

APLICACIONES HIDROLOGICAS DEL RADAR METEOROLOGICO

Por Ian D. CLUCKIE *

Preámbulo histórico

El uso del radar militar durante la Segunda Guerra Mundial —y la necesidad de eliminar la interferencia que causaba la precipitación cuando se estaba usando el radar de forma operativa para detectar aeronaves— fue el origen del radar meteorológico moderno. Los primeros trabajos sobre física de nubes abrieron el camino para el estudio de las medidas cuantitativas de la precipitación y de la estructura de las tormentas de forma que se pudieran formular predicciones de precipitación a corto plazo basadas en el movimiento, crecimiento y debilitación de las células de lluvia identificadas por los ecos del radar. Durante los últimos 50 años, el radar meteorológico ha evolucionado hasta ser una fuente primordial de información para el meteorólogo y, desde comienzos de los años 60, también se han logrado avances en el campo de la hidrología.

En el Reino Unido, por ejemplo, el resultado fue el programa embrionario de investigación, iniciado en 1966 por la Junta de Recursos Hídricos, que estaba dirigido esencialmente a la consecución de nuevos métodos para la operatividad de los sistemas de regulación fluvial y que se conoce como el Proyecto de Radar Meteorológico del Dee (véase la Sección Central de Planificación Hídrica, 1977). Este proyecto utilizaba un radar del tipo Plessey 43S (longitud de onda de 10 cm en la banda S) hasta 1973, en que el radar fue transformado de banda S a banda C (longitud de onda de 5 cm) con el fin de reducir el problema de los ecos permanentes y de las bandas brillantes. Collinge proporcionó (1987) una útil descripción del

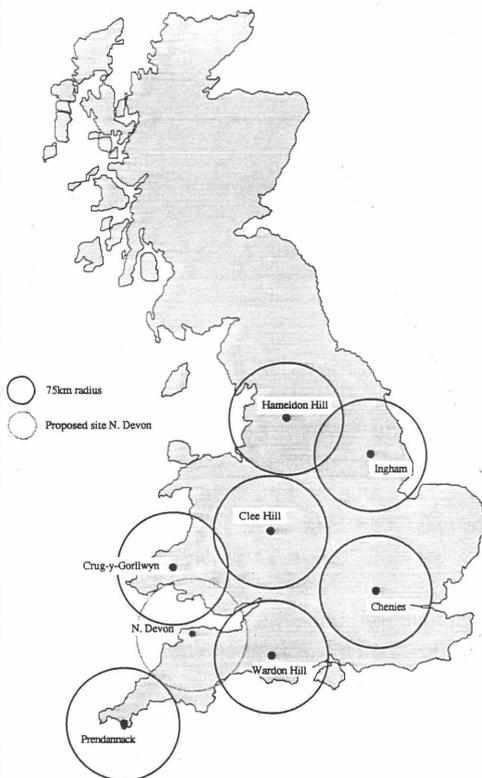


Figura 1— Red de radares meteorológicos en Inglaterra y Gales, 1989.

desarrollo del Proyecto del Dee y contribuyó en la descripción de su sucesor, el Proyecto del Radar del Noroeste, puesto en marcha en 1977. Este proyecto de gran éxito condujo al establecimiento del primer radar meteorológico automático del Reino Unido, que producía datos cuantitativos de

* Profesor de Recursos Hídricos, Departamento de Ingeniería civil, Universidad de Salford, Reino Unido.

