta vida de los procesos de nubes y precipitación. Además, había los problemas causados por la amplia extensión en área de un sistema de huracán y la baja densidad en área de los desarrollos convectivos. Ya que las mediciones se efectuaron en una plataforma móvil única, representan cuando mucho una pequeña fracción del volumen total de una tormenta e incluyen variaciones espaciales y temporales.

En vista de tales consideraciones no era factible un análisis de tipo sinóptico, habiéndose empleado en su lugar análisis estadísticos que utilizan distribuciones de frecuencia, con valores medios de un segundo, para describir algunas características generales del contenido de agua líquida. Las distribuciones del contenido de agua líquida observado (W) y el contenido de agua relativo (W/W_a , donde W_a es el valor adiabático) fueron consideradas, suponiéndose implícitamente que en el examen estadístico existen condiciones esencialmente estables para el agua de tormenta en su totalidad (aunque no necesariamente para detalles de disposición en el área) y calidad representativa de muestras de datos. Ya que los datos se colectaron en una línea de vuelo standard, independientemente del carácter de las tormentas individuales, la validez de la última suposición dependía primordialmente del área cubierta y salvo uno o dos casos, no era tan mala.

Los datos discutidos ahora se colectaron en cinco vuelos a través de cuatro tormentas. Las mediciones se hicieron en cierto intervalo de altura en las tormentas que estaban en etapas variables de su propia historia. Las ubicaciones de los volúmenes y algunos rasgos de radas se muestran en la Fig. 1.

El Huracán Carrie se disipaba lentamente durante el Vuelo 70915 B (habiendo pasado su máxima intensidad 3 días antes), pero aún tenía un sistema bien organizado de circulación y nubes. El vuelo terminó después de la primera penetración al ojo por falla mecánica, de modo que los datos quedaron limitados principalmente al área dentro de 50 millas náuticas del centro de la tormenta. Becky nunca alcanzó la intensidad de huracán; casi llegaba a su máxima fuerza en el día del Vuelo 80813 B, con presión mínima de superficie de 1006 mb y configuraciones de circulación y nubes poco organizadas.

Daisy había alcanzado apenas fuerza de huracán el 25 de Agosto (Vuelo 80825 B) y se intensificaba rápidamente; se acercó a su intensidad máxima el 27 (Vuelo 80827 B). La cobertura de área fue buena el día anterior. El 27 se encontró agua tan notablemente fuerte en la primera penetración de la pared oriental que rompió la cinta de papel. Como consecuencia, la muestra del Vuelo 80827 B no es probablemente muy representativa tanto por lo limitado del área en que se recogieron los datos como porque en su mayoría provienen de nubes muy húmedas de la pared del ojo.

to five miles of airplane traverse distance periodically interrupted long stretches of stratiform-type measurements.

The water content measurements were also subject to large temporal variability arising both from movement of the cloud systems and from the relatively short time scale of cloud and precipitation processes. In addition, there were the problems arising from the large areal extent of a hurricane system and the low areal density of convective developments. Since the measurements were collected from a single moving platform, they represent at best only a small fraction of the total volume of a storm and include both the spatial and temporal variations.

In view of these considerations a synoptic-type of analysis was not feasible. Instead statistical analyses utilizing frequency distributions of one-second mean values were employed to describe some of the gross characteristics of the liquid-water content. The distributions of both the observed water content (W) and relative water content (W/W_a , where W_a is the adiabatic value) were considered. Implicitly assumed in the statistical approach are essentially steady conditions for the storm water as a whole (although not necessarily for the details of the areal array) and representativeness of the data samples. Since the data were collected on a standard flight path independent of the character of individual storms, the validity of the latter assumption depended primarily on the areal coverage and, except in one or two cases, was not too bad.

The data discussed herein were collected on five flights through four storms. The measurements were made at a range of altitudes into storms which were at varying stages of their life history. The locations of the measurements and a few of the radar features are shown in Fig. 1.

Hurricane Carrie was filling slowly at the time of Flt. 70915 B (having passed its peak intensity 3 days earlier) but still had a well organized circulation and cloud system. The flight was terminated after the first eye penetration due to engine trouble so that the data were limited and were mainly from the area within 50 nautical miles of the center of the storm. Becky never reached hurricane intensity; it was at about its maximum strength on the day of Flt. 80813B with minimum surface pressure of 1006 mb and poorly organized flow and cloud patterns.

