

GEOFISICA INTERNACIONAL

REVISTA DE LA UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, AUSPICIADA POR EL INSTITUTO DE GEOFÍSICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Director: Julián Adem

Subdirector: Manuel Maldonado-Koerdell

Vol. 5

México, D. F., 1o. de Octubre de 1965

Núm. 4

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

México, D. F., Jun. 6-12, 1963

9a. SESIÓN

9th. SESSION

SESIÓN GENERAL (II)
GENERAL SESSION (II)

DINAMICA DEL MOVIMIENTO DE HURACANES

DYNAMICS OF HURRICANE MOTION

RICHARD L. PFEFFER *

RICHARD L. PFEFFER *

RESUMEN

ABSTRACT

Se discute el movimiento de huracanes desde el punto de vista del equilibrio del momento angular en cada conjunto, de volúmenes cilíndricos localizados en diferentes posiciones respecto al vórtice en movimiento. Se demuestra que el incremento inicial del momento angular alrededor de un eje vertical local, que debe ocurrir cuando un huracán se mueve a través de una región, se realiza desde el contorno por el transporte de dicho momento angular hacia el volumen. Este transporte puede hacerse por uno de dos procesos —circulaciones verticales o cambios horizontales por vórtices— o por una combinación de ambos.

Hurricane motion is discussed from the standpoint of the balance of angular momentum in each one of an array of cylindrical volumes located in different positions relative to the moving vortex. It is shown that the initial increase of angular momentum about a local vertical axis, which must take place when a hurricane moves through a region, is brought about by the transport of such angular momentum into the volume from the surroundings. This transport can be accomplished by either of two processes —vertical circulations or horizontal eddy exchanges— or by some combination of both.

Los resultados de esta investigación revelan que los procesos horizontales de cambio explican casi todos los transportes de momento angular asociados con el movimiento del huracán maduro. Las asimetrías encontradas en la distribución de transporte de momento angular alrededor del huracán no pueden explicarse en términos de conceptos sencillos como la "acción guiadora" de un vórtice circular por una corriente uniforme, sino que deben ser reflejo de un mecanismo más complejo de movimiento del huracán. Se sugiere que cualquier teoría de movimiento del huracán, para considerarse válida, debe explicar las asimetrías observadas en el campo de los transportes de momento angular alrededor del huracán.

The results of the present investigation reveal that horizontal exchange processes account almost entirely for the angular momentum transports associated with the motion of the mature hurricane. The asymmetries found in the distribution of the angular momentum transport around the hurricane cannot be explained in terms of simple concepts such as the "steering" of a circular vortex by a uniform current, but must be the reflection of a more complex mechanism of hurricane motion. It is suggested that any theory of hurricane motion, in order to be considered valid, should be able to account for the observed asymmetries in the field of angular momentum transports around the hurricane.

INTRODUCCION

INTRODUCTION

Cuando un sistema rotatorio de vientos, como un huracán, se mueve a través de una región, aumenta el momento

When a rotating wind system such as a hurricane moves through a region, the relative angular momentum of the air

* Lamont Geological Observatory, Columbia University, Palisades, New York.

* Lamont Geological Observatory, Columbia University, Palisades New York.

angular relativo del aire alrededor de un eje vertical local tal vez esporádicamente hasta que el centro del vórtice está casi en la posición más cercana al eje y luego disminuye, como se muestra esquemáticamente en la Fig. 1. Aunque procesos sencillos como la "acción guiadora" de un vórtice circularmente simétrico por una corriente uniforme básica pudieran explicar tales cambios, estos procesos no son los únicos que ocasionan esta secuencia de eventos. Ciertamente, si así fuera, el pronóstico del movimiento del huracán sería sencillo.

Se puede estudiar el movimiento del huracán desde un punto de vista más general utilizando una ecuación derivada por Starr (1953) para el índice de tiempo del cambio de momento angular local —esto es, el momento angular del aire alrededor de un eje vertical arbitrariamente localizado y fijo con respecto a la Tierra en rotación. La conservación del momento angular es un principio fundamental utilizado con considerable éxito como base para estudiar la circulación general de la atmósfera de la Tierra (ver, por ejemplo, Jeffrey, 1926; Starr, 1948; Starr y White, 1954 y demás referencias). La ecuación para el momento angular local ha sido utilizada por Starr (1953), Lorenz (1953), Pfeffer y Saltzman (1955), Saltzman (1955) y Pfeffer (1958a, b) para estudiar procesos dinámicos que ocurren en las circulaciones extratropical y tropical.

LA ECUACION PARA MOMENTO ANGULAR LOCAL

Adoptando un sistema de coordenadas polares cilíndricas (R, θ, Z) y considerando el volumen aproximadamente cilíndrico (V) representado por la región sombreada en la Fig. 2 (realmente una cabeza de cono) que se extiende de la superficie de la Tierra al límite superior de la atmósfera, se puede escribir la ecuación para el índice de tiempo del cambio de momento angular local sin error sensible en la forma;

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho R u \, dV = R \int_S \rho u v \, ds - \int_V \frac{\partial P}{\partial \theta} \, dV + \int_V \rho f R v \, dV + \int_V R D \, dV \quad (1)$$

donde u y v son las componentes tangenciales (positivas contra movimiento de reloj) y radiales (positivas al interior) de la velocidad del viento, respectivamente; ρ es la densidad, P es la presión, f es el parámetro de Coriolis, D es la componente tangencial de la fuerza de fricción por unidad de masa y t es el tiempo. Esta ecuación establece que el índice de tiempo del cambio de momento angular local relativo (integral a la izquierda) puede lograrse por el flujo de dicho momento a través de las fronteras del volumen (primera integral a la derecha) o por tórculos debidos a gradientes de presión, fuerza de Coriolis o viscosidad (segunda, tercera y cuarta integrales a la derecha, respectivamente). Para el propósito de esta discusión, tomaremos volúmenes en que no haya características orográficas para que la presión integral

$$\int_V \frac{\partial P}{\partial \theta} \, dV = \int_Z \int_R R \left[\phi \frac{\partial P}{\partial \theta} \, d\theta \right] \, dR \, dZ$$

igualmente se desvanezca.

about a local vertical axis increases, perhaps sporadically, until the center of the vortex is approximately at its nearest position to the axis, and then decreases, as shown schematically in Fig. 1. Although simple processes such as the "steering" of a circularly symmetrical vortex by a uniform basic current could account for such changes, these processes are not the only ones that could bring about this sequence of events. Indeed, if they were, the forecasting of hurricane motion would be a simple task.

