

# Hidrología y desarrollo de los recursos hídricos

## Previsión de inundaciones provocadas por las lluvias asociadas a los ciclones tropicales \*

### Introducción

Este estudio pretende resolver el problema que presenta la producción de las cantidades de precipitación resultante de las lluvias procedentes de ciclones tropicales y causantes de inundaciones desastrosas. Desde hace algunos años la utilización de fotografía procedentes de satélites ha permitido obtener considerables progresos en el conocimiento del comportamiento de los ciclones tropicales. En 1969 se publicó una clasificación de los ciclones tropicales según las fotografías de los satélites para el hemisferio norte, por J. Oliver *et al* (1969). Esta clasificación se ha establecido teniendo en cuenta las dimensiones de la masa nubosa central, la estructura de las bandas especiales y la posición y forma del centro de la perturbación. Esta clasificación ha sido adaptada al hemisferio sur por el Servicio Meteorológico de la Isla de la Reunión, en el sudoeste del Océano Indico. En la *figura 1* se señalan las 8 clases incluidas en la clasificación y que han sido adaptadas al hemisferio sur (Oliver *et al*), en tanto que la *figura 2* ilustra la fases X1 a X4 de la evolución de un ciclón.

### Determinación del viento medio máximo y de los valores de la presión en el centro, en ciclones de fase X

Cuando se ha podido clasificar una perturbación en una de las fases X representadas en la *figura 1*, es posible determinar la fuerza máxima del viento en la vecindad de esta perturbación, sirviéndose de un ábaco que establece una relación entre la fase (X1, X2, etc.) y el diámetro de la zona nubosa central. Tomando como ejemplo una perturbación detectada sobre una imagen de satélite y clasificada en la categoría X3, si el diámetro de la zona nubosa central es de 7 a 8 grados de latitud, se puede deducir, a partir del ábaco, que el viento alcanzará una velocidad de 90 nudos ( $46 \text{ ms}^{-1}$ ) como mínimo. También es posible determinar con aproximación la presión en el centro de la perturbación, según la fase en que ha sido clasificada. Para determinar la presión en la Isla de la Reunión se ha utilizado un ábaco adaptado a las condiciones del Sudoeste del Océano Indico.

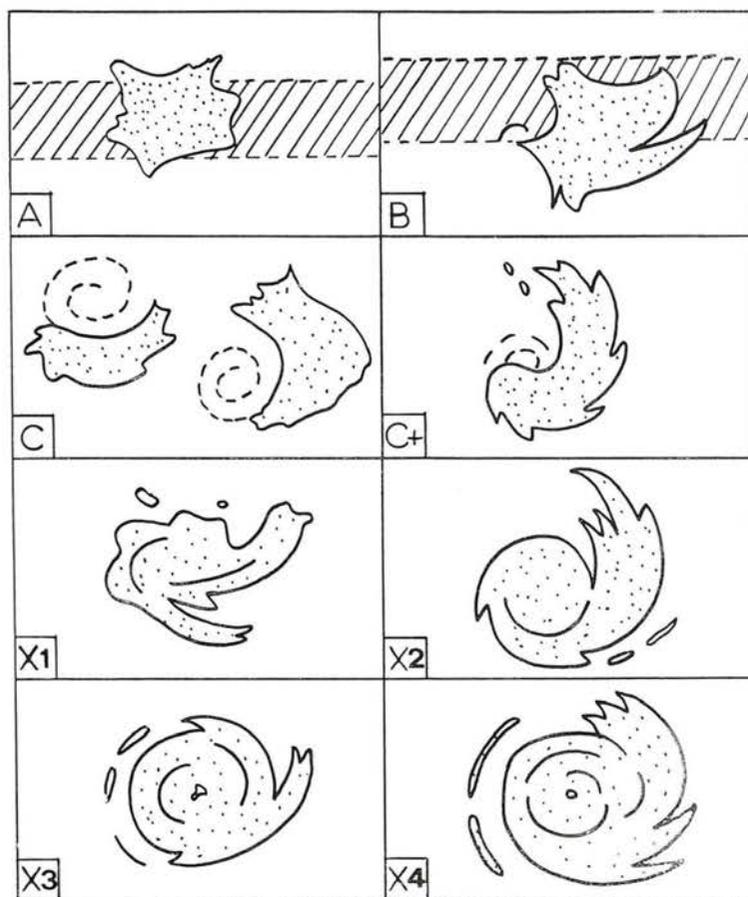
### Determinación de las cantidades de precipitación asociadas a un ciclón tropical