Daisy had just reached hurricane strength on August 25th (Flt. 80825 B) and was intensifying rapidly; it was near its peak intensity on the 27th (Flt. 80827 B). The areal coverage was good on the earlier day. On the 27th exceedingly heavy water encountered on the first traverse through the east wall caused the paper tape to break. As a consequence, the sample for Flt. 80827 B is probably not too representative both because of the limited area in which the data were collected and because so much of it was collected in the very wet clouds of the eye wall.

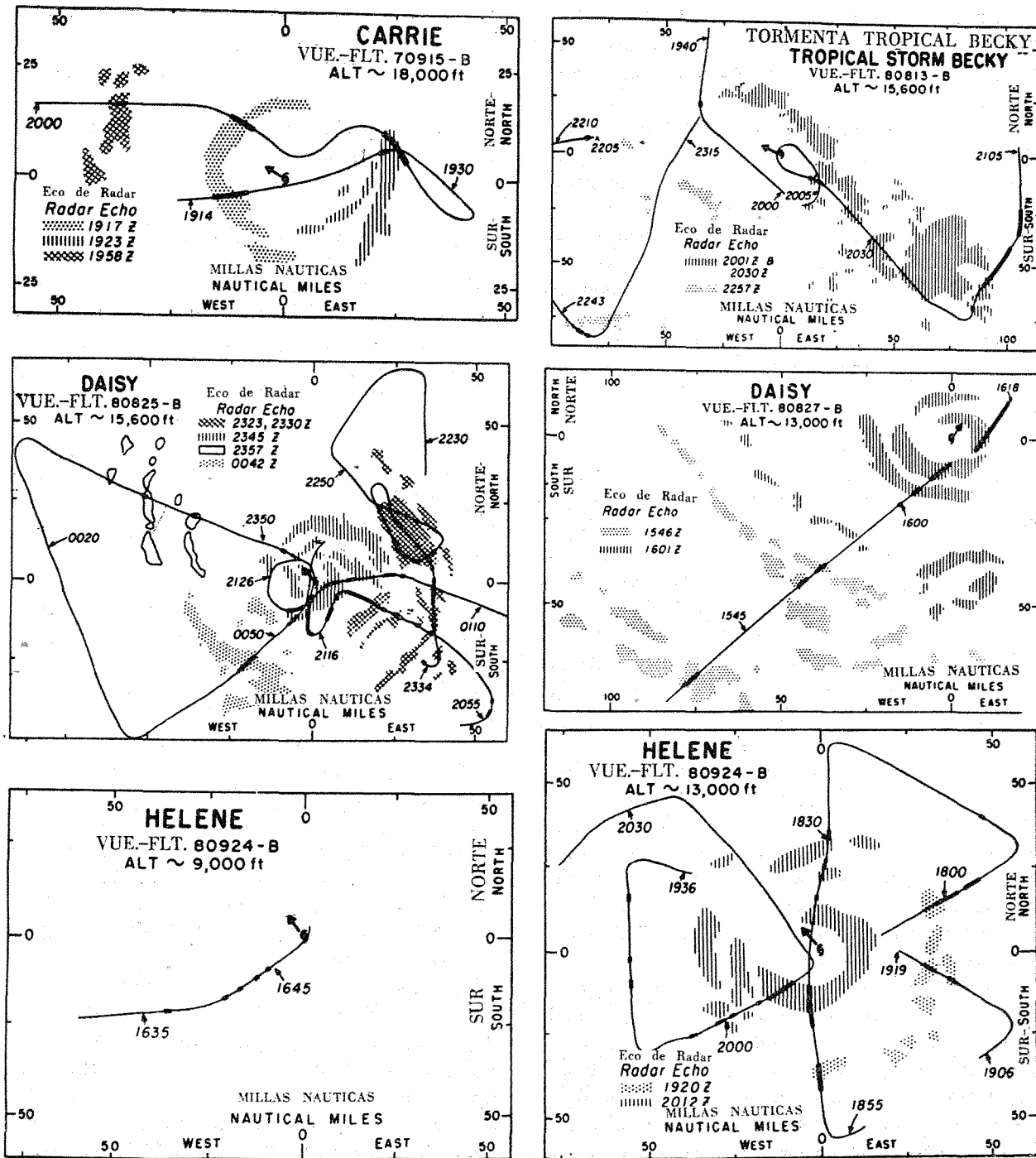


Fig. 1. Localización de mediciones de contenido de agua, indicándose los segmentos convectivos por barras gruesas. Los ecos de radar fueron detectados por el radar aerotransportado en el tiempo que se indica.