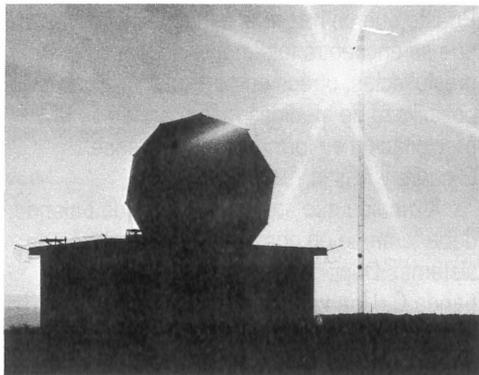
precipitación en tiempo real. Se estimó que el radar era operativamente fiable, por lo que fue totalmente incorporado al sistema regional de comunicaciones de la Jefatura del Noroeste y, además, se convirtió en el prototipo para una red de radares meteorológicos. El uso operativo de este radar alentó el desarrollo de modelos de predicción hidrológica en tiempo real, de predicciones cuantitativas de precipitación a corto plazo y el uso operativo de los datos en combinación con la telemetría existente para la calibración en tiempo real. Desde 1981, un grupo de trabajo conjunto Meteorological Office/National Water Council (National Water Council, 1983), tomó en consideración la construcción de una red nacional de radares meteorológicos (véase la figura 1).

Otros muchos países han experimentado un proceso un tanto similar y en las actas del seminario sobre creación de redes de radares meteorológicos, celebrado en Bruselas en septiembre de 1989 por la Comisión de las Comunidades Europeas como parte del proyecto COST-73, puede encontrarse un estudio sobre un gran número de programas nacionales para redes de radares. El trabajo presentado al Seminario del COST-73 junto con las contribuciones al primer simposio internacional sobre aplicaciones hidrológicas del radar meteorológico (Universidad de Salford, Reino Unido, agosto de 1989) han proporcionado una descripción definitiva del estado actual del tema. Ambas reuniones fueron copatrocinadas por la OMM.

Tecnología del radar y aspectos meteorológicos

La tecnología del radar ha tenido avances considerables en los años recientes y los objetivos primordiales de un radar meteorológico que deba formar parte de una red, tal como los definió Lawler (1989), son:

- Detección y medida de toda precipitación cuya intensidad sea igual o superior a 1 mm h^{-1} para un alcance de hasta 200 km;



El radar meteorológico de banda C de Hameldon Hill (la primera red de radar meteorológico totalmente automático del Reino Unido).

- Detección de "lluvia" para un alcance de hasta 400 km;
- Resolución espacial de 1 km;
- Funcionamiento automático;
- Alta fiabilidad, ya que el radar se usa como fuente primaria de datos para fines de avisos de inundaciones.

En general, cuanto mayor es la longitud de onda menor es la atenuación de la señal procedente de precipitaciones intensas, por lo que, en consecuencia, los radares de 10 cm de banda S se usan en las zonas tropicales y el radar de longitud de onda de 5 cm de banda C se considera generalmente como el más apropiado para fines hidrometeorológicos del radar en latitudes templadas. El interés actual se ha centrado en la aplicación de los equipos de banda X (longitud de onda 3,2 cm) de bajo coste para su utilización en zonas urbanas. El alcance cuantitativo de dichos equipos parece estar entre los 30-50 km desde el radar, mientras que normalmente se asocia a estos equipos de bajo coste una amplitud del haz de $2,5^\circ$. Es posible que funcione un radar normal de banda S como un equipo de banda X con una amplitud de haz de menos de $0,25^\circ$.

Puesto que un haz más estrecho es probable que se encuentre totalmente ocupado por la precipitación, ofrece en particular una mayor posibilidad de medidas más precisas de la precipitación en forma de nieve (véase Giguere y Austin, 1989).

A medida que los costes han ido bajando, debe tomarse en consideración la adición de sistemas Doppler a las redes existentes de banda C. Una ventaja particular de la instalación Doppler es su mayor capacidad para detectar los ruidos de tierra y la propagación anómala. Sin embargo, este realce de su capacidad es improbable que pueda ser utilizado para todo el alcance cuantitativo de los aparatos de banda C existentes. Además, el sistema Doppler proporciona una descripción más detallada de la estructura tridimensional de una tormenta, lo cual, en zonas afectadas por actividad convectiva significativa, supone una notable ventaja. Parece probable que este tipo de radar tomará la configuración deseable para fines hidrológicos.