La Isla de Reunión ( $21^{\circ} \text{ S}$ ,  $55^{\circ} \text{ E}$ ), se encuentra afectada por el paso de numerosos ciclones tropicales, por lo que se han estudiado las características de las precipitaciones relacionadas con los ciclones que han pasado sobre la isla o por sus proximidades durante los últimos cien años, tratando de aplicar los datos obtenidos en las cuencas de dicha isla.

La *figura 3* muestra la fotografía del ciclón *Fabienne* obtenida por un satélite, y en sobreimpresión, las zonas nubosas que están asociadas

\* Este artículo se basa en el informe presentado por el señor M. R. Trendel, del Servicio Meteorológico Nacional francés, al Grupo de trabajo sobre predicción hidrológica de la Comisión de Hidrología de la OMM.

a las diferentes cantidades de precipitación. Estas zonas, A a E, se definen en la *Tabla 1*.



*Figura 1.*—Clasificación de las perturbaciones tropicales y subtropicales, según datos procedentes de satélites, adaptada al hemisferio sur por Oliver *et al.* (1969). La zona de convergencia intertropical está sombreada en las fases A y B. Según Oliver *et al.* 1969) las deducciones más importantes se resumen de la siguiente manera:

- |   |   |
|---|---|
| <p>A: Líneas o bandas de nubes no curvas</p>  | <p>B: Líneas o bandas de nubes débilmente formadas; centro mal definido</p>   |
| <p>C: Líneas o bandas de nubes bien organizadas; centro bien definido en el exterior de una densa masa de nubes</p>               |   |
| <p>X1: Bandas espirales débilmente formadas; centro de la organización mal definido dentro de la masa nubosa central</p>          | <p>X2: Bandas bien formadas; bandas espirales definen el centro dentro de la masa nubosa central</p>                      |
| <p>X3: Grado moderado de concentricidad para las bandas de nubes; ojo irregularmente formado dentro de la masa nubosa central</p> | <p>X4: Alto grado de concentricidad para las bandas de nubes; ojo circular cerca del centro de la masa nubosa central</p> |

**TABLA 1**

**Precipitaciones asociadas a los ciclones tropicales**

(Zonas a las que se refiere la figura 3)

Zona	Dirección del viento	Precipitación
A	Noroeste	Moderada a fuerte
B	Norte	Fuerte
C	Nordeste a este	Muy fuerte a intensa
D	Sureste a sur	Muy fuerte a intensa
E	Suroeste a sur	Moderada a fuerte

El relieve de la isla es muy irregular, contando con cuencas de pequeña escala (véase figura 4) que pueden considerarse como modelos. Tiene forma circular con un diámetro del orden de 80 km. Las montañas alcanzan 3000 metros y las mesetas se encuentran situadas a 1500 metros.

