

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

LA ESTRUCTURA DE LOS HURACANES: UNA REVISION

N. E. LASEUR*

INTRODUCCION

Esta breve revisión aspira a dar un fondo histórico y técnico que permita visualizar la investigación actual sobre la estructura de los huracanes. No pretende agotar el tema; pues sería más bien casi imposible considerar todos los trabajos que tratan del asunto. Primeramente se limitará a la discusión de los huracanes maduros, es decir, con desarrollo completo y antes de su transformación a características extratropicales o de su modificación sobre tierra. Después se concentrará a los resultados de las últimas dos décadas en que se ha logrado más progreso que en la precedente centuria.

Como medida para evaluar adelantos técnicos en algunas ciencias se ha usado el número de publicaciones que aparecen en la literatura. Si tal medida fuese aplicada al presente análisis de la estructura de los huracanes seguramente que se expresaría por el típico crecimiento exponencial. Sin embargo, tal resultado sería engañoso en mi opinión, si se interpretase como verdadera medida del incremento en nuestro conocimiento actual sobre la estructura de los huracanes, ya que después de los descubrimientos fundamentales a principios del Siglo XIX, el verdadero índice de incremento en nuestro conocimiento sobre la estructura de los huracanes fue muy lento hasta los grandes avances del período de la II Guerra Mundial. Desde luego, las principales razones de tal situación fueron las dificultades para obtener las necesarias observaciones, aunque creo que no es la explicación completa. Otro factor que ha contribuido es la falta de sólido razonamiento físico aplicado a los datos disponibles. Dos ejemplos pueden mencionarse: (1) las actuales discusiones sobre la altura de dichas tormentas y (2) los persistentes esfuerzos para interpretar la estructura del viento de superficie en términos de un vórtice "puro" no-rotacional. La aplicación del análisis hidrostático podría haber resuelto ampliamente la primera cuestión mucho antes de que se intentara hacerlo, pues otros razonamientos basados en la conservación del momento angular absoluto más que el relativo podrían haber revelado la futilidad del segundo. No se dará claramente la explicación de tal ausencia de in-

* Departamento de Meteorología, Universidad del Estado de Florida.

THE STRUCTURE OF HURRICANES: A SURVEY

N. E. LASEUR*

INTRODUCTION

This brief survey is intended to provide an historical and technical background against which present-day research on hurricane structure may be viewed. It does not pretend to be exhaustive; indeed it would be nearly impossible to consider all of the papers which treat this subject. First of all, it will be limited to discussion of the mature hurricane, i.e., after development is complete and before transformation to extratropical characteristics or modification over land have begun. Secondly, it will concentrate on the results of the past two decades in which more progress has been made than in the preceding century.

One measure which has been used to evaluate technical advances in some sciences is the number of publications appearing in the literature. If this were to be applied to the present subject of hurricane structure, it is likely that the typical exponential growth would be indicated. However, this result would be misleading, in my opinion, if it were interpreted as a true measure of the increase in our actual knowledge of hurricane structure. In fact, after the fundamental discoveries of the early XIX Century, the true rate of growth in our knowledge of hurricane structure was very slow until the major breakthroughs of the World War II period. The principal reason for this is, of course, the difficulties of obtaining the necessary observations, but I believe this is not the complete explanation. Another contributing factor was the lack of sound physical reasoning applied to the available data. Two examples of this come to mind: (1) the prevailing arguments as to the height of these storms and, (2) the persistent efforts to interpret the surface wind structure in terms of the irrotational "pure" vortex. The application of hydrostatic reasoning could have largely resolved the first question considerably before such attempts were made, and reasoning based on the conservation of absolute rather than relative angular momentum could have revealed the futility of the latter. The reasons for such lack of proper interpretation cannot be clearly enumerated, but are probably to be found in the lack of

* Department of Meteorology, Florida State University.

interpretación adecuada, pero tal vez se encontraría en la carencia de certera información matemática y física de quienes estudiaron los primeros datos.

Así, una división natural de la discusión permite abarcar el período anterior a 1940 y de los años posteriores. Casi siempre se hará referencia a resúmenes de trabajos iniciales y a sumarios de trabajos posteriores. No se reproducen ahora las ilustraciones, ya que se encuentran generalmente en la literatura publicada.

