

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

ESFUERZOS DE VORTICES EN EL HURACAN DONNA (1960) SOBRE LONG ISLAND *

LESTER A. COHEN ** y JEROME SPAR **

INTRODUCCION

Son raras las oportunidades para estudiar la estructura del viento en la capa de frontera superficial de un huracán y una de ellas fue dada por el Huracán Donna, que pasó sobre Long Island, Nueva York, el 12 de Septiembre de 1960 en la cercanía de la torre meteorológica de 420-pies del Laboratorio Nacional de Brookhaven (LNB) (Singer, Nagle y Brown, 1961).

Por un período de seis horas, 1100-1700 TSE, el Grupo Meteorológico del LNB operó su sistema de recolección de datos de alta velocidad al pasar la tormenta para obtener velocidades de viento horizontal y vertical digitizadas de veletas aéreas y dobles a niveles de 75, 150 y 300 pies sobre el terreno. Los datos se registraron en intervalos de 3-segundos.

En este trabajo intentamos calcular los esfuerzos vertical y horizontal de vórtices en la capa de frontera superficial de Donna por el método de Reynolds, es decir, por las covariancias de las componentes de viento de 3-segundos. Dividiendo los datos en intervalos de 10-minutos, hemos construido un cuadro de la distribución de esfuerzos en la tormenta. Finalmente, tratamos de valorar los coeficientes de cambio y arrastre en Brookhaven en la capa superficial de Donna.

SITUACION SINOPTICA

El centro de Donna, según lo determinaron observaciones de radar en Nantucket, Mass., pasó al oeste del LNB casi a las 1400 TSE el 12 de Septiembre de 1960, viajando al nor-

* Contribución Núm. 12 del Laboratorio de Ciencias Geofísicas, Departamento de Meteorología y Oceanografía, Universidad de Nueva York. Este estudio fue hecho posible con el apoyo de la National Science Foundation bajo Subsidio NSF-G 16837.

** Universidad de Nueva York.

EDDY STRESSES IN HURRICANE DONNA (1960) OVER LONG ISLAND *

LESTER A. COHEN ** and JEROME SPAR **

INTRODUCTION

Opportunities to study the wind structure in the surface boundary layer of a hurricane are rare. One of these rare opportunities was provided by Hurricane Donna which passed over Long Island, New York, on September 12, 1960 in the vicinity of the 420-foot meteorological tower of the Brookhaven National Laboratory (BNL) (Singer, Nagle, and Brown, 1961).

For a period of six hours, 1100-1700 EST, during passage of the storm the Meteorology Group at BNL operated its data collection system at high speed to obtain digitized horizontal and vertical wind velocities from aerovanes and bivanes at the 75, 150, and 300 foot levels above the ground. The data were recorded at 3-second intervals.

In this paper we have attempted to compute the vertical and horizontal eddy stresses in the surface boundary layer of Donna by Reynold's method, i.e., from the covariances of the 3-second wind components. By dividing the data into 10-minute intervals we have constructed a picture of the distribution of stress in the storm. Finally we have tried to evaluate the exchange and drag coefficients at Brookhaven in the surface layer of Donna.

SYNOPTIC SITUATION

The center of Donna, as determined by radar observations from Nantucket, Mass., passed to the west of BNL about 1400 EST on 12 September 1960, traveling northeastward

* Contribution No. 12 of the Geophysical Science Laboratory, Department of Meteorology and Oceanography, New York University. This study was made possible through the support of the National Science Foundation under Grant NSF-G 16837.

** New York University.

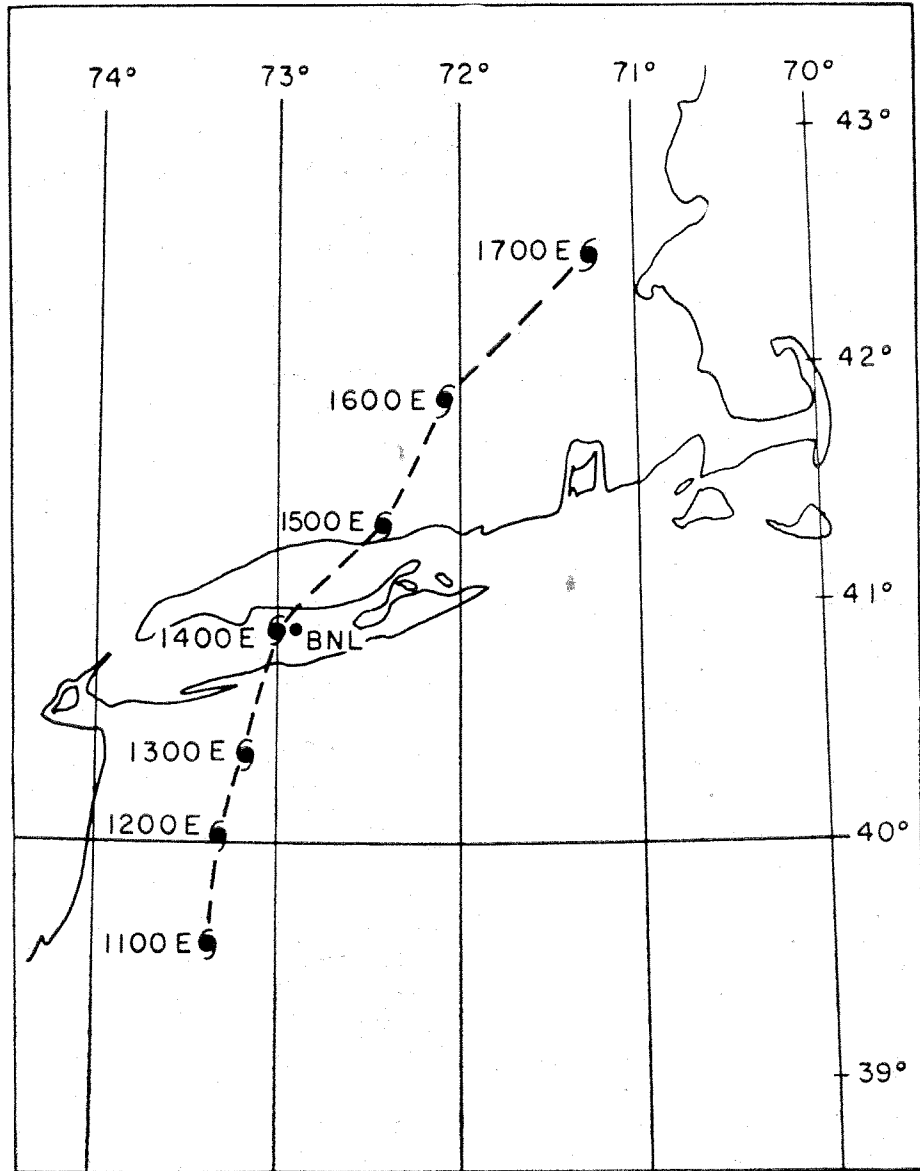


Fig. 1. Ruta del ojo de radar del huracán Donna (Sept. 12, 1960) determinado por fijas de radar desde la Isla de Nantucket.

Fig. 1. Track of radar eye of hurricane Donna (12 September 1960) as determined by radar fixes from Nantucket Island.

este con velocidad de unos 35 nudos (Fig. 1). El ojo de la tormenta era notablemente grande, de 50-100 millas en diámetro, según algunos informes (McGuire, 1960) y se alargó en un eje noreste-suroeste al pasar sobre Long Island.