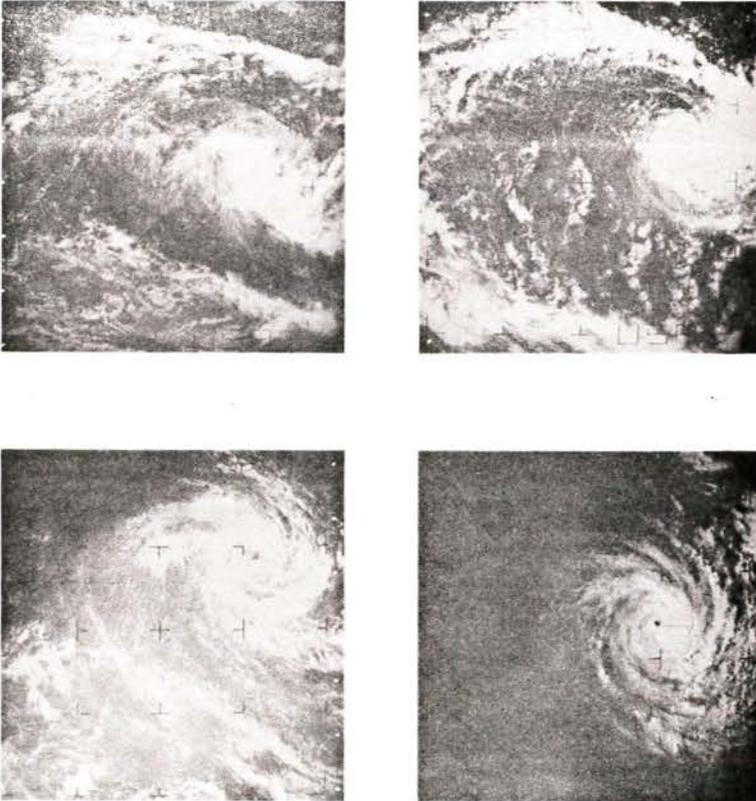


Figura 2.—Fotografías de satélite relativas a ciclones en fases X1 a X4 recibidas en el Servicio Meteorológico de la isla Reunión.  
 Imagen superior izquierda: Ciclón *Elspeth*; fase X1. Imagen superior derecha: Ciclón *Belinda*; fase X2.  
 Imagen inferior izquierda: Ciclón *Noreen*; fase X3. Imagen inferior derecha: Ciclón *Monique*; fase X4.

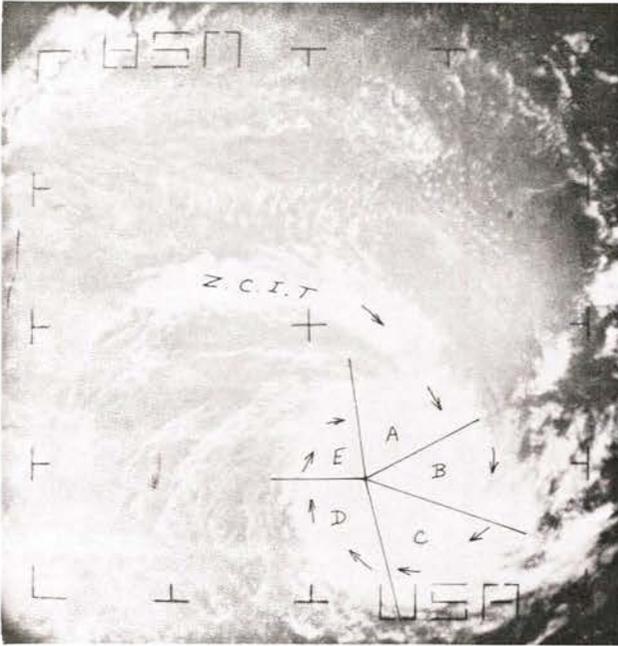


Figura 3.—Ciclón Fabienne fotografiado por el ESSA 8, a las 0536 GMT el día 17 de febrero de 1972. Superpuesta sobre la fotografía están las zonas a que hace referencia la tabla 1.

En tarjetas perforadas se han registrado las trayectorias de unos 800 ciclones que pasaron cerca de la isla o sobre la misma a lo largo de los últimos cien años. De igual manera se ha procedido con las cantidades de lluvia diaria registrada en 160 estaciones pluviométricas desde el año 1950. Dado que el Servicio Meteorológico de Reunión cuenta con un receptor de fotografías de satélites y un radar, es posible recurrir a las técnicas más modernas en la predicción de lluvias intensas.

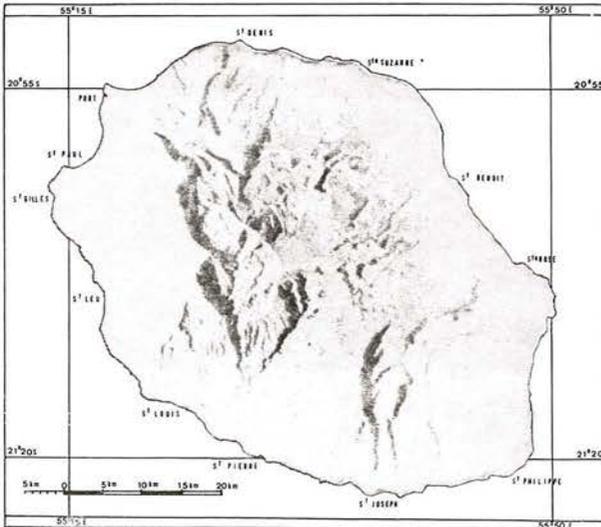


Figura 4.—La isla Reunión mostrando su relieve y las distintas formas de las cuencas.

