

- SEN ROY, N. y K. PRASAD, 1991: Climate change and global scientific response, *Vayu Mandal*, 21, 3-4, 69-82.
- SHENDE, R.R., 1999: Changes in trends of pH over BAPMoN stations in India. Aceptado para su publicación en *Vayu Mandal*.
- SINHA RAY, K.C., R.K., MUKHOPADHYAY y S.K. CHOWDHURY, 1997: Trends in maximum and minimum temperatures and sea level pressure over India. Presentado en INTROMET-97, Nueva Delhi, 1997.
- SINHA RAY, K.C., S.R. KSHIRSAGAR y G.S. BHUJAD, 2001: Trends in Sea Surface Temperature over Indian Seas, *Proceedings of Tropmet 2000*, National Symposium on Tropical Meteorology, 114-117.
- SINHA RAY, K.C., P.R. JOSHI, L.S. MEHERE, 2001: Are the districts of NW-Orissa becoming more drought prone? Enviado para su publicación en *Vayu Mandal*.
- SREEDHARAN, C.R. y A. MANI, 1965: Measurement of the vertical distribution of ozone by a chemical ozonesonde, *Current Science*, 34, 2, 39-41.
- SRIVASTAVA, A.K., K.C. SINHA RAY y U.S. DE, 2000: Trends in frequency of cyclonic disturbances and their intensification over Indian seas, *Mausam*, 51, 2, 113-118.
- SRIVASTAVA, H.N., B.N. DEWAN, S.K. DIKSHIT, G.S. PRAKASA RAO, S.S. SINGH y K.R. RAO, 1992: Decadal trends in climate over India, *Mausam*, 43, 7-20.
- SRIVASTAVA, H.N., S.V. DATAR y B. MUKHOPADHYAY, 1992: Trends in atmospheric turbidity over India, *Mausam*, 43, 183-190.
- SRIVASTAVA, H.N. y T.K. BALAKRISHNAN, 1993: Synthesis of meteorological and tide gauge observations on a decadal scale near the Indian coast, *TOGA Notes*, 15-17.
- SRIVASTAVA, H.N. y K.C. SINHA RAY, 1994: Climate change scenario: Global and national perspective, *Vayu Mandal*, 24, 3-4, 41-50.
- SRIVASTAVA, H.N., S.K. DIKSHIT, K.C. SINHA RAY y R.K. MUKHOPADHYAY, 1998: Trends in rainfall and radiation over India, *Vayu Mandal*, 28, 1-2, 41-45.

## Humedales ribereños y curvas de frecuencia del nivel del agua

63

Por A. ARCELUS\*

### Introducción

Los humedales tienen funciones ecológicas e hidrológicas que benefician a la humanidad, incluidos el control de inundaciones, el aporte de hábitat para pesquerías y recursos forestales, además de la conservación de la diversidad biológica.

No hay una definición sencilla, correcta, sólida y ecológicamente incuestionable de humedal, debido principalmente a su variedad y a que el límite entre los ambientes secos y los húmedos se desarrolla de forma gradual (Cowardin y otros, 1979). La Sociedad de Ingenieros de los EE.UU. (USACE) y la Agencia de Protección Medioambiental definen de forma conjunta los humedales como: "Zonas que se inundan o se saturan de agua superficial o subterránea a una frecuencia y con una duración suficiente para mantener, y que bajo circunstancias normales mantienen, un predominio de vegetación adaptada típicamente a vivir en condiciones de suelo saturado". Según esta definición hay que considerar tres parámetros medioambientales para delimitar un humedal: la hidrología, los suelos y la vegetación.

Aunque sea un tópico decir que la hidrología es la variable más importante para distinguir un humedal de otros ecosistemas, y a los humedales entre sí, no hay el suficiente trabajo cuantitativo para revelar por qué y de qué manera influye la hidrología en el tipo de humedal (Brinson, 1993).