Permanece la controversia relativa al empleo de las técnicas de polarización doble que promete contribuir a solucionar el problema de la identificación y eliminación de la banda brillante así como a proporcionar una descripción más detallada del tipo de precipitación (por ejemplo, granizo, nieve, etc). Caylor y Illingworth (1989) han observado que las medidas de reflectividad horizontal y vertical pueden usarse para indicar la naturaleza del "blanco", ya que la correlación copolar entre las dos señales puede discriminar entre los distintos tipos de precipitación. Esto también está limitado en su alcance en comparación con el alcance cuantitativo normal con una red de radar de banda C, pero puede proporcionar una solución para la identificación de riesgo de granizo en ciertos casos de la comunidad agrícola.

Aplicaciones hidrológicas

Los beneficios hidrológicos potenciales del radar meteorológico cuantitativo provienen

principalmente de su capacidad para suministrar oportunamente más información espacial sobre la precipitación y sus efectos en los procesos de avisos de inundación, evaluación y control de los recursos hídricos, diseño y funcionamiento del drenaje urbano, gestión agrícola y hortícola, trabajos de construcción y edificación y gestión del transporte. La mayoría de estos campos pertenecen al sector tradicional de la ingeniería civil y por esto no sorprende que haya sido la actividad financiera del sector público la principal responsable de la promoción de dichas actividades.

Mucha de la actual investigación se ha centrado en los distintos intereses potenciales hidrológicos y puede ser convenientemente considerada bajo tres básicos —aunque no exclusivos— títulos:

- **Calibración de radares meteorológicos**

Incluye la evaluación de la precisión de las medidas de lluvia y la diagnosis de las causas de error. En general, el método se ha dirigido a refinar la relación básica que existe entre la reflectividad del radar (Z) y la intensidad de lluvia (R). Esto se puede conseguir por la medida directa/indirecta de la llamada relación Z - R o por referencia a las medidas del pluviómetro en el suelo ("verdad en el suelo") en tiempo real. La dificultad de decidir qué es "verdad" y comparar ambas, forma el meollo de la controversia que rodea el problema de la calibración.

Los hidrólogos están preocupados en dos áreas de problema fundamentales. La primera es la producción de productos de entrada tales como medidas de lluvia, estadísticas y predicciones de lluvia. La segunda es la clase de productos de salida que resultan de la precipitación que ha sido modificada por el sistema hidrológico. Estos son, *inter alia*, avisos y predicciones de inundación, cálculos de entrada de caudales laterales en modelos de cuencas

fluviales y decisiones de control producidas por modelos hidrólogos operativos en sistemas que poseen algún elemento control *activo* a diferencia de los de control *pasivo*. En la actualidad no está claro qué exactitud de calibración se requiere para obtener estos distintos productos y el problema consiste, en cierto modo, en la falta de directrices hidrológicas sobre las necesidades de resolución espacial y cronológica de los datos.

Sobre este tema se han realizado muchas contribuciones valiosas en el simposio de Salford sobre aplicaciones hidrológicas del radar meteorológico y se proporcionó considerable información sobre aspectos que van desde la medida cuantitativa de la precipitación en forma de nieve hasta la combinación de los datos del radar con las densas redes telemétricas existentes de que puede disponerse localmente. El problema es todavía más complicado debido a los argumentos meteorológicos actuales que relacionan las ventajas y desventajas de la tecnología del radar disponible en la actualidad, por ejemplo, la banda C frente a la banda X, la polarización doble y las propiedades Doppler.

Los problemas fundamentales de la calibración en el momento actual están relacionados con la influencia de la orografía, la eliminación de los ruidos de tierra, la propagación anómala y la supresión de los efectos de la banda brillante. Las soluciones consideradas incluyen la modelización numérica de los campos de precipitación y el uso de sistemas "expertos" en tiempo real. Es conveniente recordar que, incluso aunque los problemas de calibración estuvieran totalmente superados (un objetivo poco realista en cualquier fuente de datos obtenidos por teledetección), los productos hidrológicos obtenidos a partir de la ecuación adolecerán todavía de problemas tales como la determinación de la precipitación efectiva en

tiempo real y la disponibilidad de predicciones con antelación suficiente para la consecución de predicciones de inundación. La gravedad del problema de la calibración del radar solamente es igualada por las dificultades inherentes a la calibración de un modelo de sistema hidrológico (véase Collier y Cluckie, 1985).