EL PERIODO ANTERIOR A 1940

Las tempranas nociones sobre la progresiva naturaleza ciclónica de los huracanes pueden probablemente rastrearse hasta el Siglo XVIII, aunque el verdadero estudio científico comenzó a principios del Siglo XIX y pueden encontrarse resúmenes de importantes trabajos iniciales en W. Nupen y M. Rigby (1956). También deben mencionarse las contribuciones de Copper (1801), Redfield (1831), Ried (1850) y Piddington (1852), quienes demostraron la progresiva naturaleza de la circulación ciclónica cercana a un mínimo de presión. Dove (1828) presentó contemporáneamente resultados de igual naturaleza, pero a lo menos fijaba el principio de los ciclones extratropicales a los que llamaba huracanes.

Durante el resto del Siglo XIX y la primera parte del Siglo XX mucho más casos de historias de huracanes (o tifones, ciclones, etc.) fueron recogidos en varias regiones tropicales. Pero, los datos continuaron siendo los barogramas superficiales, termogramas y observaciones de viento, así como de observaciones de precipitación y de nubes con limitada aerología indirecta. A esa falta de datos fundamentalmente nuevos se debió que la tendencia en los estudios de huracanes de ese período fuese de naturaleza climatológica y estadística y apenas hubo algunas contribuciones que mejoraban la descripción y el entendimiento de la estructura de los huracanes. Sólo mencionaré aquellas de Espy (1841), a quien generalmente se considera como el primero que comprendió la importancia del calor latente aunque sus contribuciones descriptivas no fuesen de valor, de Maury (1861) que intentó relacionar los campos de presión y viento de manera cuantitativa; de Ferrel (1889), con una interpretación comprensiva a base de los datos descriptivos disponibles y de Cline (1926), que destacó la distribución de la precipitación.

La última parte de este período comprende los fallidos intentos de aplicar los métodos de masas de aire frontales al análisis tropical, incluyendo a los huracanes. Este nuevo método fue recibido con entusiasmo, a lo menos en el pasado, debido al relativo estancamiento del progreso durante las precedentes décadas. Los trabajos de Kidson, Rodewald y Depperman durante los 1930 son típicos. La falta de datos adecuados fue importante factor para permitir interpretaciones que comprendían dos o más masas de aire, separadas por un o más frentes como rasgos estructurales de los huracanes, aunque un análisis cuidadoso hubiera impedido las malas interpretaciones resultantes. Depperman tuvo cuidado

adequate mathematical and physical background of those who studied the early data.

A natural division of the discussion then seems to be the period before about 1940, and the years since. The references cited are mostly to abstracts of early articles and summaries of later works. The illustrations are not reproduced here, because of their general availability in published literature.

THE PERIOD BEFORE 1940

The earliest notions as to the progressive cyclonic nature of hurricanes can probably be traced back at least to the XVIII Century, but truly scientific study began in the early XIX Century. Abstracts of the important early works may be found in W. Nupen and M. Rigby (1956). Brief mention may be made of the contributions of Copper (1801), Redfield (1831), Ried (1850), and Piddington (1852), who established the progressive nature of the cyclonic flow about a pressure minimum. Dove (1828) presented contemporary results of similar nature, but at least in the beginning was studying extratropical cyclones, although he called them hurricanes.

During the remainder of the XIX and early part of the XX Centuries, many more case histories of hurricanes (or typhoons, cyclones, etc.) were collected from various tropical regions. But the data continued to consist of surface barograms, thermograms, and wind observations, plus rainfall and cloud observations supplemented by limited indirect aerology. It was this lack of fundamentally new data that probably resulted in the tendency for hurricane studies of this period to become more climatological and statistical in nature. Only limited contributions to improved description and understanding of hurricane structure resulted. I will mention only those of Espy (1841), who is generally credited with first realizing the importance of latent heat although his contributions to description were negative; Maury (1861), who attempted to relate wind and pressure fields in a quantitative manner; Ferrel (1889), who attempted a comprehensive interpretation of available descriptive data; and Cline (1926), who emphasized rainfall distribution.