El campo de viento de superficie en la tormenta se muestra en la Fig. 2, como resumen del análisis compuesto de todas las observaciones de superficie disponibles sobre el centro del huracán para el período 1100-1700 TSE. La tormenta era claramente asimétrica, con los vientos más fuertes en el lado derecho de su ruta y ojo alargado. Los mismos rasgos son evidentes en mapas isobáricos horarios a nivel del mar, especialmente uno a las 1500 TSE (Fig. 3). La ruta de Donna era tal que Brookhaven no tuvo siquiera los más ligeros vientos en el ojo ni los más fuertes en la tormenta.

at a speed of about 35 knots (Fig. 1). The eye of the storm was unusually large, 50-100 miles in diameter according to some reports (McGuire, 1960), and became elongated along a northeast-southwest axis during passage over Long Island.

The surface wind field in the storm, as synthesized from a composite analysis of all available surface observations relative to the hurricane center for the period 1100-1700 EST, is shown in Fig. 2. The storm was clearly asymmetric, with strongest winds on the right side of the track and an elongated eye. The same features are also evident in the hourly sea-level isobaric maps especially the one for 1500 EST (Fig. 3). The path of Donna was such that Brookhaven experienced neither the lightest winds in the eye nor the strongest winds in the storm.

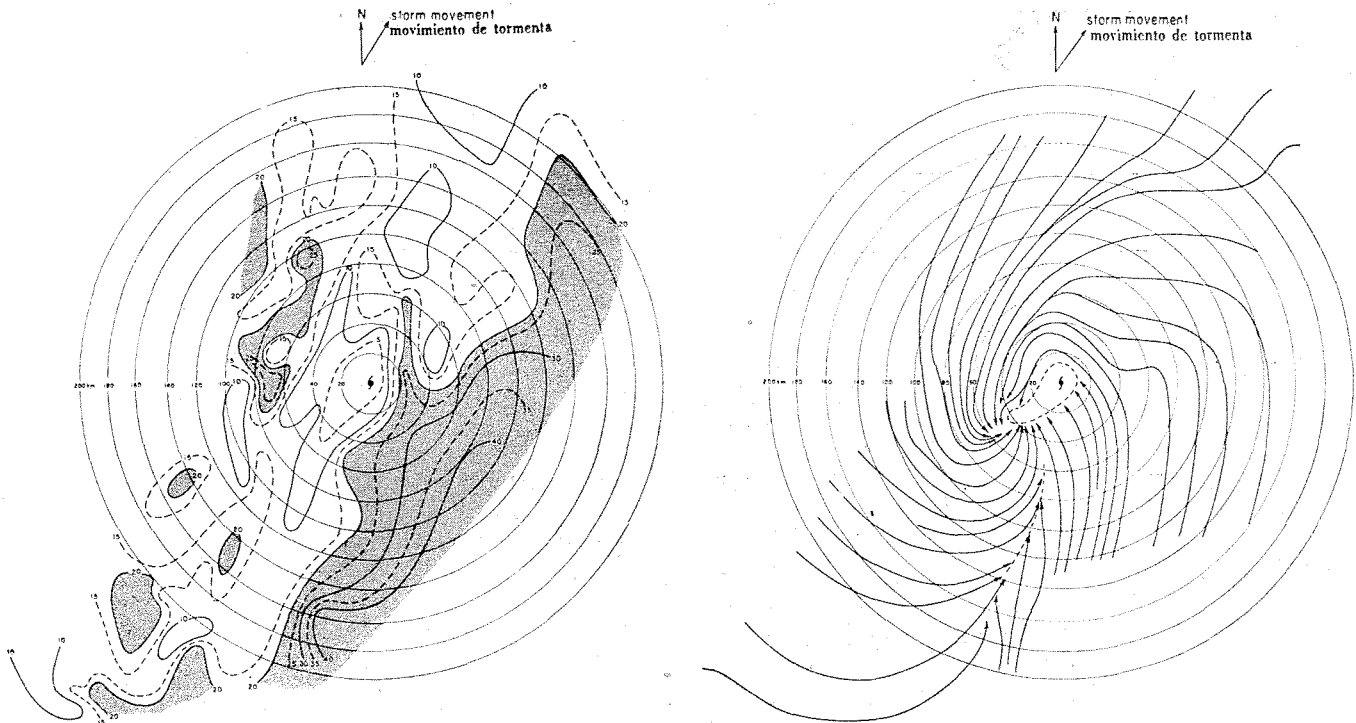


Fig. 2. Isotaca superficial compuesta y análisis de flujo de circulación para Donna, 1100-1700 TSE, 12 de Septiembre 1960. Las velocidades de viento están en metros por segundo. El sombreado indica vientos mayores de 20 m seg⁻¹.

Fig. 2. Composite surface isotach and streamflow analysis for Donna, 1100-1700 EST, 12 September 1960. Wind speeds are in meters per second. Shading indicates winds greater than 20 m sec⁻¹.

CALCULOS DE DATOS DE VIENTO Y ESFUERZO

Los datos básicos de viento registrados para cada nivel en la torre del LNB fueron: velocidad horizontal, ángulo azimutal y ángulo de doble capota (Singer y Nagle, 1962). Con dichos datos se calcularon dos componentes horizontales de viento ortogonales y la componente vertical de viento con intervalos de 3-segundos.

El registro de seis horas fue dividido en intervalos de 10-minutos y la dirección media del viento calculada para cada intervalo y para cada nivel instrumental. Entonces se determinaron las componentes de vectores de viento horizontal de 3-segundos a lo largo y perpendicularmente a la dirección del viento medio de 10-minutos. Se denominará componente viento abajo (d) a la primera y componente transviento (c) a la segunda.

La componente media transviento (c) de 10-minutos es casi cero, separándose ligeramente del cero por el uso de una dirección media del viento algebraica más que un vector. Así, la componente media viento abajo (d) de 10-minutos representa esencialmente la velocidad media del viento. La variación de dicha velocidad en los niveles de 75, 150 y 300 pies en la torre del LNB durante el período de registro de seis horas se muestra en la Fig. 4. El primer máximo de viento, que ocurrió cerca de doce horas antes de pasar el ojo, fue seguido por calma y luego por casi cinco horas de fuerte

WIND DATA AND STRESS COMPUTATIONS

The basic wind data recorded for each level on the tower at BNL are: horizontal speed, azimuth angle, and bivan angle (Singer and Nagle, 1962). From these data two orthogonal horizontal wind components and the vertical wind component were computed at 3-second intervals.

The six-hour record was divided into 10-minute intervals, and the mean wind direction was computed for each interval and for each instrument level. The components of the 3-second horizontal wind vectors were then determined along and normal to the direction of the 10-minute mean wind. The former is referred to as the downwind (d) component, and the latter as the crosswind (c) component.

The 10-minute mean crosswind component (\bar{c}) is almost zero, the slight departure from zero being due to the use of an algebraic rather than a vector mean wind direction. The 10-minute mean downwind component (\bar{d}) is thus essentially the mean wind speed. The variation of 10-minute mean wind speed at the 75, 150, and 300 foot levels on the BNL tower during the six-hour recording period is shown in Fig. 4. The first wind maximum, which occurred about twelve hours before the eye passage, was followed by a lull and then by about five hours of sustained high

viento sostenido. El mayor empuje de 3-segundos a 75 pies en el período máximo de viento fue 35 m seg^{-1} y el menor del mismo en el "período del ojo" de 3 m seg^{-1} .