Fig. 1. Location of the water content measurements with convective segments indicated by heavy bars. The radar echoes are those detected by the airborne radar at the specified time.

Helene era un huracán muy joven durante el Vuelo 80924 B y fue intensificándose moderadamente; su intensidad máxima se alcanzó dos o tres días después. Casi todo el vuelo se efectuó a 13,000 pies con buena cobertura de área; solamente el cuadrante suroeste fue penetrado en una altura más baja.

Aunque las mediciones se hicieron y registraron continuamente, los valores medios de un segundo fueron usados en todo el estudio. Cada media de un segundo se considera como "observación". El número de observaciones varió de casi 900 a nivel de 9,000 pies en el Huracán Helene a más de 11,000 en el Huracán Daisy el 25 de Agosto. Aunque todos los datos disponibles de estos vuelos se analizaron, la presente discusión se limita a las mediciones de tipo convectivo. Los números de muestras para áreas convectivas varía de casi 100 a 1,800 observaciones.

RESULTADOS

Como se esperaba, los más altos contenidos de agua se encontraron en su mayor parte en regiones de convección. El máximo de tales áreas fue de dos a diez veces el observado en nubes no-convectivas, pero aún así el contenido de agua no era excesivo. Sólo en un vuelo de tormenta las medias de distribución de frecuencias de contenido de agua observado (tabuladas en la Fig. 2) fue menor de $.75 \text{ g m}^{-3}$ y las cuartiles superiores no pasaron de 1 g m^{-3} , menos de un quinto de W_a . En solo dos casos —Daisy el día 27 y el nivel de 13,000 pies en Helene— tenían contenidos de agua en exceso de W_a que ocurrieron a muy cortas distancias.

El agua relativa de bandas convectivas varió significativamente de vuelo a vuelo —aparentemente por diferencias en alturas de vuelo. Despreciando por el momento los datos para Daisy el 27 de Agosto, las distribuciones de frecuencia (Fig. 2) cambiaron sistemáticamente a valores inferiores con el aumento en altura de las mediciones. Además, según lo indican las tabulaciones, el contenido "abosluto" de agua también disminuyó con la altura.

Los contenidos de agua medidos en Daisy el 27 de Agosto fueron más altos que para cualquiera otra tormenta, lo cual pudo deberse en parte a defectos del muestreo, como se mencionó antes. Sin embargo, aunque se omitan los datos de las paredes de nubes, los contenidos de agua son considerablemente mayores que los medidos a la misma altura en el Huracán Helene. Comparando los datos de dos vuelos parece que el agua de nube convectiva puede ser de 20 a 30 por ciento mayor en tormentas maduras que en tormentas jóvenes en desarrollo.

Se ha observado la desviación de valores adiabáticos teóricos con frecuencia y ello puede deberse a varias razones. Tal vez la más importante sea la dilución por mezcla entre la nube y el aire ambiental y sedimentación y almacenamiento en la precipitación. La efectividad de mezcla para reducir el contenido de agua en nubes convectivas depende de su magnitud y de la humedad del ambiente. El aire de huracán generalmente tiene la más alta humedad —indicando las mediciones que la humedad relativa rara vez baja de 80 a 90

Helene was a very young hurricane at the time of Flt. 80924 B and was intensifying at a moderate rate; peak intensity was reached two or three days later. Most of the flight took place at 13,000 feet for which there is good areal coverage; only the southwest quadrant was penetrated at the lower altitude.

Although the measurements were made and recorded continuously, one-second mean values were used throughout this study. Each one-second mean is considered an "observation". The number of observations ranged from about 900 at the 9,000 ft level in Hurricane Helene to over 11,000 in Hurricane Daisy on August 25th. Although all available data from these flights were analyzed, the discussion herein will be confined to the convective-type measurements. The sample sizes for the convective areas varied from about 100 to 1,800 observations.

RESULTS

As one would expect most of the higher water contents were found in the regions of convection. The maxima in these areas were from two to ten times those observed in non-convective clouds, but even so the water contents were not excessive. On all but one storm flight, the medians of the frequency distributions of observed water content (tabulated in Fig. 2) were less than $.75 \text{ g m}^{-3}$ and the upper quartiles were no more than 1 g m^{-3} , less than one-fifth W_a . In only two cases —Daisy on the 27th and the 13,000 ft level in Helene— were water contents in excess of W_a encountered, and these occurred over very short distances.