One can study the motion of the hurricane from a more general point of view by making use of an equation derived by Starr (1953) for the time rate of change of local angular momentum—that is, the angular momentum of the air about an arbitrarily located vertical axis which is fixed with respect to the rotating Earth. Conservation of angular momentum is a fundamental principle which has been used with considerable success as a basis for studying the general circulation of the Earth's atmosphere (see, for example, Jeffreys, 1926, Starr, 1948, Starr and White, 1954, and references therein). The equation for local angular momentum has been used by Starr (1953), Lorenz (1953), Pfeffer and Saltzman (1955), Saltzman (1955) and Pfeffer (1958 a, b) to study dynamical processes which take place in extratropical and tropical circulations.

THE EQUATION FOR LOCAL ANGULAR MOMENTUM

Adopting a cylindrical polar coordinate system (R, θ, Z) and considering the approximately cylindrical volume (V) shown by the shaded region in Fig. 2 (really, a frustum of a cone), which extends from the surface of the Earth to the upper limit of the atmosphere, we may write the equation for the time rate of change of local angular momentum without sensible error in the form.

where u and v are the tangential (positive counterclockwise) and radial (positive inward) components of the wind velocity, respectively, ρ is density, P is pressure, f is the Coriolis parameter, D is the tangential component of the friction force per unit mass, and t is time. This equation states that the time rate of change of relative local angular momentum (left hand integral) can be brought about by a flux of such momentum across the boundaries of the volume (first integral on the right) or by torques due to pressure gradients, the Coriolis force or viscosity (second, third and fourth integrals on the right, respectively). For the purpose of this discussion we shall consider volumes in which there are no orographic features so that the pressure integral,

vanishes identically.

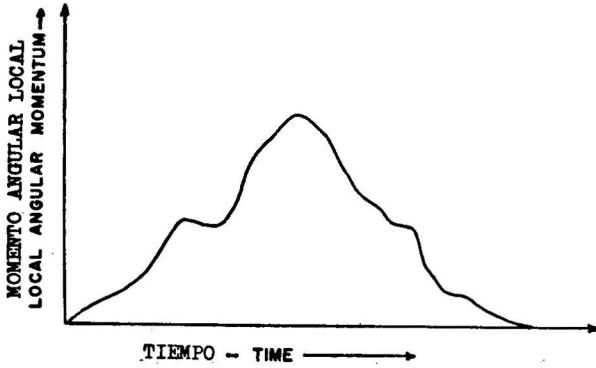


Fig. 1—Cuadro esquemático mostrando variaciones en tiempo del momento angular relativo alrededor de un eje vertical local durante el paso de un huracán.

Fig. 1—Schematic picture showing the time variation of the relative angular momentum about a local vertical axis during the passage of a hurricane.

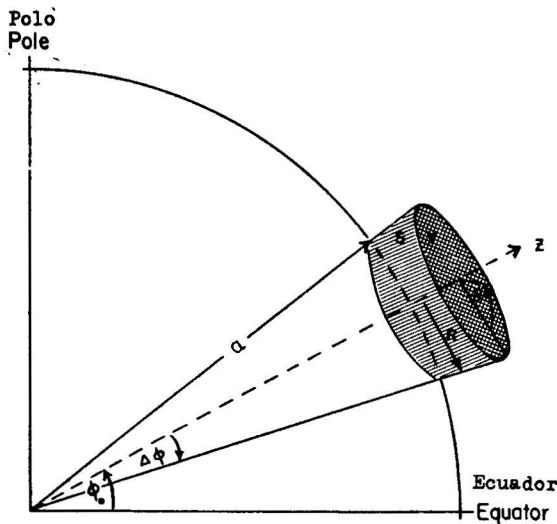


Fig. 2—Cuadro esquemático del volumen cilíndrico aproximado V (región sombreada). ϕ_0 es la latitud del eje, $\Delta\phi$ es el ángulo entre el eje y la pared, a es el radio de la Tierra y R es el radio del cilindro.

Fig. 2—Schematic picture of the approximately cylindrical volume, V (shaded region). ϕ_0 is the latitude of the axis, $\Delta\phi$ is the angle between the axis and the wall, a is the radius of the Earth and R is the radius of the cylinder.

Según Starr (1953), las dos últimas integrales en (1) actúan para oponerse al aumento inicial del momento angular en el volumen. La integral de Coriolis también actúa para oponerse a la subsecuente disminución del momento angular. Se sigue que el aumento inicial del momento angular debe ocurrir como resultado de un transporte horizontal de dicho momento hacia el volumen de la atmósfera circundante y que la disminución subsecuente se logra por alguna combinación de procesos de flujo y fricción. Esto, sin embargo, no implica que la rotación de la Tierra (representada en la ecuación (1) por la integral de Coriolis) tenga efecto despreciable sobre el índice de cambio del momento angular relativo dentro del volumen. Aunque la integral $\int_v \rho f R v dV$, tomada

sobre el volumen total del cilindro que se extiende entre la superficie de la Tierra y el límite superior de la atmósfera, no tenga el signo apropiado para responder de la dirección de los cambios de momento angular, el integrando adopta grandes valores positivos y negativos sobre una base de punto por punto. En puntos individuales el movimiento entrante genera el momento angular ciclónico y el movimiento saliente genera el momento angular anticiclónico. Por lo tanto, el efecto inmediato de la integral de Coriolis es redistribuir el momento angular dentro del volumen. La acumulación de momento angular en su interior ocurre como resulta-

As discussed by Starr (1953) the last two integrals in (1) act to oppose the initial increase of angular momentum in the volume. The Coriolis integral also acts to oppose the subsequent decrease of angular momentum. It follows that the initial increase of angular momentum must take place as a result of a horizontal transport of such momentum into the volume from the surrounding atmosphere and that the subsequent decrease is accomplished by some combination of flux processes and friction. This does not, however, imply that the Earth's rotation (represented in equation (1) by the Coriolis integral) has a negligible effect on the rate of change of the relative angular momentum within the volume. Although the integral, $\int_v \rho f R v dV$, taken over the entire

volume of the cylinder extending from the surface of the Earth to the upper limit of the atmosphere, is of the wrong sign to account for the direction of the angular momentum changes, the integrand takes on large positive and negative values on a point-for-point basis. At individual points inward motion generates cyclonic angular momentum and outward motion generates anticyclonic angular momentum. The immediate effect of the Coriolis integral, therefore, is to redistribute angular momentum within the volume. The accumulation of angular momentum in the volume then takes place as a result of the inward transport of those fluid ele-

do del transporte entrante de aquellos elementos fluidos que han adquirido momento angular ciclónico y el transporte saliente de aquéllos que han adquirido momento angular anticiclónico. El transporte *neto* de momento angular está representado por la integral de flujo $R \int_s \rho u v d s$.

