

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

SOBRE EL ORIGEN DE LAS BANDAS ESPIRALADAS DE LOS HURACANES

DAVID ATLAS, * KENNETH R. HARDY, *
RAYMOND WEXLER ** y ROLAND J. BOUCHER **

RESUMEN

Para construir un modelo tri-dimensional de una banda espiralada se usaron secciones de radar verticales de intensidad de eco en el Huracán Esther. Este modelo y películas con lapso de tiempo PPI muestran que las grandes bandas persistentes son esencialmente estratiformes con nubes de tipo convectivo sólo en sus extremos viento arriba. Las nubes convectivas se desarrollan contra la banda y hacia afuera respecto al ojo mientras las partículas de precipitación se esparcen viento abajo como plumas. El efecto neto es un movimiento de eco a lo largo de la banda en ambas direcciones; la pluma sigue al viento en tanto que la nube de origen se propaga en dirección contraria. La componente de propagación radial exterior de la nube de origen da a la banda su velocidad de salida. El máximo crecimiento está concentrado en la región estratiforme de la banda a niveles medios e inferiores abajo de 18,000 ps (nivel de 0° C a 14,000 ps). La presencia de una banda brillante en la capa de fusión impide que haya suficiente humedad para el crecimiento en forma de fuertes corrientes convectivas. Se propone un mecanismo en que el enfriamiento por evaporación y la fusión de la nieve contribuyen a la formación de una línea de convergencia espiral cerca del borde de avance de la banda y da origen a una nube de rodillo cumuliforme. El enfriamiento por fusión de la nieve dentro del núcleo de la banda establece una isoterma de 0° C y produce inestabilidad que da lugar a un estriado de estratocumulus de escala más fina abajo del nivel de fusión. El mecanismo es compatible con las observaciones meteorológicas directas, es decir, algún porcentaje del área de precipitación queda comprendido en torres convectivas "calientes" y las bandas espiraladas intermedias tienen usualmente núcleo frío ya que hay una turbulencia relativamente moderada en su interior.

INTRODUCCION

La naturaleza y origen de la estructura de bandas espiraladas en los huracanes ha recibido amplia atención. La opinión más generalmente aceptada es que las bandas espiraladas de precipitación parecen representar el lugar geométrico de convergencia a bajo nivel a lo largo del cual se produce intensa convección que origina un cumulonimbus (Wexler, 1947; Simpson, 1954). Wexler (1947) también opinó que las bandas pudieron ser "calles de nubes" arrastradas a la circulación del vórtice, la cual selectivamente ensancharía las

* *Laboratorios Cambridge de Investigación de la Fuerza Aérea,*
** *Allied Research Associates, Inc.*

ON THE ORIGIN OF HURRICANE SPIRAL BANDS

DAVID ATLAS, * KENNETH R. HARDY, *
RAYMOND WEXLER ** and ROLAND J. BOUCHER **

ABSTRACT

Vertical radar cross-sections of echo intensity in Hurricane Esther are used to build a three dimensional model of a spiral band. This model and PPI time-lapse movies show that the large persistent bands are essentially stratiform and have convective type clouds only at their upwind ends. The convective clouds are observed to develop up-band outward relative to the eye, while spewing out precipitation particles which stream down-wind in plume-like fashion. The net effect is echo motion along the band in both direction; the plume extends downwind while the source cloud propagates upwind. The outward radial component of propagation of the source cloud gives the band its outward velocity. The major growth is concentrated in the stratiform region of the band at middle and low levels below 18,000 ft (0° C level at 14,000 ft). The presence of the bright band in the melting layer precludes that the moisture supply for growth occurs in the form of strong convective currents. A mechanism is proposed in which cooling by evaporation and melting snow contributes to the establishment of a spiral line of convergence near the advancing edge of the band and gives rise to a cumuliform roll cloud. Cooling by melting snow within the core of the band establishes a 0° C isothermal and causes instability which results in a finer scale bandedness of stratocumulus below the melting level. The mechanism is consistent with direct meteorological observations; namely, that a few per cent of the precipitation area is comprised of "hot" convective towers, that the intermediate spiral bands are usually cold core, and that relatively modest turbulence is experienced within them.

INTRODUCTION

The nature and origin of the spiral band structure of hurricanes has received widespread attention. The most widely held view as to their origin seems to be that the spiral precipitation bands represent the loci of low level convergence along which intense convection breaks out giving rise to cumulonimbus (Wexler, 1947; Simpson, 1954). Wexler (1947) also speculated that the bands might have been simple "cloud streets" drawn into the vortex circulation, which selectively amplified those streets of proper wavelength.

* *Air Force Cambridge Research Laboratories,*
** *Allied Research Associates, Inc.*

calle de una longitud de onda adecuada. Más recientemente, Faller (1961) ha sugerido que la estructura espiralada resulta de inestabilidad de la capa de frontera mientras Krishnamurti (1962) sostuvo que esta estructura es natural consecuencia dinámica del campo de convergencia en las configuraciones en crecienta del campo de velocidad horizontal.

Se demuestra en este trabajo que con excepción de la pared de nubes, cada banda mayor es en esencia una pluma (o plumas) o constituye precipitación descargada de una torre convectiva sencilla (o a lo menos de unas cuantas con movimiento sencillo). También se toma en cuenta un mecanismo en que la intensidad de la pluma crece a lo largo de la banda y tal vez determina la disposición en banda de la convergencia a nivel medio o inferior. Mientras los rasgos primarios del modelo son comprobados por la estructura de reflectividad de radar tridimensional y películas de radar de lapso de tiempo, el modelo simple también es consistente con observaciones meteorológicas directas de bandas espiraladas.

OBSERVACIONES DEL HURACAN ESTHER, 1961

Las observaciones detalladas que dan base a nuestro análisis se realizaron durante el Huracán Esther, 20-22 de Septiembre de 1961, conforme se aproximaba a la costa sur de Nueva Inglaterra desde el SSW, decelerándose virtualmente hasta la inmovilidad y luego dando una fuerte vuelta al este. La deceleración durante las horas matutinas del 21 de Septiembre estuvo acompañada de un debilitamiento hasta menos de la intensidad huracanada. Sin embargo, las observaciones que nos ocupan precedieron al decremento de la tormenta.

Las fotografías PPI fueron tomadas continuamente con el radar AN/FPS-7 de 23 cm de alta potencia del Comando de la Defensa Aérea de la USAF, situado en North Truro en Cabo Cod, a una velocidad de 4 por minuto. Este radar tiene una anchura de campo horizontal de 1.3 grad. y una amplitud vertical de 18 grad. También se tomaron fotografías RHI con el radar AN/FPS-6 de 10 cm con campo de 3.4 grad (horiz) por 0.9 grad (vert.). Un juego de 8-10 fotografías se tomaron con ajustes de amplificación del receptor consecutivamente reducidos hasta que todos los ecos desaparecieron en cada azimut y después se repitieron a intervalos azimutales de 10 grados (ocasionalmente 5 grados) para cubrir el sector que contenía todas las bandas interesantes entre el radar y el ojo de la tormenta. La rápida velocidad de barrido vertical del FPS-6 (30 barridos/minuto) permitió que se repitiese el procedimiento a intervalos de casi 12 a 20 minutos.

La Fig. 1 muestra una fotografía PPI típica y croquis esquemáticos asociados que ilustran los siguientes puntos:

(1) Las bandas mayores casi son enteramente difusas y uniformes con ecos de aguda apariencia convectiva que sólo existen en sus extremos viento arriba (eliminando las estructuras fragmentarias que se desprenden de las bandas principales).

(2) Las bandas parecen plumas que se ensanchan siguiendo al viento desde su punto de origen. El borde interno (hacia el ojo) de cada banda origina una espiral más apretada que el borde externo.

More recently Faller (1961) has proposed that the spiral structure results from instability in the boundary layer, while Krishnamurti (1962) has proposed that this structure is a natural dynamic consequence of the field of convergence in the crescent-shaped pattern of the horizontal velocity field.