The relative water of convective bands differed significantly from flight to flight —apparently because of differences in flight altitude. Ignoring for the moment the data for Daisy on August 27th, the frequency distributions (Fig. 2) are seen to shift systematically toward lower values with increase in the altitude of the measurements. Moreover, as the tabulations indicate, the "absolute" water content also decreased with height.

The water contents measured in Daisy on August 27th were higher than those for any other storm. This may be due in part to bias in the data sample as mentioned above. However, even if the data from the wall clouds are omitted, the water contents are considerably higher than those measured at the same altitude in Hurricane Helene. A comparison of the data for the two flights suggests that the convective cloud water may be 20 to 30 per cent higher in mature storms than in young developing storms.

Deviation from the theoretical adiabatic value has frequently been observed and may come about for a number of reasons. Perhaps most important are dilution due to mixing between cloud and environment air and sedimentation and storage in precipitation. The effectiveness of mixing in reducing the water content of convective clouds depends on the magnitude of the mixing and the humidity of the environment. Hurricane air is generally believed to have high humidity throughout measurements indicate that the

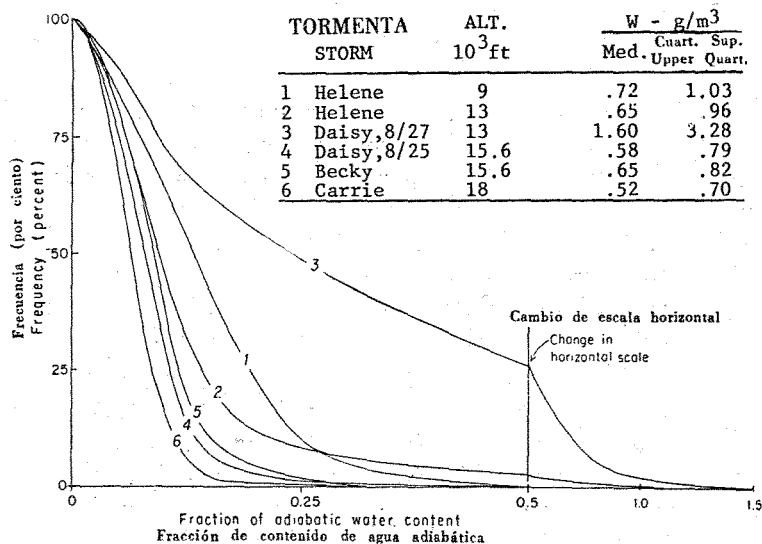


Fig. 2. Ojivas de distribuciones de frecuencia de agua relativa (W/W_a) y tabulación de valores de cuartilas media y superior de distribuciones de contenido absoluto de agua (W) en convección.

Fig. 2. Ogives of the frequency distribution of relative water (W/W_a) and tabulations of the median and upper quartile values of the distributions of absolute water content (W) in convection.

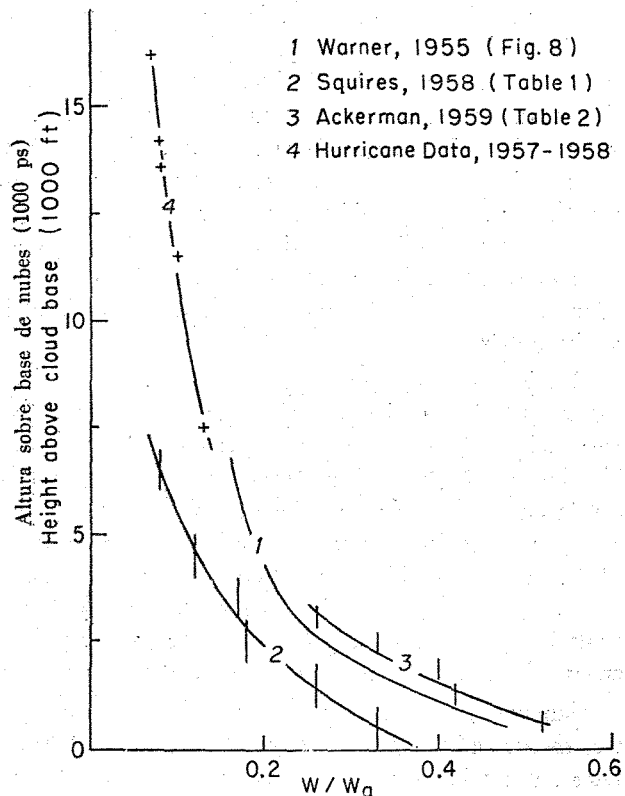


Fig. 3. Variación vertical de contenidos de agua en convección de huracán (curva 4) y en nubes cumuliiformes de tiempo menos malo, según otras investigaciones.