The last portion of this period included the abortive attempts to apply air-mass-frontal methods to tropical analysis, including hurricanes. This new tool was greeted with enthusiasm at least in past because of the relative stagnation of progress during preceding decades. The works of Kidson, Rodewald and Depperman during the 1930's are typical. The lack of adequate data was a major factor in allowing interpretations involving two or more air-masses, separated by one or more fronts, as structural features of hurricanes, but careful thought could have avoided some of the misinterpretations which resulted. Depperman was most careful in minimizing the degree of air-mass contrast, and made

de reducir el grado de contraste de las masas de aire e hizo contribuciones importantes respecto a presión, temperatura y estructura del viento.

Al mismo tiempo se lograron notables adelantos en los datos de estructura de los huracanes a base de razonamiento teórico, pudiendo citarse sólo unos cuantos ejemplos. En 1935 Haurwitz demostró a base de consideraciones hidrostáticas que tan bajas presiones de superficie observadas en los huracanes no podían desaparecer muy abajo de la tropopausa, menos que existiese un gradiente de temperatura bastante improbable. Así, el problema de la altura de estas tormentas quedó esencialmente resuelto antes de que se dispusiese de los datos verdaderos.

EL PERIODO DESDE 1940

El desarrollo y utilización de tres nuevas técnicas de observación fue la principal causa de los rápidos avances en años recientes. Eran (1) las observaciones de aire superior obtenidas con equipo de radio-sondeo y rawin-sonda, (2) el reconocimiento de tormentas por aviones y (3) el uso del radar. El tipo de desarrollo ha seguido el curso lógico de las investigaciones iniciales sobre la estructura de los huracanes a escala sinóptica continuada por más intensos análisis a escala convectiva, cuando la importancia de esta última escala de movimiento quedó revelada. Este período se revisará dentro de tal esquema general.

Al principio, los nuevos datos no fueron adecuados para el análisis comprehensivo de tormentas individuales y en cambio, se combinó información sobre varios sistemas similares con métodos que retenían la máxima información significativa en tanto que disminuían los posibles defectos inherentes a tales combinaciones. El Prof. Riehl, que era entonces el principal trabajador de esa rama, ayudado por sus asociados, presentó un resumen excelente de los principales resultados en su libro de texto (1954). Los estudios de Hughes son típicos al proporcionar informes combinados de vientos de bajo nivel obtenidos por aviones militares de reconocimiento, así como los de E. S. Jordan, usando observaciones combinadas de rawin y de E. S. y C. L. Jordan, quienes estudiaron la estructura térmica media a base de observaciones de radas combinadas (Riehl, 1954). Los principales resultados fueron: los tipos cuantitativos de promedios de campos de viento, incluyendo la revelación de una circulación anticiclónica en la tropósfera superior sobre los huracanes y la comprobación cuantitativa de la estructura térmica del núcleo cálido. Un estudio posterior sobre datos rawin combinados de Miller (1957) agregó nuevo conocimiento del promedio de tipo de viento.

Una sección transversal vertical que preparó Palmén (1948) a base de una serie de observaciones especiales de radio-sondeo de un huracán es ahora clásica. Bergeron (1954) también aprovechó esta información para examinar la estructura térmica de los huracanes. La sección transversal muestra aumento de temperatura al decrecer el radio por dentro de la frontera del ojo inclinado, donde aumenta rápidamente la temperatura. La modificación de Bergeron

significant contributions to pressure, temperature and wind structure.

It was at this same time that a major contribution to hurricane structure resulted from theoretical reasoning, one of only a few such examples that can be cited. In 1935, Haurwitz showed from hydrostatic considerations that such low surface pressures as those observed in hurricanes could not disappear much below the tropopause unless very improbable temperature gradients existed. Thus the question as to the height of these storms was essentially answered before actual data were available.

THE PERIOD SINCE 1940

The development and utilization of three new observational techniques are primarily responsible for the rapid advances of recent years. These are (1) the upper-air observations obtained by radiosonde and rawin-sonde equipment, (2) reconnaissance of storms by aircraft and (3) the use of radar. The pattern of development has followed the logical course of initial investigations of hurricane structure on a synoptic-scale followed by more intensive analysis on a convective-scale as the importance of this latter scale of motion was revealed. It is within this general format that this period will be reviewed.

