

APLICACIÓN DEL MODELO PDM EN SISTEMAS DE PRONÓSTICO DE CRECIDAS EN TRES CUENCAS DEL SUR DE INGLATERRA

Federico Groppa – Pablo Cacik

Halcrow Group Limited

Av. Alem 884 2do piso – C1001AAQ – Buenos Aires, Argentina – Tel +54(11) 43114911 – Fax +54(11) 4312 5819

E-mail: GroppaF@halcrow.com – Web: www.halcrow.com

RESUMEN

Se desarrollaron proyectos de sistemas de alerta de inundaciones en tiempo real para tres cuencas predominantemente rurales ubicadas en el sur de Inglaterra. La componente hidrológica de los modelos se calibró usando el Probability Distributed Model (PDM) del Centre for Ecology & Hydrology (CEH), mientras que para la modelación hidráulica se utilizó el modelo ISIS 1D. En el presente trabajo se explica brevemente el fundamento teórico del modelo PDM así como sus diferentes modos de operación, y se resumen los principales resultados obtenidos en los tres casos de estudio. Se explica también la aplicación de los resultados al proceso de generación de alertas, y la forma de transmisión de éstas.

El área de las cuencas analizadas se ubica en el rango de 65 km² a 121 km², mientras que la pendiente media del terreno se encuentra entre 2.5% y 7.5%. En cada caso se analizaron entre cinco y ocho eventos de calibración y validación. Los modelos fueron evaluados considerando tres escalas de tiempo diferentes, y se analizaron distintas combinaciones de datos de lluvia, tiempo de preaviso y métodos de actualización de condiciones iniciales. Si bien la calidad los resultados obtenidos presenta variaciones según los casos, la metodología así como las herramientas utilizadas se presentan como una alternativa altamente viable frente a la problemática planteada.

ABSTRACT

Real time flood forecasting systems were developed for three predominantly rural catchments in south England. The hydrological component of the models was calibrated using the Probability Distributed Model (PDM) by the Centre for Ecology & Hydrology (CEH), while ISIS 1D was used for the hydraulic modelling. In the current document PDM's theoretical background is briefly explained as well as its different operational modes, and the main results of the three study cases are summarised. It is also briefly explained how the model's results are used in the flood warning process, and how the warnings are effectively communicated to the population.

The catchment area of the three studied cases lies in the range between 65 km² and 121 km², while the mean terrain slope is within 2.5% and 7.5%. In each case between five and eight calibration and validation events were analysed. The models were evaluated considering three different time scales, and combinations of different rainfall data sources, lead times and updating methods were studied. Even though the quality of the results obtained is varied, the methodology and tools applied appear as a strong alternative to consider for similar projects.

INTRODUCCIÓN

Para la seguridad de las personas que habitan, trabajan o desarrollan actividades de esparcimiento en valles de inundación de ríos y arroyos, un adecuado pronóstico de crecidas resulta de fundamental importancia.

En el marco del convenio firmado entre la Agencia Ambiental (Environment Agency) de Inglaterra y Halcrow Group Limited se realizaron proyectos de desarrollo de sistemas de pronóstico de crecidas en las cuencas de los ríos Lymington, Meon y Beaulieu, ubicadas en el condado de Hampshire, al sur de Inglaterra. El principal objetivo de los mismos es contar con una herramienta de decisión en tiempo real para enviar una señal de alerta de crecida del río a las poblaciones dentro de la cuenca con el mayor tiempo de preaviso posible. La modelación del sistema utiliza básicamente datos de pronóstico meteorológico de radar (generados con seis horas de anticipación) y simulación hidrológica lluvia-caudal de tipo continuo con

propagación hidrodinámica. En casos en que no se dispone de pronósticos de radar, la lluvia utilizada es la registrada por pluviógrafos conectados remotamente con la central de datos. La frecuencia de los datos así como de los resultados generados es de 15 minutos.

HERRAMIENTAS Y MÉTODOS

Los modelos de pronóstico desarrollados cuentan con una componente hidrológica representada mediante el PDM (Probability Distributed Model) del Centre for Ecology & Hydrology (CEH) de Inglaterra y una componente hidráulica modelada con ISIS 1D (Halcrow Group Ltd). Dados los requerimientos de tiempo de generación de resultados, los modelos 2D actualmente no se utilizan para pronosticar crecidas en tiempo real.

Los modelos de pronóstico desarrollados debían cumplir con requerimientos de:

- a) estabilidad numérica (tener una frecuencia de fallas menor al 5% y transportar caudales del orden de 100 años de período de retorno más un 20% sin inestabilidades que afecten la precisión de los resultados),
- b) tiempo de corrida (máximo 10 minutos para el proceso completo entre la llegada de datos y la generación de los pronósticos), y
- c) precisión de resultados (el criterio habitual es admitir errores menores a ± 20 cm entre el nivel máximo del limnigrama observado y el modelado).

