

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

México, D. F., Jun. 6-12, 1963

6a. SESIÓN

6th SESSION

DESARROLLO DE HURACANES (II)  
HURRICANE DEVELOPMENT (II)

## *EL HURACAN BETSY (1961) VISTO POR TIROS III \**

ROLAND T. P. CHU \*\* y JEROME SPAR \*\*

## *A TIROS III VIEW OF HURRICANE BETSY (1961) \**

ROLAND T. P. CHU \*\* and JEROME SPAR \*\*

### INTRODUCCION

Ya se ha demostrado ampliamente (Krueger y Fritz, 1961; Fritz y Winston, 1962; Rao y Winston, 1963 y otros) que las fotografías de televisión y las mediciones de radiación infrarroja por satélites pueden usarse para análisis sinópticos y que dichas observaciones son especialmente valiosas para localizar huracanes y otras perturbaciones en áreas "vacías" de océanos tropicales (Dunn y Staff, 1962; Fritz, 1962).

El problema de la formación de huracanes es uno de los que pueden recibir considerables aportes de los satélites, no sólo porque los huracanes se forman tan frecuentemente en áreas apenas observadas, sino también por la vista verdaderamente "sinóptica" que dan los satélites. Se hizo un esfuerzo en este estudio para examinar las etapas natal y pre-natal del Huracán Betsy (1961) por análisis de fotografías de nubes y mediciones de radiación infrarroja de TIROS III, aunque por las limitaciones inherentes al sistema de TIROS la investigación no fue enteramente satisfactoria. Sin embargo, proporcionó un ejemplo del valor potencial de las observaciones de satélites en meteorología tropical.

El Huracán Betsy se formó hacia el 2 de Septiembre de 1961 en el Atlántico oriental tropical "aparentemente a base de una perturbación que se movía a lo largo de la CIT" (Dunn y Staff, 1962). La primera evidencia de la tormenta fue un informe de barco (S. S. "Granheim") a las 0800 TMG el 2 de Septiembre desde 13°.6 N-42°.2 W, indicando baja presión. Una área de "posible actividad ciclónica" fue notada en una fotografía de TIROS III a las 1137 TMG (órbita 747) en la cercanía de 15° N-45° W (U. S. Fleet Weather Facility, 1962). (Esta área estaba en el extremo de una fotografía de baja calidad y la identificación quedó incierta). A las 1500 TMG el S. S. "Charlotte Maersk" encontró vientos

\* Contribución Núm. 13 del Laboratorio de Ciencias Geofísicas, Departamento de Meteorología y Oceanografía, Universidad de Nueva York.

\*\* Universidad de Nueva York.

### INTRODUCTION

It has already been amply demonstrated (Krueger and Fritz, 1961; Fritz and Winston, 1962; Rao and Winston, 1963 and others) that television pictures and infrared radiation measurements from satellites can be used in synoptic analysis, and that these observations are especially valuable for the location of hurricane and other disturbances in the "blank" areas of the tropical oceans (Dunn and Staff, 1962; Fritz, 1962).

The problem of hurricane formation is one on which satellites may be expected to throw considerable light, not only because hurricanes form so frequently in otherwise unobserved areas, but also because of the truly "synoptic" view that the satellite presents. An effort has been made in this study to examine the natal and pre-natal stages of Hurricane Betsy (1961) through analysis of cloud pictures and infrared radiation measurements from TIROS III. Because of inherent limitations of the TIROS system the investigation was not entirely successful. However, it does provide an example of the potential value of satellite observations in tropical meteorology.

Hurricane Betsy formed in the eastern tropical Atlantic about 2 September 1961 "apparently for a perturbation moving along the ITC" (Dunn and Staff, 1962). The first evidence of the storm was a ship report (S. S. "Granheim") at 0800 GMT 2 September from 13°.6 N-42°.2 W indicating low pressure. An area of "possible cyclonic activity" was noted on a TIROS III picture at 1137 GMT (orbit 747) in the vicinity of 15° N-45° W (U. S. Fleet Weather Facility, 1962). (This area was on the edge of a photograph of poor quality, and identification was uncertain.) At 1500 GMT the S. S. "Charlotte Maersk" encountered 40 knot winds and low pressure at 10°.6 N-45°.2 W. At 0400 GMT 3

\* Contribution No. 13 of the Geophysical Sciences Laboratory, Department of Meteorology and Oceanography, New York University.

\*\* New York University.

de 40 nudos y baja presión a 15°.6 N-45°.2 W; a las 0400 TMG del 3 de Septiembre el Weather Bureau de San Juan lanzó el primer aviso de tormenta tropical, despachándose aviones a la tormenta para localizar el ojo y la fuerza huracanada de los vientos a las 1200 TMG cerca de 16° N-46°.5 W. La primera alarma de huracán se lanzó a las 1600 TMG del 3 de Septiembre.

El huracán se movía al noroeste casi 330 millas náuticas por día, debilitándose y reforzándose alternativamente hasta el 8 de Septiembre cuando recurvó fuertemente al noreste y comenzó a desarrollar características extratropicales. La tormenta se mantuvo por completo en el mar y no produjo daños conocidos.

En este estudio se han reunido observaciones de TIROS III para mostrar la estructura de nubes sobre el Atlántico oriental tropical para el período que comenzó el 27 de Agosto, antes de la aparición de Betsy y continuó durante el período de formación, 2-3 de Septiembre. También se muestra una vista de Betsy en su madurez el 7 de Septiembre. Se ha dado énfasis primordial en el análisis a las efectivas temperaturas de cuerpo negro calculadas por las mediciones de

September the Weather Bureau in San Juan issued its first tropical storm advisory. Reconnaissance aircraft dispatched to the storm located the eye and hurricane force winds at 1200 GMT near 16° N-46°.5 W. The first hurricane advisory was issued at 1600 GMT on 3 September.

The hurricane moved northwestward about 330 nautical miles per day, alternately weakening and strengthening until 8 September when it recurved sharply to the northeast and began to develop extratropical characteristics. The storm remained entirely at sea and produced no known damage.

In this study TIROS III observations have been assembled to show the cloud structure over the eastern tropical Atlantic for the period beginning 27 August, prior to the appearance of Betsy, and continuing through the formation period, 2-3 September. Also shown is a view of Betsy at maturity on 7 September. Primary emphasis in the analysis has been placed on the effective black body temperatures computed from the 8-12 micron (channel 2) "window"

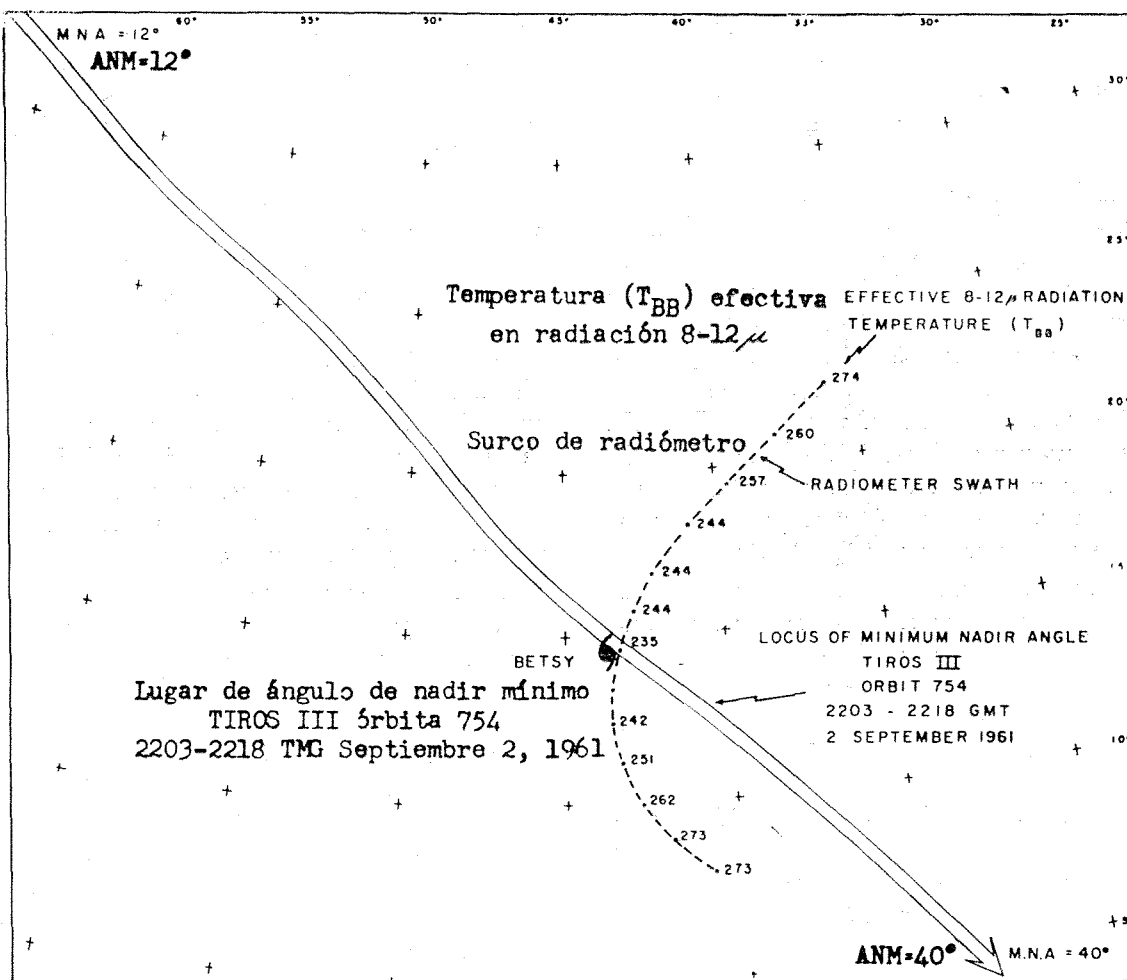


Fig. 1. "Ruta" de satélite (lugar de ángulo mínimo de nadir de radiómetro) y surco de radiómetro típico. TIROS III, órbita 754, 2203-2218 TMG, Septiembre 2, 1961.

Fig. 1. Satellite "path" (locus of minimum radiometer nadir angle) and typical radiometer swath. TIROS III, orbit 754, 2203-2218 GMT, 2 September, 1961.

radiación de la "ventana" de 8-12 micras (canal 2) que se usaron para estimar la topografía de la cima de nubes a macroescala.

radiation measurements which are used to estimate macro-scale cloud-top topography.

DATOS DE RADIACION (Figs. 1, 2)

RADIATION DATA (Figs. 1, 2)

Un típico barrido de radiómetro de TIROS III se ilustra en la Figura 1. La doble flecha muestra un segmento de 15-minutos de la "ruta" del satélite, representada aquí por el lugar del mínimo ángulo de nadir del radiómetro. En esta órbita (754), el satélite pasó sobre Betsy poco después de su aparente formación el 2 de Septiembre. La curva interrumpida es un sencillo trazo del radiómetro causado por la rotación del instrumento alrededor del eje giratorio del satélite. En la figura se han trazado las temperaturas efectivas de cuerpo negro ( $T_{BB}$ ) en grados absolutos calculados por la radiación recibida en el canal 2 ( $8-12\mu$ ) del radiómetro, sin aplicar corrección para la absorción de ozono y vapor de agua. Se ha estimado (Wark *et al*, 1962) que la máxima corrección de absorción para ángulos de nadir más pequeños de  $60^\circ$  puede ser tal vez de  $5-10^\circ A$ , que se aplicaría a la radiación emitida por las superficies más baja y más caliente

A typical TIROS III radiometer scan is illustrated in Figure 1. The double arrow shows a 15-minute segment of the "path" of the satellite, represented here by the locus of minimum nadir angle of the radiometer. On this orbit (754) the satellite passed over Betsy shortly after its apparent formation on 2 September. The dashed curve is a single radiometer swath swept out by rotation of the instrument about the satellite spin axis. Plotted in the figure are effective black body temperatures ( $T_{BB}$ ) in degrees absolute computed from the radiation received by the channel 2 ( $8-12\mu$ ) radiometer. No correction has been applied for ozone and water vapor absorption. It is estimated (Wark *et al*, 1962) that the maximum absorption correction for nadir angles smaller than  $60^\circ$  might be perhaps  $5-10^\circ A$ , which would apply to the radiation emitted by the lowest and warmest surfaces (e.g., the sea surface). The absorption correction for ra-