Para investigar el modo en que se organizan los movimientos de la atmósfera en el huracán que ocasiona los transportes requeridos de momento angular local podemos utilizar la identidad:

$$q \equiv \overline{[q]} + [q]'' + q' \quad (2)$$

donde q puede ser cualquier cantidad y los corchetes, barras e índices primos se definen como sigue:

$$[q] \equiv \frac{1}{2\pi} \oint q d\theta \quad ; \quad q' \equiv q - [q]$$

$$\overline{q} \equiv \frac{1}{P_0} \int_0^{P_0} q dP \quad ; \quad q'' \equiv q - \overline{q}$$

Usando (2) podemos escribir la integral que representa el transporte horizontal de momento angular hasta el volumen en la forma:

$$R \int_s \rho u v d s \simeq \frac{2\pi R^2 P_0}{g} [\overline{[u]'' [v]''} + \overline{[u' v']}]. \quad (3)$$

Aquí hemos ignorado un término que depende de $\overline{[v]}$ o el transporte de masa neta hacia el volumen.

El primer término a la derecha, que depende de covariancia de $[u]$ y $[v]$ sobre la frontera, mide el transporte de momento angular causado por las circulaciones verticales. Este término da una contribución positiva cuando hay flujo de masa entrante neto a esos niveles en que la circulación de frontera es grande y positiva y flujo de masa saliente neto en niveles en que es negativo o poco positivo. Las circulaciones verticales tendrán importancia si, por ejemplo, el movimiento de huracán ocurre como resultado de regeneración del campo de movimiento vertical al calentarse en una nueva región por delante de la posición existente del vórtice, v. gr. una lengua tibia de agua oceánica.

El último término, que depende de la covariancia de u y v en la frontera en cada nivel, mide el transporte de momento angular debido a los procesos de cambio horizontal y es positivo cuando a *niveles individuales* el momento angular es mayor en puntos del flujo entrante que en puntos del flujo saliente. Este término al que llamaremos "transporte de vórtice horizontal" del momento angular, tendrá importancia si el movimiento del huracán tiene forma de movimiento de onda, sea una perturbación asimétrica como una onda de alisio o una perturbación simétrica como un vórtice circular incrustado en una corriente uniforme.

ments which have acquired cyclonic angular momentum and the outward transport of those which have acquired anti-cyclonic angular momentum. The *net* transport of angular momentum is represented by the flux integral, $R \int_v \rho u v d s$.

In order to investigate the way in which the motions of the atmosphere are organized in the hurricane to bring about the required transports of local angular momentum, we may make use of the identity,

where q may be any quantity and the brackets, bar and primes are defined as follows:

Using (2) we may write the integral representing the horizontal transport of angular momentum into the volume in the form.

Here we have neglected a term which depends upon $\overline{[v]}$, or the net mass transport into the volume.

The first term on the right, which depends upon the covariance of $[u]$ and $[v]$ on the boundary, measures the angular momentum transport brought about by vertical circulations. This term gives a positive contribution when there is a net mass inflow at those levels at which the circulation on the boundary is large and positive, and a net mass outflow at those levels at which it is negative or small positive. Vertical circulations will be of importance if, for example, hurricane motion takes place as a result of a regeneration of the vertical motion field by heating in a new region ahead of the existing position of the vortex; for example, by a warm tongue of ocean water.

The last term, which depends upon the covariance of u and v along the boundary at each level, measures the transport of angular momentum due to horizontal exchange processes and is positive when, at *individual* levels, the angular momentum is greater at inflow points than it is at outflow points. This term, which we shall call the "horizontal-eddy transport" of angular momentum, will be of importance if the motion of the hurricane is a form of wave motion, whether the wave is an asymmetrical disturbance such as an easterly wave or a symmetrical disturbance such as a circular vortex imbedded in a uniform current.

ESTUDIO OBSERVACIONAL

Si pudiera disponerse de una densa red de observaciones simultáneas de viento en huracanes individuales sería sencillo valorar los términos en (3) y determinar así el papel de cada uno de los procesos de transporte. Puesto que el área de datos actuales, principalmente a niveles superiores en el huracán, es inadecuada para ellos, se decidió usar cartas compuestas de viento preparadas por E. Jordan (1952) para altitudes de 4,000, 7,000, 10,000, 18,000, 30,000, 40,000 y 45,000 ps. y por L. Hughes (1952) para 1,000 ps. usando informes de viento de cierto número de huracanes maduros. Las cartas de viento para elevaciones por encima de 1,000 ps., muchas de ellas no publicadas, fueron amablemente proporcionadas al autor por la señora Jordan hace algunos años. Puesto que estos datos son un conjunto de promedios del campo de velocidad tomados sobre un gran número de huracanes, no debe esperarse que contengan toda la información que pudiera existir en cartas sinópticas preparadas por observaciones simultáneas de viento. En particular, se tiende a suprimir rasgos con promedios de características que pueden ser comunes a todos los huracanes, pero que no tienen una ubicación preferente dentro del huracán. Dichas limitaciones en los datos deben tomarse en cuenta al estimar los resultados de este estudio. Otra limitación es que el área de las presentes observaciones cubre solamente la región entre 2° y 6° de latitud desde el ojo del huracán y por ello no dan información acerca de la estructura del vórtice interno. Sin embargo, los datos proporcionan una buena definición de la circulación a gran escala que rodea a ese vórtice. Como veremos, esa circulación es una parte integral del sistema del huracán y juega un papel importante en su movimiento.

Aunque las cartas compuestas, de viento, no señalan una secuencia de tiempo de eventos a medida que el huracán pasa a través de un volumen fijo, sí proporcionan un cuadro instantáneo de la corriente de la cual podemos obtener información útil. En la presente investigación se decidió usar tales datos para calcular el flujo de momento angular hacia cada uno de los volúmenes cilíndricos cuyo conjunto se localiza en diferentes posiciones relativas al huracán en movimiento. Estos cálculos representan un esfuerzo para determinar (a) la distribución del transporte de momento angular hacia volúmenes que rodeaban al huracán, (b) las magnitudes relativas de ambos procesos representados en los términos de la ecuación (3) y (c) la escala de los procesos que intervienen en el movimiento del huracán; sea particularmente que el movimiento del huracán esté asociado con transportes de momento angular a gran escala o que sea independiente de dichos transportes. Aunque el tamaño del cilindro que se usará está dictado de una manera burda por la escala de la circulación del huracán, la selección exacta es algo arbitraria. Para los propósitos de este estudio se decidió hacer los cálculos para cuatro diferentes tamaños de cilindros, a saber, $R = 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ$ y 5° de latitud. En ciertos casos, una porción de la pared del cilindro cruzaba la región 2° más acá y 6° más allá de la latitud del ojo del huracán donde no había datos. Puesto que sólo se involucró una pequeña porción de la pared del