El modelo PDM cuenta con la facilidad de actualizar las condiciones iniciales (updating mode) de las corridas en base a valores observados en las diferentes estaciones de aforo, a fin de aumentar la precisión de los resultados.

EL MODELO PDM

El modelo PDM es un modelo lluvia – caudal que transforma datos de lluvia y evapotranspiración potencial en caudales en la salida de una cuenca. La Figura 1 ilustra la forma general del modelo.

La generación de escorrentía en un punto dado de la cuenca es controlada por la capacidad de absorción del suelo, conjuntamente con la retención de la vegetación y el almacenamiento en superficie. Esto puede ser conceptualizado como una unidad de almacenamiento simple con una capacidad determinada. Al considerar que diferentes puntos en la cuenca tienen diferentes capacidades de almacenamiento y que la distribución de éstas puede ser descrita por medio de una ley de distribución de probabilidades, es posible formular un modelo simple de generación de escorrentía mediante la integración de los caudales generados en cada unidad de almacenamiento de la cuenca. Durante un evento de lluvia estas unidades de almacenamiento empiezan a llenarse hasta el momento en que las de menor capacidad comienzan a desbordar. Esta lámina de desborde ingresa entonces en un almacenamiento superficial que la transforma en caudales a través de un modelo de dos embalses lineales. Al mismo tiempo se pierde agua de las unidades de almacenamiento por medio de evapotranspiración e infiltración. Las pérdidas por infiltración alimentan el modelo de transformación de flujo subterráneo, representado por un único almacenamiento no lineal. La escorrentía total en el exutorio se compone entonces de la suma del caudal superficial más el subterráneo, provenientes de los respectivos almacenamientos como se puede apreciar en la Figura 1.

Siendo c la capacidad de absorción en diferentes puntos de la cuenca y $f(c)$ su ley de densidad de distribución, la proporción de la cuenca con capacidades de almacenamiento menores o iguales a c' es entonces $F(c') = \text{Pr ob}(c \leq c') = \int_0^{c'} f(c) \delta c$. Siendo A el área total de la cuenca,

entonces $AF(c')$ es el área que contribuye a la escorrentía superficial. Si π es la lluvia neta durante el intervalo de tiempo Δt , entonces $q = \pi F(c')$ es la tasa de generación de escorrentía superficial por unidad de área, la que integrada en el intervalo Δt resulta en el volumen de escorrentía por dicha unidad de área. Generalizando estos cálculos para toda el área de la cuenca, se convierte en un simple ejercicio algebraico calcular los volúmenes de escorrentía superficial generados en cada paso de tiempo y mantener el balance de masa de la cuenca. Diferentes configuraciones para los sub-módulos de separación de flujo, escorrentía superficial y subterránea pueden ser utilizados, lo que le da al PDM una gran flexibilidad para adaptarse a muy variadas condiciones de escurrimiento.