At first, the new data were not adequate for comprehensive analysis of individual storms, instead, information from several similar systems were combined by methods designed to retain the maximum significant information while minimizing the possible defects inherent in such composites. Professor Riehl, who was the leader in this type of work, aided by his students, presents an excellent summary of the main results in his textbook (1954). Typical of these studies are those of Hughes, who composited low-level wind reports obtained by military reconnaissance aircraft; E. S. Jordan, who composited rawin observations; and E. S. and C. L. Jordan, who studied the mean thermal structure from composited raobs (Riehl, 1954). Major results include: quantitative patterns of average wind fields, including the revelation of the upper-tropospheric anticyclonic circulation over hurricanes; and quantitative verification of the warm core thermal structure. A latter study of composited rawin data by Miller (1957) added to the knowledge of the mean wind patterns.

A now classical vertical cross-section was prepared by Palmén (1948) mostly from a series of special radiosonde observations from one hurricane. Bergeron (1954) has also used this information in discussing the thermal structure of hurricanes. The cross-section shows increase of temperature with decreasing radius inward to the sloping eye boundary at which temperatures increase rapidly. Bergeron's modification of this cross-section (1956, Fig. 9) shows the

a esta sección transversal (1956, Fig. 9) indica que el aire estaba más caliente que los valores tropicales medios dentro e inmediatamente afuera del ojo y un aire ligeramente más frío que los valores medios en los radios mayores.

El radar dio la primera prueba definitiva de las concentraciones de agua líquida organizadas en bandas espiraladas y de la región anular que rodea el ojo (Maynard, R. H., 1945). Al compararse con otros datos de observaciones superficiales (Wexler, H., 1947) y de penetración de aviones se reveló que estaban asociados con las regiones de mayor intensidad convectiva de la tormenta. La investigación a bordo de aviones que llevaban radar contribuyó a evidenciar más la importancia de estas bandas convectivas, especialmente de la pared de nubes que rodean al ojo. Simpson (1955) inició la utilización de aviones con propósitos de investigación, al principio como observador en aviones militares de reconocimiento y en años recientes al establecer el equipo de aviones con fines de investigación pura que trabajan con el Proyecto Nacional de Investigación de Huracanes.

Esos aviones de investigación especialmente equipados pueden medir y registrar todos los elementos meteorológicos con suficiente precisión y detalles para permitir el estudio de huracanes individuales tanto en escala sinóptica como convectiva. Tales estudios (Personal, National Hurricane Research Project, 1958; Colon, J., 1961; LaSeur, N. H. y H. F. Hawkins, 1963; LaSeur, N. H., 1962) han revelado gran variedad de nuevos datos sobre la estructura de los huracanes y proporcionado una base para otros análisis sobre el mecanismo físico responsable de la estructura observada. Entre otros resultados de esas investigaciones se cuenta la dominante importancia de la estructura del ojo en el núcleo de la tormenta, siendo tal vez la existencia de una pared de nubes alrededor de un ojo completo y bien formado la mejor prueba de que se alcanzó la etapa de madurez del huracán. Esta estructura típica del ojo ocupa menos del 5% del total de la tormenta, aunque parece que son los procesos que se desarrollan en ese lugar los responsables de la estructura y mantenimiento de la tormenta completa.

Puesto que resulta más conveniente usar el material ya accesible y conocido, resumiré los rasgos salientes de la estructura de un huracán según los revela el vuelo de reconocimiento discutiendo brevemente el huracán CLEO de 1958. Tales datos no se presentan como modelo, sino como ilustración típica de la estructura de un huracán maduro. Cleo (1958) no fue el más intenso ni más grande y ya estaba saliéndose de las latitudes bajas cuando llegaron los tres aviones de reconocimiento el 18 de Agosto de 1958. Sin embargo, todavía la tormenta estaba metida en aire de características tropicales medias y su estructura permaneció esencialmente estática durante las varias horas del reconocimiento permitiendo que se obtuvieran datos casi sinópticos después de eliminarse el desplazamiento de la tormenta. A continuación se discute brevemente la distribución de nubes y los ecos de radar fuertes, la temperatura, la presión, el viento y más brevemente, la humedad.

air to be warmer than average tropical values inside the eye and immediately outside, with slightly cooler than average values at greater radii.