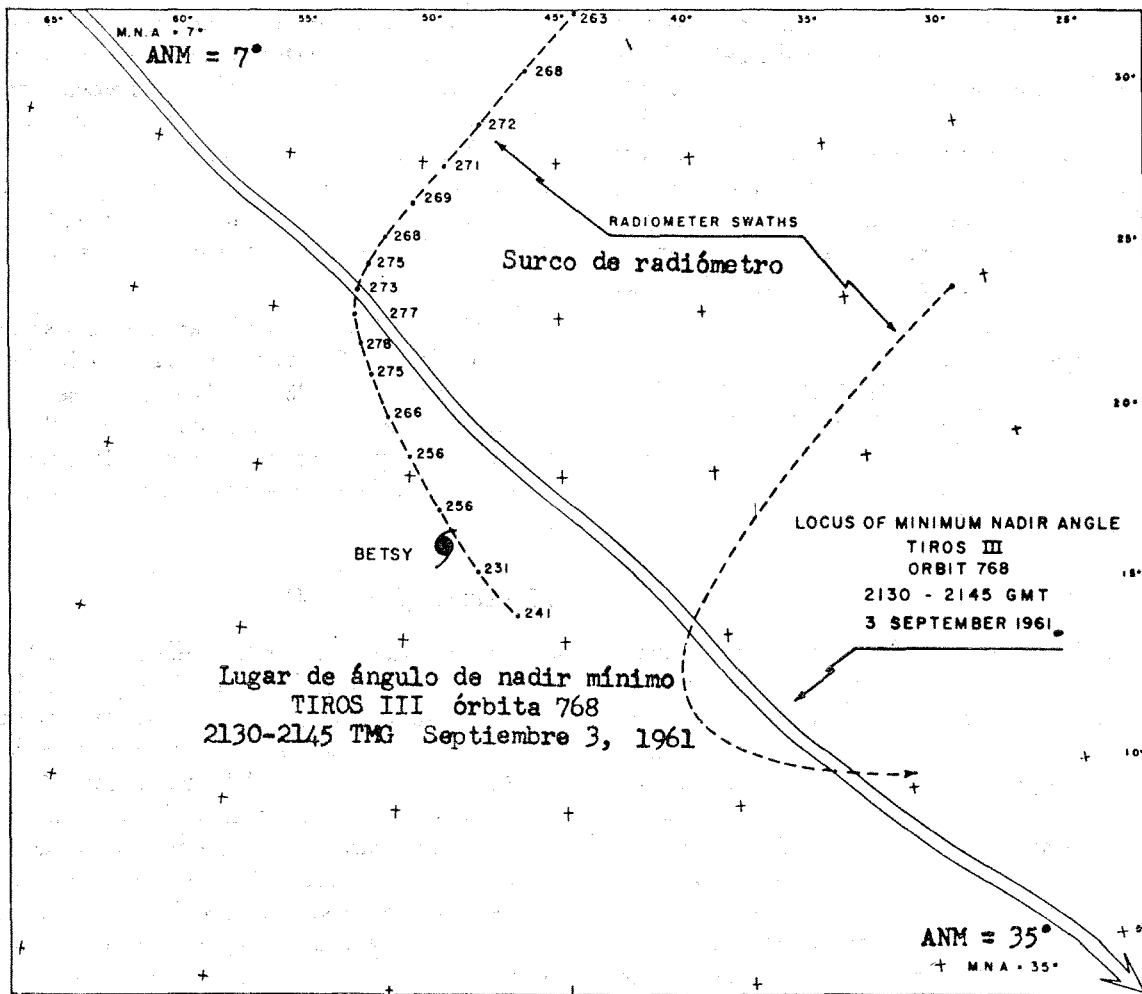


Fig. 2. Ruta de satélite y surcos de radiómetro típicos. TIROS III, órbita 768, 2130-2145 TMG, Septiembre 3, 1961.

Fig. 2. Satellite path and typical radiometer swaths. TIROS III, orbit 768, 2130-2145 GMT, 3 September, 1961.

(es decir, la superficie del mar). La corrección de absorción para radiación de superficie más alta y más fría (es decir, cima de altas nubes) es suficientemente pequeña para ser despreciada.

Al no ocuparnos ahora de la temperatura absoluta de la superficie del mar, sino sólo de la topografía de la cima de nubes, se omitió la corrección de absorción. Por otra parte, como era necesario corregir el gran error de degradación del radiómetro fue proporcionado un juego de curvas de corrección por el Goddard Space Flight Center. Aunque la temperatura representada en la Figura 1 y subsecuentes había sido corregida para degradación usando las curvas de Goddard, hay razón para creer que las correcciones fueron demasiado pequeñas para las temperaturas más altas y demasiado grandes para las más bajas. En áreas claras, donde las temperaturas de superficie del mar tropical debieron observarse, las temperaturas de radiación corregidas sólo son  $10^{\circ}\text{A}$  demasiado bajas (después de corrección por absorción) en tanto que las cimas de nubes más frías en el huracán ( $228^{\circ}\text{A}$  según las temperaturas corregidas) corresponden a alturas no mayores de casi 37,000 pies (con apoyo de sondeos tropicales medios), que probablemente son demasiado bajas.

Las incertidumbres sobre valores absolutos de temperaturas no quitan utilidad bastante a los números en sentido relativo. En la muestra del surco de radiómetro de la Figura 1, por ejemplo, las temperaturas muestran claramente la presencia de cimas de altas nubes frías ( $235^{\circ}\text{A}$ ) sobre el huracán y también es aparente que a pesar de los grandes ángulos de nadir (cerca de  $60^{\circ}$ ) en los extremos del surco, no hay suficiente "oscurecimiento de extremo" por absorción en la larga ruta óptica para ocultar las altas temperaturas observadas sobre áreas aparentemente claras del océano.

También se muestran surcos típicos de radiómetro en la Figura 2 para la órbita 768 el 3 de Septiembre, donde otra vez la más baja temperatura de radiación ( $231^{\circ}\text{A}$ ) se ubica cerca del sitio del centro del huracán. Los sucesivos surcos del radiómetro se superponen parcialmente hasta formar una densa red sinóptica de temperaturas para los análisis que se muestran en las siguientes figuras.

#### 27 DE AGOSTO (Figs. 3-4)

Las configuraciones de viento de superficie y de temperaturas de radiación efectivas para el 27 de Agosto, cinco o seis días antes de formarse Betsy, se muestran en la Figura 3. El análisis del flujo de corriente es un compuesto basado en informes de barco para el período de las 1200 TMG del 27 de Agosto a 1200 TMG del 28. Donde no había datos disponibles para ese período las líneas de flujo de corriente están rotas. La doble línea discontinua representa la zona de convergencia intertropical (CIT). Un punto negro a  $13^{\circ}.6\text{ N}$ ,  $42^{\circ}.2\text{ W}$  indica dónde se localizó primero Betsy como una perturbación tropical el 2 de Septiembre. Las isothermas de efectivas temperaturas de cuerpo negro, marcadas en grados absolutos, se basan en mediciones de radiación en "ventanas" para el período 2357 TMG del 27 de Agosto-0012 TMG del

diation from higher and colder surfaces (e.g., high cloud tops) is small enough to be neglected.

As we were not concerned with the absolute temperature of the sea surface in this study, but only with cloud-top topography, the absorption correction was ignored. On the other hand it was necessary to correct for a large degradation error of the radiometer for which a set of correction curves was supplied by Goddard Space Flight Center. Although the temperatures plotted in Figure 1 and in all subsequent figures have been corrected for degradation by use of the Goddard curves, there is reason to believe that the correction may be too small for the higher temperatures and too large for the lower temperatures. In clear areas, where tropical sea surface temperatures should have been observed, the corrected radiation temperatures are as much as  $10^{\circ}\text{A}$  too low (after correction for absorption), while the coldest cloud tops in the hurricane ( $228^{\circ}\text{A}$  according to the corrected temperatures) correspond to heights no greater than about 37,000 feet (based on mean tropical soundings), which is probably rather low.

Despite uncertainties in the absolute values of the temperatures, the numbers are clearly useful in a relative sense. In the sample radiometer swath in Figure 1, for example, the temperatures show clearly the presence of high cold ( $235^{\circ}\text{A}$ ) cloud tops over the hurricane. It is also apparent that despite the large nadir angles (about  $60^{\circ}$ ) at the ends of the swaths there is not enough "limb darkening" by absorption in the long optical path to obscure the high temperatures observed over apparently clear areas of the ocean.

Typical radiometer swaths are shown also in Figure 2 for orbit 768 on 3 September where again the lowest radiation temperature ( $231^{\circ}\text{A}$ ) is found close to the location of the hurricane center. The successive radiometer swaths partially overlap so that a dense synoptic array of temperatures is available for the analyses shown in the following figures.

#### 27 AUGUST (Figs. 3, 4)

Surface wind patterns and effective radiation temperatures for 27 August, five or six days prior to formation of Betsy, are shown in Figure 3. The streamflow analysis is a composite based on all ship reports for the period 1200 GMT 27 August through 1200 GMT 28 August. Where no data were available for this period the streamflow lines are broken. The dashed double line represents the intertropical convergence zone (ITC). A black dot at  $13^{\circ}.6\text{ N}$ ,  $42^{\circ}.4\text{ W}$  indicates where Betsy was first located as a tropical disturbance on 2 September. Isotherms of effective black body temperature, labelled in degrees absolute, are based on "window" radiation measurements for the period 2357 GMT 27 August-0012 GMT 28 August (orbit 669). Shading is used to indicate regions colder than  $254^{\circ}\text{A}$  (Isotherms were

28 (órbita 669). Se usó sombreado para indicar regiones más frías que  $254^{\circ}\text{A}$  (las isotermas se dibujaron primero para cada  $10^{\circ}\text{A}$  de temperatura no corregida y se redibujaron después de la corrección para error de degradación. Luego el intervalo isotérmico no es uniforme y varía ligeramente con el tiempo tanto como el error de degradación).

La configuración de temperatura de radiación puede compararse con la nube fotografiada en la Figura 4, donde las isotermas de la órbita 669 quedaron superpuestas en un análisis de nubes basado en fotografías tomadas sobre la órbita 662 a las 1319 TMG del 27 de Agosto.

first drawn for every  $10^{\circ}\text{A}$  of uncorrected temperature, then relabelled after correction for the degradation error. Hence the isotherm interval is non-uniform, and varies slightly with time as does the degradation error).

The radiation temperature pattern may be compared with the photographed cloud in Figure 4 where isotherms for orbit 669 are superimposed on a cloud analysis based on photographs taken on orbit 662 at 1319 GMT 27 August.