In this paper, it is shown that, with the exception of the wall cloud, each major band is in essence a plume (or plumes) or precipitation released from a single (or at most a few) moving convective tower(s). A mechanism by which the plume intensity grows down-band and allegedly controls the banded arrangement of low or mid-level convergence is also proposed. While the primary features of the model are demonstrated from the three-dimensional radar reflectivity structure and radar time-lapse movies, this simple model is also consistent with direct meteorological observations of the spiral bands.

THE OBSERVATIONS IN HURRICANE ESTHER, 1961

The detailed observations upon which our analysis is based were made during Hurricane Esther, Sept. 20-22, 1961, as it approached the southern coast of New England from the SSW, decelerated virtually to a standstill, and then took a sharp turn to the east. The deceleration during the morning hours of Sept. 21 was accompanied by a weakening to less than hurricane intensity. However the observations with which we are mostly concerned preceded the decay of the storm.

PPI scope photographs were taken continuously on the high-power 23 cm AN/FPS-7 radar at the USAF Air Defense Command site at North Truro on Cape Cod at a rate of 4 per minute. This radar has a horizontal beam width of 1.3 deg. and a wide vertical beam of 18 deg. RHI photographs were taken with the high power 10 cm AN/FPS-6 with a beam 3.4 deg. (horiz.) by 0.9 deg. (vert.). A set of 8 to 10 photos was taken at consecutively reduced receiver gain settings until all echoes disappeared at each azimuth and then repeated at 10 degree (occasionally 5 degree) azimuth intervals to cover the sector containing all the interesting bands between the radar and the eye of the storm. The rapid vertical scan rate of the FPS-6 (30 scans/minute) permitted the procedure to be repeated at intervals of about 12 to 20 minutes.

Fig. 1 shows a typical PPI photograph and associated schematic sketches which illustrate the following points:

(1) The major bands are almost entirely diffuse and uniform with sharp convective-like echoes appearing only at their upwind ends (neglecting the fragmentary structures which break away from the main bands).

(2) The bands are shaped like plumes broadening downwind from a point source. The inner (eye-ward) edge of each band makes a tighter spiral than the outer edge.

Fig. 1(a). Fotografía PPI en 0030 EST tomada con el radar FPS-7 localizado en North Truro sobre Cabo Cod. Los marcadores de alcance gruesos están separados por 50 millas náut.

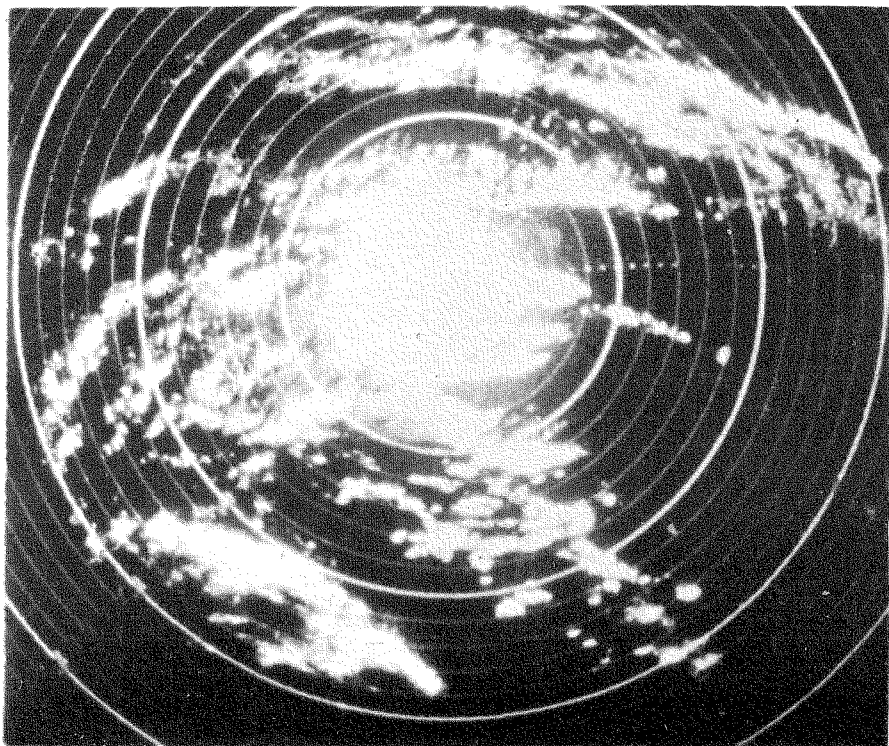


Fig. 1(a). PPI photograph at 0030 EST taken with the FPS-7 radar located at North Truro on Cape Cod. The heavy range markers are spaced at 50 naut. miles.

Fig. 1(b). La misma fotografía de la Fig. 1(a) mostrando el perfil de las bandas y las fuentes convectivas en sus extremos viento arriba. Nótese que en la banda inferior se origina una nueva torre convectiva viento abajo y produce una segunda pluma que parece mezclarse con la primera.

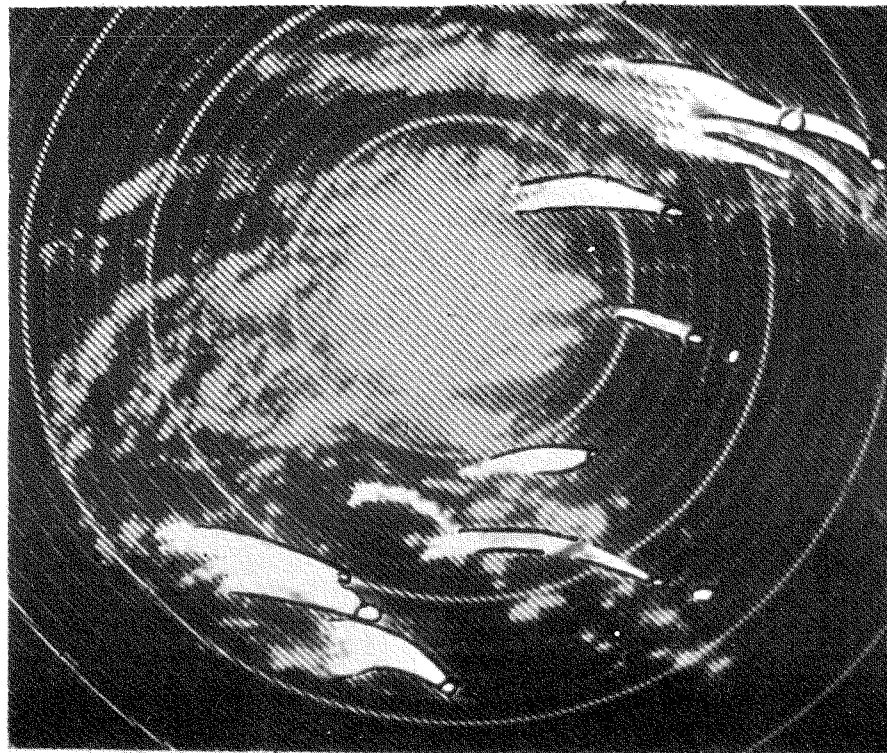


Fig. 1(b). The same photograph as Fig. 1(a) showing the outline of the bands and the convective sources at their upwind ends. Notice that in the lower band a new convective tower originates downwind and gives rise to a second plume which appears to blend with the first.

(3) Viento abajo, la pluma o banda y su borde saliente al topar con otra torre convectiva pueden originar una segunda pluma que parece mezclarse con la primera.

(4) Las bandas no son necesariamente concéntricas entre sí o alrededor del ojo (en esta tormenta extra-tropical menos organizada). Los centros de curvatura sólo quedan determinados por las trayectorias curvas de partículas y la velocidad de las nubes de origen con relación al ojo (ver discusión).

El análisis de las películas con lapsos de tiempo PPI muestra que:

(5) La banda se mueve al exterior según la componente radial de velocidad del origen del punto convectivo en el extremo contra el viento. En otras palabras, toda la pluma se desplaza como si la arrojase una chimenea en movimiento.