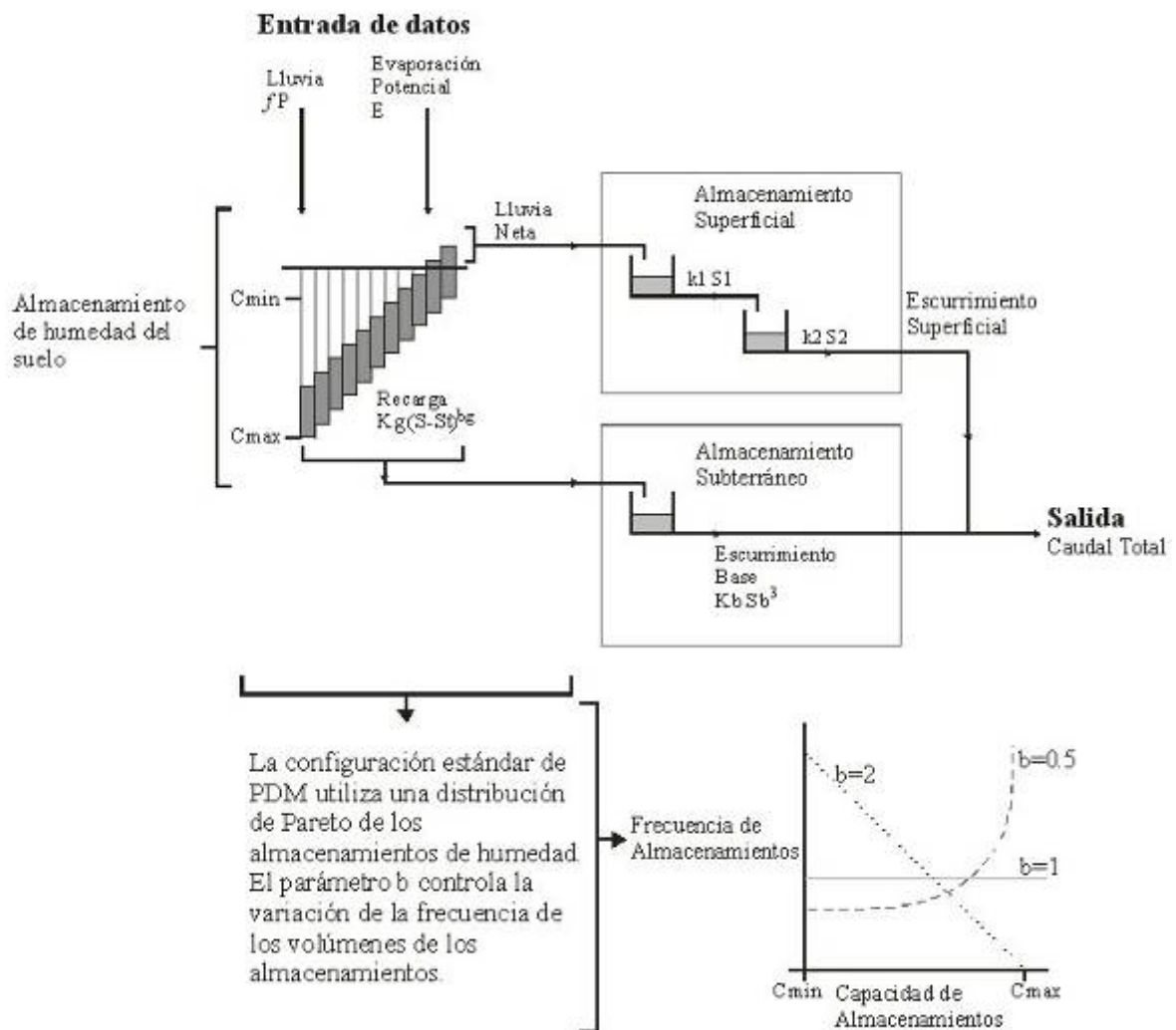


Figura 1.- Esquema conceptual del modelo PDM

Los parámetros a calibrar en PDM se agrupan básicamente en:

- Parámetros que afectan la lluvia y la evapotranspiración (f , b_e)
- Parámetros que definen la ley estadística de distribución de unidades de almacenamiento (C_{min} , C_{max} , b)
- Parámetros que definen las características de escorrentía e infiltración (k_g , b_g , S_t)
- Parámetros de transformación del flujo superficial (k_1 , k_2)
- Parámetros de transformación del flujo subterráneo (k_b , m)

CONFIGURACIONES ALTERNATIVAS

Diferentes configuraciones pueden ser utilizadas para los distintos módulos de PDM. Así, si bien la distribución de Pareto es la usada habitualmente en la mayoría de los casos, la ley de distribución de humedad del suelo puede tomar formas rectangulares, triangulares, potenciales, lognormales o exponenciales.

A su vez, el modelo estándar de pérdidas puede ser cambiado por otros dos que suelen ser más eficaces en casos extremos de cuencas altamente impermeables (con poco flujo base) o cuencas fuertemente dominadas por el comportamiento del agua subterránea. Diferentes alternativas se presentan también para los módulos de generación de escorrentía superficial y subterránea.

A su vez, cada uno de estas alternativas requiere de la calibración de diferentes grupos de parámetros.

MODOS DE ACTUALIZACIÓN DE VALORES Y PREDICCIÓN DE ERRORES (UPDATING MODES)

Si se dispone en tiempo real de registro de caudales y/o niveles en algún punto de la cuenca, éstos pueden ser utilizados para actualizar las condiciones iniciales del modelo, a fin de mejorar la calidad de los resultados. A su vez, analizando los errores en los pronósticos es posible generar un modelo de predicción de errores futuros.

El modelo PDM permite dos tipos de actualizaciones de condiciones iniciales: state correction (corrección de variables) y error prediction (predicción de errores), de los cuales el último también es usado para predecir los errores en los pronósticos.