OBSERVATIONAL STUDY

If a dense network of simultaneous wind observations in individual hurricanes were available, it would be a simple matter to evaluate the terms in (3) and thereby to determine the role of each of the transport processes. Since present-day data coverage, particularly at upper levels in the hurricane, is inadequate for such purposes, it was decided to make use of composite wind charts which have been prepared by E. Jordan (1952) for altitudes 4,000, 7,000, 10,000, 18,000, 30,000, 40,000 and 45,000 ft., and by L. Hughes (1952) for 1,000 ft., using wind reports from a number of mature hurricanes. The wind charts for elevations above 1,000 ft., many of which were unpublished, were kindly loaned to the author several years ago by Mrs. Jordan. Since these data are in the nature of ensemble averages of the velocity field taken over a large number of hurricanes, they cannot be expected to contain all of the information that might be present on synoptic charts prepared from simultaneous wind observations. In particular, features which may be common to all hurricanes, but which do not have a preferred location within the hurricane, tend to be suppressed by averaging. Such limitations in the data should be kept in mind when evaluating the result of the present study. A further limitation is that the present observations cover only the region between 2° and 6° latitude from the hurricane eye and, therefore, do not give us information about the structure of the inner vortex. The data do, however, provide good definition of the large-scale circulation surrounding this vortex. As we shall see, this circulation is an integral part of the hurricane system which plays an important role in the motion of the hurricane.

Although composite wind charts cannot furnish us with a time sequence of events as the hurricane passes through a fixed volume, they do provide an instantaneous picture of the flow from which we can obtain useful information. In the present investigation, it was decided to use these data to compute the angular momentum flux into each one of an array of cylindrical volumes located in different positions relative to the moving hurricane. The computations were made in an effort to determine (a) the distribution of the angular momentum transport into volumes surrounding the hurricane, (b) the relative magnitudes of the two processes represented by the terms in equation (3), and (c) the scale of the processes involved in the motion of the hurricane; in particular whether the motion of the hurricane is associated with large-scale transports of angular momentum, or whether it is independent of such transport. Although the size of the cylinder to be used is dictated in a rough way by the scale of the hurricane circulation, the exact choice is somewhat arbitrary. For the purposes of the present study it was decided to make the computations for four different cylinder sizes, namely, $R = 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ$ and 5° latitude. In a number of cases a portion of the cylinder wall passed through the region within 2° or beyond 6° latitude from the eye of the hurricane where there were no data. Since only a small portion of the cylinder wall was involved

cilindro en casi todos los casos, se considera que las principales conclusiones de este estudio no han sido afectadas por esa limitación de datos.

Los números en la Fig. 3 dan el transporte total de momento angular hacia cada uno de los volúmenes cilíndricos cuyo conjunto tiene radios de 3° de latitud. Las posiciones de los números denotan las ubicaciones de los ejes de los respectivos cilindros. El ojo del huracán está designado por el símbolo ξ y la dirección del movimiento del huracán va a la izquierda, como lo indica la flecha. Por conveniencia, el conjunto de números está trazado con curvas viéndose que el movimiento del huracán sigue la línea que conecta los centros de máximos positivos y negativos del transporte de momento angular en el sentido de valores negativos a positivos. El transporte positivo máximo se encuentra entre 1° y 2° de latitud por delante del ojo y el transporte negativo máximo a 3° por detrás. También hay un transporte positivo de momento angular hacia el cilindro centrado en el ojo. Esto se requiere para equilibrar el arrastre friccional de momento angular ocasionado por la interacción entre la circulación del huracán y la superficie de la Tierra.

En la Fig. 4 se presenta un cálculo similar para un conjunto de cilindros con radios de 4° de latitud. En este caso,

in all but a few instances, it is felt that the main conclusions of the present study are not affected by this shortcoming in the data.

The numbers in Fig. 3 give the total transport of angular momentum into each one of an array of cylindrical volumes with radii 3° latitude. The positions of the numbers denote the locations of the axes of the respective cylinders. The hurricane eye is designated by the symbol ξ and the direction of motion of the hurricane is to the left, as indicated by the arrow. For convenience the array of numbers is contoured. It is seen that the motion of the hurricane is along the line connecting the centers of maximum positive and negative angular momentum transport, the sense being from negative toward positive values. The maximum positive transport is found about 1° to 2° latitude ahead of the eye and the maximum negative transport is found 3° behind the eye. There is also a positive transport of angular momentum into the cylinder centered at the eye. This is required to balance the frictional drain of angular momentum which is brought about by the interaction between the hurricane circulation and the Earth's surface.

In Fig. 4 a similar calculation is presented for an array of cylinders with radii 4° latitude. In this case, the maximum

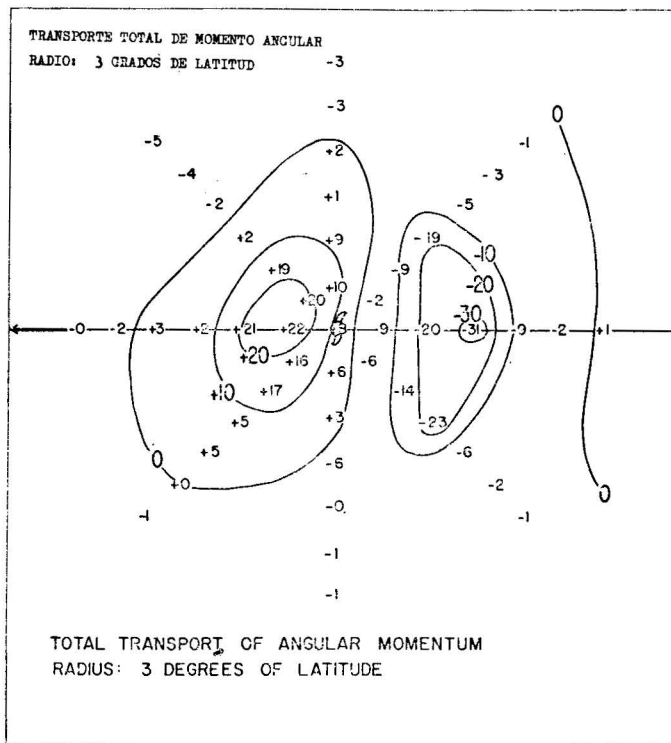


Fig. 3—Transporte total de momento angular hacia cada uno de los volúmenes cilíndricos cuyo conjunto tiene radios de 3° de latitud. Las posiciones de los números indican las ubicaciones de los ejes de los respectivos cilindros. El ojo del huracán se designa con el símbolo ξ y la dirección del movimiento del huracán es a la izquierda, como lo indica la flecha.

Fig. 4—Transporte total de momento angular hacia cada uno de los volúmenes cilíndricos cuyo conjunto tiene radio de 4° de latitud.