Sin embargo, algunas bandas se originan o propagan desde sus extremos viento arriba al desarrollarse nuevas torres convectivas en ellos de una manera similar a tronadas persistentes. En el Esther, las bandas del cuadrante noreste se movieron hasta 30 grad. y algunas 14 grad. hacia la derecha, con la velocidad del ojo y aproximadamente de 5 a 10 nudos más rápidamente.

Las películas también mostraron dramáticamente el desalojamiento de la corriente de viento que sale de la fuente y aún los ocasionales cambios menores en dirección de la co-

(3) Downwind along the plume or band and at its leading edge another convective tower may originate and give rise to a second plume which appears to blend with the first.

(4) The bands are not necessarily concentric with one another or around the eye (in this less organized extra-tropical storm). The centers of curvature are determined only by the curved particle trajectories and the velocity of the source clouds with respect to the eye (see discussion).

Analysis of the time-lapse PPI movies shows that:

(5) The band travels outward with the radial component of the velocity of the convective point source at its upwind end. In other words, the entire plume is displaced as if it were ejected from a moving chimney.

However, some bands build or propagate on their upwind ends as new convective towers develop there in a manner similar to that of a persistent thunderstorm. In Esther, the bands in the northeast quadrant moved toward 30 deg., some 14 deg. to the right of the eye velocity and with a speed some 5 to 10 knots greater.

The movies also dramatically show the streaming away of the effluent downwind of the source, and even the occasional minor changes in stream direction and perturbations

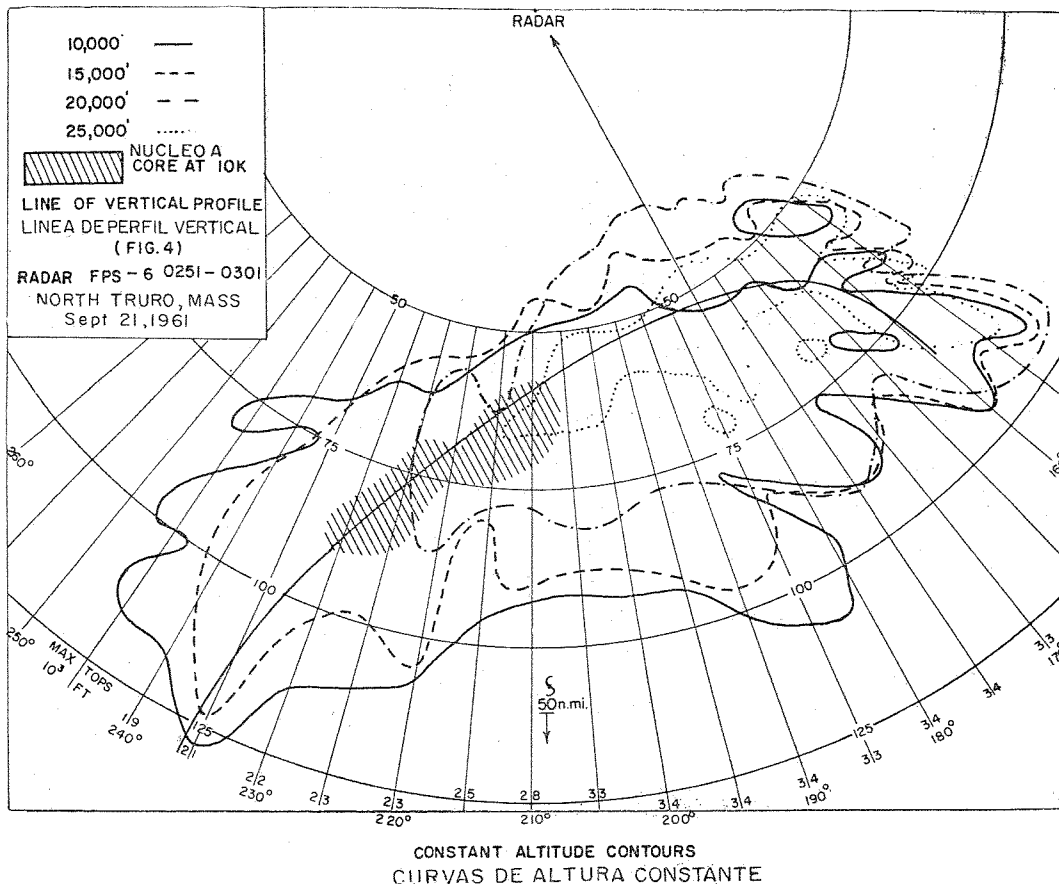


Fig. 2. Conjunto de niveles constantes de una banda espiralada de huracán a 10, 15, 20 y 25 mil pies. Se indica la altura máxima del eco de radar para cada azimut cerca de la base de la figura. La trayectoria (línea continua) es el lugar geométrico de ganancia máxima para cada azimut. Las áreas sombreadas son las regiones de fuerte eco a 10,000 pies.

Fig. 2. Constant level display at 10, 15, 20, and 25 thousand feet of a hurricane spiral band. The maximum altitude of the radar echo at each azimuth is indicated near the bottom of the figure. The spiral path (solid line) is the locus of the maximum gain at each azimuth. The shaded areas are the regions of strong echo at 10,000 ft.

riente y sus perturbaciones a lo largo de su longitud resultantes de variaciones en el viento. La impresión es idéntica a la que se tiene al observar películas con lapsos de tiempo de plumas de humo de una chimenea.

En la Fig. 2 cuatro planos de nivel constante se han construido a través de las bandas desde la sección de avance máximo RHI tomada a intervalos de 5 grad. de azimut. Puede notarse que excepto para los núcleos de alta intensidad, solamente se delinear los contornos de límites exteriores de la masa de eco completa en altitudes de 10, 15, 20 y 25 mil ps. La máxima altitud alcanzada en cada azimut se indica numéricamente sobre el límite exterior. Se ha construido un modelo tridimensional de la misma banda mostrando su estructura externa detalladamente, así como su organización interior tal como aparece en isoplethas de intensidad de eco, para representar el verdadero modelo que se usó en el estudio como indica la Fig. 3. La Fig. 4 muestra una sección vertical del campo de intensidad del eco a lo largo del curso espiral horizontal que se indica en la Fig. 2, la cual se preparó cortando las secciones verticales de la Fig. 3. En otras palabras, la Fig. 4 es una pared vertical a lo largo de una espiral horizontal que simplemente se desplegó en un plano. Al estudiar las Figs. 2, 3 y 4 destacan los siguientes puntos:

(6) En la Fig. 2 las curvas de nivel del extremo de la banda viento arriba (150-165 grad., 70-90 mi.) casi se superponen entre sí indicando una columna virtualmente vertical característica de una tormenta convectiva.

(7) En la Fig. 3 las secciones que cortan el extremo de la banda viento arriba a 155, 160 y 165 grad., ilustran las etapas de ascenso de la cima del eco y sugieren la apariencia escalonada de sucesivas torres convectivas del lado contrario al viento en una tronada (ver, por ejemplo, Fujita y Arnold, 1963, Fig. 1).

(8) En las alturas la curva de nivel a 25,000 ps. solamente tiene una forma espiralada que puede identificarse (Fig. 2), aunque la Fig. 3 indica ondas que parecen espirales en la totalidad de la estructura de la cima del eco.

(9) Excepto por su curvatura la configuración de las curvas de nivel es similar a la pluma de precipitación desde el centro de una tronada (Fig. 2).

(10) Las cimas de los ecos descienden marcadamente hacia la cola de la banda, como se esperaría en los cristales de nieve (Figs. 2, 3 y 4). Dichas cimas muestran también fuertes pendientes (aunque onduladas) desde el extremo delantero de la banda en las secciones que las cruzan (Fig. 3), probablemente como resultado de cizallamiento vertical.

(11) El núcleo de lluvia de alta intensidad (con máximo cercano a 14 mm/hora en la superficie¹) se desplaza a lo largo de la banda desde su eje de cimas máximas. Se indica en la Fig. 4 una probable trayectoria para una partícula de precipitación que cae casi a 1 m/seg. siguiendo al núcleo de la espiral. La trayectoria se origina desde un generador de tipo convectivo inicial y al moverse la partícula a lo largo de la banda desaparece la nube de origen y aparece otra adelante banda arriba. Así, las partículas que llegan al extremo

¹ Con base en cálculos de radar.

along its length due to wind variations. The impression is identical to that obtained when viewing time-lapse movies of smoke plumes from a chimney.