Para efectuar este estudio se han seleccionado siete ejemplos característicos de ciclones, con las siguientes trayectorias:

- ciclón que se desplaza del noroeste al sudeste pasando por las proximidades del sur de la isla;
- ciclón que rodea la isla, según una trayectoria parabólica;
- ciclón de trayectoria irregular pero que afecta a todas las cuencas de la isla;
- ciclón con desplazamiento de norte a sur y que pasa por el oeste de la isla;
- ciclón con desplazamiento de nordeste a suroeste y que pasa sobre la isla;
- ciclón con desplazamiento de nordeste a suroeste y que pasa al sur de la isla;
- ciclón con trayectoria irregular pero con un movimiento general de dirección este-oeste.

**TABLA 2**  
**Posición del centro del ciclón en relación al relieve y a las zonas que con más probabilidad sean afectadas por precipitaciones fuertes**  
 (según la Figura 5).

Posición del centro del ciclón en relación al relieve	Zonas amenazadas
Noroeste y oeste	1 y 4
Suroeste y sur	1 y 2
Sureste y este	2 y 3
Nordeste y norte	3 y 4

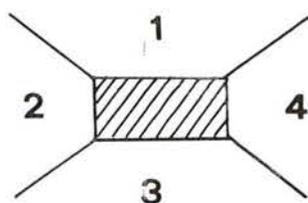


Figura 5.—El relieve (sombreado) y las distintas zonas de exposición a que se hace referencia en el texto.

- 1.—Exposición al norte
- 2.—Exposición al oeste
- 3.—Exposición al sur
- 4.—Exposición al este

### Resultados obtenidos

Este estudio ha permitido deducir los siguientes resultados de importancia:

Las lluvias intensas se recogen en las zonas de perturbación expuestas al viento, en tanto que en las regiones a sotavento sólo pueden observarse lluvias débiles.

La cantidad y duración de las precipitaciones observadas en las distintas zonas dependen principalmente del tipo de perturbación, del diámetro de la masa nubosa, de la velocidad de desplazamiento de la perturbación y de la distancia del centro del ciclón.

La relación entre las cantidades de precipitación caída al nivel del mar con las recogidas a diferentes altitudes es muy variable y depende de la posición que ocupa la zona interesada en el interior del sistema nuboso del ciclón (por ejemplo, a una altura de 1500 metros la relación puede variar de 2,5 a 7).

### Determinación de los riesgos de inundación

La figura 5 representa la situación de las cuencas (numeradas del 1 al 4). La Tabla 2 indica las cuencas que tienen un riesgo mayor de inundación, debido a las distintas posiciones del centro del ciclón con respecto al relieve. Puesto que la duración de la lluvia es proporcional al tiempo que tarda en pasar el ciclón sobre una zona dada, el riesgo de inundación es mayor cuando el ciclón se desplaza más lentamente. Las cuencas ex-

puestas al este y al sur (zonas 3 y 4 de la *figura 5*) son las que reciben las precipitaciones más intensas.

*Determinación de los riesgos de inundación de una cuenca en función de su exposición.*

A continuación se citan dos ejemplos de los resultados obtenidos:

**TABLA 3**

**Cantidades de precipitación (mm) recogidas en la zona 4 (*Figura 5*) cuando un ciclón está situado al norte o al oeste, o pasa sobre la zona estudiada**

Distancia en grados latitud desde el centro del ciclón	Altitud en metros					
	Nivel del mar	100	500	1000	1500	> 1500
6-7	50	55	85	120	150	170
4-5	100	120	200	300	400	500
2-3	150	200	350	500	700	900
1-2	200	280	500	800	1000	1200
Paso del centro	300	400	700	1200	1600	1800

*Cuencas expuestas al este —Zona 4.*—Como puede apreciarse en la *figura 5* y en la *Tabla 2*, los ciclones centrados al norte y al oeste son los que generalmente provocan las lluvias más intensas y las inundaciones resultantes. Las zonas afectadas se encuentran situadas donde el sistema nuboso alcanza mayor desarrollo. La *Tabla 3* contiene cálculos estadísticos de las cantidades de lluvia recogidas al nivel del mar y a diferentes altitudes, dependiendo de la distancia, expresada en grados, del centro de los ciclones de la fase X.