- **Predicciones hidrológicas en tiempo real**

La elección del modelo adecuado para la predicción del caudal en tiempo real deberá tener en cuenta la exactitud requerida en la predicción, el tiempo disponible entre la elaboración de la predicción y la ocurrencia de la inundación, los recursos humanos e informáticos disponibles y, también, la resolución de los datos de las medidas de precipitación.

En la actualidad se dispone de numerosos modelos de predicción de precipitación y escorrentía (véase Reed, 1984) y la conclusión general a la que se ha llegado acerca de las aplicaciones en tiempo real es que "lo sencillo es lo mejor". Sin embargo, además de las formas usuales de modelos de estructura fragmentada, tales como los modelos de unidad hidrográfica y de función de transferencia (véase Cluckie y Owens, 1987; Troch y otros, 1989) existen otras dos categorías principales. La primera es la clase de modelos semidistribuidos (véase Cluckie y otros, 1989, y Rodríguez y otros, 1989) y la segunda es la del modelo totalmente distribuido o modelo distribuido basado en puntos de rejilla (véase Pao-shan Yu, 1989, y Chander y Fattorelli, 1989). La figura 2 muestra cómo una malla regular coincidente con la resolución de los datos del radar se superpone sobre una cuenca. Después, un modelo del tipo ilustrado en la figura 3, se usa para convertir la entrada basada en puntos de rejilla individuales en caudal de desagüe de la cuenca. La principal dificultad con un modelo de este tipo de estructura es que, al igual que con

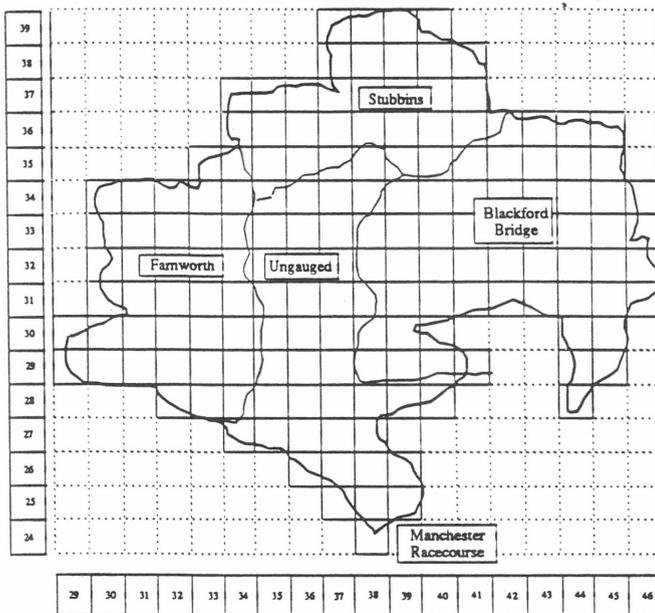


Figura 2- La retícula correspondiente a la cuenca del Irwell (adaptado de Paoshan Yu, 1989).

los modelos totalmente distribuidos, hay demasiados parámetros estrechamente relacionados y una consecuente escasez de datos tanto en los no obtenidos a través de línea como, sobre todo, los obtenidos por línea, que pueden ser utilizados con fines de actualización y estimación de parámetros. Este campo continúa estando dentro del entorno del investigador y no están aún garantizadas las aplicaciones prácticas a gran escala.

En el área de los modelos de inundaciones repentinas, el empleo de los datos cuantitativos de radar representará seguramente un gran beneficio, pero parece probable que el avance estará en consonancia con el de las predicciones de precipitación a corto plazo y el de los sistemas expertos en tiempo real.