In Fig. 2 four constant level plan cuts through one of the bands have been constructed from the maximum gain RHI cross-sections taken at 5 deg. intervals of azimuth. Note that except for the high intensity cores, the contours display only the outer boundaries of the entire echo mass at 10, 15, 20, and 25 thousand ft. altitudes. The maximum altitude attained at each azimuth is indicated numerically on the outer boundary. A three-dimensional model of the same band showing its detailed external structure as well as its internal make-up as it appears in isopleths of echo intensity has also been constructed. A representation of the actual model which was used for study is presented in Fig. 3. Fig. 4 shows a vertical cross-section of the echo intensity field along the horizontal spiral path shown in Fig. 2 which was made by cutting through the vertical sections of Fig. 3. In other words, Fig. 4 is a vertical wall along a horizontal spiral which we have simply unfurled onto a plane. Study of Figs. 2, 3, and 4 indicates these significant points:

(6) In Fig. 2, the height contours at the upwind end of the band (150-165 deg., 70-90 mi.) are nearly superimposed on one-another indicating a virtually vertical column characteristic of a convective storm.

(7) In Fig. 3, the cross-sections through the upwind end of the band at 155, 160, and 165 deg. illustrate the upward steps in the echo top suggesting the step-wise building of successive convective turrets on the upwind side of a thunderstorm (see, for example Fujita and Arnold, 1963, Fig. 1).

(8) Aloft, only the 25,000 ft. height contour has a discrete identifiable spiral shape (Fig. 2) although Fig. 3 indicates spiral like waves throughout the echo top structure.

(9) Except for the curvature, the pattern of height contours is similar to the plume of precipitation from a thunderstorm anvil (Fig. 2).

(10) The echo tops lower markedly down-band as expected for falling snow crystals (Figs. 2, 3, 4). The tops also show sharp down slope (although rippled) from the advancing edge of the band in the cross-band sections (Fig. 3) probably as a result of vertical shear.

(11) The high intensity rain core (maximum about 14 mm/hr at the surface¹) is displaced downwind along the band from the axis of maximum tops. A probable trajectory for a precipitation particle falling at about 1 m/sec along the core of the spiral is indicated in Fig. 4. The trajectory originates from an initial convective type generator. As the particle moves down-band, the original source cloud disappears and a new one appears up-band. Thus, the particles which reach the downwind end of the spiral originated from

¹ Based on radar calculations.

HURACAN ESTHER
HURRICANE ESTHER

Sept. 21, 1961
0251-0301 EST

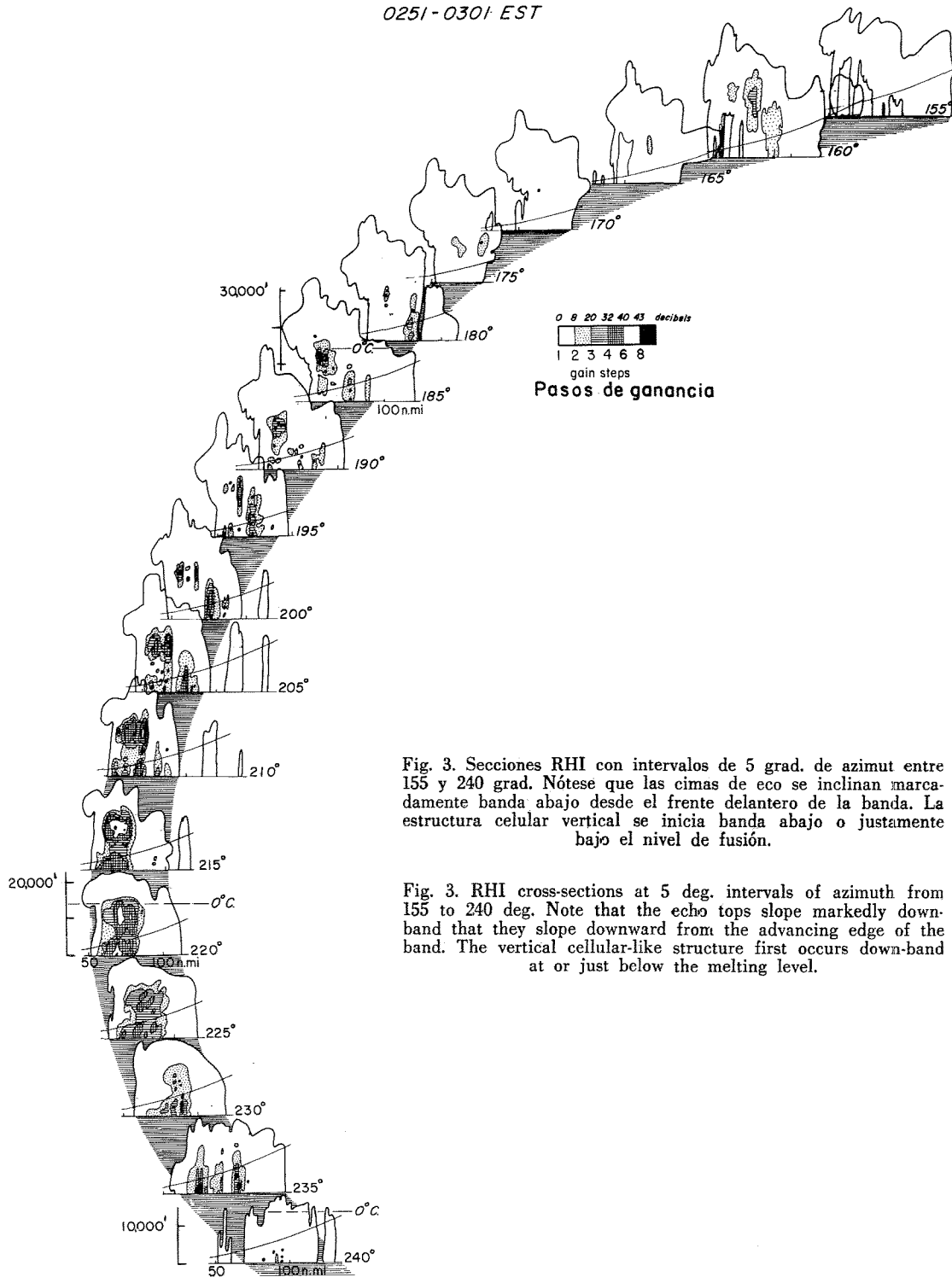


Fig. 3. Secciones RHI con intervalos de 5 grad. de azimut entre 155 y 240 grad. Nótese que las cimas de eco se inclinan marcadamente banda abajo desde el frente delantero de la banda. La estructura celular vertical se inicia banda abajo o justamente bajo el nivel de fusión.

Fig. 3. RHI cross-sections at 5 deg. intervals of azimuth from 155 to 240 deg. Note that the echo tops slope markedly downward from the advancing edge of the band. The vertical cellular-like structure first occurs down-band at or just below the melting level.