Fig. 3. The vertical variation of the water contents in hurricane convection (curve 4) and in cumuliiform clouds of less severe weather from other investigations.

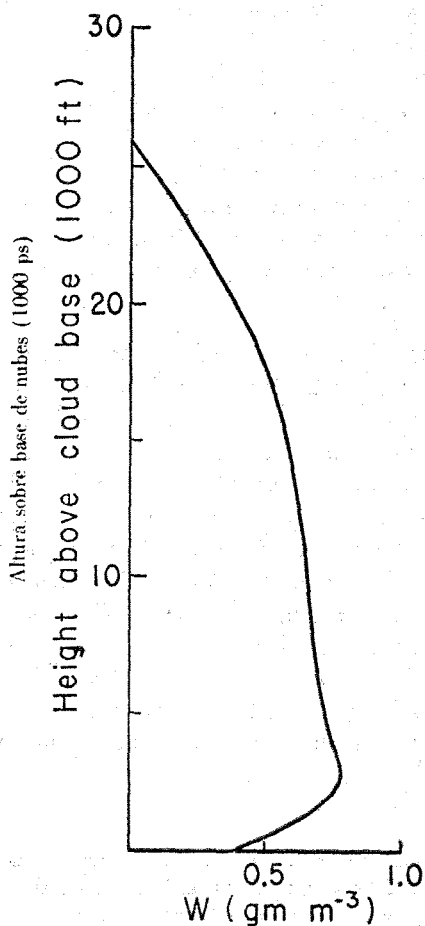


Fig. 4. Promedio de distribución vertical de contenido de agua líquida en desarrollos convectivos.

Fig. 4. Average vertical distribution of liquid water content in convective developments.

por ciento. Por consecuencia, los efectos evaporativos de mezcla serán limitados, aunque hay la posibilidad de apreciable redistribución del agua líquida en el proceso de mezcla —compartiéndose esa agua con el aire original de arrastre y el mezclado. La manera de redistribuirse dependerá, desde luego, del mecanismo del arrastre y mezcla que se lleven a cabo —tema de considerables discusiones por ahora. Sin embargo, bien puede ser que los elementos convectivos sean factores en el establecimiento y mantenimiento de los amplios puentes de nubes, a través de mezclas y/o de residuos en disipación.

También se demostró que por encima del intervalo entre 9,000 a 18,000 pies, los contenidos de agua, tanto observada como relativa disminuían con la altura en áreas convectivas. Los decrementos sistemáticos del contenido de agua relativa con la altura han sido observados en sistemas más pequeños y menos complejos de nubes convectivas, v. gr. por Warner (1955) y Squires (1958) en cumuli marítimos y hacia tierra en Australia, por Draginis (1958) en cumuli sobre la parte central-oeste de los Estados Unidos y por Ackerman (1959) en cumuli pequeños y medianos sobre el Atlántico subtropical.

Aunque se conocían bien las radicales diferencias en datos, se han dibujado las variaciones de altura citadas por estos autores junto con los datos de huracanes en una gráfica única (Fig. 3). No hay mayores inconsistencias y de hecho el grado de concordancia puede sorprender a algunos, a pesar de lo cual, conforme se acumulan observaciones variadas, hay evidencia creciente de que ciertos rasgos básicos y procesos en nubes convectivas son notablemente similares para una gran variedad de condiciones de tiempo y geografía. Por consecuencia, se cree que un cuadro medio de la distribución vertical del contenido de agua en bandas convectivas de huracanes puede lograrse con razonable certeza por extrapolación de datos de huracanes a menores alturas, usando las otras curvas como guías para determinar su forma.¹ Tal cuadro medio indica una pérdida neta de agua de capas superiores a inferiores en huracanes, lo cual era de esperarse en nubes de lluvia.