Esta tabla ofrece una estimación general de la lluvia caída en el tiempo que duró la perturbación. Aunque estas lluvias duren de 24 a 48 horas las intensidades más fuertes se limitan a 24 horas. Con una altitud de 1.500 m la cantidad de lluvia puede alcanzar e incluso pasar de 1.600 mm en 24 horas. Es indispensable prestar la debida atención a las cifras que figuran en esta tabla pues explican las catastróficas inundaciones que ocurren en distintos países.

**TABLA 4**

**Cantidades de precipitación (mm) recogidas en la zona 2 de la *Figura 5* cuando un ciclón está situado al sur o al este, o pasa sobre la zona estudiada**

Distancia en grados latitud desde el centro del ciclón	Altitud en metros					
	Nivel del mar	100	500	1000	1500	> 1500
4-5	50	60	90	125	160	180
2-3	100	120	200	300	400	500
1-2	150	180	350	500	650	800
Paso del centro	200	250	450	700	1000	1100

*Cuencas expuestas al oeste — Zona 2.*— Los ciclones centrados en el sur y en el este son los que provocan las lluvias importantes registradas en la zona. Los valores correspondientes figuran en la *Tabla 4*. La duración de estas lluvias es, normalmente, de menos de 24 horas ya que las zonas afectadas están situadas en la parte menos ancha de la masa nubosa.

Teniendo en cuenta las diferentes tablas (por ejemplo, las números 3 y 4), se ha podido calcular la relación entre las cantidades de precipitación caída a nivel del mar y en distintas altitudes. Esta relación varía en función de la distancia desde el centro del ciclón y según la posición de la cuenca en relación con la masa de nubes de la tormenta.

**TABLA 5**  
**Coefficiente de intensidad  $\alpha$**

*(Este coeficiente es válido hasta una altitud de 1800 m; no se disponen de datos suficientes por encima de dicha altura)*

<i>Posición del centro del ciclón en relación con la cuenca</i>	<i>Distancia en grados de latitud desde el centro del ciclón a la cuenca</i>				
	6-7	4-5	2-3	1-2	0-1
Norte	0.15	0.20	0.30	0.35	0.40
Noroeste	0.15	0.20	0.25	0.25	0.30
Nordeste	0.15	0.20	0.20	0.25	0.25
Sudeste	0.15	0.15	0.20	0.25	0.25
Este	—	0.15	0.20	0.25	0.25
Suroeste	—	0.15	0.20	0.25	0.25
Sur	0.15	0.15	0.20	0.25	0.25
Oeste	0.15	0.15	0.25	0.25	0.30

#### *Cálculo de la precipitación en distintas altitudes*

Hemos tenido que introducir un coeficiente de intensidad que oscila en función de la posición relativa de la superficie considerada con la masa nubosa. Los valores de este coeficiente, obtenidos de forma empírica, se señalan en la *figura 6* y en la *Tabla 5*. Los valores se han calculado para una altitud de 100 m. Con estos coeficientes, además del conocimiento de la precipitación a nivel del mar y de la posición de la cuenca relativa a la masa de nubes, se pueden calcular las precipitaciones a distintas alturas y en cualquier momento dado.

En estas condiciones basta aplicar la fórmula:

$$P_n = P_o (1 + \alpha n)$$

donde  $n$  es la altitud de la estación en hm. (Por ejemplo, para 100 m,  $n = 1$ ; para 200 m,  $n = 2$ ).