Las direcciones medias del viento de 10-minutos fueron

wind. The highest 3-second gust at 75 feet in the peak wind period was 35 m sec^{-1} , and the lowest 3-second wind in the "eye period" at that level was 3 m sec^{-1} .

The 10-minute mean wind directions were almost identic-

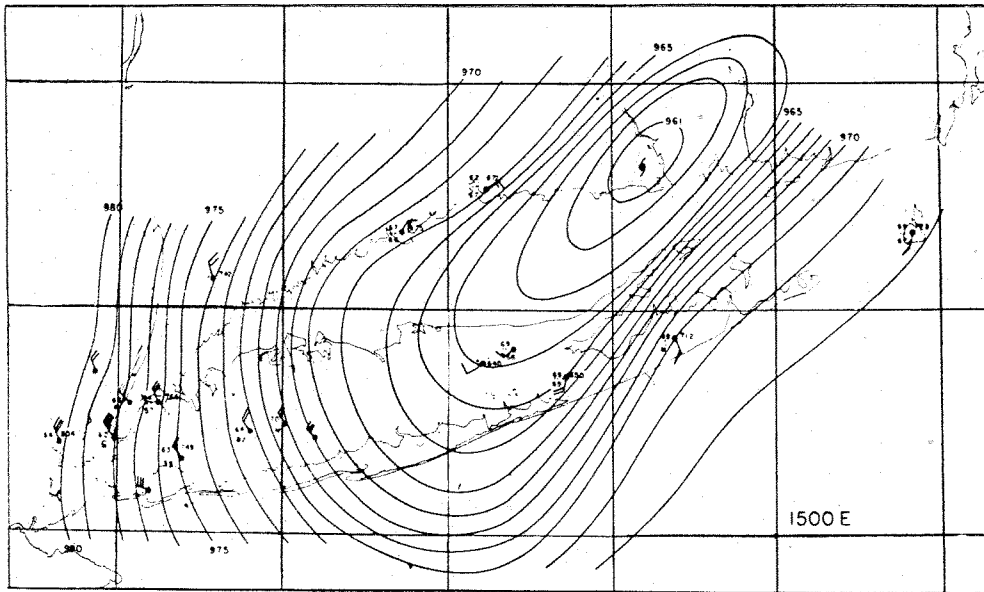


Fig. 3. 1500 TSE, Septiembre 12, 1960, isobaras de 1 mm.

Fig. 3. 1500 EST, 12 September 1960, 1 mb isobars.

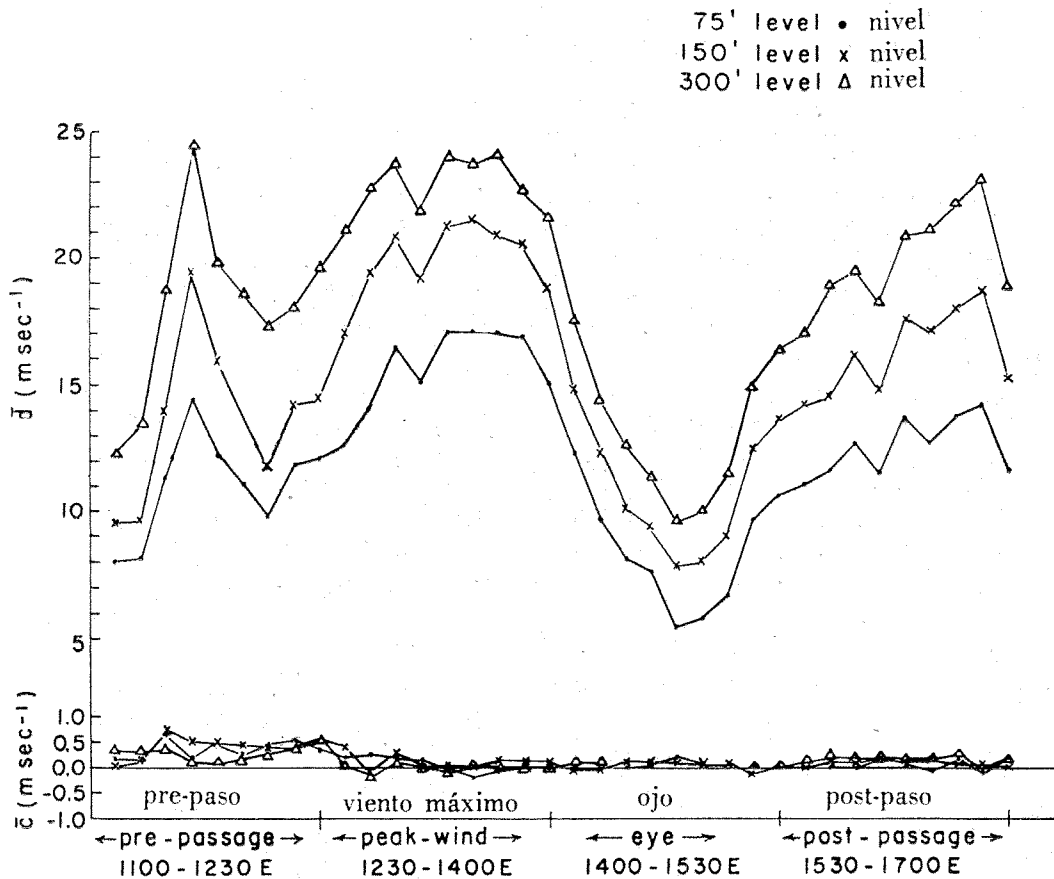


Fig. 4. Velocidades medias de viento de 10-minutos (m seg^{-1}) a 75, 150 y 300 pies en el LNB en Donna.

Fig. 4. 10-minute mean wind speeds (m sec^{-1}) at 75, 150, and 300 feet at BNL in Donna (1960).