DENSIDAD DE AREA. La frecuencia relativa de contenido de agua del tipo convectivo permite estimar, en general, la densidad de área de los elementos convectivos, lo cual puede definirse como una fracción del área total. Para hacer más amplio el muestreo en un estudio de la densidad de área de convección, se determinaron la frecuencia relativa y la ubicación de los volúmenes de tipo convectivo por cinco vuelos adicionales en 1958: (a) en el Huracán Helene, del 26 de Septiembre, cuando la tormenta alcanzaba su intensidad máxima, (b) en el Huracán Cleo, el 18 de Agosto, cuando estaba terminando (c) en Becky, del 15 de Agosto, (d) Gerda, del 14 de Septiembre, tormentas tropicales ambas y (e) Ella, el 2 de Septiembre, cuando ya había perdido su fuerza máxima. La altura de los vuelos varió entre 10,000 a 15,600 pies.

¹ Debe señalarse que los datos de huracanes vienen principalmente de jóvenes tormentas en intensificación y por ello, que la curva de la Fig. 3 es más aplicable a etapas iniciales de tormentas.

relative humidity is seldom less than 80 or 90 per cent. Therefore the evaporative effects of mixing will be limited. There is, however, the possibility of sizeable redistribution of the liquid water in the mixing process —with the realized water being shared by the admixed and originating air. How this redistribution may occur, will of course depend on the mechanisms by which entrainment and mixing take place— a subject of considerable debate as of this time. However, it may well be that the convective elements are factors in establishing and maintaining the widespread cloud decks, through mixing and/or dissipating residue.

It was also shown above that over the range of 9,000 to 18,000 feet, both the observed and the relative water contents decreased with height in convective areas. Systematic decreases of relative water content with height have been observed in smaller, less complex convective cloud systems, e. g. by Warner (1955) and Squires (1958) in isolated maritime and landward cumuli in Australia, by Draginis (1958) in cumuli over the widwestern part of the United States, and by Ackerman (1959) in small and medium-sized cumuli over the subtropical Atlantic.

While fully cognizant of some rather radical differences in data, the height variations cited by these authors have been plotted, along with the hurricane data, on a single graph (Fig. 3). There are no gross inconsistencies, and in fact the degree of agreement may be surprising to some. However, as observations of various kinds accumulate, there is increasing evidence that certain basic features and processes in convective clouds are remarkably similar for a wide range of weather conditions and geography. Therefore, it is felt that a reasonably accurate mean picture of the vertical distribution of water content in hurricane convective bands is obtained by an extrapolation of the data from hurricanes to the lower altitudes using the other curves as guides to determine the shape.¹ Such a mean picture indicates a net loss of water from the upper to the lower layers in a hurricane, which is to be expected in rain clouds.

AREAL DENSITY. The relative frequency of convective-type water contents gives a rough estimate of the areal density of convective elements, where areal density is defined as a fraction of total area. In order to enlarge the sample for a study of the areal density of convection, the relative frequency and location of convective-type measurements were determined for five additional flights made in 1958: (a) Hurricane Helene on the 26th of September when the storm was very near maximum intensity, (b) Hurricane Cleo on the 18th of August when it was filling, (c) Becky on August 15th and (d) Gerda on September 14th, both tropical storms, and (e) Ella on September 2nd when it was well down from maximum strength. The flight altitudes ranged from 10,000 to 15,600 feet.

¹ It should be pointed out that the hurricane data are primarily from young intensifying storms and therefore, the curve of Fig. 3 is more applicable for the early storm stages.

TABLE I

TABLA I

LA FRECUENCIA DEL PORCENTAJE DEL CONTENIDO DE AGUA DE TIPO CONVECTIVO PARA
AREAS ANULARES DE 40 MILLAS DE ANCHURA, PROMEDIADA PARA 10 VUELOS

THE PERCENTAGE FREQUENCY OF CONVECTIVE-TYPE-WATER CONTENTS FOR 40-MILE
WIDE ANNULAR RINGS, AVERAGED FOR 10 FLIGHTS

| Etapa de la Tormenta Stage of Storm | Distancia al centro de la tormenta (millas náuticas) Distance from storm center (nautical miles) | | | |
|---|---|-------|--------|------|
| | ≤40 | 40-80 | 80-120 | ≤120 |
| Principio-Building | 30% | 5% | <1% | 15% |
| Máximo-Peak | 47 | 34 | 21 | 36 |
| Disipación-Filling | 25 | 8 | 9 | 14 |
| Tormentas Tropicales Tropical Storms | 2 | 6 | 6 | 5 |