$P_o$  = precipitación a nivel del mar

$\alpha$  = coeficiente de intensidad (obtenido según la *Tabla 5*)

TABLA 6

Precipitaciones estimadas (mm) al nivel del mar, para ciclones que alcancen las fases X2 a X4

Zonas (véase Figura 5)	Posición del ciclón en relación con la cuenca	Distancia en grados latitud de la cuenca al centro del ciclón				
		6-7	4-5	2-3	1-2	Paso del centro
1.—Exposición al norte	Oeste, después sur	20	50	100	200	300
2.—Exposición al oeste	Este, después sur	—	50	100	150	200
3.—Exposición al sur	Este, después norte	30	100	120	180	200
4.—Exposición al este	Norte, después oeste	50	100	150	200	300



Figura 6.—Ciclón Gertrude el día 31 de enero de 1973 con los coeficientes de intensidad superpuestos

*Cálculo de la precipitación sobre una cuenca*

El requisito más imprescindible para poder calcular la precipitación sobre una cuenca, es dar por supuesto que se conoce la trayectoria del ciclón. Para conseguirlo es necesario prever la cantidad de precipitación, antes de iniciarse la precipitación más intensa.

La Tabla 6 indica el orden de importancia de las precipitaciones previstas a nivel del mar, para cuencas expuestas «al viento». Las cifras de la tabla se refieren a un ciclón que origina fuertes precipitaciones durante un período de veinticuatro horas. Si, por el contrario, el ciclón tarda menos de veinticuatro horas en sobrepasar la zona, habría que reducir proporcionalmente las cifras de la tabla.

En cuanto a los ciclones de las fases A a la X1, habría que calcular las precipitaciones originadas por un ciclón a una distancia de 4 a 6 grados de

latitud, incluso si la tormenta evoluciona mucho más cerca de la cuenca considerada. En esta situación, el sistema nuboso todavía no se ha organizado bien alrededor del centro de la perturbación.

#### *Utilización práctica de los resultados — Desarrollo de un modelo*

Actualmente se ha desarrollado un modelo empleando tanto los resultados de este estudio como el método estadístico de predicción de las trayectorias de los ciclones. De este modo, una vez que se haya formado el núcleo de precipitación, a una distancia, que a veces está a varios miles de kilómetros, y conociendo la trayectoria del ciclón, es posible calcular las diversas cantidades de las probables precipitaciones en las distintas cuencas. A medida que avanza el ciclón, se actualizará continuamente la trayectoria prevista y, por consiguiente, habrán de ajustarse también continuamente las predicciones de precipitación. De este modo, el hidrólogo tendría acceso a una información que le permitiría predecir riadas desastrosas en determinadas zonas.

Este modelo, que se emplea para la zona sudoeste del Océano Indico podría, sin dudas, adaptarse a todas las cuencas, independientemente de que se encuentren en el hemisferio norte o sur.

#### BIBLIOGRAFIA

OLIVER, V. J. *et al* (1969). *Application of meteorological satellite data in analysis and forecasting*. (Aplicación de datos meteorológicos procedentes de satélites al análisis y predicción.) ESSA Tech. Rpt. NESC 51 (también Air Weather Service Technical Report No. 212). Capítulo 4, Sección E; páginas 1-11.

#### **Datos hidrológicos para el diseño de proyectos de recursos hídricos**

Una de las mayores preocupaciones que siempre ha tenido la Comisión de Hidrología ha sido la necesidad de poder disponer de una información hidrológica completa para el eficaz planeamiento, diseño y explotación de los recursos hídricos; esta preocupación se ha reflejado siempre en las atribuciones conferidas a la Comisión y en el actual plan de prioridad de las actividades del Programa de hidrología operativa de la OMM.

Aparte de las diversas publicaciones de la OMM, editadas sobre este tema, se ha prestado gran atención al desarrollo y mejora del material de orientación sobre aplicaciones de la hidrología en la explotación hídrica, que figura en la *Guía de prácticas hidrológicas* (OMM — Núm. 168). Como consecuencia, el Grupo de trabajo sobre datos de diseño hidrológico para proyectos de recursos hídricos de la Comisión de Hidrología, se reunió en Ginebra en enero de 1976, bajo la presidencia del Profesor L. R. Beard, de Estados Unidos.

Los debates de la reunión de este Grupo de trabajo se ocuparon de perfeccionar una nueva redacción de las secciones de la Guía que tratan del aprovechamiento del agua, planificación de inundaciones y cálculo de los niveles máximos en los pantanos. En la reunión se estudiaron también varios informes sobre temas de interés actual como por ejemplo, cursos de agua, relación de calidad del agua, y carga térmica de los ríos y masas de agua.