Los humedales ribereños son franjas lineales, como cintas, de vegetación a lo largo de los ríos, corrientes o lagos que dependen del agua superficial o subterránea, perenne, intermitente o efímera (Goldstein, 1996).

Pollock (1998) presenta algunas relaciones cuantitativas entre las inundaciones y los humedales ribereños utilizando datos desde 1992 hasta 1994. Es difícil obtener series largas de datos hidrológicos y, además, los datos se recogen, generalmente, en un punto de nivel. Esto permite algunos análisis probabilísticos, que se pueden aplicar localmente, pero impide directamente la realización de curvas de frecuencia de nivel del agua en la región de interés. Como métodos indirectos, los modelos hidrodinámicos pueden ayudar a superar esta restricción mediante la consideración de la información topográfica y de los datos puntuales hidrológicos (condiciones de frontera), dando como resultado salidas hidráulicas que pueden permitir el desarrollo de las curvas citadas.

\* Dirección Nacional de Hidrografía, Ministerio de Transporte y Obras Públicas, Montevideo, Uruguay. Correo electrónico: arcelus@comercialnet.com.uy

Se han definido los humedales como zonas que se inundan o están saturadas con una frecuencia que permite mantener plantas adaptadas a condiciones de saturación y/o de inundación. Esta definición introduce la frecuencia de inundación como un término genérico, de una forma cualitativa. Los humedales ribereños a lo largo de los ríos son un tipo particular de humedal, que están presentes en Uruguay. Este artículo representa un primer paso hacia la cuantificación de la relación entre la frecuencia de inundación y los humedales ribereños. Las curvas de frecuencia del nivel de agua en el humedal de Corbo (14,6 km<sup>2</sup>) se generaron utilizando un modelo de diferencia finita, unidimensional e implícito para la informatización de los flujos inestables (Mike 11), que se calibró y se aplicó utilizando datos diarios para un período de 20 años. Se utilizó teledetección (imágenes de satélites y fotograñas aéreas) y sistemas de información geográfica para analizar la vegetación del humedal y para compararla con las curvas desarrolladas. La investigación indica que la modificación de la vegetación no presenta una correlación directa con la variación a corto plazo de los niveles de agua (estacionales o anuales). Sin embargo, el límite del humedal analizado se encuentra entre las curvas de frecuencias del 5 y del 10 por ciento (el porcentaje indica el tiempo durante el cual el nivel del agua es igual o superior a la curva). No se puede tomar esta correspondencia como una declaración general y habría que seguir investigando este tema para rechazar, confirmar o mejorar la relación entre el tipo de humedal y la delineación de las curvas de frecuencia que se presentan en el estudio.

Uruguay no tiene un sistema nacional de clasificación o vigilancia de humedales y por lo tanto, los estudios que aportan herramientas o nuevas percepciones para percatarse de la relación entre la hidrología y los humedales pueden ayudar en esta tarea. Este artículo presenta la aplicación de una metodología para desarrollar curvas de frecuencia de inundación en un humedal ribereño. También analiza la relación entre este tipo de humedal y su régimen hidrológico durante un período de 20 años.

### El humedal de Corbo

El área de estudio es un humedal ribereño de 14,65 km<sup>2</sup> a lo largo del río Cebollatí (en el Departamento de Lavalleja) (Figura 1). Este río sigue un curso en una llanura de inundación al suroeste del país con una zona tributaria total de 17 000 km<sup>2</sup>. Esta región ha experimentado un importante crecimiento en la agricultura y en la ganadería en los últimos años, pero estas actividades se llevan a cabo corriente abajo de nuestra zona de interés, que permanece prácticamente libre de intervención humana. El humedal tiene tres tributarios: el importante río Cebollatí (en la cuenca del Corbo, 2 850 km<sup>2</sup>), además de los riachuelos Laureles (147 km<sup>2</sup>) y Pirarajá (376 km<sup>2</sup>). La precipitación anual media es de 1 258 mm, y la descarga promedio del río Cebollatí en la estación de Paso Corbo es de 50 m<sup>3</sup>/s.