- State correction: Opera corrigiendo los volúmenes almacenados en los diferentes almacenamientos del modelo, de modo tal que el caudal erogado por el modelo en el tiempo t sea igual al caudal observado en el mismo momento. Es un método de corrección “interno” ya que modifica las condiciones de los almacenamientos del modelo previo a la generación de resultados. A fin de evitar volúmenes almacenados que resulten físicamente incoherentes, el error ε a corregir se reparte entre los diferentes almacenamientos de manera proporcional a la contribución relativa de éstos al caudal total. Usando coeficientes de relajación aplicados a los factores de corrección permite realizar ajustes más conservativos; estos coeficientes pueden calibrarse en base a las series de datos observados
- Error prediction: Consiste en un modelo ARMA de los errores observados en un determinado período previo al momento t en el cual las condiciones iniciales son actualizadas. Este método no modifica las variables internas del PDM, por lo cual atribuye los errores en las predicciones a factores externos al modelo como por ejemplo los datos de lluvia utilizados. El ajuste de las condiciones iniciales consiste en simplemente corregir el error entre los datos observados y modelados antes de efectuar la corrida del modelo. El método de predicción de errores no obstante permite también predecir cuáles van a ser los errores que tendrán los pronósticos futuros y ajustar éstos en base a modelo ARMA calibrado usando la serie de datos observados. Este ajuste se basa en la fuerte hipótesis de que los errores futuros mantendrán la misma estructura que los pasados, lo que en caso de no cumplirse puede conducir a resultados no realistas.

ANÁLISIS DE CASOS PRÁCTICOS

El modelo PDM fue aplicado en tres proyectos de sistemas de alerta de crecidas en cuencas del sur de Inglaterra. Como se menciona anteriormente, la componente hidráulica de los modelos se calibró usando ISIS 1D.

Las tres cuencas estudiadas son netamente rurales, con pendientes longitudinales en el rango 2.5% - 7.5%, áreas entre 65 km² y 121 km² y caudales módulo cerca de la desembocadura entre 0.8 m³/s y 1.5 m³/s, con caudales máximos observados que superan entre 8 y 48 veces al módulo. Los tiempos de concentración estimados en todos los casos resultaron menores a 8 horas. Existen pequeñas poblaciones a lo largo del curso de los distintos ríos, principalmente cerca de su desembocadura en el Canal de la Mancha, no obstante éstas ocupan en todos los casos menos del 2% del área total de las respectivas cuencas. En todos los casos se contó con registros de lluvias de al menos tres pluviógrafos ubicados dentro o cerca de la cuenca (a menos de 10 km del límite de cuenca en todos los casos), así como lluvias medias areales calculadas en base a registros de radar (las áreas utilizadas coincidiendo con las subcuencas a calibrar).

La Tabla 1 muestra las principales características físicas de la cuenca, mientras que la Figura 2 indica su ubicación geográfica. La Figura 3 muestra una vista del río Beaulieu cerca de la estación homónima, tomada durante la última inundación significativa registrada.

Dos de las cuencas (Lymington y Beaulieu) presentan una geología uniforme donde el flujo base tiene poca relevancia con respecto a las crecidas observadas a lo largo del año. La cuenca del río Meon en contrapartida se ve interrumpida en su tramo medio por un estrato altamente permeable que modifica notablemente el régimen de flujo y la naturaleza de las crecidas, ocurriendo éstas típicamente en meses de invierno donde la cuenca se encuentra parcial o totalmente saturada. A su vez, estudios hidrogeológicos en la cuenca mostraron que en su tramo medio las estaciones de aforo no captaban toda el agua que ingresaba en el área aguas arriba de éstas, resultando en un by-pass natural del agua a través del flujo subterráneo. El modelo de pronóstico fue modificado de modo tal de considerar este by-pass (y calibrado considerando series de datos de freáticos ubicados en la cuenca), mejorando ostensiblemente los resultados. Igualmente vale aclarar que la calidad de los resultados de calibración del proyecto en el río Meon es en general inferior a la conseguida para los ríos Beaulieu y Lymington.

Tabla 1.- Propiedades físicas de las cuencas estudiadas

Nombre	Área [km ²]	Pendiente media terreno [%]	Área urbanizada [%]	Cantidad de estaciones de medición	Módulo en la desembocadura [m ³ /s]	Caudal máximo registrado [m ³ /s]	Longitud de serie de datos [años]
Beaulieu	64.7	2.5%	0.7	2	0.86	20.4	7.5
Meon	107.6	7%	1.5	5	1.11	8.61	9
Lymington	120.9	3.8%	0.6	3	1.37	68.8	10



Figura 2.- Ubicación de las cuencas de estudio



Figura 3.- Inundación en el río Beaulieu en Marzo de 2008

PROCESO DE EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Los modelos son evaluados inicialmente en su modo estándar (sin actualización de condiciones iniciales) para tres escalas de tiempo diferentes:

- a) la escala interanual -observando las variaciones estacionales y prestando especial atención al balance hídrico-,
- b) la escala de eventos -donde se juzga la capacidad de reproducir la forma del hidrograma de crecida, el caudal (o nivel) al pico (magnitud y ocurrencia), y el momento de ocurrencia de sobrepaso de diferentes niveles umbrales-

- c) una escala focalizada en la rama ascendente y el pico del evento –por ejemplo, entre las 6hs previas al pico y el momento posterior a éste en que el caudal cae un 20%-. Es evidente que, en comparación con las dos escalas anteriores, ésta última es la más exigente de las tres.

En cada cuenca se analizaron entre tres y cinco eventos durante el período de calibración más dos o tres de verificación. Una vez calibrado y verificado el modelo para el modo de operación estándar se evalúa la precisión de los pronósticos con actualización de las condiciones iniciales, considerando que éstas se actualizan normalmente cada seis horas. Con este fin, y para los eventos usados para calibración y verificación, se corre el modelo en modo actualización de condiciones iniciales y se comparan los valores observados contra los pronosticados para diferentes tiempos de preaviso (lead times). Finalmente, se evalúa la frecuencia de los errores y se calculan intervalos de confianza para los diferentes tiempos de preaviso y, si las hubiere, combinaciones de fuentes de datos y métodos de actualización de condiciones iniciales. La Figura 4 muestra un ejemplo para el río Lymington en Brockenhurst, para la escala focalizada en la rama ascendente y el pico del evento. Puede verse en este caso que para 3hs de preaviso los errores se ubican en ± 20 cm en el 95% de los casos.

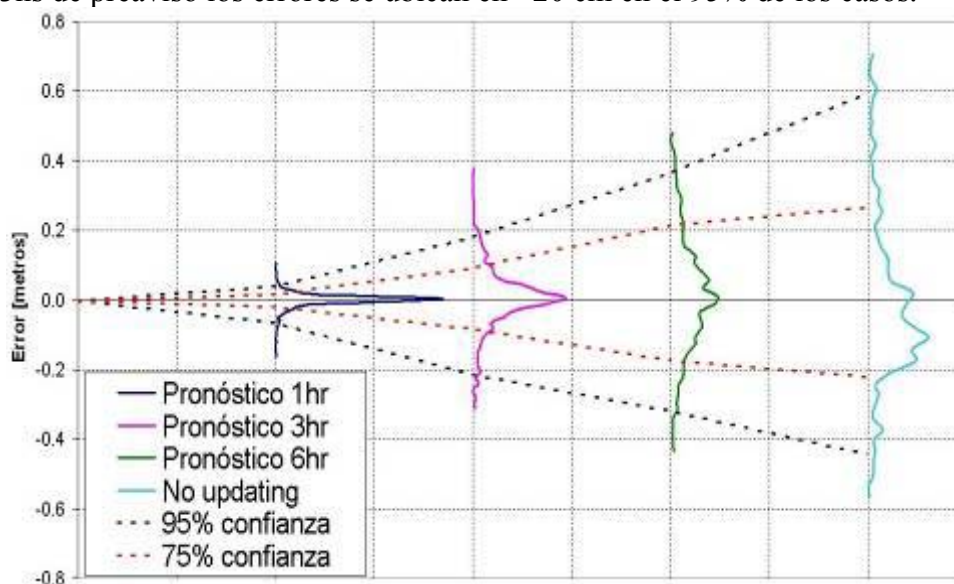


Figura 4.- Ejemplo de análisis de errores en los pronósticos

PRINCIPALES RESULTADOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO

En la Tabla 2 pueden verse los valores de los parámetros de PDM que optimizaron la calibración en cada uno de los casos, junto con los promedios de los principales estadísticos resultantes del análisis de los diferentes eventos. En todos los casos los resultados mostrados en la Tabla 2 y las Figuras 5, 6 y 7 se refieren a la calibración de los modelos sin actualización de condiciones iniciales.

Es posible notar por la similitud de los valores de los parámetros de PDM que las cuencas vecinas de los ríos Lymington y Beaulieu presentan características hidrológicas similares, mientras que la cuenca del río Meon muestra importantes variaciones respecto de las anteriores. Las diferencias más notables radican en los valores de los parámetros que controlan el volumen de almacenamiento subterráneo, que en concordancia con la naturaleza altamente permeable en los tramos medios de la cuenca del río Meon, determinan grandes almacenamientos.