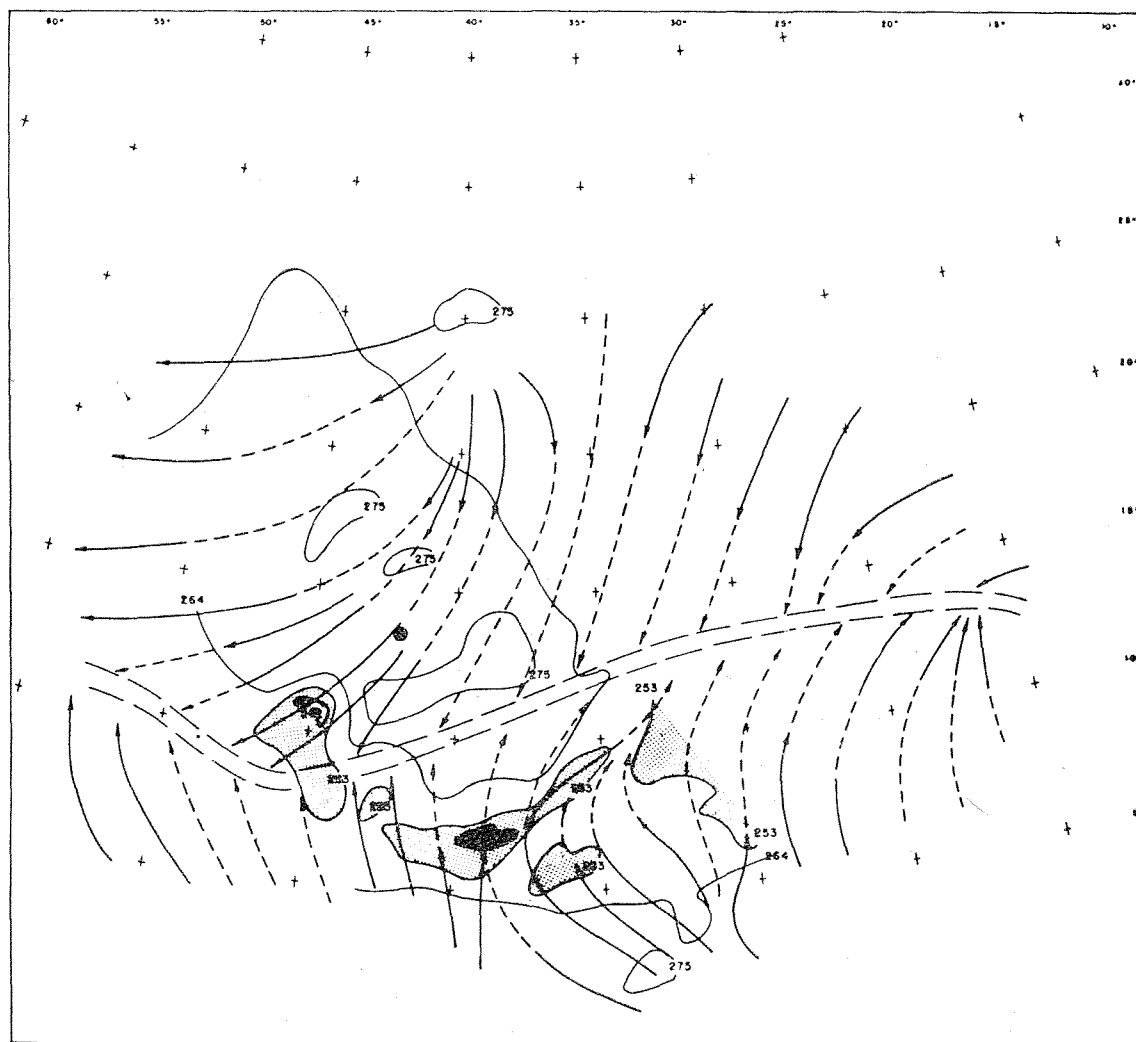


Fig. 3. Temperaturas de radiación efectivas de cuerpo negro ( $T_{BB}$ ,  $^{\circ}\text{A}$ ), TIROS III, órbita 669, 2357, TMG, Agosto 27-0012 TMG, Agosto 28, 1961 y flujo de corriente de superficie compuesto, 1200 TMG, Agosto 27-1200 TMG, Agosto 28, 1961. Las isotermas se indican en grados absolutos y el sombreado indica temperaturas menores de  $254^{\circ}\text{A}$ . Las líneas de flujo de corriente interrumpidas se dibujaron donde no hay datos disponibles. La delgada línea interrumpida doble indica la zona de convergencia intertropical (CIT). El punto negro en la figura señala dónde Betsy fue primero detectado como una perturbación tropical a las 0800 TMG en Septiembre 2.

Fig. 3. Effective black body radiation temperature ( $T_{BB}$ ,  $^{\circ}\text{A}$ ), TIROS III, orbit 669, 2357 GMT, 27 August-0012 GMT, 28 August, 1961, and composite surface streamflow, 1200 GMT, 27 August-1200 GMT, 28 August, 1961. Isotherms are labelled in degrees absolute, and shading denotes temperatures less than  $254^{\circ}\text{A}$ . Broken streamflow lines are drawn where no data were available. The thin dashed double line denotes the intertropical convergence zone (ITC). The black dot in the figure indicates where Betsy was first detected as a tropical disturbance at 0800 GMT 2 September.

Una banda de altas nubes se encontró en parte sobre y algo al sur de la CIT entre áreas de cielos claros o nubes bajas al norte, en los vientos del noreste y hacia el sur, en la zona ecuatorial. La temperatura de la cima de la nube más fría en ese momento era de casi  $242^{\circ}\text{A}$ . Nótese que la principal banda de nubes altas está al sur de la CIT en una región diferente del flujo del sur (precisamente en dicha región parecía que el ciclón se formaba como cuatro días después).

Los datos de radiación proporcionan información cuantitativa sin los cuales sería extremadamente difícil la interpretación de las fotografías de nubes. Así, en la Figura 4 es sólo a través de temperaturas de radiación que se pueden distinguir las altas nubes al sur de las nubes bajas mucho más al norte.

A band of high clouds is found partly on and partly south of the ITC sandwiched between areas of clear skies or low clouds to the north, in the northeast trades, and to the south, in the equatorial zone. The coldest cloud top temperature at this time is about  $242^{\circ}\text{A}$ . Note that the principal high cloud band is south of the ITC in a diffluent region of the southerly flow (It is in this region that the cyclone apparently formed about four days later).

The radiation data provide quantitative information without which interpretation of the cloud photographs would be extremely difficult. Thus in Figure 4 it is only through the radiation temperatures that one can distinguish the high clouds in the south from the lower clouds farther north.

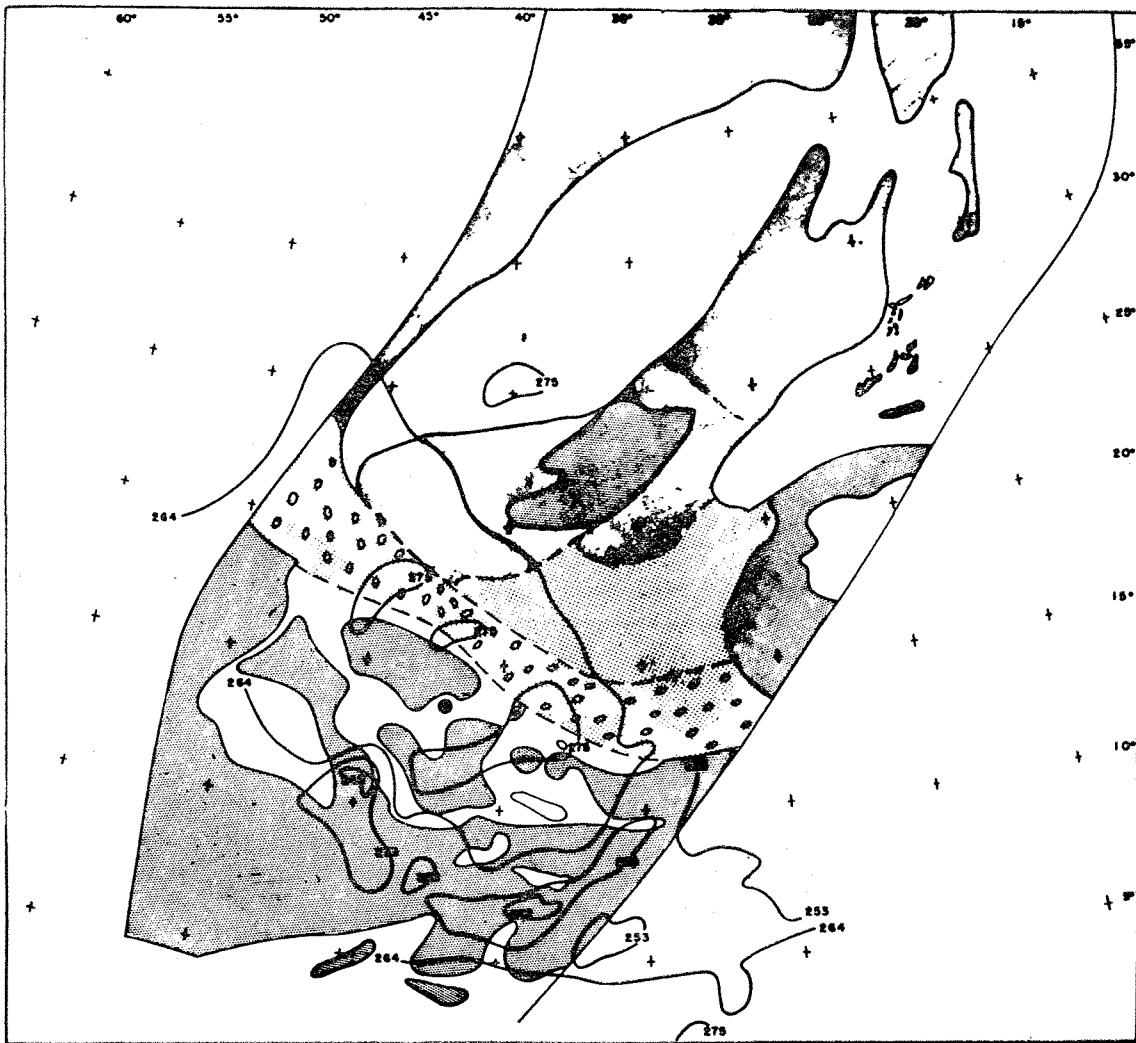


Fig. 4. Isothermas  $T_{BB}$ , TIROS III, órbita 669, 2357 TMG, Agosto 27-0012 TMG, Agosto 28, 1961 y reconstrucción de nubes según órbita 662, 1319 TMG, Agosto 27, 1961. El sombreado obscuro medio y claro indican áreas de nubes sólidas, interrumpidas y celulares, respectivamente.

Fig. 4.  $T_{BB}$  isotherms, TIROS III, orbit 669, 2357, GMT 27 August-0012 GMT, 28 August, 1961, and cloud reconstruction from orbit 662, 1319 CMT, 27 August, 1961. Dark, medium, and light shading denote solid, broken, and cellular cloud areas, respectively.

28 DE AGOSTO (Fig. 5)

El 28 de Agosto (Fig. 5) las temperaturas de radiación de la órbita 683 (2320-2335 TMG) muestran que la principal banda de nubes altas queda entre las latitudes 5° y 10° N, al sur de la CIT, según se determinó por el flujo de corrientes de superficie compuesto para el período 1200 TMG del 28 de Agosto-1200 TMG del 29. Las cimas de nubes parecen haberse elevado (enfriado) desde el día anterior, ocupando las nubes altas una área más grande. Sin embargo, debe notarse que no hubo datos de radiación al este de la longitud 30° W el día 27, como tampoco hubo el 28. Así, la evolución de la configuración de nubes no se conoce con certeza, pues no podemos estar seguros de cambios que no se deben al movimiento de nubes.

Las altas temperaturas en la región del viento del noreste al norte de la CIT y en la zona ecuatorial indican ausencia del desarrollo de altas nubes a cada lado de la principal banda de nubes situada en la corriente transecuatorial del sur.

28 AUGUST (Fig. 5)

On 28 August (Fig. 5) the radiation temperatures from orbit 683 (2320-2335 GMT) show that the principal high cloud band lies between latitudes 5° and 10° N, south of the ITC as determined from the composite surface streamflow for the period 1200 GMT 28 August-1200 GMT 29 August. The cloud tops appear to have risen (cooled) since the previous day, with the high clouds occupying a larger area. However, it must be noted that there were no radiation data east of longitude 30° W on the 27th, just as there are none on the 28th. Thus the evolution of the cloud pattern is not known with any certainty, for we cannot be sure that the changes are not due to cloud motion.

The high temperatures in the northeast trade wind region north of the ITC and in the equatorial zone indicate an absence of high cloud development on either side of the principal cloud band which lies in the southerly trans-equatorial current.