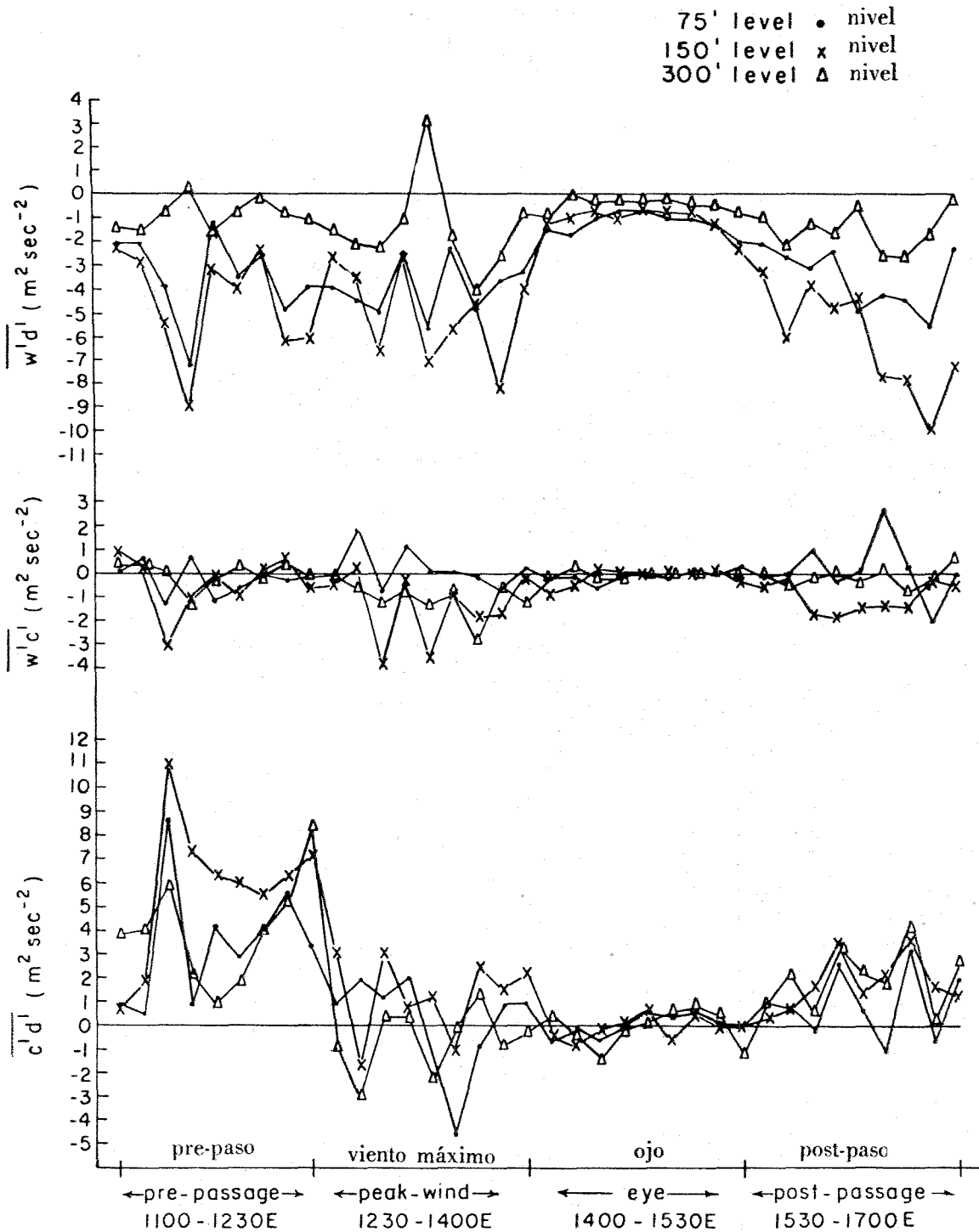


Fig. 5. Covariancias de velocidad a 75, 150 y 300 pies en el LNB en Donna.

Fig. 5. Velocity covariances at 75, 150, and 300 feet at BNL in Donna (1960).

casi idénticas en los niveles de 75 y 150 pies durante el período de registro de 6-horas. Sin embargo, en el nivel de 300 pies, la dirección registrada del viento indicó un *retardo* del viento con la altura. Se cree que este sistemático retardo de 20-grados entre 150 y 300 pies representa un error de alineamiento con la veleta aérea a 300 pies.

Los esfuerzos tangenciales de vórtice pudieron calcularse

al at the 75 and 150 foot levels during the 6-hour recording period. At the 300 foot level, however, the recorded wind direction indicated a *backing* of wind with height. It is believed that this systematic 20-degree backing from 150 to 300 feet represents an alignment error of the 300 foot aerovane.

The tangential eddy stresses may be computed from the

por covariancias de velocidad. Así, si x , y , y z denotan las direcciones viento abajo, transviento y vertical

$$\tau_{zx} = -\rho \overline{d'w'}, \quad \tau_{zy} = -\rho \overline{c'w'}, \quad \tau_{xy} = -\rho \overline{c'd'}, \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del aire, w indica velocidad vertical, las primas desviaciones de los vientos de 3-segundos de las medias de 10-minutos y una barra el promedio sobre intervalo de 10-minutos.

Convencionalmente w , d y c son positivas hacia arriba, viento abajo y a la derecha (frente al segundo), respectivamente. Por ello, los valores de esfuerzo vertical de vórtice que corresponden a valores negativos de flujo de momento de vórtice y negativos de covariancias $d'w'$ y $c'w'$ indican flujo de momento hacia abajo. Los valores negativos de esfuerzo horizontal de vórtice o positivos de covariancia $c'd'$ representan flujo de momento a la derecha del viento medio. Usualmente puede pensarse que en un ciclón existe flujo de momento hacia afuera del centro.

Las covariancias de velocidad se muestran en la Fig. 5. La porción superior de la figura, que representa el flujo vertical de vórtice de momento de viento abajo, muestra que el esfuerzo de vórtice a 75 y 100 pies es consistentemente positivo (covariancia negativa) y de magnitud aproximadamente igual en ambos niveles. El valor medio de la covariancia en el período de viento máximo es $-4.5 \text{ m}^2 \text{ seg}^{-2}$ correspondiente a un esfuerzo de casi $+55 \text{ dinas cm}^{-2}$. Como se espera, el esfuerzo disminuye hasta valor muy bajo en el ojo, pero sube de nuevo con el aumento de velocidad del viento. El esfuerzo a nivel de 300 pies es consistentemente menor que a niveles más bajos, indicando que ese nivel está cerca de la cima de la capa de frontera superficial. Sin embargo, aún a 300 pies, el esfuerzo vertical de vórtice es positivo con sólo dos excepciones. La porción media de la figura muestra que el flujo hacia abajo del momento de transviento es casi cero en todo nivel, como se esperaría, ya que hay poca o ninguna reversión del viento medio con la altura en la capa de la torre.

El esfuerzo horizontal de vórtice está representado por la covariancia $c'd'$ en la parte inferior de la Fig. 5, no pareciendo que haya diferencias sistemáticas entre esfuerzos horizontales en los tres niveles. Durante el período del ojo, que incluye los períodos de vientos rápidos ascendentes y descendentes (¿pared del ojo?), el flujo de momento horizontal es casi cero en todos los niveles, con covariancia media de $-0.1 \text{ m}^2 \text{ seg}^{-2}$. En los períodos de viento máximo se registraron mayores fluctuaciones de covariancias, a pesar de lo cual el valor medio de la covariancia horizontal ($+0.2 \text{ m}^2 \text{ seg}^{-2}$) en este período es también de aproximadamente cero. En el período de pre-paso, por otra parte, mientras el centro de la tormenta estaba aún sobre el agua, las covariancias eran consistentemente positivas a todo nivel, indicando flujo de momento de vórtice hacia afuera del ciclón. El valor medio de covariancias en los tres niveles en este período era de $+4.4 \text{ m}^2 \text{ seg}^{-2}$ correspondiente a un

velocity covariances. Thus, if x , y , and z denote the downwind, crosswind, and vertical directions,

where ρ is the air density, w denotes vertical velocity, the primes denote variations of the 3-second winds from the 10-minute means, and a bar indicates averaging over the 10-minute interval.

By convention w , d , and c are positive upward, downwind, and to the right (facing downwind) respectively. Thus positive values of vertical eddy stress, which correspond to negative values of eddy momentum flux, and negative values of the covariances $d'w'$ and $c'w'$, signify downward momentum flux. Negative values of the horizontal eddy stress, or positive values of the covariance $c'd'$, represent momentum flux to the right of the mean wind. In a cyclone this may usually be thought of as a momentum flux outward from the center.