Desde un punto de vista geológico, la cuenca subterránea de la laguna Merín se formó por la acumulación de material volcánico y sedimentario, hace entre 130 y 150 millones de años. Hidro-

geológicamente, los sedimentos son posteriores a la formación del bentos de Fray. De este tipo de material solo puede obtenerse agua como una excepción (Bossi y Campal, 1996). Por lo tanto, en la zona de estudio, los acuíferos no son importantes.

Este bosque ripario está habitado por varios mamíferos como la nutria (*Lutra longicaudis*) y el capibara (*Hydrochoerus hydrochaeris*), y también por aves como el martín pescador (*Ceryllidae*) y la garza real azul (*Butorides striatus*).

Desde el punto de vista de la cubierta vegetal, el humedal de Corbo es una franja de follaje de anchura variable dominada por arbustos leñosos. Entre los numerosos tipos de vegetación autóctona presente en el área, se pueden encontrar las siguientes especies hidrofitas: *phyllanthus sellowianus*; *salix humboldtia-*

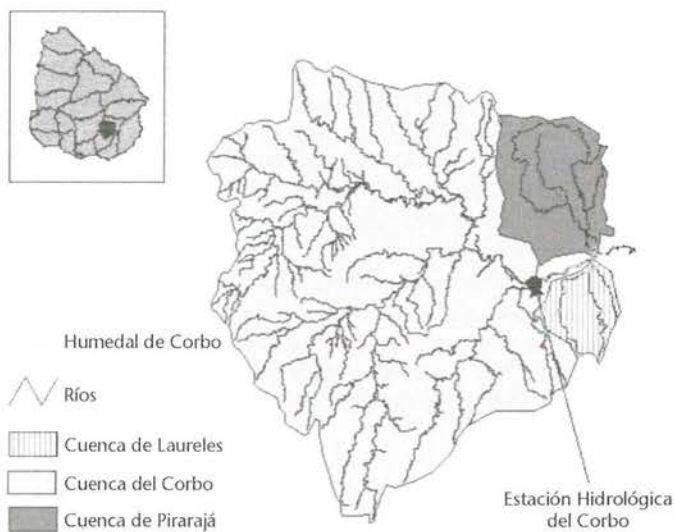


Figura 1 — Zona de estudio y cuencas tributarias

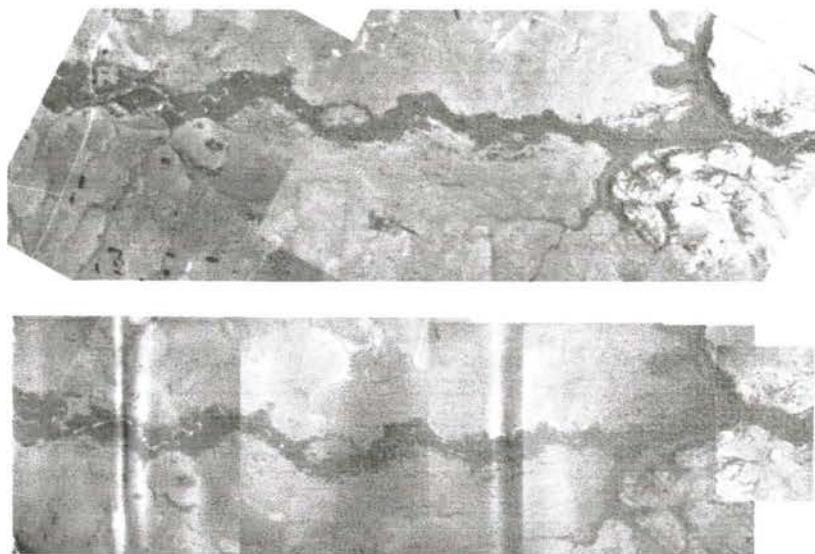


Figura 2 — Imágenes aéreas (composición): 1986 (arriba); 1959 (abajo)

*na*; y *pouteria salicifolia*. Otras especies autóctonas son *sebastiana schottiana*; *scutia buxifolia* y *acacia caven* (Porcile, 1987).