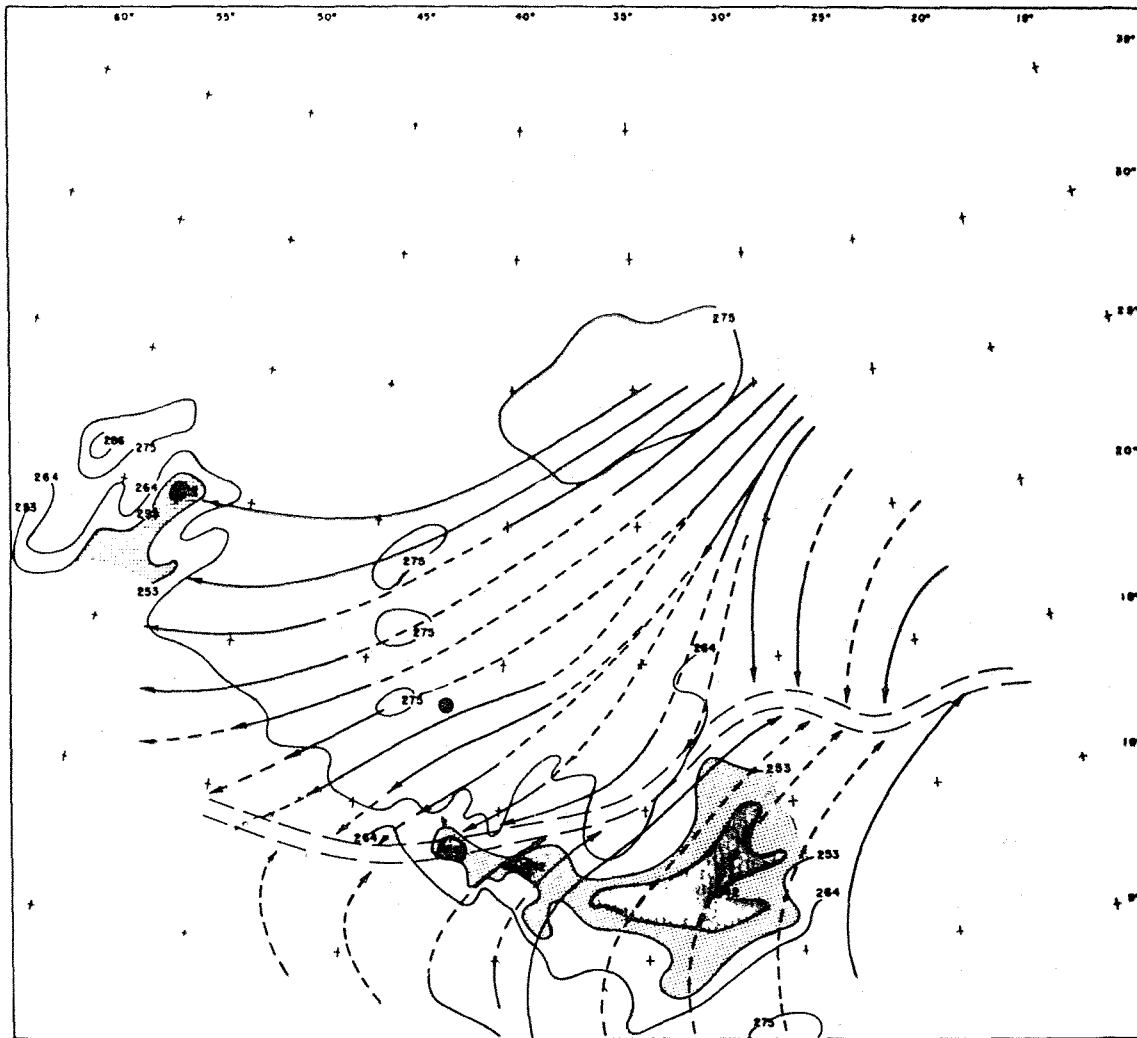


Fig. 5. Isotermas  $T_{BB}$ , TIROS III, órbita 683, 2320-2335 TMG, Agosto 28, 1961 y flujo de corriente de superficie compuesto, 1200 GMT, Agosto 30-1200 TMG, Agosto 31, 1961 (ver leyenda Fig. 3).

Fig. 5.  $T_{BB}$  isotherms, TIROS III, orbit 683, 2320-2335 GMT, 28 August, 1961, and composite surface streamflow, 1200 GMT, 28 August-1200 GMT, 29 August, 1961 (See legend Fig. 3).

29 DE AGOSTO

No hubo datos de TIROS III para esta fecha sobre la región de interés.

30 DE AGOSTO (Fig. 6)

Después de un intervalo de dos días apareció un marcado cambio en las configuraciones de temperatura y flujo de corriente, aunque es difícil establecer continuidad tanto por el lapso de tiempo como por la desviación hacia el este de la órbita del satélite. El 30 de Agosto a las 2209 TMG (Fig. 6) todavía aparecían bandas zonales de altas nubes al sur de la CIT. Sin embargo, cierto número de celdas de altas nubes se encontraban al norte de la CIT, con la principal masa de nubes al oeste de las Islas de Cabo Verde. La orientación y la configuración de nubes parece ahora ser más meridional que zonal y la masa de altas nubes parece cubrir una área

29 AUGUST

No usable TIROS III data were available for this date over the region of interest.

30 AUGUST (Fig. 6)

After an interval of two days a marked change is apparent in both temperature and streamflow patterns, although it is difficult to establish continuity because of both the time lapse and the eastward shift of the satellite orbit. On 30 August at 2209 GMT (Fig. 6) zonal bands of high cloud still appear south of the ITC. However, now a number of high cloud cells are found to the north of the ITC, with the principal cloud mass west of the Cape Verde Islands. The orientation of the cloud pattern appears now to be more meridional than zonal, and the high cloud mass appears to cover a broader area. However, this may be due simply

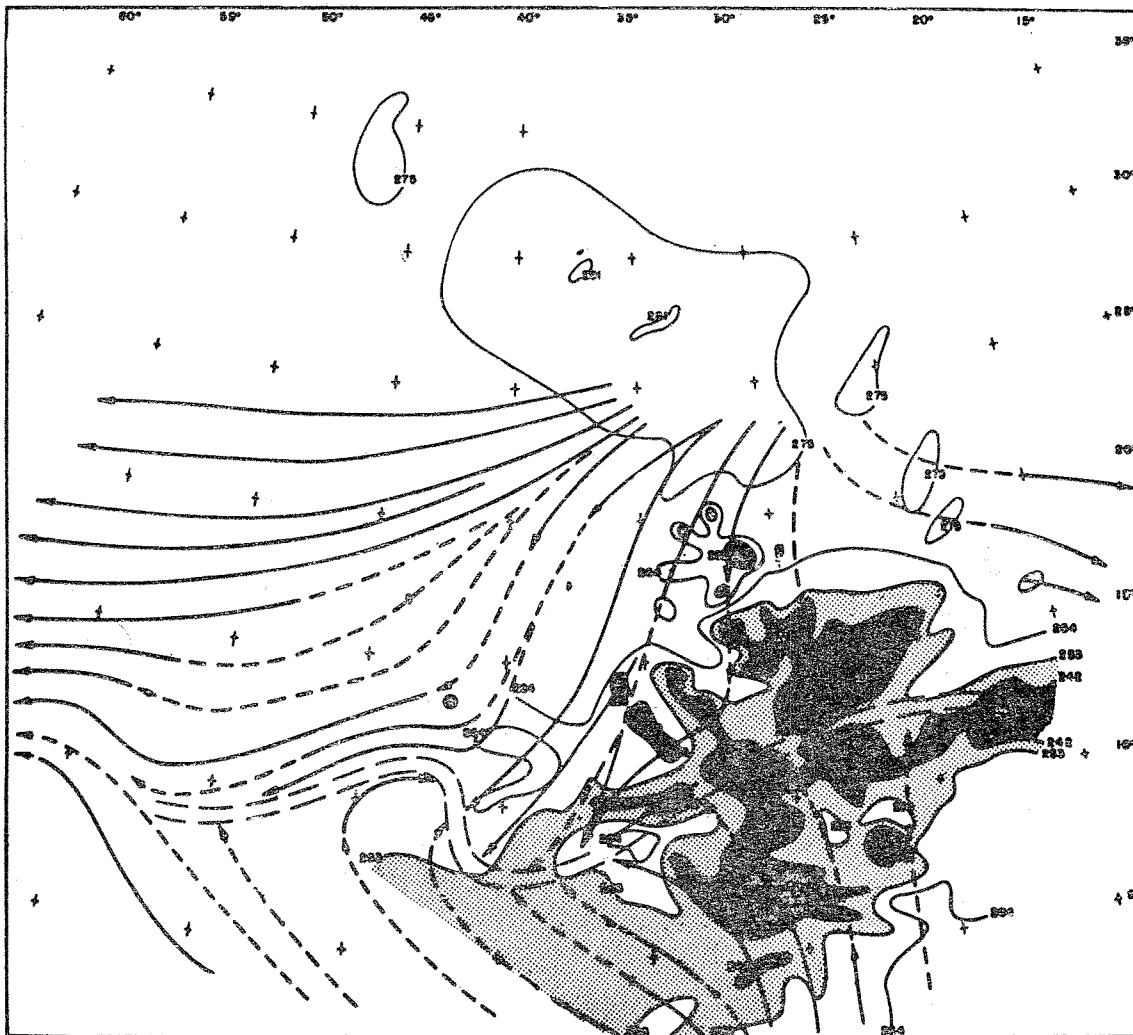


Fig. 6. Isothermas  $T_{BB}$ , TIROS III, órbita 711, 2209-2224 TMG, Agosto 30, 1961 y flujo de corriente de superficie compuesto, 1200 TMG, Agosto 30-1200 TMG, Agosto 31, 1961 (ver leyenda Fig. 3).

Fig. 6.  $T_{BB}$  isotherms, TIROS III, orbit 711, 2209-2224 GMT, 30 August, 1961, and composite surface streamflow, 1200 GMT, 30 August-1200 GMT, 31 August, 1961 (See legend Fig. 3).



más ancha. Sin embargo, esto puede deberse simplemente a la deriva hacia el este del área barrida por el radiómetro del satélite.

Existe alguna evidencia de perturbaciones similares a ondas en el flujo de corriente tanto en la CIT como en los vientos del noreste. También es digno de atención que la circulación al sur de la CIT se haya cambiado más hacia el sureste y sea más ciclónica. Por desgracia, la principal masa de altas nubes permaneció en una región en que no existen datos sinópticos para establecer una correlación entre el flujo de corriente y la estructura de la nube.

31 DE AGOSTO

La superposición de pasos de radiación entre el 30 y 31 de Agosto es insuficiente para un análisis comparativo de los campos de temperatura en ambos días. Por desgracia, la región con mayor actividad de nubes no se observó el día anterior en el paso del radiómetro que comenzó a las 2209 (TMG).

to the eastward shift of the area scanned by the satellite radiometer.

There is some evidence in the streamflow of wavelike disturbances in both the ITC and the northeast trades. It is also noteworthy that the circulation south of the ITC has become more southeasterly and more cyclonic. Unfortunately, the principal high cloud mass lies in a region where no synoptic data are available to establish a correlation between streamflow and cloud structure.

31 AUGUST

The overlap between the radiation passes on 30 and 31 August is insufficient for a comparative analysis of the temperature fields on the two days. It is unfortunate that the region where most of the cloud activity was seen on the previous day was not observed on the radiometer pass beginning 2209 GMT.

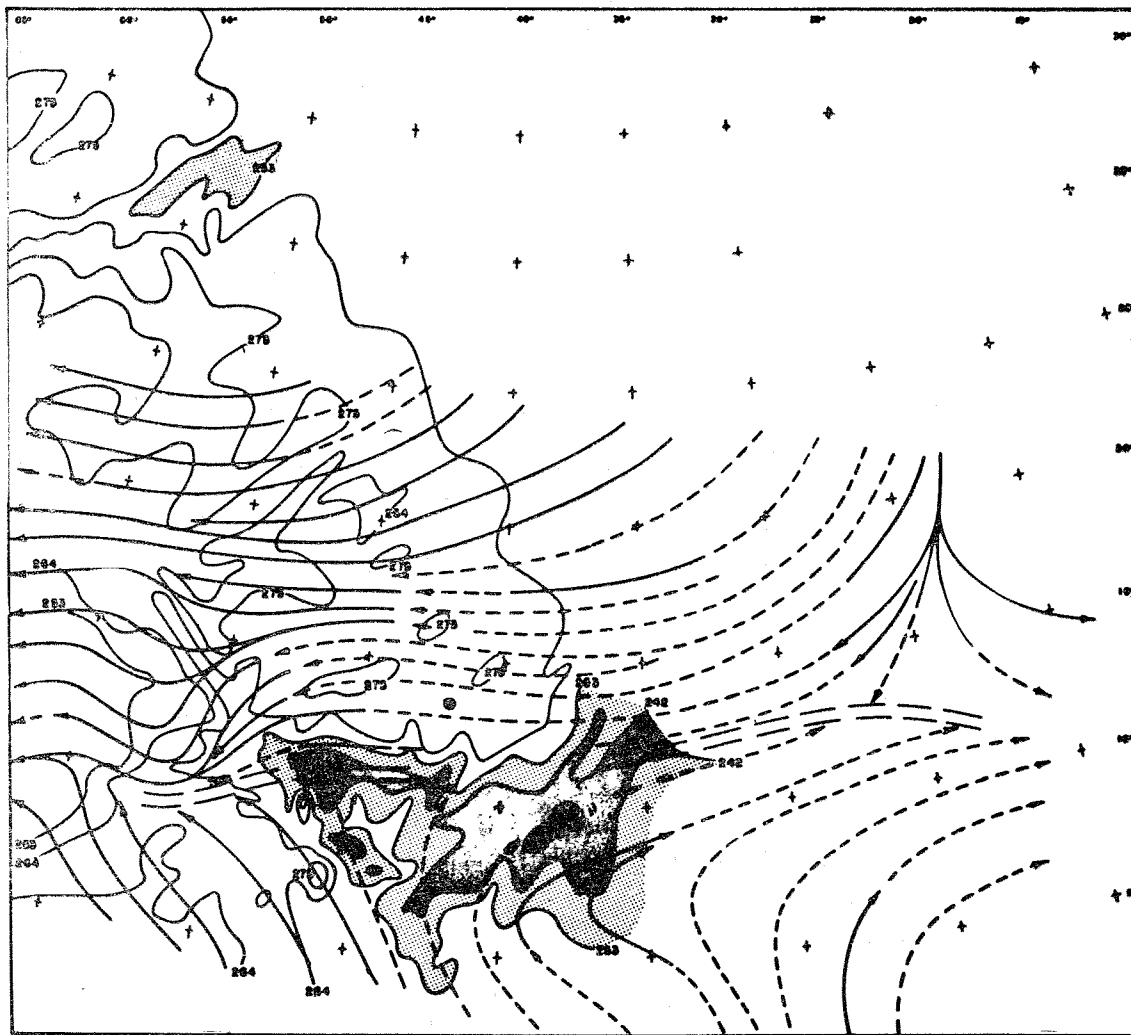


Fig. 7. Isothermas  $T_{BB}$ , TIROS III, órbita 726, 2317-2322 TMG, Agosto 31, 1961 y flujo de corriente de superficie compuesto, 1200 TMG, Agosto 31-1200 TMG, Septiembre 1, 1961 (ver leyenda Fig. 3).