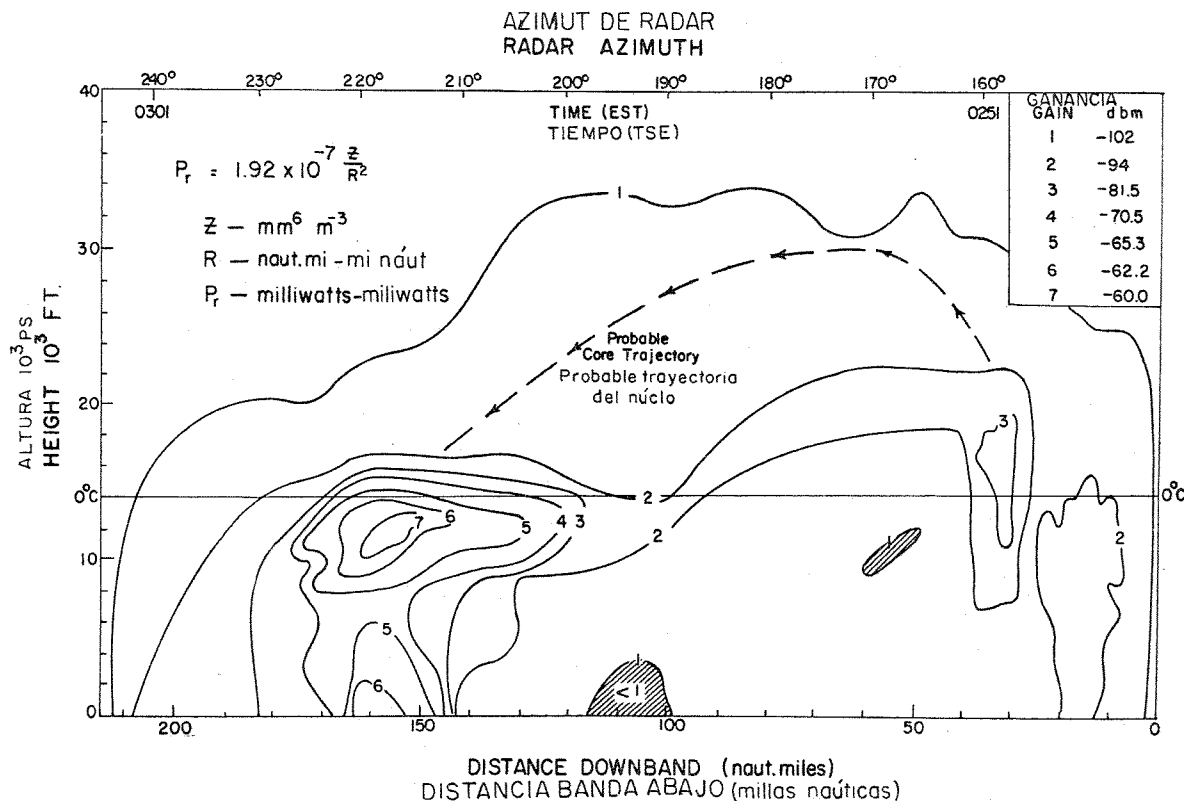


Fig. 4. Secciones verticales del campo de intensidad de eco a lo largo de la trayectoria de la Fig. 2. La línea discontinua es una trayectoria probable de una partícula de precipitación que cae casi a 1 m/seg siguiendo al núcleo espiralado. La fuente generadora se propaga firmemente banda arriba en tanto que las partículas descienden viento abajo. Nótese la bien definida banda brillante precisamente bajo el nivel 0° C.

Fig. 4. Vertical cross-section of the echo intensity field along the spiral path shown in Fig. 2. The dashed line is a probable trajectory of a precipitation particle falling at about 1 m/sec along the core of the spiral. The generating source propagates steadily up-band while the particle descends downwind. Note the well-defined bright band just below the 0° C level.

viento abajo de la espiral se originaron en un punto cualquiera de su porción media y al caer, la región de su origen se propagó hacia adelante de la banda. (Por ello, las variaciones verticales en la reflectividad de radar pueden no deberse necesariamente a desarrollo o decremento sino a variaciones en tiempo de la intensidad de la nube de origen).

(12) Aparece un poco abajo del nivel de 0° C una banda brillante bien definida, muy característica de la precipitación estratiforme, la cual nunca se encuentra en regiones de fuerte convección.

(13) A lo largo de la banda aparecen primeramente estructuras verticales de tipo celular a través de y (Fig. 3²) en el mismo sitio o un poco abajo de la banda brillante, indicando que hubo algún proceso al nivel de 0° C eficiente que convierte a las corrientes de lluvia en bandas inferiores.

(14) La intensidad de eco aumentaba fuertemente hacia abajo en la capa de 4,000 ps. de espesor encima del nivel de 0° C (Figs. 3, 4) mostrando que la tasa de caída de la nieve aumentaba rápidamente (más o menos de 0.2 a 9 mm/hora) como resultado de su propio crecimiento.

² Los detalles observados por debajo del horizonte de radar en los azimutes 195 a 240 grad. pueden deberse a propagación anómala (vistas al norte y al noreste del radar desde horas antes). Por ello la estructura en el aire no se altera de manera notable pues la propagación anómala predomina en ángulos de elevación muy bajos.

a source somewhere in the middle of the spiral, and during their fall, the generating region had propagated steadily up-band. (Because of this, vertical variations in the radar reflectivity may not necessarily be due to growth or decay, but to time variations in the strength of the source cloud.)

(12) A well defined bright-band appears just below the 0° C level. This is characteristic of stratiform precipitation and is never found in regions of strong convection.

(13) Down-band vertical cellular-like structures first appear across the band (Fig. 3²) in or just below the bright band suggesting that some process at the 0° C level is effective in organizing the rain streamers into low level bands.

(14) The echo intensity increased very sharply downward in the 4,000 ft. layer above the 0° C level (Figs. 3, 4) indicating that the snowfall rate is increasing sharply (roughly from 0.2 to 9 mm/hr) as a result of growth in this layer.

² The detail shown below the radar horizon at azimuths between 195 and 240 deg. may be due to anomalous propagation (known to be present north and northeast of the radar a few hours earlier). This does not alter the structure aloft significantly since anomalous propagation is predominant at very low angles.

OTRAS OBSERVACIONES EN HURACANES

Aunque sólo se ha presentado la estructura de una banda aislada en un momento dado, podría agregarse que fueron observados tipos similares en otras dos secciones a través de dicha banda (que no se muestran) 24 y 47 minutos antes, así como en otras dos bandas. Además, muchas características de la banda observada en Esther ya se habían observado antes en otros huracanes tanto en regiones extratropicales como tropicales. En particular Kessler y Atlas (1956) destacaron con insistencia el hecho de que las bandas del Huracán Edna (1954) tormenta de la Nueva Inglaterra más intensa que Esther, fueron casi completamente estratiformes con excepción de sus extremos viento arriba.³ También mencionaron la existencia de la banda brillante en secciones verticales, así como el desarrollo de la lluvia a bajo nivel a lo largo de ciertas secciones y a la presencia de espirales no-concéntricas.

Malkus, Ronne y Chaffee (1961) hicieron un detallado análisis de los ecos de radar y de las fotografías de nubes del Huracán Daisy (1958). Entre sus resultados más importantes indicaron primeramente la notable persistencia de tipos de nubes reconocibles durante los tres días del estudio y después, la concentración de actividad convectiva en unas cuantas líneas de torres de cumulonimbus que aún en el día de la madurez ocupaban sólo el 4% del área de lluvias (1% en el día de la formación) dentro de un radio de 200 millas náuticas. Esta última conclusión concuerda con el pequeño porcentaje de convección activa inscrito en las Figs. 3 y 4.

El carácter estratiforme de todas las bandas, excepto las más exteriores, también quedó evidenciado en el huracán de Florida del 15 y 16 de Septiembre de 1945 (Wexler, 1947). Aunque esta tormenta no resultó rara, la mencionamos en particular por la amplia atención que ha recibido el trabajo original de Wexler y porque uno de nosotros (Atlas) tuvo a su cargo las observaciones de radar. Si bien Wexler no se refirió a secciones verticales, Atlas realizó sondeos zenitales que también mostraron la presencia de la banda brillante al pasar por encima las grandes bandas espiraladas (hasta hoy la significación de tales observaciones ha quedado oscura).

Las soberbias fotografías de radar de Donna (1960) también indican la presencia de bandas estratiformes en las latitudes más bajas y sobre el mar en la Isla del Gran Turco, en las Bahamas, mencionadas por Jordan y Schatzle (1961).

Tatehira (1961) analizó el movimiento de las bandas en el Tifón Helen (1958) cuando pasaba sobre Japón, encontrando células separadas.⁴ Sin embargo, al examinar sus ilustraciones se comprende que le preocupaban primordialmente los extremos de las bandas viento arriba.