The velocity covariances are shown in Fig. 5. The upper portion of the figure, which represents the vertical eddy flux of downwind momentum, shows that at 75 and 150 feet the eddy stress is consistently positive (covariance is negative) and of approximately the same magnitude at both levels. The mean value of the covariance in the peak wind period is $-4.5 \text{ m}^2 \text{ sec}^{-2}$ corresponding to a stress of about $+55 \text{ dynes cm}^{-2}$. As expected the stress decreases to a very low value in the eye, then rises again with the increase of wind speed. The stress at the 300 foot level is consistently smaller than at the lower levels, indicating that this level lies close to the top of the surface boundary layer. Even at 300 feet, however, the vertical eddy stress is positive with only two exceptions. The middle portion of the figure shows that the downward flux of crosswind momentum is nearly zero at all levels as would be expected from the fact that there is little or no turning of the mean wind with height in the tower layer.

The horizontal eddy stress is represented by the covariance $c'd'$ in the lower part of Fig. 5. There appear to be no systematic differences between the horizontal stresses at the three levels. During the eye period, which includes the periods of rapidly falling and rising wind (the eye wall?), the horizontal momentum flux is nearly zero at all levels, with a mean covariance of $-0.1 \text{ m}^2 \text{ sec}^{-2}$. In the peak wind period larger fluctuations of the covariances were recorded; however, the mean value of the horizontal covariance ($+0.2 \text{ m}^2 \text{ sec}^{-2}$) in this period is also approximately zero. In the pre-passage period, on the other hand, while the storm center was still over water, the covariances were consistently positive at all levels, indicating eddy momentum flux outward from the cyclone. The mean value of the covariance at the three levels in this period was $+4.4 \text{ m}^2 \text{ sec}^{-2}$ corresponding to a horizontal eddy stress of about $-55 \text{ dynes cm}^{-2}$ (In the period

esfuerzo horizontal de vórtice de casi -55 dina cm^{-2} (En el período que siguió al paso del ojo el valor medio de la covariancia fue de $+1.5 \text{ m}^2 \text{ seg}^{-2}$, que representan un esfuerzo de aproximadamente $-20 \text{ dinas cm}^{-2}$ y también un flujo de momento hacia afuera). Los esfuerzos horizontal y vertical de vórtice en la capa de frontera superficial del huracán son casi de la misma magnitud. Sin embargo, parece que no hay o hay poco cambio de momento entre el ojo de la tormenta y los altos remolinos de vientos alrededor del ojo.

following passage of the eye the mean value of the covariance was $+1.5 \text{ m}^2 \text{ sec}^{-2}$, which represents a stress of approximately $-20 \text{ dynes cm}^{-2}$ and again an outward momentum flux). The horizontal and vertical eddy stresses in the surface boundary layer of the hurricane are thus seen to be of the same magnitude. However, there appears to be little or no horizontal exchange of momentum between the eye of the storm and the high winds whirling about the eye.

COEFICIENTES DE INTERCAMBIO VERTICAL Y ARRASTRE

VERTICAL EXCHANGE AND DRAG COEFFICIENTS

Los esfuerzos verticales de vórtice en los niveles de 75 y 150 pies también se calcularon con perfiles medios de viento a base de la teoría de longitud de mezcla (La proporción de lapso en este período era casi adiabática seca en la capa de la torre. Además, los perfiles medios de viento entre 37 pies para los cuales existía un registro de carta y 300 pies eran aproximadamente logarítmicos durante la tormenta). Aunque correlacionados positivamente en ambos niveles, los esfuerzos de Reynolds medidos y los calculados con perfil de viento coincidieron mejor en 75 pies que en 150 pies, con coeficientes de correlación de $+0.86$ y $+0.40$, respectivamente.

Vertical eddy stresses at the 75 and 150 foot levels were also computed from the mean wind profiles on the basis of mixing length theory (The lapse rate in this period was nearly dry adiabatic in the tower layer. Furthermore the mean wind profiles between 37 feet, for which a chart record was available, and 300 feet were approximately logarithmic during the storm). Although positively correlated at both levels, the measured Reynolds stress and the stress computed from the wind profile agreed better at 75 feet than at 150 feet, with correlation coefficients of $+0.86$ and $+0.40$ respectively.

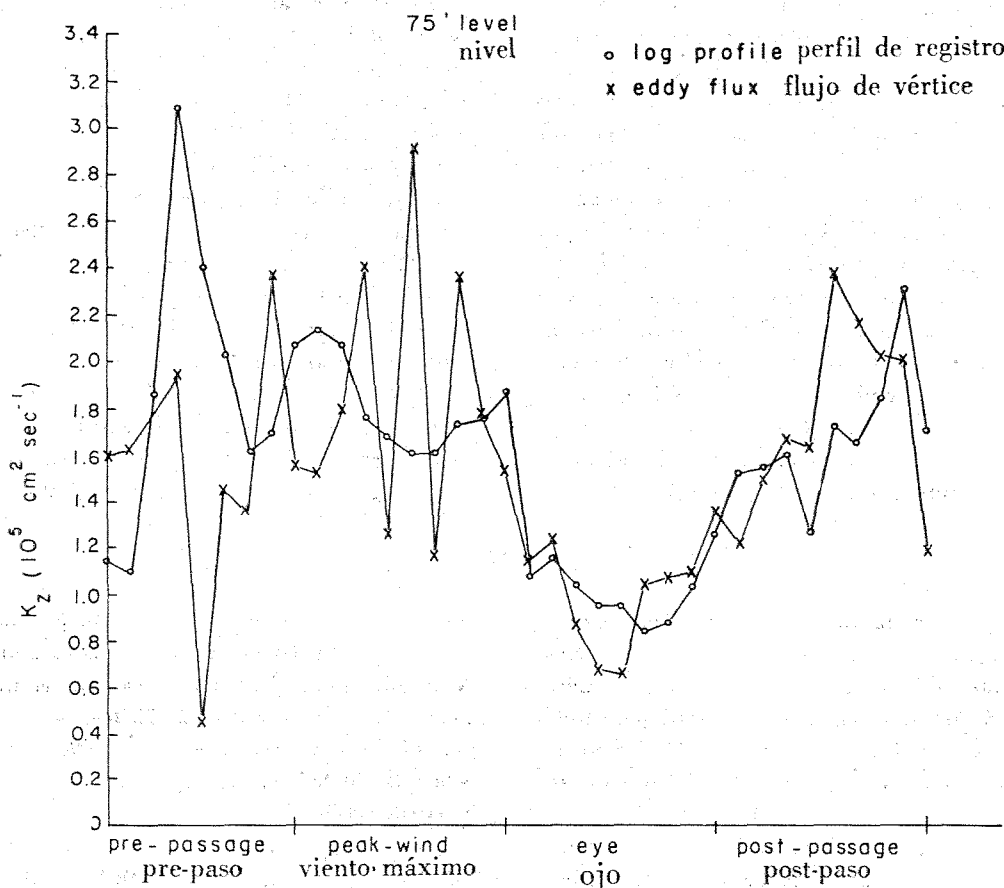


Fig. 6. Coeficientes de intercambio vertical en Donna en el LNB a 75 pies calculados por mediciones de esfuerzos de vórtice y perfiles logarítmicos de viento.

Fig. 6. Vertical exchange coefficients in Donna at 75 feet at BNL computed from eddy stress measurements and from the logarithmic wind profile.