- **Sistemas de drenaje urbano**

El potencial verdadero para el empleo de los datos cuantitativos de radar en sistemas de drenaje urbano, aunque todavía han de ser evaluados y consecuentemente

comprendidos, dependerán probablemente de una solución satisfactoria al problema de la recalibración no automática, lo que dará lugar a un archivo en continuo crecimiento de distribución de tormentas para uso de los diseñadores. Otra importante influencia será el éxito (o lo contrario) de la filosofía del control en tiempo real (CTR) en lo referente al funcionamiento operativo y al diseño de las redes de drenaje. Esto dependerá en gran parte de la validez de la suposición de que las estrategias de control *activo* (tales como control de almacenamiento mediante compuertas y bombeo) serán adoptadas con preferencia sobre los elementos de control *pasivo* (tales como desagües, etc.) en algo que tradicionalmente ha sido un régimen de control *pasivo*. Los costes y beneficios de la CTR (véase Schilling, 1987) están aún por determinar, pero el trabajo descrito por Green (1989) se centra en la evaluación de las ventajas de la introducción de los procedimientos CTR. Huff y otros (1981) consideraron este problema con algún detalle y, con los crecientes costes de capital para la renovación y puesta a punto de los aportes

subterráneos y la necesidad de reducir el impacto sobre la calidad del agua de los caudales combinados de las alcantarillas en muchas áreas urbanas del mundo, el trabajo para las aplicaciones del radar es probable que aumente considerablemente (véase Cluckie y Tyson, 1989; Verworn, 1989, y Shepherd, 1987).

Otras aplicaciones

Se han deducido nuevas aplicaciones que implican la aplicación del radar meteorológico a problemas de la evaluación de la inundación máxima probable (IMP) derivada de la precipitación máxima probable (PMP) (véase Pessoa, 1989), que permiten la transposición y maximalización de tormentas mediante el "archivo" de radar, con el fin de calcular inundaciones extremadas. Otros investigadores se han concentrado en el desarrollo de nuevos métodos de actualización de modelos en tiempo real con datos "ruidosos" (Rungo y Refsgaard, 1989) y en el desarrollo de métodos para la predicción a corto plazo de la

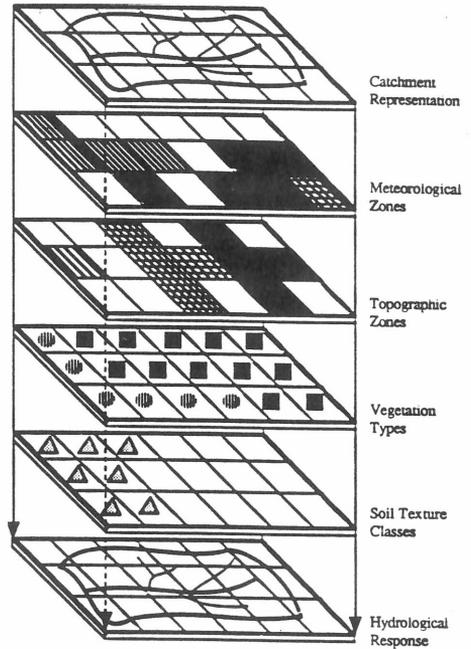


Figura 3- La simulación multicapas del modelo distribuido reticular (MDR) (adaptado de Pao-shan You, 1989).