DISCUSION Y MECANISMO PROPUESTO
PARA LAS BANDAS ESPIRALADAS

Se ve que con excepción de las bandas más exteriores

³ Las bandas más exteriores de Edna estaban compuestas por agujeros cálidos separados, pero ello no tiene interés ahora.

⁴ Debe notarse que la "separación" de las células en el visor PPI no es una condición suficiente para clasificarlas como convectivas. Pueden ser simplemente volúmenes pasivos de precipitación desprendida en pulsaciones desde una fuente convectiva viento arriba.

OTHER HURRICANE OBSERVATIONS

While only the structure of a single band at one time has been presented, it should be noted that essentially similar patterns were observed in two other cross-sections through that band (not shown) 24 and 47 minutes previously, and in two other bands as well. Furthermore, most of the band characteristics noted in Esther have previously been observed in other hurricanes in both extratropical and tropical regions. In particular, Kessler and Atlas (1956) placed considerable emphasis on the fact that the bands in Hurricane Edna (1954), a more intense New England storm than Esther, were almost entirely stratiform except at their upwind ends.³ They also reported the occurrence of the bright band in vertical cross-sections, low level growth in the rain along certain sections, and the presence of non-concentric spirals.

Malkus, Ronne, and Chaffee (1961) have made a detailed analysis of the radar echoes and cloud photographs of Hurricane Daisy (1958). Their most significant results are first the remarkable persistence of recognizable cloud patterns throughout the three days studied and second, the concentration of convective activity into a few lines of cumulonimbus towers which even on the mature day occupied only about 4% of the rain area (1% on the day of formation) within a radius of 200 nautical miles. This latter conclusion is consistent with the small percentage of active convection which appears in Figs. 3 and 4.

The stratiform character of all but the outermost bands is also clearly evident in the Florida hurricane of Sept. 15-16, 1945 (Wexler, 1947). While the latter storm was not at all unusual, we mention it particularly because of the wide attention Wexler's original paper has received, and because one of us (Atlas) was responsible for those radar observations. Although Wexler did not make any reference to vertical sections, Atlas did make zenith soundings which also showed the presence of the bright band with the passage overhead of the major spiral bands (until now the significance of these observations remained obscure).

That stratiform bands also occur in lower latitudes and over the sea is evidenced by the superb radar photos of Donna (1960) in the vicinity of Grand Turk Island in the Bahamas presented by Jordan and Schatzle (1961).

Tatehira (1961) has analyzed the motion of the bands in Typhoon Helen (1958) as it passed over Japan. In this case, he found discrete cells.⁴ However, examination of his illustrations show that he was concerned primarily with the upwind ends of the bands.

DISCUSSION AND PROPOSED SPIRAL BAND
MECHANISM

It is seen that, with the exceptions of the outermost

³ The outermost bands of Edna were comprised of discrete warm showers, but these are not the subject of interest here.

⁴ It should be noted that the "discreteness" of cells on the PPI scope is not a sufficient condition for classifying them as convective. They may simply be passive volumes of precipitation released in pulses from a convective source upwind.

de las células convectivas y de la propia pared de nubes, las bandas espiraladas intermedias de un huracán son generalmente estratiformes. Además, se ha demostrado que estas espirales estratiformes se componen de plumas de precipitación desprendidas de generadores convectivos en la cabeza de la banda. La nube generadora parece propagarse banda arriba, manteniendo así una pluma virtualmente continua por una o varias horas que representan la duración típica de la banda. También puede desarrollarse ocasionalmente una segunda torre convectiva viento abajo en el borde delantero de la banda y salir otra pluma que se mezcla con la primera.

Desde luego hay un crecimiento substancial de la precipitación cuando va cayendo a lo largo de la banda, especialmente alrededor del núcleo de la espiral, lo cual explica la fuerte precipitación que llega a la superficie. Puede verse que el mayor desarrollo se realiza por debajo de 18,000 ps., principalmente en una capa situada a 4 o 5,000 ps. por encima del nivel de 0° C. Puesto que el desarrollo observado implica una carga de humedad substancial (aunque el contenido de agua de la nube es sólo de unos 0.3 gm/m³ en la capa a 2-6000 ps.⁵), la presencia de la banda brillante en la capa de fusión excluye la posibilidad de que tal humedad haya resultado de una convección comparable a los aguaceros o las tronadas. Por otra parte, ya que las estructuras celulares aparecen primero en las secciones verticales que cruzan las bandas cerca del nivel de 0° C queda implícita la presencia de alguna convección celular menos intensa cerca de dicho nivel. Esto concuerda con el hecho de que los vuelos a lo largo de bandas de precipitación se caracterizan por turbulencia débil o moderada (Gentry, 1963) y de intensidad mucho menor que la correspondiente a tronadas.⁶

Se ha comprobado la disposición de las partículas desprendidas de un campo de viento en una fuente que se mueve hacia afuera y banda arriba, de acuerdo con las observaciones del Huracán Esther, apareciendo como una espiral con características similares a las espirales observadas por radar. Así parecería completamente fortuito encontrar una distribución de humedad en niveles medios y bajos exactamente donde desciende la pluma, a menos que se originase uniformemente en cualquier sitio. Tal ascenso uniforme ampliamente distribuido no parece posible ya que los índices de crecimiento y de humedad a lo largo del eje de la pluma implican velocidades verticales de de 1 m/seg. Consecuentemente, se implica que la misma pluma de precipitación determina la región de ascenso y humedad a nivel bajo y medio, describiéndose a continuación el mecanismo propuesto.

La corriente de precipitación representa la ruta de enfriamiento por evaporación y de fusión de nieve, ocurriendo el máximo enfriamiento a lo largo del eje de la pluma. Claramente queda indicada la presencia de enfriamiento por evaporación superior por las salientes tetiformes de la base del colgante del frente de avance de la banda en todas las secciones verticales que las cruzan (Fig. 3). Ciertamente, tal en-

band(s) of convective cells and the wall cloud itself, the intermediate spiral bands of a hurricane are largely stratiform. Furthermore, it has been shown that these stratiform spirals are composed of plumes of precipitation released from convective generators at the head of the band. The generating cloud appears to propagate up-band thus maintaining a virtually continuous plume for one or more hours, the typical band lifetimes. Also a second convective tower may occasionally develop downwind and at the leading edge of the band to release another plume which blends with the first.

To be sure, there is substantial growth of the precipitation as it falls down-band, especially along the core of the spiral thus accounting for the heavy precipitation which reaches the surface. It is seen that the major growth takes place below 18,000 ft., primarily in a layer some 4 to 5,000 ft. above the 0° C level. While the observed growth implies a substantial supply of moisture (but cloud water contents of only about 0.3 gm/m³ in the layer 2-6,000 ft.⁵), The presence of the bright band in the melting layer precludes the possibility that this supply occurs by means of intense convection comparable to that in showers or thunderstorms. On the other hand, the fact that cellular structures first appear in cross-band vertical sections near the 0° C level implies the presence of some less intense cellular convection near that level. This is consistent with the fact that flights along the precipitation bands are characterized by only weak or moderate turbulence (Gentry, 1963) of an intensity much less than that experienced in thunderstorms.⁶

The pattern formed by particles which are released in a wind field and from a source moving outward and up-band consistent with the observations of Hurricane Esther has been drawn. This pattern is a spiral with characteristics similar to the spirals observed with radar. It would thus appear rather fortuitous to find a pattern of moisture supply in the middle and low levels exactly where the plume descends, unless the supply were taking place uniformly everywhere. Such widespread uniform lifting seems highly unlikely since the rates of growth and moisture supply along the axis of the plume imply vertical velocities of the order of 1 m/sec. The implication is strong therefore that the precipitation plume itself determines the region of mid- and low level uplift and moisture supply. The proposed mechanism by which this may occur follows.