Los estadísticos mostrados fueron calculados para cada uno de los eventos analizados; en el presente trabajo se exhibe sólo a modo de resumen el valor medio de éstos. Los estadísticos usados son:

- Error al pico: Diferencia entre el valor máximo observado y el modelado en cada evento, en metros.
- Desvío estándar error al pico: Desvío estándar de los errores al pico, a fin de mostrar la variación de los errores obtenidos
- R² promedio (evento): Parámetro de Nash-Sutcliffe, calculado para cada evento y promediado
- Error medio cuadrático (evento): Calculado para cada evento y promediado

Tabla 2.- Parámetros de calibración de los modelos PDM y estadísticos medios

Parámetro PDM	Lymington en estación		Beaulieu en estación	Meon en estación			
	Meerut Road	Brockenhurst	Hartford Bridge	East Meon	West Meon	Mislingford	Wickham
rainfac	1	1	1	1	1	1	1
cmin	0	0	6.05	60	120	70	40
cmax	35	45	60	120	400	420	200
b	0.4	0.3	0.40	1	0.2	0.35	0.2
be	10	10	10	5	3	6	4
k1	3	4	8	2	5	8	3
k2	4	6	8	2.37	0	0	0
kb	20	40	150	700	200	500	842.84
kg	2000	20000	10078	4000	55000	30000	12000
St	0	0	6.17	45	100	100	45
bg	2.6	2	1.68	2.4	2	2.9	2.6
qconst	0	0	0	0	0	0	0
tdly	0	0	2	0	0	0	0
Resultados promedio							
Error al pico [m]	0.080	-0.010	0.020	0.155	0.072	-0.068	0.005
Desvío estándar error al pico [m]	0.110	0.310	0.144	0.096	0.190	0.110	0.146
R² promedio (evento)	0.70	0.58	0.69	0.38	0.28	0.23	0.33
Error medio cuadrático (evento) [m]	0.067	0.228	0.170	0.043	0.075	0.080	0.060

En la Tabla 2 puede verse que, si bien en todos los casos se consigue un error medio en la estimación del nivel máximo de agua de acuerdo a las expectativas (menor a 0.20m), hay en algunos casos una dispersión significativa. Muestras de esto son las variaciones en los valores de desvío estándar del error al pico y, particularmente, los relativamente bajos valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe (R²) observados en la cuenca del río Meon. Múltiples causas fueron atribuidas a estos bajos valores de R², de las cuales las más probables resultaron ser errores en las series de caudales observados, transferencias netas no registradas de agua con cuencas vecinas (la evidencia hidrogeológica confirma que esto ocurre con importantes variaciones estacionales) y la necesidad de un modelo conceptualmente más amplio a fin de modelar la componente de flujo subterráneo (absolutamente dominante en la cuenca del río Meon) con mayor detalle.

Las Figuras 5 y 6 muestran ejemplos de los resultados de eventos de calibración, mientras que en la Figura 7 puede verse un evento de verificación. Estas figuras muestran que normalmente

es posible observar diferencias resultantes de utilizar dos fuentes de datos de lluvia distintas (pluviógrafo y radar), así como la habilidad del PDM de replicar las diferentes variaciones de los niveles (o caudales) observados.