Radar gave the first definitive evidence of concentrations of liquid water organized in spiral bands and the annular region surrounding the eye (Maynard, R. H., 1945). Comparison with other data from surface observations (Wexler, H., 1947) and aircraft penetration revealed that these were associated with the most intense convective regions of the storm. Aircraft reconnaissance research, including airborne radar, gave increasing evidence of the importance of these convective bands, especially the wall cloud surrounding the eye. Simpson (1955) was a pioneer in the utilization of aircraft for research purposes, first as an observer aboard military reconnaissance aircraft, and in recent years through the establishment of purely research aircraft facilities associated with the National Hurricane Research Project.

Such especially equipped research aircraft are capable of measuring and recording all meteorological elements with sufficient accuracy and detail to permit study of individual hurricanes on both a synoptic and convective scale. Such studies (Staff, National Hurricane Research Project, 1958; Colon, J., 1961; LaSeur, N. H. and H. F. Hawkins, 1963; LaSeur, N. H., 1962) have revealed a wealth of new data on hurricane structure and provided a basis new studies of the physical mechanisms responsible for the observed structure. A major result of these investigations is the dominant importance of the eye structure in the core of the storm. The existence of a complete and well-formed eye wall-cloud is perhaps the best evidence that the mature hurricane stage has been reached. This eye structure typically occupies less than 5 per cent of the total storm volume, but evidence indicates that processes which take place there are largely responsible for the structure and maintenance of the entire storm.

Because it is more convenient to make use of readily available and familiar material, I shall summarize the salient features of hurricane structure as revealed by such research reconnaissance by a brief discussion of hurricane CLEO in 1958. These data are not presented as models, but as typical illustrations of the structure of a mature hurricane. Cleo (1958) was not the largest or most intense hurricane and was already moving out of low latitudes at the time of the three plane reconnaissance on August 18, 1958. However, the storm was still embedded within air of average tropical characteristics. Its structure remained essentially unchanged during the several hours of reconnaissance which permits consideration of the data as quasi-synoptic after elimination of the storm's translation. The summary will include a brief discussion of the distributions of clouds and strong radar echoes, temperature, pressure, wind and, very briefly, humidity.

NUBES Y ECOS DE RADAR. Una sección vertical de la estructura de nubes fue construida combinando información de fotografías de nubes con lapsos de tiempo. La pared de nubes llegaba casi a 50,000 alrededor del ojo, mezclándose con el amplio escudo de cirros-cirrostratos. Varias bandas convectivas también salían del centro, pero sólo algunas en 70-80 mi n se extendían arriba del principal escudo de nubes. Al lado izquierdo de la tormenta el agudo borde del —Ya le dije que no me hace aprecio y hasta se me arranca escudo de nubes aparece encima del área clara que se extiende hasta la superficie. Nueva información sobre este aspecto de la estructura de la tormenta tal como lo revelan datos de satélites, será presentada por uno de los participantes en esta sesión. Las posiciones de ecos de radar de alta reflectividad generalmente coinciden con regiones de actividad convectiva, especialmente la pared del ojo y las bandas de lluvia interiores. Las fotografías de radar originales muestran los ecos más fuertes en el anillo de ecos que rodea al ojo, pero ni en esa área son uniformes pues los más fuertes ocurren en el cuadrante frontal de la derecha.

TEMPERATURA. El campo de temperaturas muestra únicamente pequeños gradientes irregulares fuera de la región de la pared del ojo. Las temperaturas más cálidas se encuentran dentro del ojo con amplios gradientes que atraviesan su pared. Al representarlas en términos de anomalías de temperatura en condiciones tropicales medias muestran los mayores valores positivos en la tropósfera superior arriba del ojo y disminuyen hacia afuera y abajo. Desde luego, los gradientes horizontales de anomalías de temperatura son idénticos para la temperatura.