The precipitation streamer represents the path along which cooling by evaporation and melting snow occurs, the maximum cooling occurring along the axis of the plume. The presence of evaporative cooling from above is clearly indicated by the mamma-type bulges on the base of the overhang at the advancing edge of the band in all cross-band vertical sections (Fig. 3). Indeed such cooling would account

⁵ Calculada usando Eq. 10 de Wexler y Atlas (1958).

⁶ La explicación de esta relativa falta de turbulencia presentada por Richl en una comunicación personal a Malkus (1960) parece ahora sin fundamento.

⁵ Calculated using Eq. 10 of Wexler and Atlas (1958).

⁶ The explanation for the relative lack of turbulence offered by Richl in a personal communication to Malkus (1960) now seems unwarranted.

friamiento explicaría que las bandas son esencialmente núcleos fríos primarios (Gentry, 1963).⁷ Se sabe bien que el enfriamiento por fusión de la nieve origina un gradiente isotérmico en la capa de fusión. Realmente se encontró dicho gradiente isotérmico entre los 12,000 y 14,000 ps. en el sondeo a 1900 E. (Sept. 20) en Nueva York. El mantenimiento de este enfriamiento desde arriba origina una inestabilidad por debajo de la base de la isoterna de 0° (Findeisen, 1940). En las grandes tormentas, Findeisen ha descrito este mecanismo que origina nubes de tipo fracto- y estratocumulus que se generan por debajo del nivel de 0° C. En los huracanes, las nubes resultantes probablemente tomarían la forma de rollos de estratocumulus extendiéndose hacia arriba a varios miles de pies a partir de algunos niveles que están por debajo de la base de la capa de fusión. Ya que indudablemente el máximo de enfriamiento tiene lugar en el frente de avance de la espiral, parece que la convergencia máxima y el ascenso ocurrirán justamente por delante de la espiral de máximo enfriamiento. A su vez, el máximo desarrollo y la lluvia superficial esperada se originan precisamente en la región del extremo de avance de la pluma de precipitación, lo cual concuerda bien con las observaciones en Esther (1961). Además, el mayor desarrollo debería comenzar en algún nivel no muy lejano por encima del nivel de 0° C, igualmente acorde con las observaciones.

Puesto que la cima de la capa de fusión representa una superficie estable, razonablemente podría esperarse que los rollos de nubes tuviesen alguna escala determinada por la profundidad de la capa de convección y el cizallamiento del viento vertical en dicha capa. Así, las mismas nubes en rollo deberían tender a bandearse ya que su espaciamento dentro de la masa de eco generalmente difusa determinaría la escala de las estructuras de precipitación inferiores mucho más abajo. Tal es el mecanismo causal aparente de las estructuras celulares del eco que aparecen primero en la banda brillante, así como del bandeamiento finamente escalar de la lluvia inferior. El mismo efecto podría explicar las finas salientes espiraladas escalares que aparecen en la cima de la masa del eco.

Dicho mecanismo parece también acorde con las observaciones de Tatehira (1961) en que el frente de avance de las bandas de lluvia está marcado por convergencia en tanto que el borde trasero está caracterizado por divergencia. Por tal razón, Wexler (1947), Simpson (1954) y otros erróneamente han creído que las propias bandas espiraladas han resultado ser tipos de convergencia en bandas. Seguramente la intensidad de precipitación observada en algunas bandas no indica necesariamente convergencia a niveles bajos y medios, pero postulamos en este trabajo que las grandes y persistentes plumas espiraladas deben su origen básicamente a una o más células convectivas en la cabeza de la banda y que la misma pluma determinan dónde se producirá el ascenso

⁷ La estructura tetiforme también implica que el lado inferior del colgante debiera caracterizarse por una turbulencia moderada para que las observaciones durante el vuelo a lo largo de las bandas de la turbulencia y de la temperatura, como lo informa Gentry (1963), se interpretaran con extremo cuidado por su posición relativa en la estructura tri-dimensional.

for the fact that the bands are primarily cold core (Gentry, 1963).⁷ It is well known that cooling by melting snow gives rise to an isothermal lapse in the melting layer. Such an isothermal layer was in fact found between 12,000 and 14,000 ft. in the 1900 E. (Sept. 20) sounding at New York. The maintenance of this cooling from above gives rise to instability below the base of the 0° isothermal (Findeisen, 1940). In widespread storms, Findeisen describes this as the mechanism by which fracto- and stratocumulus type clouds are generated below the 0° C level. In hurricanes, the resulting clouds would probably take the form of stratocumulus rolls extending upward several thousand feet from some level which is below the base of the melting layer. Since maximum cooling undoubtedly occurs on the advancing edge of the spiral, it appears likely that the maximum convergence and lift would occur just ahead of the spiral of maximum cooling. It is in this region toward the leading edge of the precipitation plume, where the maximum growth and surface rainfall would be expected. This seems to agree well with the observations in Esther (1961). Furthermore the major growth should begin at some level not too far above the 0° C level, also in very good accord with the observations.

Since the top of the melting layer represents a stable surface, one may reasonably expect the roll clouds to have some scale determined by the depth of the convection layer and the vertical wind shear in that layer. Thus the roll clouds themselves should tend to be banded and their spacing within the generally diffuse echo mass should determine the scale of the precipitation structures lower down. This is believed to be the mechanism responsible for the cellular echo structures which first appear in the bright band and for the fine scale bandedness of the rain below. The same effect might also account for the fine scale spiral bulges which appear at the top of the echo mass.

The above mechanism seems also to be in good accord with the observations of Tatehira (1961) that the leading edge of the rain bands is marked by convergence while the trailing edge is characterized by divergence. Because of this, Wexler (1947) and Simpson (1954) and others may have been misled into believing that the spiral bands themselves must have been due to banded convergence patterns. To be sure, the precipitation intensity experienced in some bands does indeed imply some low or mid-level convergence, but it is the thesis of this paper that the large, persistent spiral plume owes its basic origin to one or more convective cells at the head of the band, and that the plume itself determines where the lower level lifting and convergence will occur.

⁷ The mammate structures also imply that the underside of the forward overhang would be characterized by moderate turbulence so that flight observations of turbulence and temperature along the bands such as those reported by Gentry (1963) must be interpreted with extreme care as to their position relative to the three-dimensional structure.

del nivel inferior y la convergencia. El mecanismo propuesto es análogo en muchos aspectos al pseudo-frente frío de avance de la línea de turbonada que proporciona un medio para la continua regeneración del frente.

Donaldson y Atlas (1963) han revisado el uso del radar en meteorología tropical y notado que Bigler y Hexter (1960) prepararon vistas del plano de altura constante de los tipos de eco del Huracán Debra (1959), cuyas observaciones de la estructura de la pared de nubes sugieren concordancia entre el mecanismo de precipitación de esa pared en Debra y el que se propone ahora para las bandas espiraladas intermedias, es decir, una "torre" convectiva que se desplaza ciclónicamente al ascender en una configuración helicoidal y cuya altura máxima se localiza en el cuadrante noreste, en tanto que la banda desciende viento abajo y que la intensidad más fuerte de la banda a 10,000 ps. indica que se han desarrollado considerablemente sus partículas de precipitación al incrementarse su altura que abarca la capa de fusión. Aunque la interpretación de Bigler y Hexter de los datos cualitativos es aún tentativa, claramente se necesita una descripción detallada de la distribución espacial de reflectividad en la precipitación de la nube de pared y en su variación con el tiempo.

OBSERVACIONES FINALES

Es evidente que este nuevo modelo de las bandas espiraladas de los huracanes difiere notablemente de criterios anteriores. En consecuencia, su aceptación despertará considerable resistencia aunque por cierto se espera que la tenga, pues en valor estará en la resistencia que pueda vencer. Sin embargo, debe recalarse que los tipos incluidos en las Figs. 2-4 representan objetivamente mediciones de radar y que los hechos numerados en observaciones son simplemente descripciones de lo que muestran esas mediciones con un mínimo de interpretación. Así, por primera vez, se ha obtenido una completa visión cuantitativa tri-dimensional de las bandas espiraladas de los huracanes. Por lo menos, no podrá discutirse el modelo obtenido con el radar.