Fig. 7.  $T_{BB}$  isotherms, TIROS III, orbit 726, 2317-2332 GMT, 31 August, 1961, and composite surface streamflow, 1200 GMT, 31 August-1200 GMT, 1 September, 1961 (See legend Fig. 3).

## 31 DE AGOSTO (Fig. 7)

En la región observada el día 31 se encontró una masa de altas nubes frías dentro y al sur de la CIT, cuyas menores temperaturas se situaban cerca de  $10^{\circ}$  N,  $38^{\circ}$  W. Por la ruta subsecuente de la tormenta (véanse Figuras 12 y 13), parece muy razonable que Betsy se haya formado en esa región. El informe de un barco (S. S. "Robin Sherwood") de un viento oeste-suroeste a las 1800 TMG del 31, dos grados al sur del centro frío, tiende a apoyar esta suposición.

## 1 DE SEPTIEMBRE (Figs. 8 y 9)

Otra laguna en los datos de radiación ocurrió el 1 de Septiembre. Sin embargo, en una fotografía mostrada en la Figura 8 dichos datos existen para la región de interés en esa fecha. Una reconstrucción de nubes por 3 fotografías de la órbita 733 a las 1213 TMG del 1 de Septiembre en unión del flujo de corriente de superficie compuesto se presenta en la Figura 9, para el período 1200 TMG del 1 de Septiembre-1200 TMG del 2.

## 31 AUGUST (Fig. 7)

In the observed region on the 31st a high (cold) cloud mass is found in and south of the ITC, with the lowest temperatures in the vicinity of  $10^{\circ}$  N- $38^{\circ}$  W. From the subsequent path of the storm (see Figures 12 and 13), it appears quite reasonable that Betsy may have formed in this region. The report by a ship (S. S. "Robin Sherwood") of a west-southwest wind at 1800 GMT on the 31st two degrees south of the cold center lends support to this conjecture.

## 1 SEPTEMBER (Figs. 8, 9)

Another gap in the radiation data occurs on 1 September. However, photographs, one of which is shown in Figure 8, are available for the region of interest on this date. A cloud reconstruction from 3 frames of orbit 733 for 1213 GMT 1 September together with the composite surface streamflow for the period 1200 GMT 1 September-1200 GMT 2 September is presented in Figure 9.

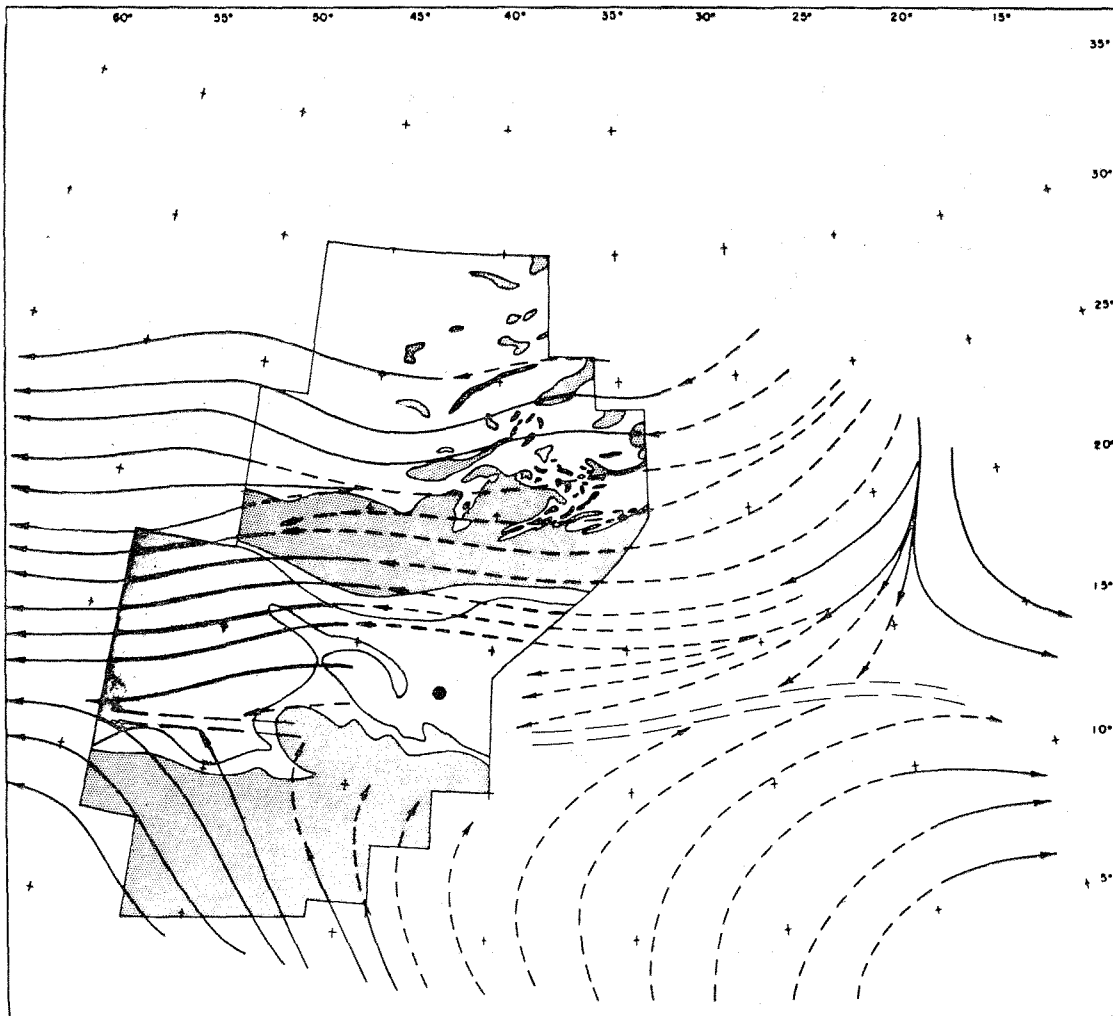
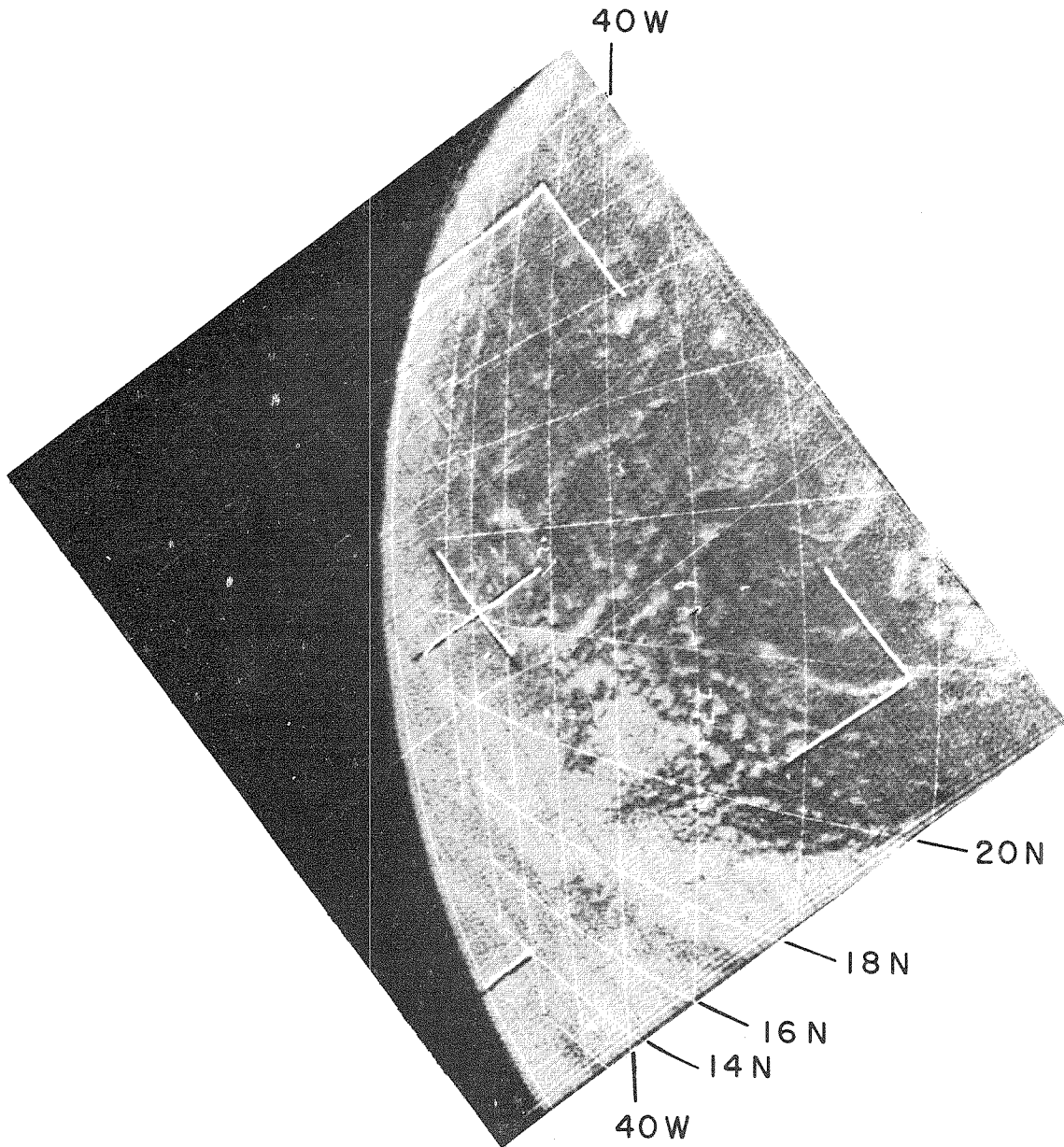


Fig. 9. Reconstrucción de nubes, TIROS III, órbita 733, 1213 TMG, Septiembre 1, 1961 y flujo de corriente de superficie compuesto, 1200 TMG, Septiembre 1-1200 TMG, Septiembre 2, 1961 (ver leyenda Fig. 4).

Fig. 9. Cloud reconstruction, TIROS III, orbit 733, 1213 GMT, 1 September, 1961, and composite surface streamflow, 1200 GMT, 1 September-1200 GMT, 2 September, 1961 (See legend Fig. 4).