PRESIÓN. Se discutirá el campo de presión en términos de anomalías o valores "D" para condiciones tropicales medias. En la tropósfera inferior y media esta cantidad se hace más y más negativa conforme nos acercamos al ojo y alcanza más fuertes en la pared del ojo. Sólo es aparente una ligera asimetría cerca del centro de la tormenta. Los gradientes horizontales disminuyen rápidamente hacia arriba, en la tropósfera superior. Al comparar estos valores "D" con las anomalías de temperatura puede verse que los grandes valores "D" negativos de la tropósfera inferior se asocian hidrostáticamente con las grandes anomalías de temperatura positiva de la tropósfera superior.

VIENTOS. Los tipos de mayor fluidez en la tropósfera inferior y media muestran el mismo alto grado de simetría que el campo de presión, pero un cuidadoso análisis revela entrada de corrientes que ocurre típicamente en el cuadrante posterior de la izquierda y salida en el frontal de la derecha, lo cual concuerda con las aceleraciones que necesariamente explican la distribución de isotacas que son típicamente asimétricas y tienen velocidades más fuertes en el lado derecho de la tormenta. Esta asimetría es también aparente en la pared del ojo donde ocurren las más altas velocidades. La simetría del campo de velocidad puede explicarse como uno de los efectos de diferencia en la curvatura de trayectoria en circulación casi ciclostrófica o de gradiente. En la tropósfera superior salen corrientes de todos los cuadrantes y la fina curvatura cambia de ciclónica a anticiclónica al

CLOUDS AND RADAR ECHOES. A vertical cross-section of the cloud structure was constructed by compositing information from time-lapse cloud photography. The cloud wall extends to nearly 50,000 around the eye, merging with the extensive cirrus-cirrostratus shield. Several convective bands appear further from the center, but only a few within 70-80 n mi extend upward into the main cloud shield. On the left-hand side of the storm the sharp edge of the cloud shield is apparent above the clear area which extends to the surface. Further information on this aspect of storm structure revealed by satellite data will be reported by one of the participants in this session. The positions of radar echoes of high reflectivity generally coincide with regions of convective activity, especially the eye-wall and inner rain bands. Original radar photographs show the strongest echoes in the ring echo surrounding the eye, but even these are not uniform, the strongest occurring in the right-front quadrant.

TEMPERATURE. The temperature field shows only small irregular gradients outside the eye-wall region. Warmest temperatures are found inside the eye with large gradients through the eye-wall. A representation in terms of temperature anomaly from average tropical conditions shows the largest positive values in the upper troposphere over the eye, decreasing outward and downward. Horizontal gradients of temperature anomaly are, of course, the same as for temperature.

PRESSURE. The pressure field will be discussed in terms of anomalies or "D" values from mean tropical conditions. In the lower and middle troposphere this quantity becomes increasingly negative as one approaches the eye with strongest gradients in the eye wall. Only very slight asymmetry about the storm center is apparent. Horizontal gradients decrease rapidly upward in the upper troposphere. A comparison of these "D" values with the temperature anomalies shows that the large negative "D" values of the lower troposphere are associated hydrostatically with the large positive temperature anomalies of the upper troposphere.

WINDS. Streamline patterns in lower and middle troposphere show same high degree of symmetry as pressure field, but careful analysis reveals indraft occurring typically in left-rear quadrant and out-draft in right-front. This is consistent with the accelerations necessary to account for the isotach distribution which is typically asymmetrical with stronger speeds on the right-hand side of the storm. This asymmetry is apparent even in the eye wall where highest speeds occur. The symmetry of the speed field is mostly accounted for by the effects of differences in trajectory curvature on quasi-cyclostrophic or gradient flow. In the upper troposphere outdraft occurs in all quadrants and streamline curvature changes from cyclonic to anticyclonic

aumentar el radio. Alaka (1961) ha encontrado inestabilidad dinámica en la tropósfera superior asociada con vorticidad absoluta negativa y circulación anómala.

HUMEDAD. Es muy difícil medir con seguridad su valor, aunque puede mencionarse un importante resultado pues el contenido de vapor de agua del aire dentro del ojo alcanza cuando mucho dos veces mayor magnitud de la que puede esperarse al suponer descenso sistemático del aire de la alta tropósfera. Queda, así, claro que mucho del aire interior en el ojo debe resultar de una mezcla a través de su pared con re-evaporación de partículas de nubes y algún descenso adiabático seco que puede explicar las temperaturas y humedades observadas. Malkus (1958) ha intentado examinar cuantitativamente tales procesos y Jordan (1952, 1957, 1961), al presentar amplios resúmenes de datos de sondeo bajo en ojos de huracanes y tifones, ha encontrado condiciones más secas y cálidas durante la rápida intensificación y no después.