Los datos para los diez vuelos se han resumido en la Tabla I; las tendencias indicadas por datos promediados también se observan en las estadísticas individuales de tormenta. Dos cosas pueden verse claramente: la frecuencia relativa de convección era una función tanto del desarrollo de la tormenta como de la distancia al centro. Para la región dentro de 120 millas náuticas del centro de la tormenta, un promedio de casi 15 por ciento de las mediciones eran del tipo convectivo en jóvenes tormentas en desarrollo, aumentando a casi 35 por ciento al acercarse al máximo de intensidad y luego disminuían otra vez en tormentas terminales. La incidencia relativa de convección apenas alcanzaba porcentaje en tormentas tropicales, mucho menos que en huracanes.

Durante las etapas de intensificación y madurez, la densidad de área de convección tendía a disminuir del centro hacia afuera y en mucho menor grado también sucedía así en las etapas terminales. En las tormentas jóvenes este decremento era tal que el área completa que cubrían las nubes convectivas en las capas medias también disminuía hacia afuera. Este rasgo no era consistente en las tormentas en su culminación y no existía en las tormentas terminales y parecería que cuando una tormenta comienza a disiparse hay una disminución del total de convección y también del grado en que se concentra cerca del centro. Por otra parte, en las tormentas tropicales no había prueba de algún cambio sistemático en la densidad del área de convección con la distancia desde el centro de la tormenta.

Malkus *et al.* (1961) estimaron con fotografías de nubes del Huracán Daisy que la convección de penetración (torres de nubes por encima de 37,000 pies) ocurría en más de 1 por ciento del área dentro de 200 millas náuticas del centro en el día de formación (25 de Agosto) y en más de 4 por ciento de dicha área en el día del máximo (27 de Agosto). Según datos del contenido de agua, la convección a 15,600 pies en Daisy, el 25, se estimó en 16 por ciento del área dentro de 100 millas náuticas del centro. Usando el decremento

The data for all ten flights are summarized in Table I; the trends indicated by the averaged data are seen in the individual storm statistics also. Two things may be clearly seen: the relative frequency of convection was a function both of the stage of the storm and of the distance from center. For the region within 120 nautical miles from the storm center, an average of around 15 per cent of the measurements were of the convective type in young deepening storms, increasing to about 35 per cent for storms near peak intensity and then decreasing again in filling storms. The relative incidence of convection was just a few per cent in tropical storms, much lower than in hurricanes.

During the intensifying and mature stages the areal density of convection tended to decrease outward from the center, and, to a much lesser extent, this was true also of the filling stages. In the young storms this decrease was such that the total area involved in convective clouds in the middle layers also decreased outward. This trend was not consistent for storms at their peak and not at all true for the filling storms. It would appear that as a storm begins to dissipate, there is a decrease in the amount of convection and also in the degree to which it is concentrated close to the center. In tropical storms, on the other hand, there was no evidence of any systematic change in the areal density of convection with distance from storm center.

Malkus *et al.* (1961) estimated from cloud photographs from Hurricane Daisy that penetrative convection (cloud towers exceeding 37,000 feet) occurred over 1 per cent of the area within 200 nautical miles of the center on the formative day (August 25th) and over about 4 per cent of this area on the peak day (August 27th). From water content data, convection at 15,600 feet in Daisy on the 25th is estimated at 16 per cent of the area within 100 nautical miles of center. Making use of the observed decrease

observado de incidencias de convección hacia afuera del centro en este vuelo, se estimó la convección en niveles medios como de casi 2 por ciento del área dentro de 200 millas del centro —casi dos veces que lo mencionado por Malkus. Estimando superficialmente los tamaños de células convectivas, parecería que casi una célula entre seis que existían a 16,000 pies puede alcanzar alturas de 35,000 pies.

Los datos de agua para Daisy el día 27 son limitados y usando las observaciones del Huracán Helene en su día más activo, la densidad de área de convección en niveles medios, para una tormenta en su máximo, se estimó en casi 5 a 6 por ciento del área dentro de 200 millas náuticas del centro. Comparándolo con el valor de 4 por ciento citado por Malkus para convección de penetración, podría ser que en las más intensas etapas del huracán una fracción relativamente grande de la convección tiene intensidad "penetrante".