Los suelos de la zona son fluvisoles con gleisoles de humus (suelos hídricos) y lúvicos, además de planosoles éutricos (Sombroek y otros, 1969).

## Métodos y medios

### Creación del modelo

El humedal de Corbo está situado en un segmento de río de 15,63 km de longitud, después de la estación hidrológica de Paso Corbo (véase Figura 1), donde se miden niveles y descargas diarias. Para establecer la frecuencia de inundación del humedal se necesitan datos diarios durante un mínimo de 10 años (EFH-19). En el estudio presente, se consideraron 20 años de datos (1980-1999).

En una situación ribereña, la información en las localizaciones de medida de la corriente se puede extender corriente arriba o corriente abajo, utilizando información del perfil de la superficie del agua. Debido a la forma característica de la vegetación del humedal a lo largo del río en una dirección dominante, se utilizó un módulo hidrodinámico de una dimensión de Mike 11 (modelo de diferencia finita e implícita para informatizar co-

rrientes inestables de ríos) para informatizar la información.

Se analizaron once secciones transversales, utilizando estudios de campo y mapas de contorno (Figura 3). Como condición de frontera corriente arriba se utilizó la información del nivel de agua de la estación hidrológica de Corbo (sección transversal 11). También se consideraron los flujos de las cuencas del Pirarajá y del Laureles como condiciones de frontera (flujos de entrada laterales).

Estas descargas se informatizaron considerando datos de precipitación diarios y acoplando dos modelos hidrológicos: un modelo de acontecimientos y un modelo continuo de contabilidad de agua (Arcelus, 2001).

Al final del segmento del río estudiado (sección transversal 11 en Sierra del Tigre), se registró la información del nivel de agua desde marzo de 1997 hasta diciembre de 1998 y el modelo se calibró desde marzo de 1997 hasta febrero de 1998.

Para la fase de explotación del modelo se calculó una condición de frontera en Sierra del Tigre. Los valores de descarga para 1997 se obtuvieron del modelo y se desarrolló una curva de índice H-Q en Sierra del Tigre. Se llevó a cabo un análisis de regresión con un coeficiente de  $r^2 = 0,82$ . Analizando la serie del nivel de agua en Corbo y en Sierra del Tigre, el 82 por ciento de

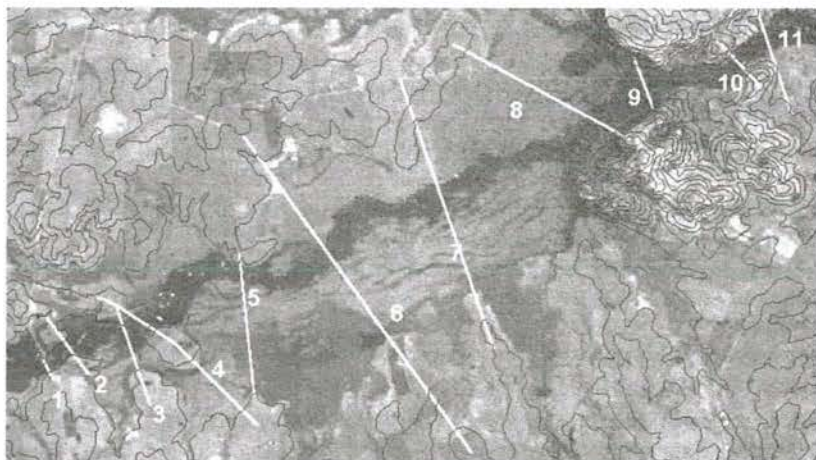


Figura 3 — Imagen de satélite (diciembre de 1998) con líneas de contorno (cada 10 m) y secciones transversales del modelo