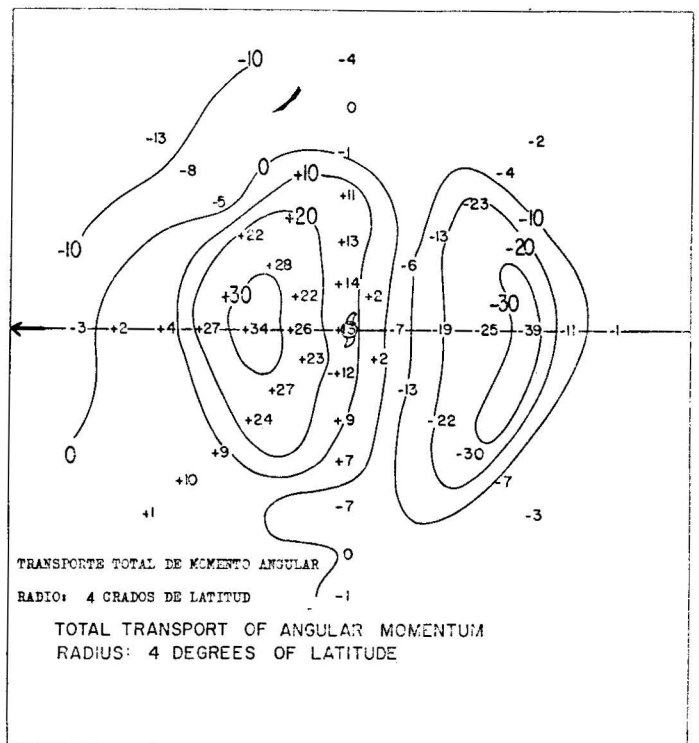


Fig. 3—Total transport of angular momentum into each one of an array of cylindrical volumes with radii 3° latitude. The positions of the numbers denote the locations of the axes of the respective cylinders. The hurricane eye is designated by the symbol, ξ , and the direction of motion of the hurricane is to the left, as indicated by the arrow.

Fig. 4—Total transport of angular momentum into each one of an array of cylindrical volumen with radii 4° latitude.

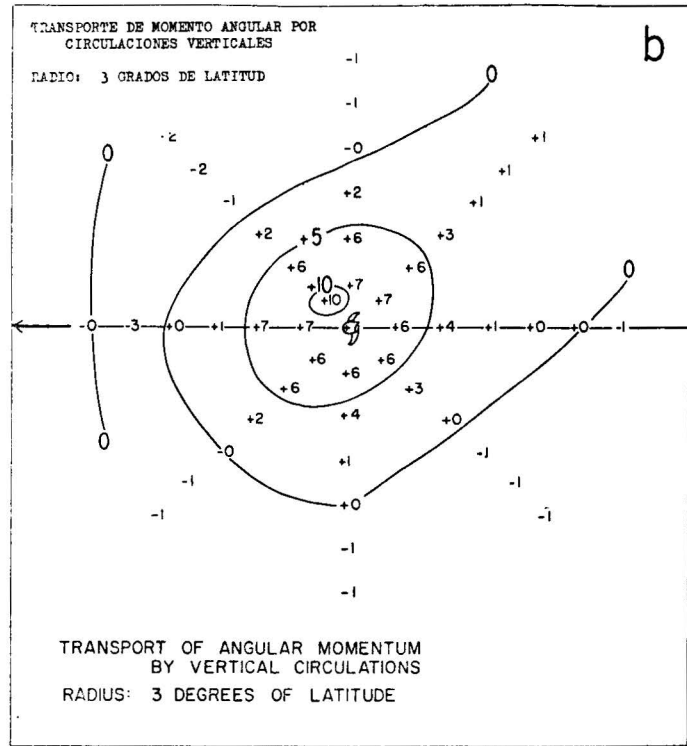
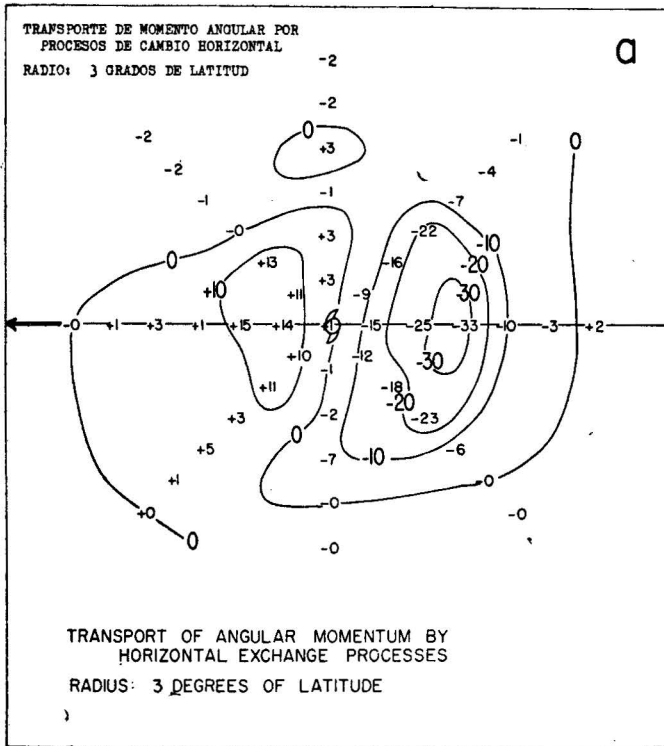


Fig. 5—Transporte de momento angular hacia cada uno de los volúmenes cilíndricos cuyo conjunto tiene radios de 3° de latitud.

- a. por procesos de cambio horizontal
- b. por circulaciones verticales

Fig. 5—Transport of angular momentum into each one of the array of cylindrical volumes with radii 3° latitude.