ANEXO

El "reservorio" convectivo. Es posible llegar a una estimación del total de agua condensada que se mantiene en reserva por desarrollos convectivos mediante la distribución de agua en la cobertura vertical y de área de tales desarrollos. Lo último puede verse directamente en la Tabla I y lo primero extrapolando en la curva 4 de la Fig. 3. Una profundidad media de nubes de casi 26,000 pies fue considerada razonable y se extendió la curva 4 hacia arriba, hasta el contenido de agua cero en dicha altura; la extensión hacia abajo, a la base de la nube, se hizo usando las otras curvas como guía para su forma y estimando el agua relativa en sus porciones inferiores como de 25 a 40 por ciento más alta que la encontrada en tiempo no-perturbado en trópicos (curva 3).

La distribución vertical resultante del contenido de agua, W (Fig. 4), representa una estimación del promedio de espacio-tiempo para todas las nubes convectivas dentro de 120 millas náuticas del centro y es más aplicable a tormentas en intensificación que a las maduras o terminales. Indica que los contenidos medios de agua son moderados en toda la profundidad de nubes, siendo siempre menores de 1 g m^{-3} y que los valores más altos y en consecuencia, las mayores cantidades de agua de nubes por unidad de profundidad, tienen lugar en los cinco o seis mil pies inferiores de la nube.

Con los datos de la Fig. 4 y de la Tabla I, las regiones convectivas probablemente contienen casi 9×10^{13} gramos de agua condensada en una tormenta muy joven en intensificación y casi 28×10^{13} gramos en una tormenta en su máximo. Así, hay un incremento triple —y una adición de casi 2×10^{14} gramos de agua condensada— en el "reservorio" convectivo en más o menos dos días.

BIBLIOGRAFIA

- ACKERMAN, B. 1959. The Variability of the Water Contents of Tropical Cumuli. *Jour. Meteor.* 16:191-198.
DRACINIS, M. 1958. Liquid Water within Convective Clouds. *Jour. Meteor.* 15:481-485.

of the incidence of convection outward from center on this flight, convection at the middle levels is estimated to represent about 2 per cent of the area within 200 miles of center —about twice that reported by Malkus. Roughly estimating the sizes of the convective cells, it would appear that about one cell out of six occurring at 16,000 feet might be expected to reach heights of 35,000 feet.

The water data from Daisy on the 27th are limited. Making use of observations from Hurricane Helene on its most active day, the areal density of convection at middle levels for a storm at its peak is estimated to be about 5 or 6 per cent of the area within 200 nautical miles of center. Comparing this to the 4 per cent value cited by Malkus for penetrative convection suggests that in the most intense stages of a hurricane, a relatively larger fraction of the convection is of "penetrative" intensity.

ADDENDUM

The convective "reservoir". It is possible to obtain an estimate of the total condensed water held in reserve by convective developments from the distribution of water in the vertical and the areal coverage of such developments. The latter is directly available from Table I, the former from extrapolation of curve 4 in Fig. 3. An average cloud depth of about 26,000 ft. was considered reasonable and curve 4 was extended upward to zero water content at this height; the extension downward to cloud base was made using the other curves as guide for shape and estimating the relative water in the lowest portions to be 25 to 40 per cent higher than that found in undisturbed weather in the tropics (curve 3).

The resultant vertical distribution of water content, W (Fig. 4) represents an estimate of the time-space average for all convective clouds within 120 nautical miles of center and is more applicable to intensifying storms than to mature or filling storms. It indicates that the average water contents are moderate throughout the cloud depth, being everywhere under 1 g m^{-3} and that the highest values, and therefore the largest amounts of cloud water per unit depth, occur in the lowest five or six thousand feet of cloud.

From the data in Fig. 4 and Table I, the convective regions are estimated to contain about 9×10^{13} grams of condensed water in a very young, intensifying storm and about 28×10^{13} grams for a storm at its peak. Thus, there is a three-fold increase —an addition of about 2×10^{14} grams of condensed water— in the convective "reservoir" in a matter of about two days.

BIBLIOGRAPHY

- MALKUS, J. S., C. RONNE & M. CHAFFEE. 1961. Cloud Patterns in Hurricane Daisy, 1958. *Tellus*, 13:8-30.
- WARNER, J. 1955. The Water Content of Cumuliform Cloud. *Tellus*, 7:449-457.
- SQUIRES, P. 1958. The Spatial Variation of Liquid Water and Droplet Concentration in Cumuli. *Tellus*, 10:372-380.