Lo que deberá discutirse entonces es la interpretación de lo que indican las observaciones y el mecanismo que se propone para explicar su origen (Otras Observaciones de Huracanes). Pero, aún así, se piensa que el mecanismo propuesto debe ser esencialmente verdadero, pues tal vez el punto más importante que necesita probarse es si la región de convergencia a nivel bajo y medio, el ascenso y el desarrollo de la precipitación a lo largo de la banda viento abajo lo induce o no la propia banda de precipitación y no otro proceso dinámico independiente. Ya que los procesos dinámicos independientes tales como las ondas espiraladas que se propagan hacia afuera del ojo debieran tener cierta simetría respecto a dicho ojo, un experimento clave podría tratar de localizar la región de desarrollo máximo de la precipitación con relación al origen (extremo viento arriba) de la banda y el centro de presión, especialmente en aquellas bandas que no están centradas alrededor del ojo.

Desde luego todavía deben contestarse otras preguntas fundamentales:

The proposed mechanism is analogous in many respects to that of the pseudo-cold front in advance of the squall line which provides a means for continued regeneration of the line.

Donaldson and Atlas (1963) have reviewed the use of radar in tropical meteorology. They note that Bigler and Hexter (1960) prepared constant-altitude plan views of the echo patterns of Hurricane Debra (1959), and that their observations of the wall cloud structure suggest a consistency between the precipitation mechanism of the wall cloud in Debra and that proposed here for the intermediate spiral bands; namely, a convective "tower" which is displaced cyclonically with height in a helical configuration and has its maximum height in a segment of the northeast quadrant, the band lowers downwind, and the stronger intensity of the band at 10,000 ft indicates that considerable growth in its precipitation particles has taken place throughout an altitude increment which includes the melting layer. Although the interpretation of Bigler and Hexter's qualitative data must remain tentative, there is clearly a need for a detailed description of the spatial distribution of reflectivity in the precipitation of the wall cloud and its variation with time.

CONCLUDING REMARKS

It is evident that this new model of the hurricane spiral band differs sharply from long-held views. Therefore its acceptance will undoubtedly meet with considerable resistance. Indeed, it is hoped that it will for its ultimate strength will be determined largely by the resistance it overcomes. However, it should be emphasized that the patterns shown in Figs. 2-4 are objectively represented radar measurements, and that the numbered facts in Observations are simply word pictures of what the measurements show with a minimum of interpretation. Thus, for the first time, a complete three-dimensional quantitative view of a hurricane spiral band has been obtained. At the very least the radar model can not be disputed.

What should be disputed then is the interpretation of what the observations show and the proposed mechanism to which they owe their origin (other Hurricane observations). But even here, it is believed that the proposed mechanism must hold the essence of the truth. Probably the most crucial point which needs further validation is whether or not the region of low and mid-level convergence, lifting, and precipitation growth downwind along the band is in fact induced by the precipitation band itself and not by some independent dynamic process. Since independent dynamic processes, such as spiral waves propagating outward from the eye, would have some symmetry with respect to the eye, a key experiment should seek to locate the region of maximum precipitation growth both with respect to the origin (upwind end) of the band and to the pressure center, especially in those spirals which are not centered around the eye.

Of course, other fundamental questions have yet to be answered;

(1) ¿Por qué las nubes de origen convectivo en las cabezas de las espirales tienen tan perfecto arreglo? ⁸

(2) ¿Cómo mantiene un generador convectivo lo que parece ser una pluma constante para períodos del orden de 1 a 5 horas, duración de las bandas o cómo se propaga la nube de origen viento arriba a lo largo de la banda o hacia afuera con respecto al ojo?

(3) Respecto a (1) y (2), ¿qué es lo que controla la iniciación y velocidad de propagación de las nubes de origen y por qué se propagan a velocidades tan diferentes de los vientos circundantes?

AGRADECIMIENTOS

Estamos grandemente agradecidos a C. R. Landry, del Instituto Wentworth, J. Dodge por su ayuda analítica y a A. C. Chmela, de los Laboratorios Cambridge de Investigación de la Fuerza Aérea, por las ilustraciones.

⁸ La distribución de las nubes de origen en Esther (1961) y otros huracanes extratropicales difícilmente tendrían ese arreglo como parece ocurrir en latitudes más bajas.

(1) Why are the convective source clouds at the heads of the spirals so well arranged? ⁸

(2) How does a convective generator maintain what appears to be a steady plume for periods of the order of 1 to 5 hours, the band lifetimes, or how does the source cloud propagate upwind along the band and outward with respect to the eye?

(3) In connection with (1) and (2) what controls the initiation and propagation velocity of the source clouds and why do they propagate at velocities so different than that of the environmental winds?

ACKNOWLEDGEMENTS

We are greatly indebted to C. R. Landry of Wentworth Institute, J. Dodge for analytical assistance and to A. C. Chmela of Air Force Cambridge Research Laboratories for the illustrations.

⁸ The arrangement of source clouds in Esther (1961) and other extratropical hurricanes can hardly be said to be as well ordered as appears to occur at lower latitudes.

BIBLIOGRAFIA

- BIGLER, S. G. & P. L. HEXTER, JR. 1960. Radar Analysis of Hurricane Debra. *Proc. Eighth Radar Conf.* (Boston, Amer. Meteor. Soc.), pp. 25-32.
- DONALDSON, JR. R. J. & D. ATLAS. 1963. Radar in Tropical Meteorology. (Paper presented at WMO Symposium on Tropical Meteorology, Rotorua, N. Z., Nov.).
- FALLER, A. J. 1961. An Experimental Analogy to and proposed Explanation of Hurricane Spiral Bands. *Proc. Second Tech. Conf. on Hurricanes.* (National Hurricane Research Project, Rep. No. 50, pp. 307-313).
- FINDEISEN, W. 1940. Die Entstehung der 0° Isothermie und die Fraktocumulus-Bildung. *Meteor. Zeitschr.*, 57:49-54.
- FUJITA, T. & J. ARNOLD. 1963. Development of a Cumulonimbus under the influence of Strong Vertical Wind-Shear. *Proc. Tenth Radar Conf.*, (Boston), pp. 177-186.
- GENTRY, R. C. 1963. Variation of Wind and Temperature in Hurricane Rain Bands. (Presented at 43rd Annual Meeting of Amer. Meteor. Soc. New York, Jan., 1963).
- JORDAN, C. L. & F. J. SCHATZLE. 1961. The "double eye" of Hurricane Donna. *Proc. Second Tech. Conf. on Hurricanes.* N.H.R.P., No. 50, pp. 368-372.
- KESSLER, III, E. & D. ATLAS. 1956. Radar-synoptic analysis of hurricane Edna, 1954. *Geophys. Res. Pap.*, No. 50, Geophys. Res. Directorate, Bedford, Mass, 113 pp.
- KRISHNAMURTI, T. N. 1962. Some Numerical Calculations of the Vertical Velocity Field in Hurricanes. *Tellus*, 14:195-211.
- MALKUS, J. S. 1960 Recent developments in studies of penetrative convection and an application to hurricane cumulonimbus towers. In *Cumulus Dynamics*, New York, (Pergamon Press), pp. 65-84.
- MALKUS, J. S., C. RONNE & M. CHAFFE. 1961. Cloud Patterns in Hurricane Daisy, 1958. *Tellus*, 13:8-30.
- SIMPSON, R. H. 1954. Structure of an immature hurricane. *Bull. American Meteor. Soc.*, 35:335-350.
- TATEHIRA, R. 1961. A Mesosynoptic and Radar Analysis of Typhoon Rain Band (Case Study of Typhoon "Helen", 1958). *Proc. Second Tech. Conf. on Hurricanes* N.H.R.P., Rep. No. 50, pp. 115-126.
- WEXLER, H. 1947. Structure of Hurricanes as determined by Radar. *Ann. New York, Acad. Sci.*, Art. 8, pp. 821-844.
- WEXLER, R. & D. ATLAS. 1958. Moisture Supply and Growth of Stratiform Precipitation. *Jour. Meteorology*, 15:531-538.

BIBLIOGRAPHY