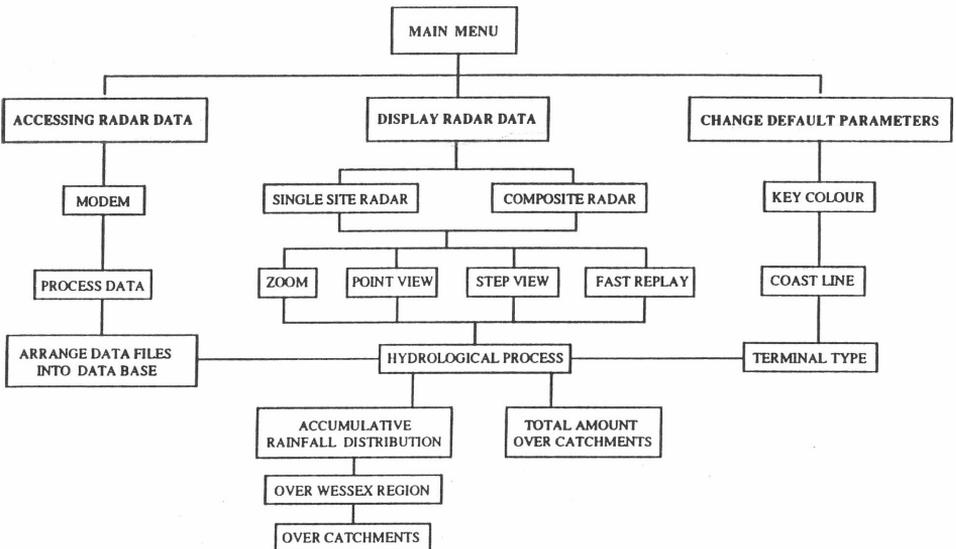


Figura 4- Representación esquemática del STORM (sistema para obtener medidas de radar).

precipitación, empleando métodos hidrológicos en lugar de los meteorológicos (véase Georgakakos y Krajewski, 1989). Se han construido sofisticadas instalaciones informáticas con el fin de permitir a los predictores de inundaciones el acceso a distancia a los datos de radar y a los modelos de predicción de inundaciones. La figura 4 es una representación esquemática del "STORM" (sistema para la obtención de medidas de radar) que actualmente está siendo implantado en las industrias hídricas del Reino Unido (véase Birks y otros, 1984) para acceso a distancia a los datos de radar meteorológico en tiempo real con fines de predicción de inundaciones.

Hidrometeorología - el tema común

Está claro que algunas de las redes de radar meteorológico que con más éxito funcionan, se han beneficiado de una estrecha colaboración entre hidrólogos y meteorólogos. También está claro que las aplicaciones hidrológicas continuarán precisando de medidas de precipitación de alta calidad a pequeñas escalas espaciales y cronológicas. El decenio de los años 90, será el más importante para el desarrollo del radar meteorológico desde un punto de vista hidrológico, puesto que se están poniendo a punto muchos sistemas que emplean datos de precipitación obtenidos por radar. Estas aplicaciones llevarán a una mayor demanda de la comunidad de investigadores según los sistemas de control remoto vayan alcanzando sus límites naturales. Este proceso necesitará la máxima cooperación entre las comunidades hidrológica y meteorológica, como indudablemente aparecerá reflejado en organizaciones internacionales como la OMM.

Referencias

BIRKS, C.J., A.P. BOOTMAN, I.D. CLUCKE and Han DAWEI, 1989: Wessex Flood Forecasting System. *Proc. Int. Symp. Hydrological Applications of Weather Radar*. University of Salford, United Kingdom.