El coeficiente de intercambio vertical (Austausch) K_z en el nivel de 75 pies fue calculado tanto por la teoría de longitud de mezcla como por los esfuerzos medidos de vórtice. Según la teoría de longitud de mezcla

$$K_z = k^2 \bar{d} (\ln z/z_0)^{-1} z \quad (2)$$

donde k es la constante de von Karman, z la altura del instrumento y z_0 el parámetro de aspereza. Según los esfuerzos de vórtice

$$K_z = -(\overline{w'd'}) \left(\frac{\partial \bar{d}}{\partial z}\right)^{-1} \quad (3)$$

La derivada en (3) se calculó con perfiles logarítmicos alisados de viento que se ajustaron a vientos medios de 10-minutos.

La Fig. 6 muestra las variaciones de K_z a 75 pies determinada por ambos métodos en la tormenta. Si hay algunas grandes discrepancias entre los dos valores K_z pueden correlacionarse positivamente (El coeficiente de correlación es + 0.38). El K_z calculado por el esfuerzo máximo resulta más errático. Sin embargo, es aparente que ambos valores de K_z varían en la tormenta por un factor de 2 a lo menos de un mínimo en el ojo a un máximo en la región de vientos altos. Ello está de acuerdo con el resultado de la teoría de longitud de mezcla ya que K_z es proporcional a la velocidad del viento a cualquier nivel en la capa de frontera superficial (El coeficiente de correlación entre la velocidad del viento y el K_z calculado por el esfuerzo de vórtice a 75 pies era de + 0.65). El promedio de valor K_z para el período de 6-horas, determinado por los esfuerzos, aumentó de $1.6 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ seg}^{-1}$ a 75 pies a $3.5 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ seg}^{-1}$ a 150 pies, de acuerdo con el resultado de la teoría de longitud de mezcla pues el coeficiente de intercambio en la capa de frontera superficial es proporcional a la altura sobre el terreno.

En general, el esfuerzo vertical se calcula por la velocidad del viento y un coeficiente de arrastre, C_d , usando la fórmula

$$\tau_{zx} = \rho \cdot C_d \cdot d^2, \quad (4)$$

donde C_d es una función de la altura y del parámetro de violencia. En Brookhaven C_d depende de la dirección del viento. Así, el coeficiente de correlación lineal entre el esfuerzo de vórtice y d^2 a 75 pies, que sólo fue de + 0.65 para todos los datos, aumentó a + 0.80, + 0.81 y + 0.94 cuando los datos se agruparon según las tres clases de dirección del viento.

El promedio de magnitud de C_d a 75 pies fue de 0.025. Claro es que se sabe que C_d aumenta hacia la superficie y que es casi un orden de magnitud más grande sobre tierra que sobre mar (Sin embargo, debe notarse que mientras el coeficiente de arrastre es mucho más pequeño sobre mar que sobre tierra, en un huracán el mismo esfuerzo es de igual orden de magnitud). Los datos apoyan la forma de relación

The vertical exchange (Austausch) coefficient, K_z at the 75 foot level was computed from both mixing length theory and the measured eddy stresses. From mixing length theory,

where k is von Karman's constant, z is the heights of the instrument, and z_0 is the roughness parameter. From the eddy stresses,

The derivative in (3) was evaluated from smoothed logarithmic wind profiles fitted to the 10-minute mean winds.

Figure 6 shows the variation of K_z at 75 feet in the storm as determined by the two methods. While there are some large discrepancies between the two values of K_z , they are positively correlated (The correlation coefficient is + 0.38). The K_z computed from the measured stress is the more erratic. Nevertheless it is apparent that both values of K_z vary by at least a factor of 2 in the storm from a minimum in the eye to a maximum in the high wind region. This is in agreement with the result from mixing length theory that K_z is proportional to the wind speed at any level in the surface boundary layer (The correlation coefficient between the wind speed and the K_z computed from the eddy stress at 75 feet was found to be + 0.65). The average value of K_z for the 6-hour period, as determined from the stresses, was found to increase from $1.6 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ at 75 feet to $3.5 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ at 150 feet, in agreement with the result from mixing length theory that the exchange coefficient in the surface boundary layer is proportional to the height above ground.

The vertical stress is often estimated from the wind speed and drag coefficient, C_d , by use of the formula

where C_d is a function of the height and the roughness parameter. At Brookhaven C_d was found to depend upon wind direction. Thus the linear correlation coefficient between eddy stress and d^2 at 75 feet, which was only + 0.65 for all the data, increased to + 0.80, + 0.81, and + 0.94 when the data were grouped according to three classes of wind direction.

The average magnitude of C_d at 75 feet was 0.025. Of course, it is well known that C_d increases toward the ground, and is about an order of magnitude larger over land than over sea (It is noteworthy, however, that while the drag coefficient is much smaller over sea than over land, the stress itself in a hurricane is of the same order of magnitude). The data support the form of the relation-

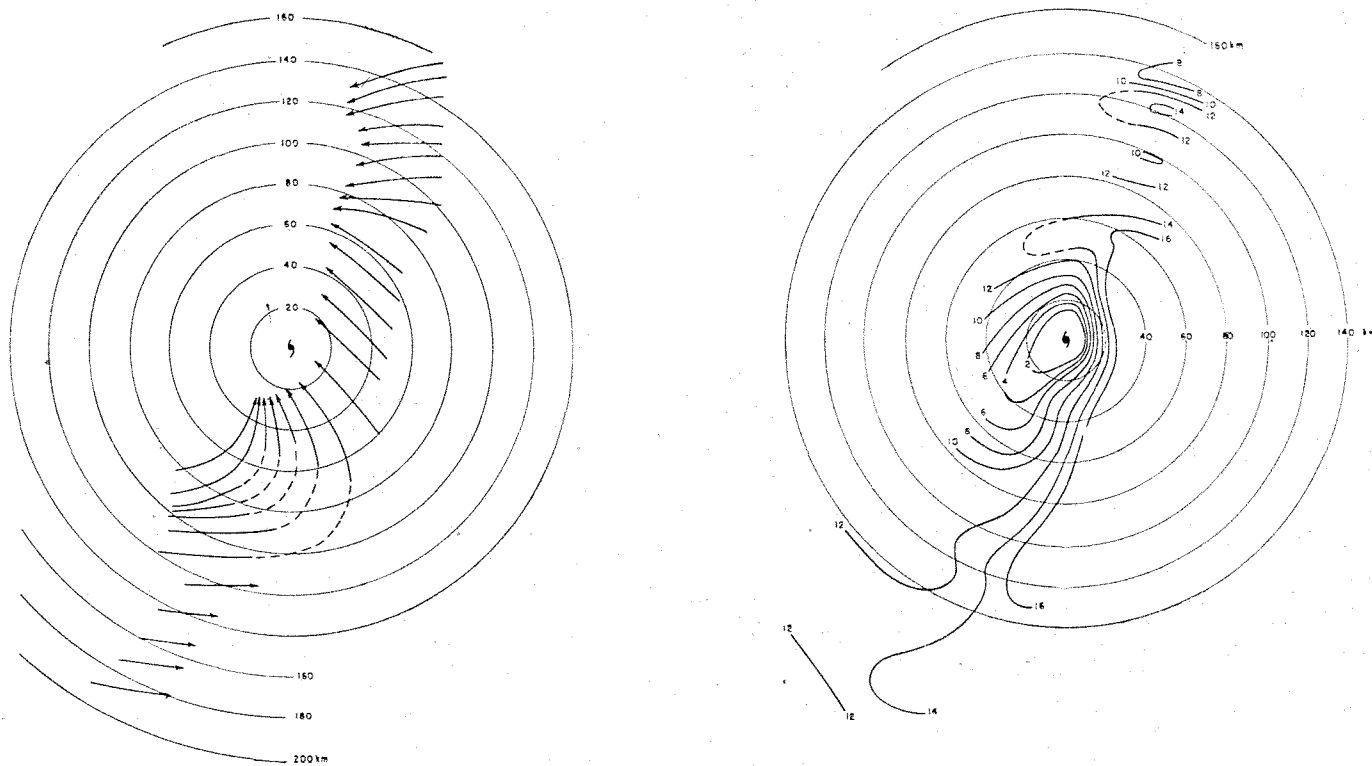


Fig. 7. Isotaca y flujo de corriente compuesta (m seg⁻¹) analizados en Donna (1960) con datos de 75-pies del LNB.