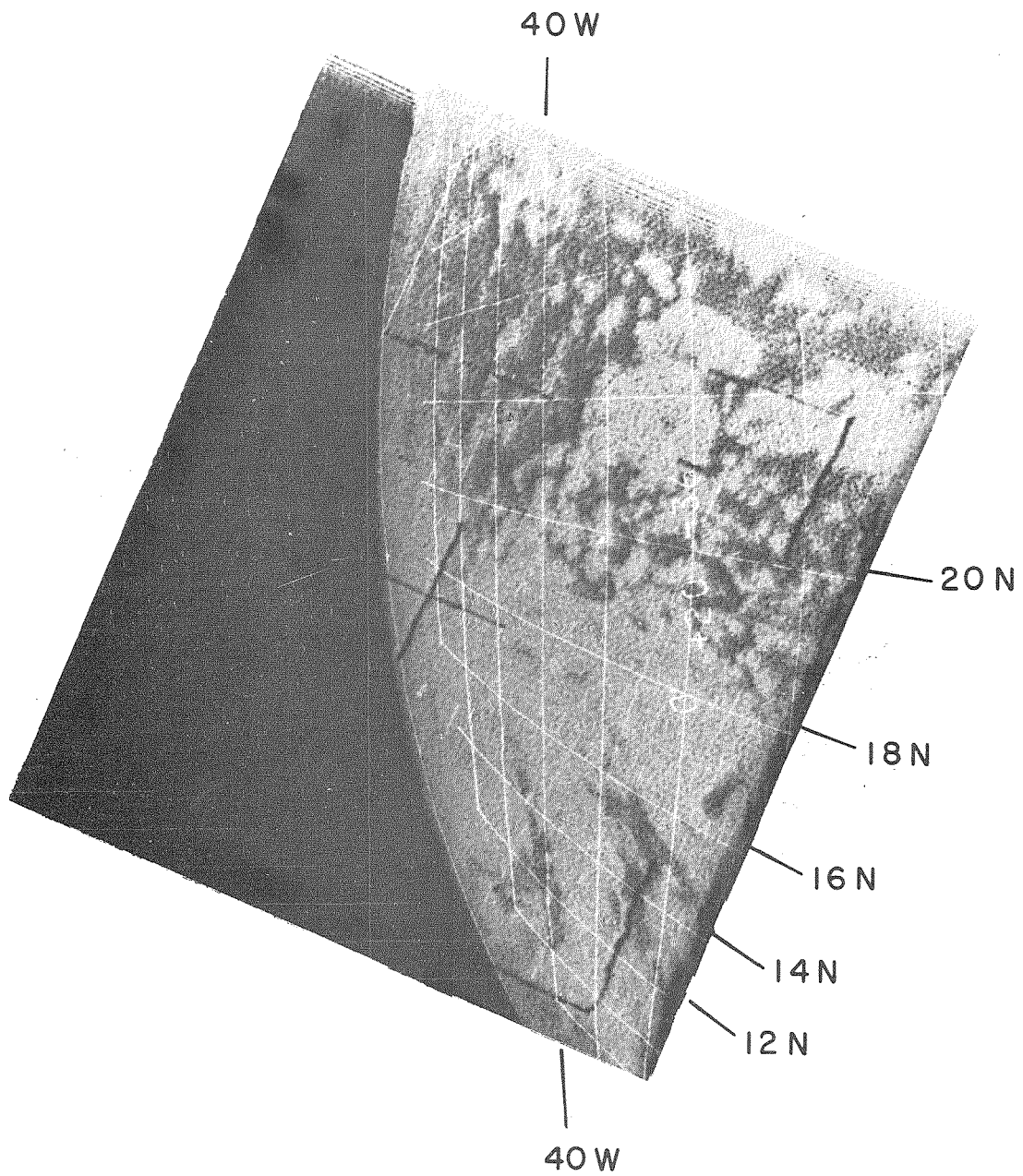


TIROS III 1213 Z

SEPTIEMBRE 1, 1961

Fig. 8. Fotografía de TIROS III, órbita 733, 1213 TMG, Septiembre 1, 1961.

Fig. 8. TIROS III photograph, orbit 733, 1213 GMT, 1 September, 1961.



TIROS III

SEPTIEMBRE 2, 1961

(1137 Z)

Fig. 10. Fotografía de TIROS III, órbita 747, 1137 TMG, Septiembre 2, 1961.

Fig. 10. TIROS III photograph, orbit 747, 1137 GTM, 2 September, 1961.

En ese momento los datos de superficie son demasiado diseminados para definir adecuadamente el flujo de corriente en la región en que probablemente se formó Betsy. A pesar de ello, la configuración de nubes muestra también la estructura de banda este-oeste en amplia escala, como ligera prueba de un vórtice en esta región en forma de dos surcos claros y curvos en la cubierta de nubes. Podría intentarse asociar esta estructura con la masa de altas nubes observadas más allá al sureste en el día previo. Si el vórtice se formó cerca de  $10^{\circ}\text{N}-38^{\circ}\text{W}$  el día 31, ahora se encontraría cerca de  $13^{\circ}\text{N}-41^{\circ}\text{W}$ . Por desgracia, debe admitirse que la calidad de las fotografías no justifica ese análisis tan forzado.

La ausencia de datos de radiación que pudo proporcionar el eslabón perdido en ese momento en el cuadro de evolución de las nubes huracanadas es lamentable e ilustra la importancia de las mediciones de radiación para análisis sinópticos.

2 DE SEPTIEMBRE (Figs. 10-11-12)

La superposición de observaciones infrarojas y de televisión cambió el 2 de Septiembre, día que Betsy fue prime-

At this time the surface data are too sparse to define the streamflow adequately in the region where Betsy probably formed. The cloud pattern, however, shows, in addition to the broad-scale, east-west band structure, some slight evidence of a vortex in this region in the form of two clear, curved swaths in the cloud cover. It is tempting to try to associate this structure with the high cloud mass observed farther to the southeast on the previous day. If the vortex did form near  $10^{\circ}\text{N}-38^{\circ}\text{W}$  on the 31st, it would now be found near  $13^{\circ}\text{N}-41^{\circ}\text{W}$ . Unfortunately, it must be admitted that the quality of the photographs does not justify such a Procrustean analysis.

The absence of radiation data, for this time, which might have provided the missing link in the picture of the hurricane cloud evolution, is regrettable, and illustrates the importance of the radiation measurements for synoptic analysis.

2 SEPTEMBER (Figs. 10, 11, 12)

Overlapping of television and infrared observations improved on 2 September, the day Betsy was first detected.

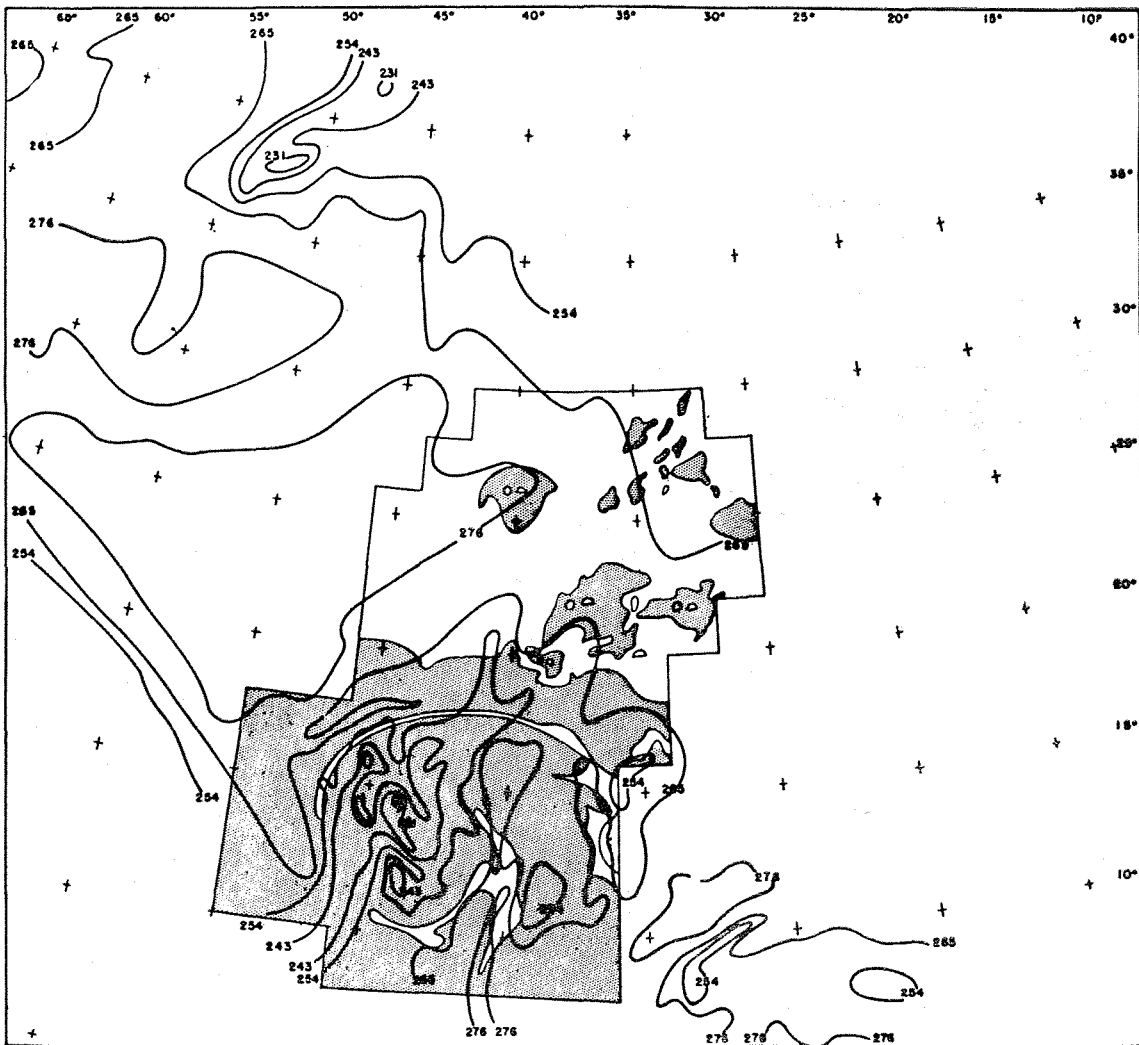


Fig. 11. Isothermas  $T_{BB}$  órbita 754, 2203-2218 TMG, Septiembre 2, 1961 y reconstrucción de nubes según órbita 747, 1137 TMG, Septiembre 2, 1961 (ver leyenda Fig. 4).

Fig. 11.  $T_{BB}$  isotherms, TIROS III, orbit 754, 2203-2218 GMT, 2 September, 1961, and cloud reconstruction from orbit 747, 1137 GMT, 1 September, 1961 (See legend Fig. 4).

ramente detectado. La Figura 10 muestra una fotografía hecha en la órbita 747 a las 1137 TMG. En la Figura 11 la reconstrucción de la nube en tres fotografías de la órbita 747 aparece junto con las isotermas deducidas de mediciones de radiación en la órbita 754 a las 2203-2218 TMG. El flujo de corriente de superficie compuesto para 24-horas que corresponde a las temperaturas de radiación se ilustra en la Figura 12.

La calidad de la fotografía es obviamente muy mala para permitir la identificación inequívoca de un vórtice. Por otra parte, los datos de radiación indican un cambio aparente en la fluctuación de la nube, con tendencia a la aparición de bandas curvas a menor escala donde previamente la cima de la nube había tomado la forma de un montículo a mayor escala. Con el desarrollo del huracán en el 2º día, las cimas de las nubes más frías apenas se habían enfriado más que las más frías observadas antes de la formación. Sin embargo, la escala de la estructura de nubes vista en el radiómetro dis-

Figure 10 shows one photograph made on orbit 747 at 1137 GMT. In Figure 11 the cloud picture reconstructed from three frames of orbit 747 photographs is shown together with the isotherms deduced from radiation measurements on orbit 754 at 2203-2218 GMT. The 24-hour composite surface streamflow corresponding to the radiation temperatures is illustrated in Figure 12.