- a. by horizontal exchange processes
- b. by vertical circulations

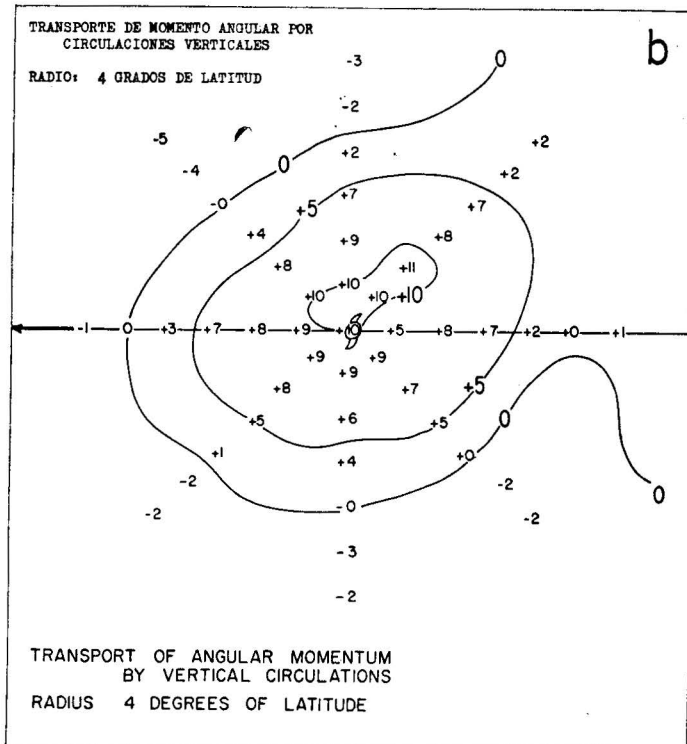
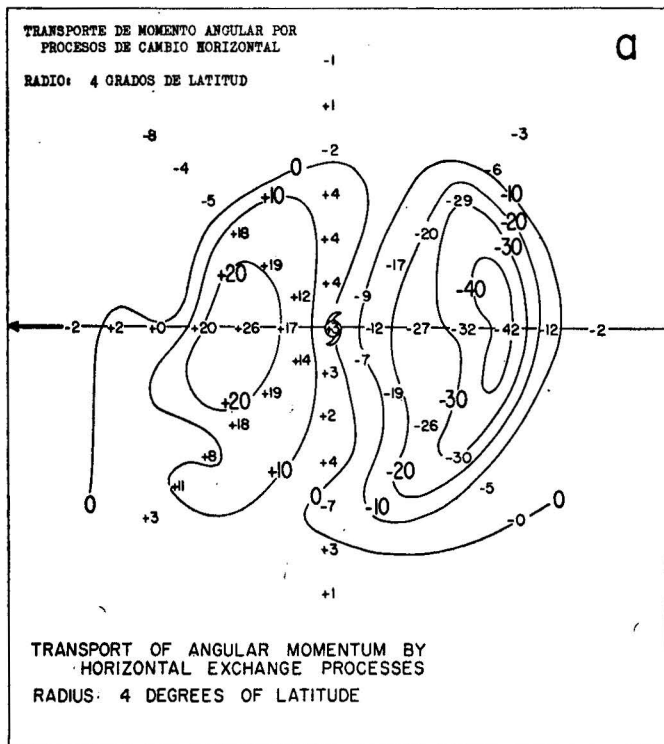


Fig. 6—Transporte de momento angular hacia cada uno de los volúmenes cilíndricos cuyo conjunto tiene radios de 4° de latitud

- a. por procesos de cambio horizontal
- b. por circulaciones verticales

Fig. 6—Transport of angular momentum into each one of the array of cylindrical volumes with radii 4° latitude

- a. by horizontal exchange processes
- b. by vertical circulations

el transporte positivo máximo de momento angular local se encuentra a 2° de latitud por delante del ojo y el transporte negativo máximo a 4° de latitud por detrás. Otra vez hay un transporte positivo de momento angular hacia el cilindro centrado en el ojo del huracán.

Cálculos que utilizan cilindros mayores y menores confirman que a medida que aumenta su tamaño, los centros positivos y negativos del transporte de momento angular se separan siguiendo las líneas del movimiento del huracán con transporte positivo máximo ubicado siempre más cerca del ojo del huracán que el negativo máximo. En cada caso hay un transporte positivo de momento angular hacia el cilindro centrado en el ojo.

Las Figs. 5a y 5b muestran las contribuciones de procesos de cambio horizontal y circulaciones verticales, respectivamente, al total del transporte de momento angular hacia los cilindros con radios de 3° de latitud. Las Figs. 6a y 6b dan resultados de cálculos similares para cilindros con radios de 4° de latitud. En ambos casos y en el caso de cilindros mayores y menores (que no se muestran), los transportes de momento angular debidos a procesos de cambio horizontal tienen mayor magnitud que los debidos a circulaciones verticales y la configuración de transportes horizontales por vórtices se correlaciona con la de transportes totales. Las Figs. 7a y 7b muestran cómo está organizada la configuración de líneas de corriente en la tropósfera media para efectuar los transportes de momento angular requeridos. En el cilindro ubicado por delante del huracán el movimiento ciclónico alrededor de su eje está presente tanto en puntos de entrada como de salida, pero como la velocidad es mayor en los puntos de entrada el resultado es un transporte neto de momento angular al interior. En el cilindro ubicado por detrás del huracán, el movimiento ciclónico alrededor de su eje se encuentra en puntos de salida y el movimiento anticiclónico en puntos de entrada produciendo un transporte neto de momento angular al exterior de dicho volumen.

Como se notó antes, la "acción guiadora" de un vórtice circular por una corriente uniforme, producirá transportes positivos y negativos de momento angular por vórtices hacia cilindros localizados por delante y detrás de su centro, respectivamente. Sin embargo, este fenómeno no puede explicar los flujos de momento angular positivos por vórtices hacia cilindros de varios tamaños centrados en el ojo del huracán o el hecho de que los flujos máximos negativos de momento angular se encuentran en cilindros más alejados del ojo del huracán que en otros donde hay flujos positivos máximos. Tales asimetrías deben ser reflejo de un mecanismo más complejo del movimiento del huracán que futuros tratamientos teóricos del problema podrán explicar.

SUMARIO Y CONCLUSIONES

Se pueden calcular con bastante exactitud los transportes de momento angular hacia volúmenes cilíndricos ubicados en diferentes posiciones respecto al huracán en movimiento, aunque falten datos dentro de un radio de 2° de latitud del ojo del huracán. Los cálculos para varios tamaños de cilindros

positive transport of local angular momentum is found 2° latitude ahead of the eye and the maximum negative transport is found 4° latitude behind it. Once again there is a positive transport of angular momentum into the cylinder centered at the eye of the hurricane.

Calculations using larger and smaller cylinders confirm that, as the cylinder size is increased, the centers of positive and negative angular momentum transport move farther apart along the line of hurricane motion, with the maximum positive transport always located closer to the eye of the hurricane than the maximum negative transport. In every case there is a positive transport of angular momentum into the cylinder centered at the eye.

Figs 5a and 5b show the contributions of horizontal exchange processes and vertical circulations, respectively, to the total transport of angular momentum into the cylinders with radii 3° latitude. Figs. 6a and 6b give the results of similar calculations for the cylinders with radii 4° latitude. In both of these cases, and in the case of larger and smaller cylinders (not shown here), the angular momentum transports due to horizontal exchange processes are of greater magnitude than those due to vertical circulations, and the pattern of the horizontal-eddy transports correlates well with that of the total transports. Figs. 7a and 7b show how the streamline pattern in the middle troposphere is organized to accomplish the required transports of angular momentum. In the cylinder located ahead of the hurricane, cyclonic motion about the axis of the cylinder is present at both inflow and outflow points; but because the velocity is greater at inflow points the result is a net inward transport of angular momentum. In the cylinder located behind the hurricane, cyclonic motion about the axis of the cylinder is found at outflow points and anticyclonic motion is found at inflow points, thus leading to a net outward transport of angular momentum from this volume.