Fig. 7. Composite streamflow and isotach (m sec⁻¹) analysis in Donna (1960) from 75-foot BNL data.

entre la velocidad del viento y el esfuerzo sobre tierra en (4), pero no son relevantes en el problema de esta relación sobre mar.

ship between wind speed and stress given by (4) over land, but are, of course, not relevant to the problem of this relationship over the sea.

EL COEFICIENTE DE INTERCAMBIO HORIZONTAL

THE HORIZONTAL EXCHANGE COEFFICIENT

Por analogía con la viscosidad molecular, el esfuerzo horizontal de vórtice se expresa con coordenadas cilíndricas por

By analogy with molecular viscosity the horizontal eddy stress may be expressed in cylindrical coordinates by

$$\tau_{xy} = \rho K_H \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} + \frac{\partial u}{r \partial \theta} \right) \tag{5}$$

donde K_H es un coeficiente de intercambio horizontal (Austausch), v y u son las componentes de velocidad tangencial y radial y r y θ denotan la distancia radial y el azimut (Lamb, 1932).

where K_H is a horizontal exchange (Austausch) coefficient, v and u are the tangential and radial velocity components, and r and θ denote radial distance and azimuth (Lamb, 1932).

Se intentó estimar K_H por los esfuerzos horizontales de vórtice suponiendo que el huracán se encuentra en estado estacionario, que el término $\partial v/r \partial \theta$ es despreciable y que los gradientes de velocidad total del viento pueden substituirse por gradientes de velocidad tangencial. Con tales suposiciones

An attempt was made to estimate K_H from the horizontal eddy stresses on the assumptions that the hurricane is in a steady state, the term $\partial v/r \partial \theta$ is negligible, and gradients of total wind speed may be substituted for gradients of tangential speed. With these assumptions

$$K_H = - \overline{(c'd')} \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \right) \right]^{-1} \tag{6}$$

Fue construido un campo de viento compuesto a 75 pies trazando los promedios de viento de 10-minutos en Brook-

A composite 75-foot wind field was constructed by plotting the Brookhaven 10-minute mean winds relative to the

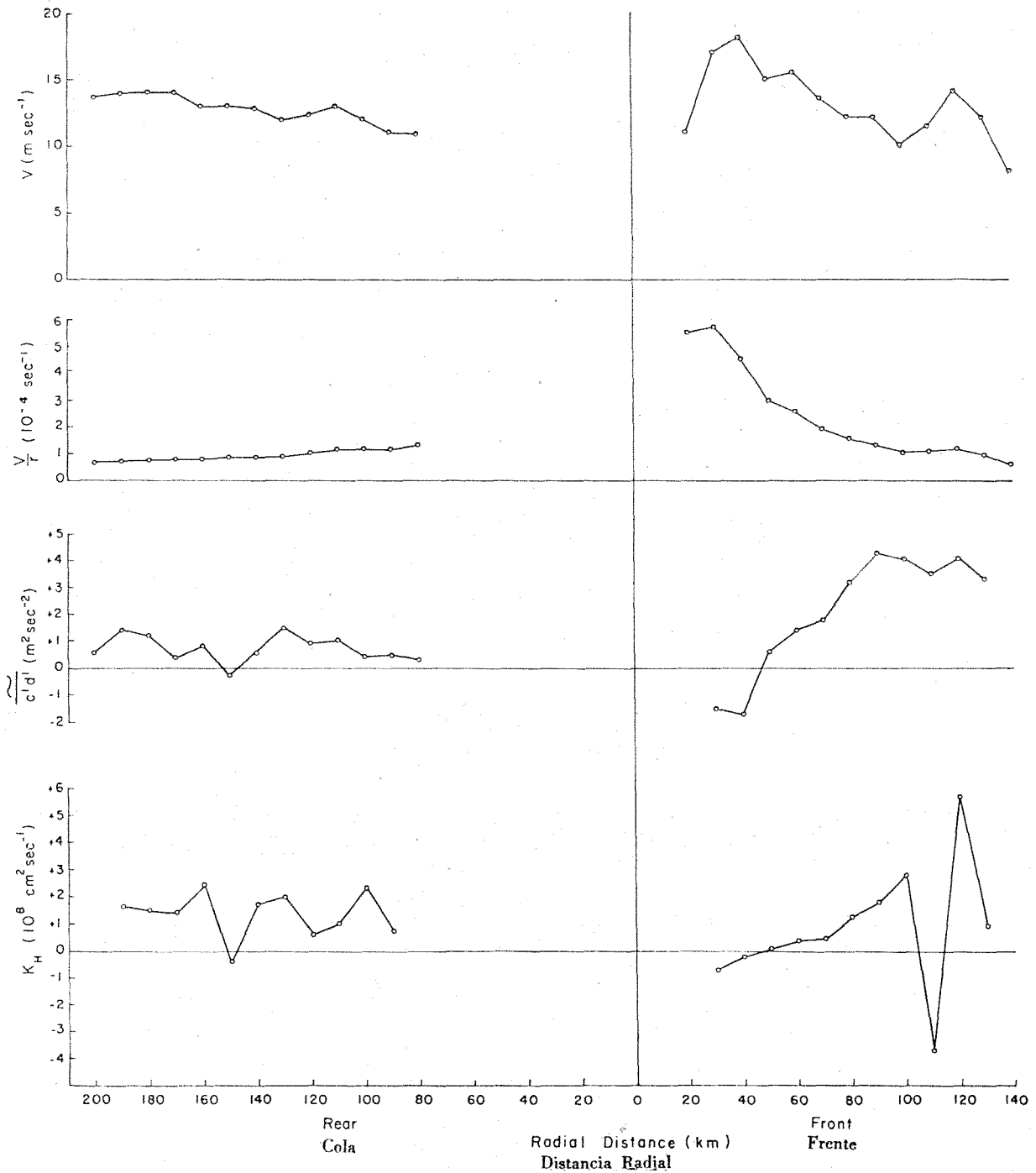


Fig. 8. Perfiles de radar de velocidad de viento, velocidad angular, esfuerzo horizontal de vórtice y coeficiente de intercambio horizontal en Donna calculados con datos del nivel de 75-pies en el LNB.

Fig. 8. Radial profiles of wind speed, angular velocity, horizontal eddy stress, and horizontal exchange coefficient in Donna computed from 75 foot level data at BNL.

haven con relación al centro del huracán para el período 1100-1700 TSE (Fig. 7). Se muestran los perfiles radiales de velocidad del viento y velocidad angular construidos con el mapa compuesto junto con perfiles alisados de $\overline{c'd'}$ y coeficientes de intercambio calculados en la Fig. 8. La tormenta se divide en porciones frontal y terminal y la región asimétrica del ojo se ha omitido de la figura.