los picos de la hidrógrafa tienen un lapso temporal de un día. Al final del segmento del río, los flujos se calcularon fijando el itinerario de las descargas del Corbo mediante la técnica de Muskingum (Tucci, 1998) con  $x = 0,2$ ,  $K$  y  $DT = 1$  día, sumando los flujos de las cuencas del Laureles y del Pirarajá. Las descargas de Sierra del Tigre se transformaron en datos de fase hídrica mediante la curva de índice. Los datos de nivel de agua de abril a diciembre de 1998 se utilizaron para corroborar el procedimiento. La Figura 5 presenta el ajuste de la curva y la correspondencia entre la serie del nivel de agua medida frente a fases calculadas de acuerdo con la curva de índice. Los niveles de agua calculados se utilizaron como condición de frontera corriente abajo para los 20 años modelizados.

### Calibración del modelo

La calibración se realizó con datos del año 1997. Se siguió este procedimiento para obtener las correspondientes descargas dadas por la curva de índice en la estación hidrológica de Corbo. En la sección 6, en ausencia de registros continuos de datos, los paisanos ofrecieron información de referencia de campo que pudo utilizarse para ajustar los picos de la tormenta para el año de calibración.

El ajuste se llevó a cabo principalmente a través de coeficientes de Manning. En el canal principal, donde el curso estaba bien definido, se consideró una  $n$  entre 0,03 y 0,050. Estos valores se aumentaron en general entre un 75 y un 200 por ciento en zonas con humedal ribereño arbolado y entre un 75 y un 100 por ciento en secciones con humedal de matorral o arbustos. Estos valores están de acuerdo con los estudios realizados en los humedales de Rocha (Iberis-Evarsa, 2001).

El método de calibración que se siguió fue el de ensayo y error. También se aplicó una función objetivo con un coeficiente de correlación de Nash de  $R^2 = 0,994$  (Nash y Sutcliffe, 1970). La Figura 5 presenta la comparación entre los resultados medidos y los del modelo.

Se utilizó una serie independiente de datos hidrológicos para verificar el modelo. Se utilizaron datos desde marzo de 1993 hasta enero de 1994. La Figura 6 presenta esta verificación.

### Explotación del modelo

Con el modelo utilizado, se ejecutaron 20 años de datos, y se procesó información diaria del nivel de agua para cada sección. Estos datos estaban organizados de mayores a menores, ofreciendo cada valor la probabili-

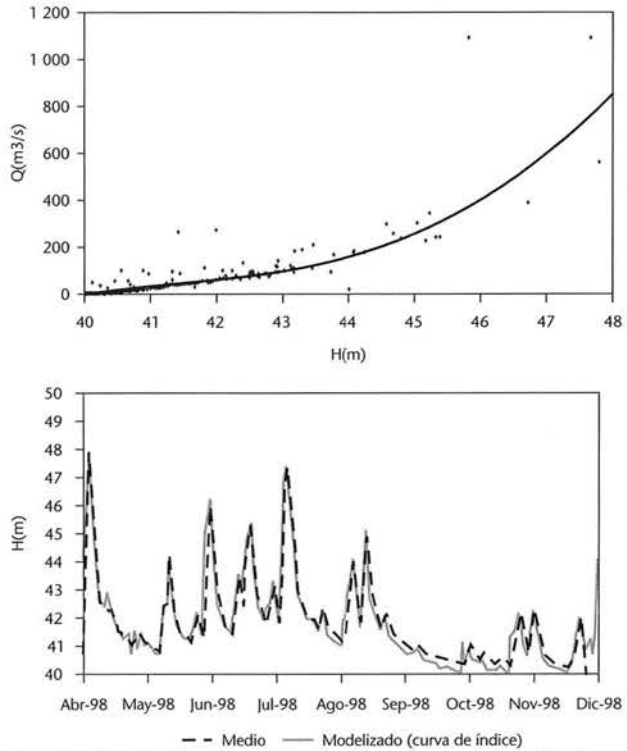


Figura 4 — Curva de índice en Sierra del Tigre (arriba) y comparación de las medidas frente a los valores calculados (abajo)

dad de ser excedido o un porcentaje de tiempo en el que el nivel de agua era igual o mayor a ese valor.