As noted earlier, the "steering" of a circular vortex by a uniform current would result in positive and negative eddy transports of angular momentum into cylinders located ahead of and behind the center of the vortex, respectively. However, this phenomenon cannot account for positive eddy fluxes of angular momentum into cylinders of various sizes centered at the eye of the hurricane, or for the fact that the maximum negative fluxes of angular momentum are found in cylinders which lie farther from the eye of the hurricane than the ones in which the maximum positive fluxes are found. Such asymmetries must be the reflection of a more complex mechanism of hurricane motion which future theoretical treatments of the problem will have to explain.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

Transports of local angular momentum into cylindrical volumes located in different positions relative to the moving hurricane can be computed with reasonable accuracy, even when the data within a radius of 2° latitude from the hurricane eye are missing. Computations for various cylinder

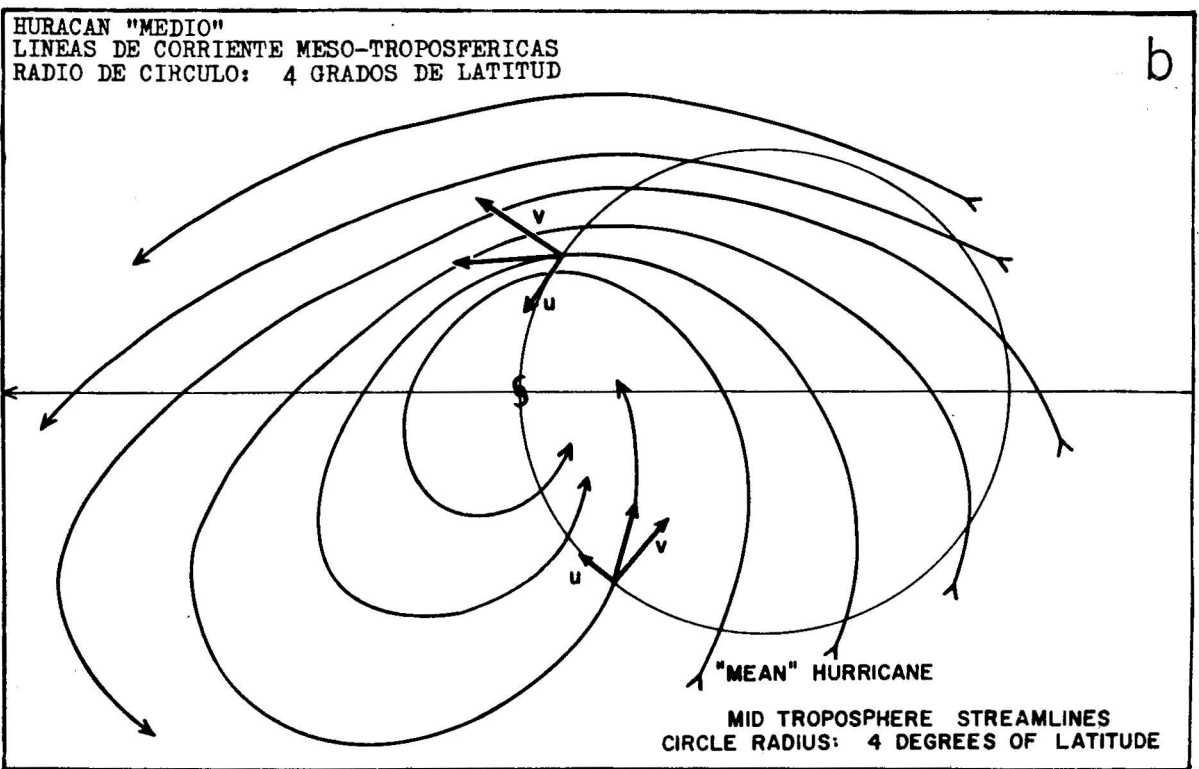
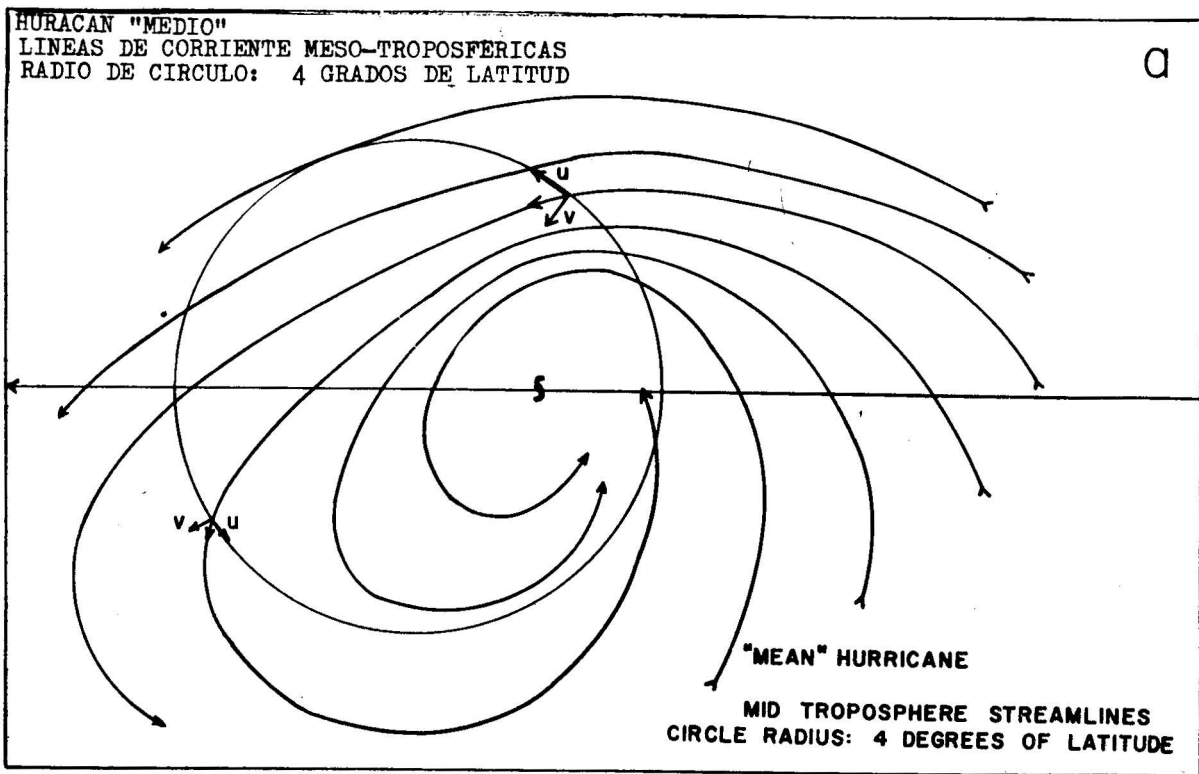