De los 22 puntos en que se calculó K_H , 18 son positivos como se esperaba. También parece que a lo menos en la por-

hurricane center for the period 1100-1700 EST (Fig. 7). Radial profiles of wind speed and angular velocity constructed from the composite map are shown together with smoothed profiles of $\overline{c'd'}$ and computed exchange coefficients in Fig. 8. The storm is divided into a front and rear portion, and the asymmetric eye region has been omitted from the figure.

Of the 22 points for which K_H was computed, 18 are positive as expected. There also appears to be, at least in

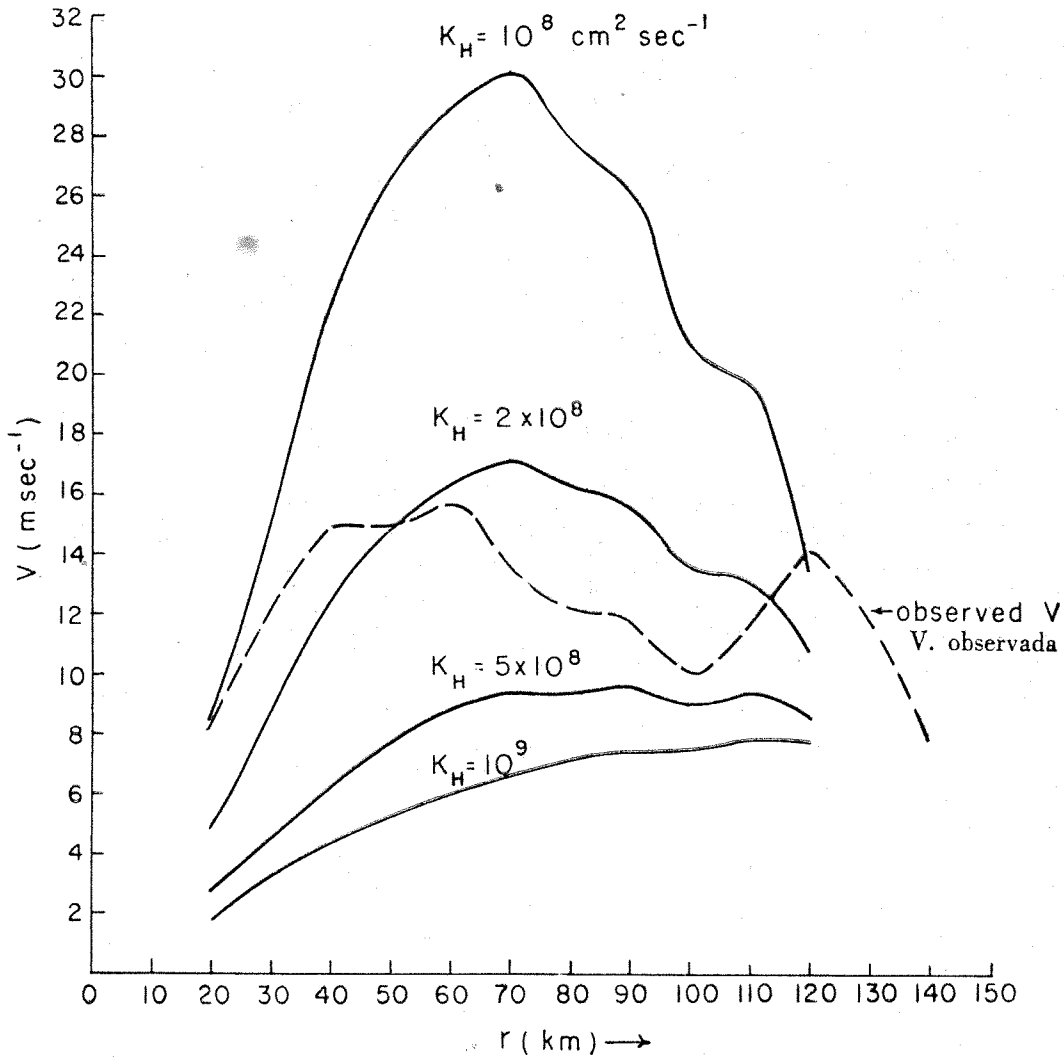


Fig. 9. Distribuciones radiales de velocidad tangencial de viento en un huracán simétrico calculadas por varios valores constantes de coeficientes de intercambio horizontal por medidas de esfuerzos de vórtice en Donna a 75-pies en el LNB.

Fig. 9. Radial distributions of tangential wind speed in a symmetric hurricane computed for several constant values of horizontal exchange coefficient from the measured eddy stresses in Donna at 75 feet at BNL.

ción frontal de la tormenta, existe incremento sistemático de K_H con la distancia al centro. Sin embargo, los valores de K_H son tan erráticos que tal distribución no puede aceptarse como significativa y todo lo que puede decirse de K_H es que su orden de magnitud es 10^8 cm² seg⁻¹ y que en general es positiva, indicando un flujo de momento hacia afuera desde el núcleo de máxima velocidad angular del huracán.

También se intentó estimar K_H adoptando varios valores constantes del coeficiente y calculando perfiles radiales de viento tangencial por esfuerzos medidos. Integrando (6) con el máximo radio r_m , se obtiene hacia adentro

the front portion of the storm, a systematic increase of K_H with distance from the center. However, the values of K_H are so erratic that this distribution cannot be accepted as significant. About all that can be said of K_H is that its order of magnitude is 10^8 cm² sec⁻¹, and it is generally positive, indicating an outward flux of momentum from the core of maximum angular velocity in the hurricane.

An attempt was also made to evaluate K_H by assuming various constant values of the coefficient and computing radial profiles of tangential wind from the measured stresses. Integration of (6) from the maximum radius, r_m , inward yields

$$v(r) = v(r_m) + \int_{r_m}^r v \, d \ln r - (K_H)^{-1} \int_{r_m}^r (\overline{c'd'}) \, dr, \quad (7)$$

que se usó para valorar los perfiles de velocidad de la Fig. 9. Es aparente que un valor de K_m cercano a $2 \times 10^8 \text{ cm}^2 \text{ seg}^{-1}$ se ajusta mejor al perfil de viento observado, aunque está lejos de ser satisfactorio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quedan agradecidos al Grupo Meteorológico del Laboratorio Nacional de Brookhaven por proporcionar los datos en que se apoyó este estudio.

which was used to evaluate the velocity profiles shown in Fig. 9. It is apparent that a value of K_H close to $2 \times 10^8 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ fits the observed wind profile best, although the fit is far from satisfactory.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors are indebted to the Meteorology Group of the Brookhaven National Laboratory for providing the data on which this study was based.

BIBLIOGRAFIA

- LAMB, H. 1932. *Hydrodynamics*, Sixth Ed. Cambridge Univ. Press. 738 pp.
 MCGUIRE, J. K. 1960. Hurricane Donna in the northeast. *Weatherwise*, 13:215-217.
 SINGER, I. A., C. M. NAGLE & R. M. BROWN. 1961. Variation of wind with height during the approach and passage of Hurricane Donna. *Proc. Second Tech. Conf. on Hurricanes, June 27-30, 1961, Miami Beach, Fla. National Hurricane Research Project Report No. 50, March 1962.*
 SINGER, I. A. & C. M. NAGLE. 1962. A study of the wind profile in the lowest 400 feet of the atmosphere. Final Report, BNL 718 (T-254), March 1962. 25 pp.

BIBLIOGRAPHY