Se calcularon, para cada sección, los niveles para frecuencias de 10; 5; 1; 0,1 y 0,014 por ciento. Después se desarrollaron las curvas de frecuencia y se las cartografió en Arcview, vinculando cada punto de sección de acuerdo al esquema de las curvas de contorno. La Figura 7 muestra las curvas desarrolladas.

### Imágenes aéreas y satelitales

Se analizaron las imágenes aéreas del área estudiada, desde 1969 y 1986, en las que se podría identificar con claridad el humedal arbolado, para detectar cambios en la forma de la vegetación. Debido a la escala a la que

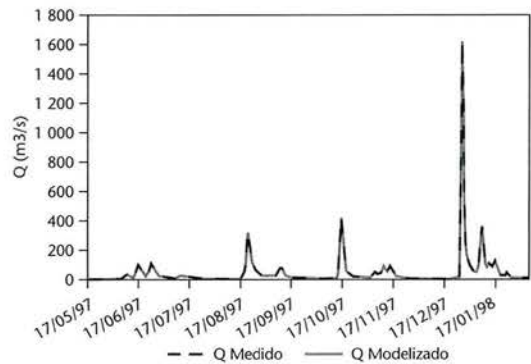


Figura 5 — Calibración del modelo en Paso Corbo (sección transversal 1)

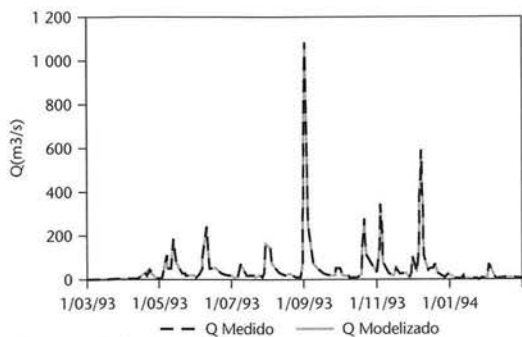


Figura 6 — Verificación del modelo

se tomaron las fotos no fue posible analizar más profundamente la zona, por ejemplo, para identificar otros humedales asociados con el sistema ribereño.

Se examinaron imágenes de satélite más recientes obtenidas con LANDSAT TM 7 (en diciembre de 1996 y en diciembre de 1998). El uso de datos espectrales generados por satélites de observación de la Tierra es útil para representar ciertas particularidades, tales como zonas de vegetación densa, cuerpos de agua y zonas de suelo desnudo o sin cultivos. Por ejemplo, la banda infrarroja es adecuada para cartografiar cuerpos de agua, debido a la absorción y a su reflexión casi nula. Una curva de reflectancia típica para plantas verdes sanas de hoja ancha tiene un valor pequeño en el espectro visible (bandas 1 a 3) y más alto en el espectro cercano al infrarrojo (banda 4). Esta clase de vegetación destacaría con el color elegido para la banda 4 (Meijerink y otros, 1994) (Figura 3).

Desgraciadamente, no fue posible obtener más imágenes para observar la existencia de cambios estacionales para este entorno de humedal ribereño.

Para cada imagen aérea y satelital se dibujaron los contornos del humedal ribereño arbolado para comparar su desarrollo a lo largo de los años. El mapa también sirvió para analizar la relación existente entre la vegetación y las curvas de frecuencia obtenidas.

### Conclusión

Comparando las distintas imágenes se observó que el humedal arbolado no cambió durante varias décadas. Su variación puede ser función de cambios a más largo plazo. También se demostró que su existencia y forma estaban relacionadas de forma directa con la presencia del río. Se podían identificar y asociar con el río otros tipos de vegetación del humedal, pero su identificación no era tan obvia.