Fig. 7—Configuración de líneas de corriente en la tropósfera media mostrando cómo se organizan los movimientos de la atmósfera para transportar momento angular
a. hacia un cilindro ubicado por delante del ojo
b. hacia un cilindro ubicado por detrás del ojo

Fig. 7—Streamline pattern in the middle troposphere showing how the motions of the atmosphere are organized to transport angular momentum
a. into a cylinder located in advance of the eye
b. into a cylinder located to the rear of the eye

muestran que los transportes se hacen principalmente por procesos horizontales de cambio y que la dirección instantánea del movimiento del huracán maduro sigue la línea que conecta los centros de transportes de momento angular horizontales positivos y negativos por vórtices (con sentido de valores negativos a positivos). Los cilindros en que se encuentran transportes positivos máximos se sitúan más cerca del ojo del huracán que aquéllos en que existen transportes negativos máximos. También hay un transporte positivo de momento angular por procesos horizontales de cambio hacia cilindros centrados en el ojo, cuya magnitud aumenta a medida que aumenta el tamaño del cilindro dentro de la escala de tamaños considerada en esta investigación. Las asimetrías observadas no pueden explicarse por la "acción guiadora" de un vórtice circular en una corriente uniforme, pues deben ser el reflejo de un mecanismo más complejo del movimiento del huracán.

De vez en cuando se propondrán modelos teóricos que intenten explicar el mecanismo del movimiento y desarrollo de huracán y será necesario tener criterios para juzgar la validez de las conclusiones alcanzadas en base a dichas teorías. A pesar de cualquier otra consideración, puede establecerse que si el modelo satisface los principios de conservación de masa, momento y energía *en la misma forma que lo hace la atmósfera*, representa entonces una explicación válida de su comportamiento. La tarea de probarlo descansa en estudios en que se haga un esfuerzo para determinar cuantitativamente los procesos físicos que tienen lugar en la atmósfera. Esta investigación es un intento en tal dirección, pero debido a limitaciones de datos, debe considerarse como una primera y cruda ojeada al mecanismo del movimiento de huracanes. Si los resultados de este estudio se confirman por futuros cálculos que usen datos más completos y más exactos, servirán como prueba de la validez de teorías propuestas para movimientos de huracanes. Cualquier teoría del movimiento de un huracán, para poder considerarse válida, deberá explicar las asimetrías observadas en el campo de transportes de momento angular alrededor del huracán.

AGRADECIMIENTOS:

Esta investigación fue iniciada hace varios años cuando el autor estaba afiliado a la Dirección de Investigaciones Geofísicas y al Instituto Tecnológico de Massachusetts y se completó recientemente en el Observatorio Geológico Lamont. El autor agradece al Proyecto Nacional de Investigación de Huracanes, al Proyecto de Investigación de Huracanes del I.T.M. y a la Oficina de Investigación Naval su apoyo para este trabajo. En las etapas iniciales de la investigación se obtuvo un considerable beneficio por las discusiones con el Profesor V. P. Starr.

BIBLIOGRAFIA

- HUGHES, L. A. 1952. On the Low-Level Wind Structure of Tropical Storms. *Jour. Meteorology*, 9:422-428.
 JEFFREYS, H. 1926. On the Dynamics of Geostrophic Winds. *Quart. Jour. Royal Met. Soc.*, 52:85-104.

sizes show that the transports are accomplished mainly by horizontal exchange processes and that the instantaneous direction of motion of the mature hurricane is along the line connecting the centers of positive and negative horizontal eddy transports of angular momentum (the sense being from negative toward positive values). The cylinders in which the maximum positive transports are found lie closer to the eye of the hurricane than those in which the maximum negative transports are found. There is also a positive transport of angular momentum by horizontal exchange processes into cylinders centered at the eye, the magnitude of which increases with increasing cylinder size within the range of sizes considered in this investigation. The observed asymmetries cannot be accounted for by the "steering" of a circular vortex in a uniform current, but must be the reflection of a more complex mechanism of hurricane motion.

From time to time theoretical models will be proposed which attempt to explain the mechanism of hurricane development and motion. It will be necessary to find criteria by which to judge the validity of the conclusions reached on the basis of such theories. Regardless of any other considerations, it may be stated that if the model satisfies the principles of conservation of mass, momentum and energy *in the same way that the atmosphere does*, then it constitutes a valid explanation of the behavior of the atmosphere. The burden of proof thus rests on studies in which an effort is made to determine, quantitatively, the physical processes which take place in the atmosphere. The present investigation is an attempt in this direction. Owing to the limitations of the data, it must be regarded merely as a crude first look at the mechanism of hurricane motion. If the results of this study are confirmed by future computations using more accurate and more complete data, they will serve as one test of the validity of proposed theories of hurricane motion. Any theory of hurricane motion, in order to be considered valid, should be able to account for the observed asymmetries in the field of angular momentum transports around the hurricane.

ACKNOWLEDGEMENTS:

This research was begun several years ago while the author was affiliated with the Geophysics Research Directorate and with the Massachusetts Institute of Technology, and was completed recently at the Lamont Geological Observatory. The author is grateful to the National Hurricane Research Project, the M.I.T. Hurricane Research Project and the Office of Naval Research for supporting this work. Considerable benefit was derived from discussions with Professor V. P. Starr in the early stages of this investigation.

BIBLIOGRAPHY

- JORDAN, E. S. 1952. An Observational Study of the Upper Wind-Circulation Around Tropical Storms. *Jour. Meteorology*, 9:340-346.
- LORENZ, E. N. 1953. Displacement and Intensification Associated with Variations of Local Angular Momentum. *Geophys. Res. Papers* (Geophysics Research Directorate, U. S. Air Force), No. 24, pp. 19-25.
- PFEFFER, R. L. 1958a. Concerning the Mechanics of Hurricanes. *Jour. Meteorology*, 15(1):113-120.
- 1958b. Further Study of the Balance of Angular Momentum in the Mature Hurricane. Scientific Report (National Hurricane Research Project), No. 19, July.
- PFEFFER, R. L. & B. SALTZMAN. 1955. Angular Momentum as a Parameter in the Investigation of Cyclone-Scale Circulations. *Jour. Meteorology*, 12(5):500-507.
- SALTZMAN, B. 1955. Note on Simple Assumptions Regarding the Baroclinic Structure of the Atmosphere. *Tellus*, 7:385-387.
- STARR, V. P. 1948. An Essay on the General Circulation of the Earth's Atmosphere. *Jour. Meteorology*, 5:39-43.
- 1953. Some Aspects of the Dynamics of Cyclones. *Geophys. Res. Papers*. (Geophysics Research Directorate, U. S. Air Force), No. 24, pp. 9-17.
- STARR, V. P. & R. WHITE. 1954. Balance Requirements of the General Circulation. *Geophys. Res. Papers*. (Geophysics Research Directorate, U. S. Air Force), No. 35, pp. 1-57.