- CAYLOR, I.J. and A.J. ILLINGWORTH, 1989: *Identification of the Bright Band and Hydrometeors using Co-polar Dual Polarization Radar*. Preprints 24th Radar Meteorology Conference, 27-31 March 1989, Tallahassee, USA. Amer. Meteor. Soc.
- CENTRAL WATER PLANNING UNIT, 1977: *Dee Weather Radar and Real-time Hydrological Forecasting Project*. Report by Steering Committee, CWPU, HMSO, London.
- CHANDER, S. and S. FATTORELLI, 1989: Adaptive Gridsquare-Based Geometrically Distributed Flood Forecasting Model. *Proc. Int. Symp. Hydrological Applications of Weather Radar*. University of Salford, United Kingdom.
- CLUCKIE, I.D., Pao-shan YU and K.A. TILFORD, 1989: *Real-Time Forecasting: Model Structure and Data Resolution*. Proc. Int. Seminar on Weather Radar Networking, COST-73, CEC, Brussels.
- CLUCKIE, I.D. and J.M. TYSON, 1989: Weather Radar and Urban Drainage Systems. *Weather Radar and the Water Industry*. British Hydrological Society Occasional Paper, 2, 65-73.
- COLLIER, C.G. and I.D. CLUCKIE, 1985: A Hydrological Study of the Real-Time Calibration of Radar Derived Rainfall Data. *Proc. Int. Symp. Advances in Water Engineering*. University of Birmingham. Elsevier, London.
- COLLINGS, V.K., 1987: The Development of Weather Radar in the United Kingdom. *Weather Radar and Flood Forecasting*. V.K. COLLINGS and C. KIRBY (Eds.). Chapter 1. Wiley.
- GEORGAKAKOS, K.P. and W.F. KRAJEWSKI, 1989: Short-term Rainfall Forecasting Using Radar Data and Hydrometeorological Models. *Proc. Int. Symp. Hydrological Applications of Weather Radar*. University of Salford, United Kingdom.
- GIGUERE, A. and G.L. AUSTIN, 1989: On the Significance of Radar Wavelength in the Estimation of Snowfall. *Proc. Int. Symp. Hydrological Applications of Weather Radar*. University of Salford, United Kingdom.
- GREEN, M.J., 1989: Real-Time Control for Urban Drainage Systems—Advantage or Disadvantage? *Proc. Int. Symp. Hydrological Applications of Weather Radar*. University of Salford, United Kingdom.
- HUFF, F.A., J.L. VOGEL and S.A. CHANGNON, 1981: Real-Time Rainfall Monitoring-Prediction System and Urban Hydrologic Operations. *Jour. Water Res. Plan and Man. Div.*, ASCE, 107, WRZ, 419-435.
- LAWLER, K.P., 1989: Weather Radar System Design. *Weather Radar and the Water Industry*. British Hydrological Society Occasional Paper, 2, 14-23.
- PESSOA, M.L., 1989: *The Hydrological Utilization of Radar Derived Rainfall Data in Modelling Extreme Storm Behaviour*. Ph.D. thesis, University of Birmingham, United Kingdom.
- REED, D.W., 1984: *A Review of British Flood Forecasting Practice*. NERC Institute of Hydrology Report No. 90, 42 pp.

RODRIGUEZ, J., D. SEMPRES-TORRES and C. OBLER, 1989: Extension of Lumped Operational Rainfall-Runoff Approach Models to Semi-Lumped Modeling: the Case of the DPFT-ERUHDIT Approach. *Proc. Int. Symp. Hydrological Applications of Weather Radar*. University of Salford, United Kingdom.

RUNGO, M. and J.C. REFSGAARD, 1989: The Updating Procedure in the MIKE II Modelling System for Real-time Forecasting. *Proc. Int. Symp. Hydrological Applications of Weather Radar*. University of Salford, United Kingdom.

SCHILLING, W. (Ed.), 1987: IAWPRC/IAHR Joint Committee on Urban Storm Drainage. *Report on Real-time Control of Urban Drainage Systems—the State-of-the-art*.

Shepherd, G.W., 1987: *On the Utilization of Weather Radar in the Simulation of Urban Drainage Networks*.

Ph.D. thesis. University of Birmingham, United Kingdom, 240 pp.

TROCH, P.A., F.P. DE TROCH and J. VAN HYFTE, 1989: Modelling the Time-dependent Nature of the Rainfall-Runoff Relationship Using On-line Identification. *Proc. Int. Symp. Hydrological Applications of Weather Radar*. University of Salford, United Kingdom.

VERWORN, H.R., 1989: Hydrological Relevance of Radar Rainfall Data. *Proc. Int. Symp. Hydrological Applications of Weather Radar*. University of Salford, United Kingdom.

Yu, Pao-shan, 1989: *Real-Time Grid-based Distributed Rainfall-Runoff Model for Flood Forecasting with Weather Radar*. Ph.D. thesis, University of Birmingham, United Kingdom.

PROGRAMA DE CICLONES TROPICALES

REUNIONES RECIENTES

Comité de Tifones CESAP/OMM

La vigesimotercera reunión anual del Comité de Tifones fue acordada conjuntamente por la Comisión Económica y Social para Asia y el

Pacífico (CESAP) y por la OMM, y se celebró en Seúl, República de Corea, del 13 al 19 de noviembre de 1990. Fue la primera vez que el Gobierno de la República de Corea acogía a una reunión del Comité de Tifones.



Seúl, República de Corea, noviembre de 1990.— Participantes en la vigesimotercera reunión anual del Comité de Tifones.