La Figura 7 presenta el cartografiado de las curvas de frecuencia. La curva de 0,014 por ciento corresponde a la inundación más grande registrada en los 20 años de datos (período de retorno  $T = 20$ ). La curva de 0,1 por ciento está asociada a un período de retorno  $T = 16$ ; la de 1 por ciento, a un  $T = 4$ ; la de 5 por ciento, a un  $T = 2$ ; y la de 10 por ciento, a un  $T = 1$ . El mapa muestra que el límite del humedal ribereño arbolado está situado entre las curvas de 5 y 10 por ciento. Este resultado está de acuerdo con Pollock (1998), cuyos estudios indicaban que un bosque de llanura de inundación se inundaba una vez por año. Los resultados también están de acuerdo con el informe técnico Y-87 de la USACE, que postula que un área tiene hidrología de humedal si se inunda o está saturada hasta la superficie de forma continuada al menos el 5 por ciento de la temporada de crecimiento la mayor parte de los años. Para la USACE, estas zonas se consideran humedales si satisfacen también las necesidades de vegetación hidrofítica y de suelo hídrico.

Otros tipos de vegetación de humedal pueden estar asociados con curvas de frecuencia de inundación menores (1 por ciento). Sin embargo, la relación no es tan clara como en el primer caso. En este ejemplo, el área también podría definirse como un humedal ribereño (de matorral o arbustos). Se deberían realizar más estudios para corroborar si se puede generalizar el análisis cuantitativo.

### Referencias

- ABBOT, M.B. y J.C. REFSGAARD (Eds.), 1996: *Distributed Hydrological*. Kluwer Academic Publishers.
- ARCELUS, A., 2001: Coupling two hydrological models to compute runoff in ungauged basins. III Water Meeting, Santiago de Chile.
- BOSSI, J. y N. CAMPAL, 1996: "Comportamiento esperado de los acuíferos en los humedales de la cuenca de la Laguna Merín en el departamento de la Rocha". PROBIDES.

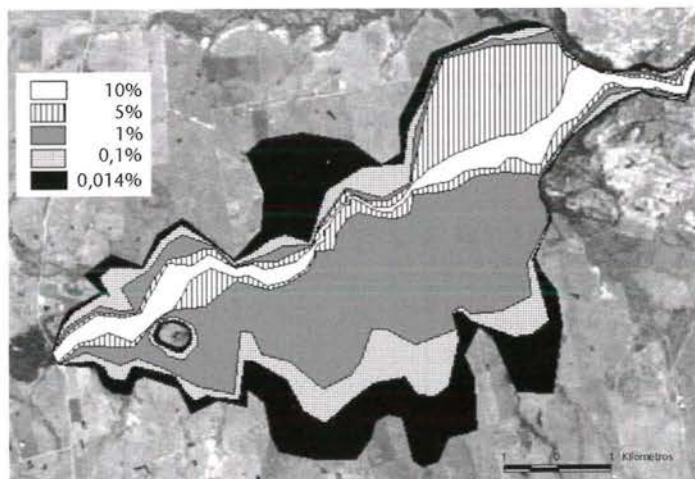


Figura 7 — Delineación de las curvas de frecuencia de nivel de agua del humedal de Corbo