SUGESTIONES PARA INVESTIGACIONES FUTURAS

Se necesitan datos como los incluídos en recientes estudios básicos y discutidos antes para la muy alta tropósfera, especialmente cerca de la tropopausa donde las tormentas se humedecen rápidamente al subir. También se necesita una amplia investigación de la cubierta superficial de frontera para establecer los cambios de momento, calor sensible y calor latente entre el aire y el mar. Dentro del propio volumen de la tormenta parece que debe recalcarse el estudio detallado del sistema a escala convectiva organizado especialmente en la región del ojo. Mediciones cuantitativas de la substancia acuosa en todas sus bases también se necesitan urgentemente. Los datos requeridos pueden lograrse con nuevos desarrollos y utilización de sistemas instrumentales llevados por aire.

with increasing radius. Alaka (1961) has found dynamic instability in the upper troposphere associated both with negative absolute vorticity and anomalous flow.

HUMIDITY. This quantity is most difficult to measure with accuracy, but one important result can be illustrated. The water vapor content of the air inside the eye is at most two orders of magnitude higher than can be accounted for if one assumes systematic descent of high tropospheric air. It is clear that most of the air inside the eye must come from mixing across the eye wall with re-evaporation of cloud particles and some dry adiabatic descent accounting for observed temperatures and humidities. Malkus (1958) has attempted a quantitative discussion of these processes, and Jordan (1952, 1957, 1961) who has presented extensive summaries of dropsonde data in hurricane and typhoon eyes, has found warmer, drier conditions during rapid intensification than afterwards.

SUGGESTIONS FOR FUTURE RESEARCH

Data such as formed the basis the recent studies discussed above are needed in the very high troposphere, especially near the tropopause where the storms damp rapidly upward. Also the surface boundary layer needs intensive investigation with emphasis on the exchange of momentum, sensible heat and latent heat between the air and sea. Within the bulk of the storm volume it appears that emphasis should be placed on detailed study of the organized convective-scale systems, especially the eye region. Quantitative measurement of water substance in all its bases is urgently needed. Further development and utilization of airborne instrument systems should supply the needed data.

BIBLIOGRAFIA

- ALAKA, M. A. 1961. NHRP Rept. No. 45.
 BERGERON, T. 1954. *Quart. Jour. Royal Meteor. Soc.*, 80:131.
 COLON, J. 1961. NHRP Rept. No. 48.
 HAURWITZ, B. 1935. *Mo. Wea. Rev.*, 63:45.
 JORDAN, C. L. 1952. *Jour. Meteorology*, 9:285.
 — 1957. NHRP Rept. No. 13.
 — 1961. *Jour. Meteorology*, 18:779.
 LASEUR, N. E. & H. F. HAWKINS, s.f. (Para publicarse). — (To be published).
 LASEUR, N. E. 1962. *Proc. of Second Tech. Conf. on Hurricanes*, NHRP Rept. No. 50.
 MALKUS, J. S. 1958. *Jour. Meteorology*, 15:337.
 MAYNARD, R. H. 1954. *Jour. Meteorology*, 2:214.
 MILLER, B. I. 1957. NHRP. Rept. No. 15.
 NUPEN, W. & M. RIGBY. 1956. Annotated Bibliography on Tropical Cyclones, Hurricanes and Typhoons. *Meteor. Abstracts and Bibliogr.*, 7:1115.
 PALMEN, E. 1948. *Geophysics*, 3:26.
 RIEHL, H. 1954. *Tropical Meteorology*. New York (McGraw-Hill Book, Co.), ver Cap. 11 — see Ch. 11.
 SIMPSON, R. H. 1955. Proc of UNESCO Symp. on Typhoons, Tokyo, 129.
 STAFF, NAT'L HURR. RES. PROJ. 1958. NHRP Report No. 24.
 WEXLER, H. 1947. *Ann. New York Acad. Sci.*, 48:821.

BIBLIOGRAPHY