The quality of the photograph is obviously too poor to permit unequivocal identification of a vortex. On the other hand the radiation data indicate an apparent change in cloud structure, with a tendency for smaller scale curved bands to appear where previously the cloud top had taken the form of a larger scale mound. With the development of the hurricane on the 2nd, the coldest cloud tops become only slightly colder than the coldest clouds observed prior to formation. However, the scale of the cloud structure, as seen by the radiometer, apparently diminished during the

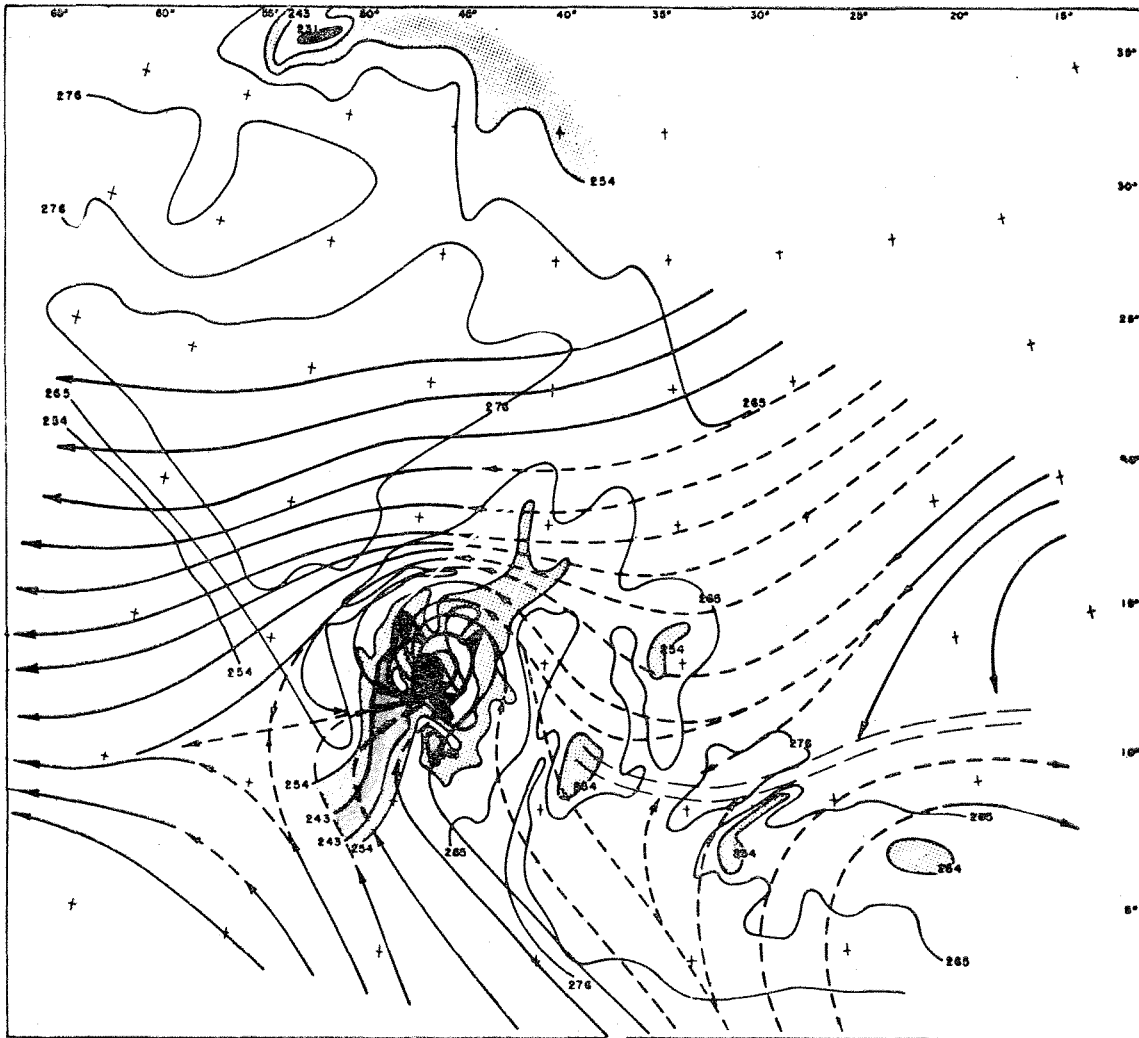


Fig. 12. Isotherms  $T_{BB}$ , TIROS III, órbita 754, 2203-2218 TMG, Septiembre 2, 1961 y flujo de corriente de superficie compuesto, 1200 TMG, Septiembre 2-1200 TMG, Septiembre 3, 1961 (ver leyenda Fig. 3).

Fig. 12.  $T_{BB}$  isotherms, TIROS III, orbit 754, 2203-2218 GMT, 2 September, 1961, and composite surface streamflow, 1200 GMT, 2 September-1200 GMT, 3 September, 1961 (See legend Fig. 3).

minuyó aparentemente durante el período de formación (Al mismo tiempo pudo haber también un crecimiento de celdas convectivas en el huracán a escala mucho menor que el poder resolvente del radiómetro).

La topografía bandeada de la nube queda aparente en la Figura 11, donde largos y claros surcos espirales en la fotografía rodean la región de la tormenta así como bandas de nubes a menor escala dentro del mismo huracán son reveladas por la temperatura de radiación.

3 DE SEPTIEMBRE (Fig. 13)

Para el 3 de Septiembre Betsy había alcanzado la etapa de huracán y mostraba características bandas de nubes asimétricas como lo indica la configuración de temperatura de radiación en la Figura 13. Las nubes más altas (y posiblemente la lluvia más fuerte) se encuentran en el lado derecho de la ruta del huracán en dos bandas principales, una pequeña banda interna adyacente al ojo y una banda externa

formation period (At the same time there may have been also growth of convective cells in the hurricane on a scale below the resolving power of the radiometer).

The banded cloud topography is apparent in Figure 11 where long, clear spiral swaths in the photograph enclose the storm region while smaller scale cloud bands within the hurricane itself are revealed by the radiation temperatures.

3 SEPTEMBER (Fig. 13)

By 3 September Betsy had reached hurricane stage, and displayed characteristic asymmetric cloud bands as shown by the radiation temperature pattern in Figure 13. The highest clouds (and presumably the heaviest rain) are found on the right side of the hurricane track in two main bands, a smaller inner band adjacent to the eye, and a larger outer band at a radius of about 200 miles from the

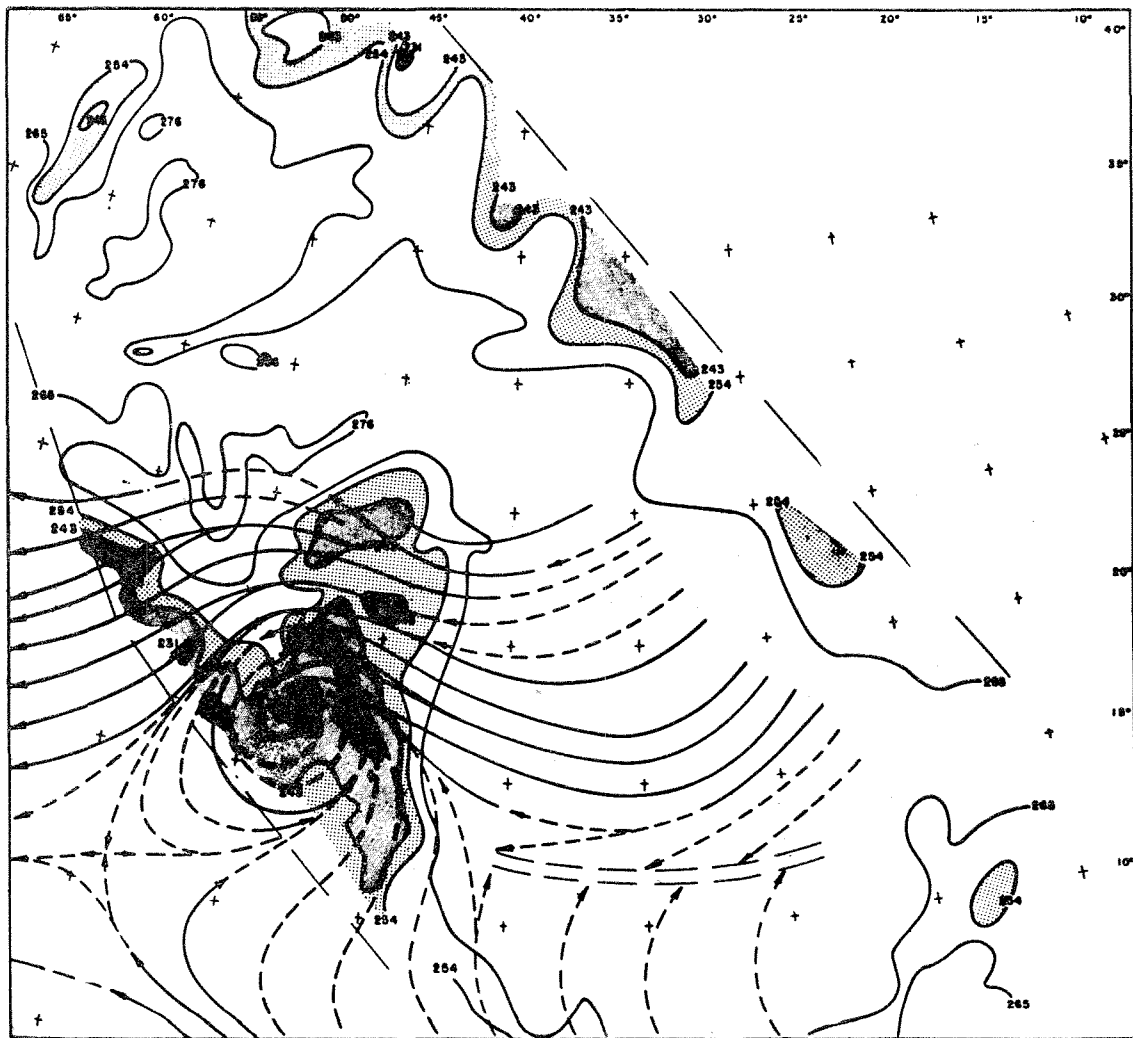


Fig. 13. Isothermas  $T_{BB}$ , TIROS III, órbita 768, 2130-2145 TMG, Septiembre 3, 1961 y flujo de corriente de superficie compuesto, 1800 TMG, Septiembre 3, 1961 (ver leyenda Fig. 3).

Fig. 13.  $T_{BB}$  isotherms, TIROS III, orbit 768, 2130-2145 GMT, 3 September, 1961, and surface streamflow, 1800 GMT, 3 September, 1961 (See legend Fig. 3).

más grande en un radio de cerca de 200 millas del centro. Una ancha cubierta de nubes se extiende sobre el semicírculo a la derecha y posiblemente también a la izquierda, donde no hay datos de radiación. No existen nubes altas por delante (es decir, al noroeste) del centro de la tormenta, aunque hay una pequeña depresión en la topografía de la nube atrás del mismo ciclón. La estructura de la nube se asemeja a una mariposa cuyo cuerpo quedase a lo largo de la ruta del huracán.

#### 7 DE SEPTIEMBRE (Figs. 14, 15)

Las estructuras de nubes de Betsy es su madurez, cuatro días más tarde, el 7 de Septiembre, se muestran en la reconstrucción de nubes (Fig. 14) por fotografías de las órbitas 823 y 824 tomadas a las 1905 y 2051 TMG y en la configuración de temperatura de radiación (Fig. 15) de la órbita 825 a las 2052-2102 TMG. Fueron superpuestas en ambos mapas las líneas de corriente de superficie a las 1800 TMG.

center. A broad sheet of cloud extends over the right semi-circle, and possibly also to the left where the radiation data are cut off. There are no high clouds ahead (i.e., northwest) of the storm center, and a slight depression in the cloud topography exists to the rear of the cyclone as well. The cloud structure appears to resemble a butterfly with its body lying along the hurricane track.

#### 7 SEPTEMBER (Figs. 14, 15)

The cloud structure of Betsy a maturity four days later on 7 September is shown in the cloud reconstruction (Fig. 14) from photographs taken at 1905 GMT on orbit 823 and 2051 GMT on orbit 824, and in the radiation temperature pattern (Fig. 15) from orbit 825 at 2052-2102 GMT. Surface streamlines for 1800 GMT are superimposed on both maps.