- BRINSON, M.M., 1993: *A Hydrogeomorphic Classification for Wetlands*. Research Program Technical Report WRP-DE-4. USACE Waterways Experimental Station.
- CHOW, V.T., D.R. MAIDMENT y L.W. MAYS, 1988: *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering.
- COWARDIN, L.M., 1979: *Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States*. Fish and Wildlife Service, US Department of the Interior.
- INSTITUTO HIDRÁULICO DANÉS, 1995: *Mike 11. A microcomputer based modelling system for rivers and channels (user manual)*.
- INSTITUTO HIDRÁULICO DANÉS, 1995: *Mike 11. A microcomputer based modelling system for rivers and channels (reference manual)*.
- DOTI, R., A. DURÁN y O. LÓPEZ TABOADA, 1979: *Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay*. Volumen III. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Aguas. Avda. Garzón 456. Montevideo, Uruguay. (En español).
- USDA, 1979: *Engineering Field Handbook*. Chapter 19—Hydrology tools for wetland determination. Natural Resources Conservation Service.
- ENVIRONMENTAL LABORATORY CORPS OF ENGINEERS, 1987: *Wetland Delineation Manual*. Wetlands Research Program Technical Report Y-87-1.
- GOLDSTEIN, J.H., 1996: *The Impact of Federal Programs on Wetlands*. Vol. II
- IBERSIS-EVARSA, 2001: *Regulación Hídrica de los Bañados de Rocha*. Primer Informe de Avance. Ministerio de Transporte y Obras Públicas-DHN. Rincón 575. Montevideo, Uruguay. (En español).
- POLLOCK, M.M., 1998: *Plant Species Richness in Riparian Wetlands—A test of Biodiversity Theory*. Ecological Society of America.
- PORCHLE, J.F., 1987: Informe relativo a la posible realización de trabajos de deforestación en los montes marginales del río Cebollatí. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección Forestal. 18 de julio 1455. Montevideo, Uruguay. (En español).
- MEIJERINK, A.M.J., 1994: Introduction to the use of geographic information systems for practical hydrology. UNESCO-IHP-IV M 2.3. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences.
- NASH, J.E. y J.V. SUTCLIFFE, 1970: River flow forecasting through conceptual models. Part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- SOMBROEK, W.G. et al., 1969: *Detailed Reconnaissance Map of Soils and Land Forms. Merin Lagoon Regional Project CLM/PNUD/FAO*.
- TUCCI, C.E., 1998: *Modelos Hidrológicos*. ABRH. Editora da Universidade. (En portugués).
- OMM, 1994: *Guía de Prácticas Hidrológicas*. OMM-N.º 168. Quinta edición.

## Sistemas de procesamiento de datos para predicción de inundaciones en Turquía

Por Ayhan SAYIN\*

### Introducción

Los desastres naturales, inducidos por tiempo severo acompañado de variaciones microclimáticas y topográficas, ocasionan en Turquía daños a la propiedad de millones de \$ EE.UU. y muertes todos los años. En particular, las precipitaciones intensas que originan rápidas inundaciones en zonas costeras son uno de los fenómenos más peligrosos. Sólo la costa del Egeo ha sido devastada por inundaciones a gran escala varias veces en los últimos años. Un ejemplo fue la inundación de Marmaris entre el 9 y el 10 de diciembre de 1992. La ciudad de Marmaris recibió 426 mm de lluvia en cinco horas y se destruyó casi toda la infraestructura. Los días 3 y 4 de noviembre de 1995, una intensa actividad tormentosa sobre la costa del Egeo originó una rápida inundación en la ciudad de Izmir (Komuscu y

otros, 1998). Se calculó un daño de más de 50 millones de \$ EE.UU. y murieron 61 personas. Más aún, durante los días 19 y 22 de mayo de 1998 cayeron lluvias intensas en las regiones costeras del noroeste. Hace poco, una inundación devastadora en las ciudades de Mersin y Antalya, en diciembre de 2001, ocasionó más de 200 millones de \$ EE.UU. de daños a propiedades residenciales y comerciales y a cultivos agrícolas.

El territorio de Turquía está situado en la zona subtropical de la región macroclimática mediterránea. Tiene una elevación media de 1 100 m y está rodeada de mar por tres lados. Debido a su compleja topografía, su proximidad al agua y al hecho de estar en una zona de transición entre distintos sistemas de circulaciones meteorológicas de gran escala, el clima es variable con el espacio. La cantidad total y la distribución de la precipitación en las zonas costeras están influenciadas por vaguadas y ciclones de latitudes medias, de tipo frontal, asociados con los flujos predominantes del

\* Servicio Meteorológico del Estado Turco, Ankara. Correo electrónico: osayin@meteor.gov.tr