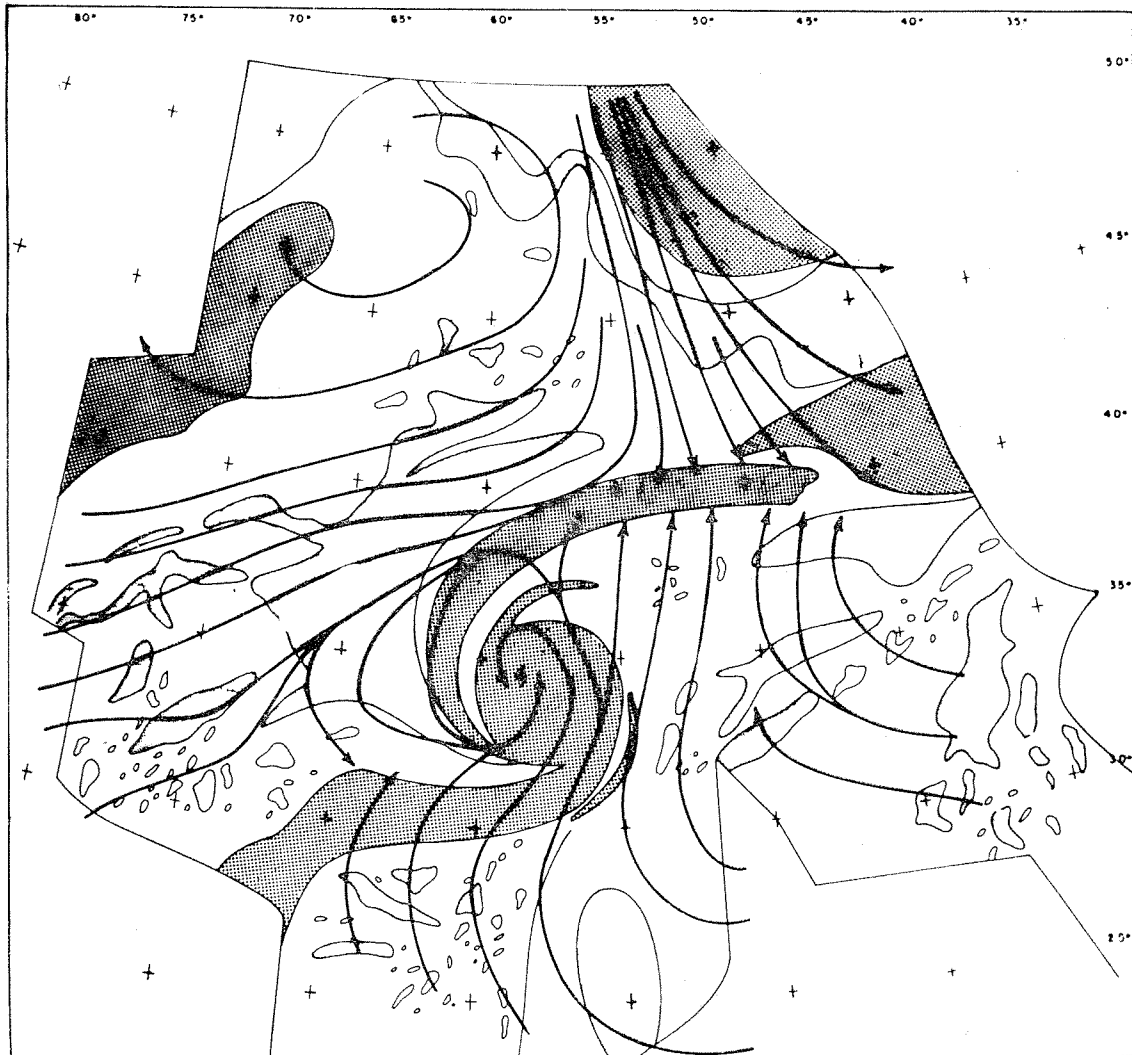


Fig. 14. Reconstrucción de nubes, TIROS III, órbitas 823, 1905 TMG y 824, 2051 TMG, Septiembre 7, 1961 y flujo de corriente de superficie, Septiembre 7, 1961 (ver leyenda Fig. 4).

Fig. 14. Cloud reconstruction, TIROS III, orbits 823, 1905 GMT, and 824, 2051 GMT, 7 September, 1961, and surface streamflow, 1800 GMT, 7 September, 1961 (See legend Fig. 4).



Claramente es visible un vórtice en la configuración de nubes de la Figura 14, notándose bien las dos grandes bandas espiraladas al norte y sur de la masa central de nubes. La banda del norte yace obviamente sobre una línea de convergencia que marca una zona frontal y la del sur que indica una zona de convergencia en el aire tropical que se mueve al norte. Dichas espirales de nubes a gran escala alrededor de ciclones son ahora un rasgo familiar en fotografías de satélites.

En el mapa de temperaturas de radiación (Fig. 15), la más fría (más alta) cima de nubes se localiza en la masa central circular de nubes del huracán y a la derecha del centro de circulación, sin verse un ojo en los datos de radiación. Las nubes muestran mucho menor estructura bandeada y más simetría en la etapa de madurez de lo que era evidente en las primeras fases del desarrollo.

A vortex is clearly visible in the cloud pattern of Figure 14. Note especially the two large spiral cloud bands north and south of the central cloud mass. The northern band lies along an obvious convergence line marking a frontal zone. The southern band indicates a zone of convergence in the northward moving tropical air. Such large scale cloud spirals around cyclones have now become a familiar feature on satellite photographs.

On the radiation temperature map (Fig. 15) the coldest (highest) cloud top is located in the circular central cloud mass of the hurricane, and to the right of the circulation center. No eye is discernible in the radiation data. The clouds show considerably less band structure and more symmetry in the mature stage than was evident in the earlier stages of development.

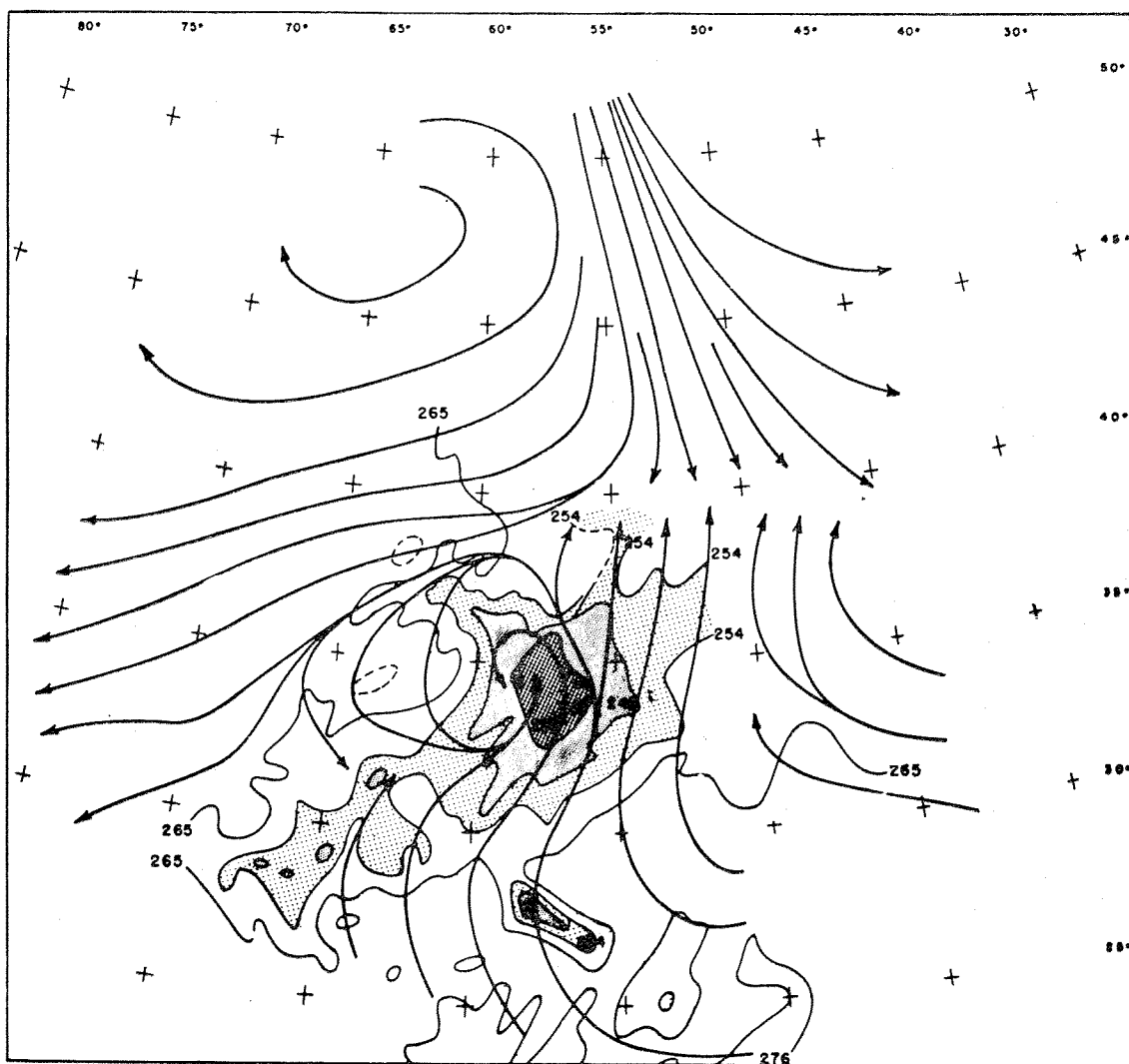


Fig. 15. Isothermas  $T_{BB}$ , TIROS III, órbita 825, 2052-2102 TMG, Septiembre 7, 1961 y flujo de corriente de superficie, 1800 TMG, Septiembre 7, 1961 (ver leyenda Fig. 3).

Fig. 15.  $T_{BB}$  isotherms, TIROS III, orbit 825, 2052-2102 GMT, 7 September, 1961, and surface streamflow, 1800 GMT, 7 September, 1961 (See legend Fig. 3).

## SUMARIO

Los datos de radiación infraroja de satélites no sólo son un suplemento necesario de fotografías de nubes, sino que parecen tener aún mayor valor sinóptico que las propias fotografías.

En el caso de Betsy (1961) tal vez el huracán se formó en una región de la CIT o al sur, caracterizada por una ancha banda de nubes y un montículo central de cimas de nubes altas. Antes de la aparición del huracán, la altura de la planicie de nubes llegó al máximo.

Con la formación del huracán la topografía de cimas de nubes cambió de una planicie a gran escala a una estructura bandeada a menor escala, condición que pareció deberse tanto a subsistencia meso-escala como a convergencia intensificada y ascenso.

Al madurar el huracán desapareció la estructura bandeada de las nubes reemplazándola un montículo de nubes más simétricas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al National Weather Satellite Center del U. S. Weather Bureau haber proporcionado las fotografías y cuadrículas usadas en el presente estudio y al Goddard Space Flight Center NASA, por los datos de radiación infraroja de TIROS III.

## SUMMARY

Infrared radiation data from satellites are not only a necessary supplement to cloud photography, but appear to be of even greater synoptic value than the photographs themselves.

In the case of Betsy (1961) the hurricane apparently formed in a region on or south of the ITC characterized by a broad band of clouds and a central mound of high cloud tops. The height of the highest cloud plateau rose prior to appearance of the hurricane.

With the formation of the hurricane the cloud top topography changed from a large scale plateau to smaller scale banded structure. The bandedness appears to be due as much to subsidence as to intensified convergence and lifting.

As the hurricane matured the banded cloud structure disappeared and was replaced by a more symmetric mound-shaped cloud top.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors are indebted to the National Weather Satellite Center of the U. S. Weather Bureau for providing the photographs and grids used in this study, and to the Goddard Space Flight Center, NASA, for the TIROS III infrared radiation data.

## BIBLIOGRAFIA

- DUNN, G. E. & STAFF, U. S. WEATHER BUREAU OFFICE, MIAMI. 1962. The Hurricane Season of 1961. *Mo. Weather Rev.*, 90:107-119.
- FRITZ, S. 1962. Satellite Pictures and the Origin of Hurricane Anna. *Mo. Weather Rev.*, 90:507-513.
- FRITZ, S. & J. S. WINSTON. 1962. Synoptic Use of Radiation Measurements from Satellite TIROS III. *Mo. Weather Rev.*, 90:1-9.
- KRUEGER, A. F. & S. FRITZ. 1961. Cellular Cloud Pattern revealed by TIROS II. *Tellus*, 13:1-7.
- RAO, P. K. & J. S. WINSTON. 1963. An Investigation of Some Synoptic Capabilities of Atmospheric "Window" Measurements for Satellite TIROS II. *Jour. Appl. Meteor.*, 2:12-23.
- STAFF MEMBERS, GODDARD SPACE FLIGHT CENTER. 1962. TIROS III Radiation Data Users' Manual, 71 pp.
- U. S. FLEET WEATHER FACILITY. 1962. Annual Tropical Storm Report 1961, OPNAV Report 3140-9, Miami, Florida.
- U. S. WEATHER BUREAU. 1961-1962. Catalogue of TIROS III Cloud Photography. Passes 001-725, October 1961; Passes 726-1155, January 1962.) Meteorological Satellite Laboratory, Washington, D. C.
- WARK, D. Q., G. YAMAMOTO & J. H. LIENESCH. 1962. Methods of estimating Infrared Flux and Surface Temperature from Meteorological Satellites. *Jour. Atmospher. Sci.*, 19:369-384.

## BIBLIOGRAPHY