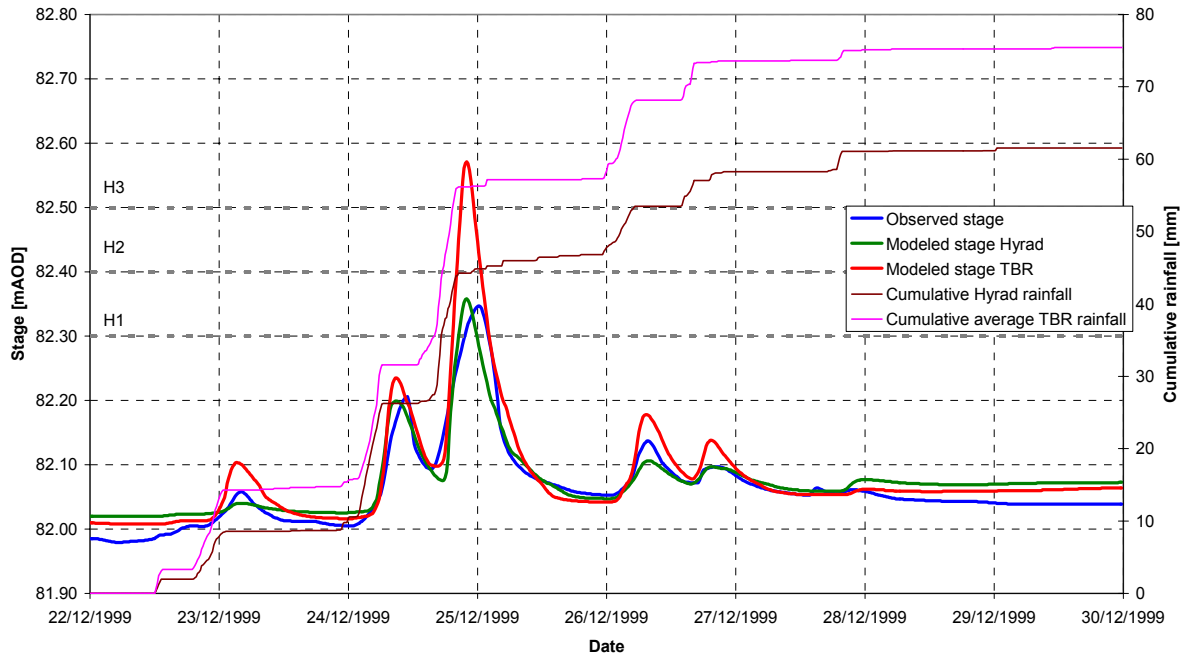


Figura 5.- Evento de calibración – Río Meon en West Meon

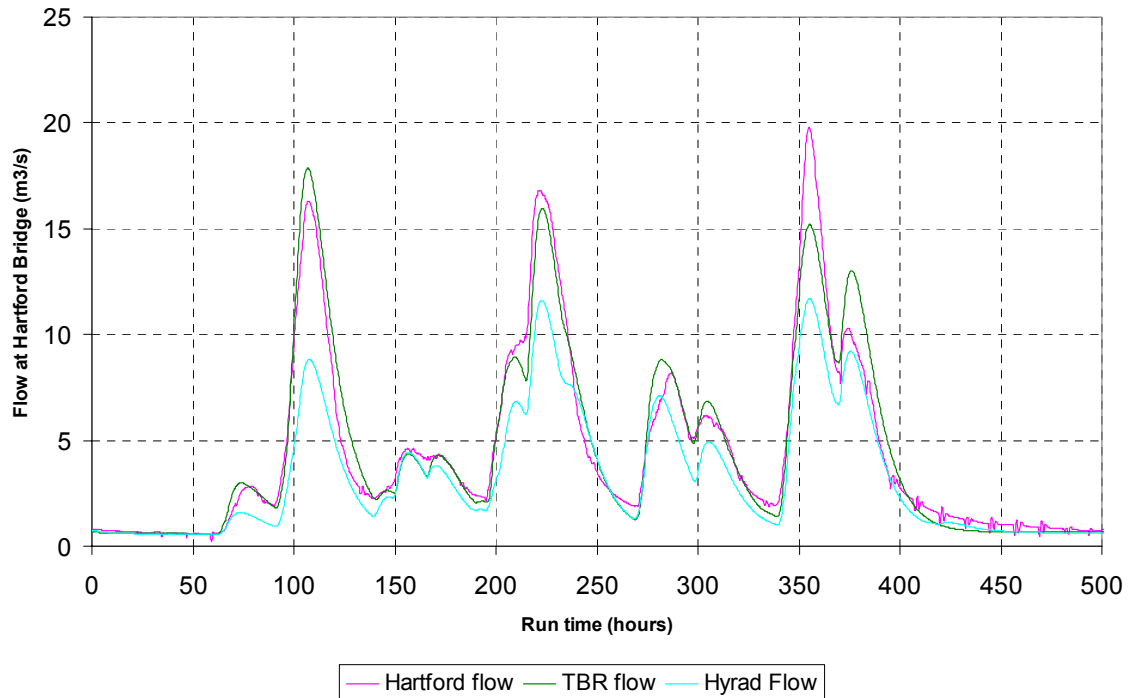


Figura 6.- Evento de calibración – Río Beaulieu en Hartford Bridge

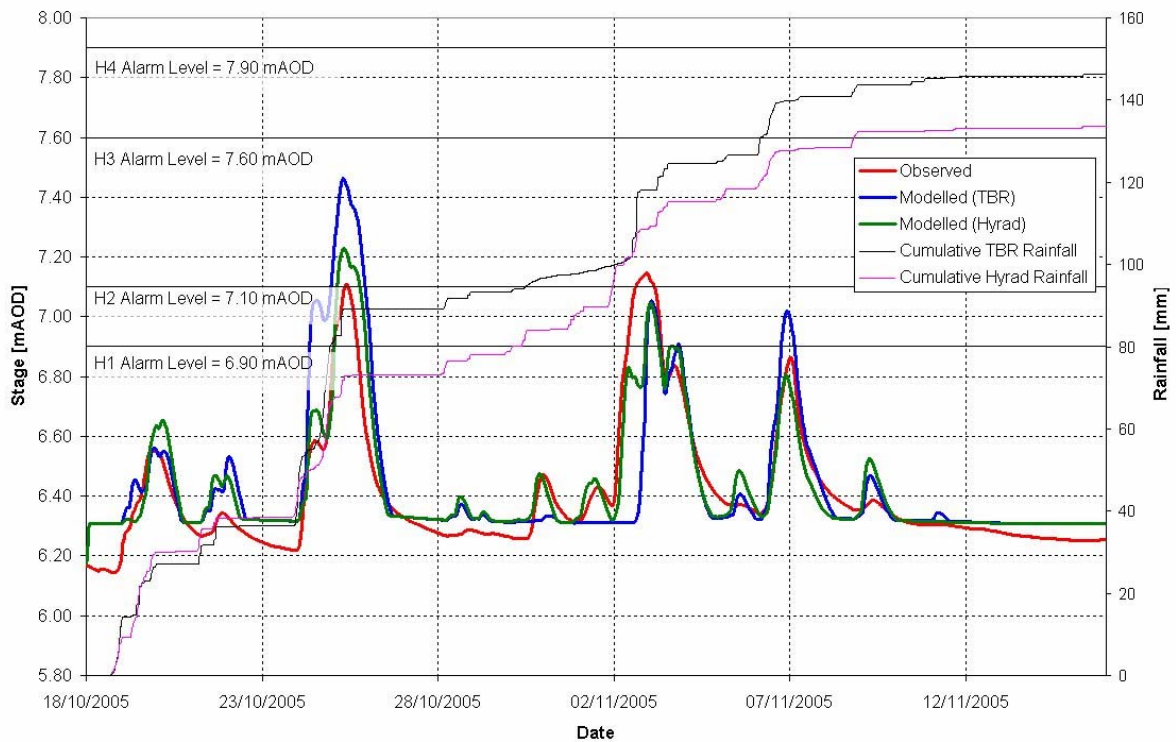


Figura 7.- Evento de verificación – Río Lymington en Brockenhurst

ENVÍO DE ALERTAS

En general, las oficinas meteorológicas de la Agencia Ambiental de Inglaterra operan los modelos en tiempo real, corriéndolos al menos cuatro veces al día. A su vez, monitorean las condiciones hidrológicas de la cuenca: niveles, caudales, pronósticos de lluvias, etc. Cuando se observa el sobrepaso de un nivel umbral la decisión de enviar una señal de alerta se toma de acuerdo al criterio y la experiencia del operador, basándose en los resultados de los modelos y los datos hidrológicos observados en distintos puntos de la cuenca. La Figura 8 muestra los cuatro niveles de alerta que maneja actualmente la Environment Agency.



Figura 8.- Niveles de alerta de inundación

La determinación de las zonas afectadas se realiza en base a resultados de modelación del río. Se generan manchas de inundación para el área urbana y ésta luego se zonifica de acuerdo al uso predominante del suelo (residencial, comercial, industrial o rural) y la cantidad de propiedades afectadas. Los valores observados en los modelos que generan una inundación en cada zona se correlacionan con los valores observados en la estación de aforos, para el mismo evento y el mismo instante. De esta forma, se tiene una zonificación del área urbana indicando qué puntos están en riesgo de inundación para cada nivel observado en la estación

de aforos, y a su vez se sabe cuántas propiedades se ven afectadas y qué tipo de uso del suelo predomina. Esto permite también plantear diferentes cursos de acción de acuerdo a la zona que se halle en riesgo, y así optimizar los recursos durante el desarrollo de una eventual evacuación.

Una vez que se decide enviar una alerta, ésta se comunica a los potenciales damnificados a través del medio que ellos previamente hayan elegido: sms, teléfono, fax, email, etc., donde se les informa que revisen su casilla de correos y/o de voz, donde encontrarán todos los detalles del evento y las medidas a tomar. Simultáneamente también se alerta a los servicios de emergencia y las autoridades locales, se carga la información en un sitio web y se habilitan líneas telefónicas de consulta. Mientras esto sucede, personal de la Agencia supervisa la evacuación y documenta lo ocurrido.

Una vez que las aguas comienzan a bajar se releva la zona inundada y se realiza una revisión exhaustiva evaluando toda la información recogida durante el evento. A su vez se comprueba la eficiencia de la alerta, esto es, la cantidad de gente que efectivamente la recibió y evacuó la zona a tiempo. La información post-evento es luego analizada en gabinete a fin de –en caso de ser necesario- ajustar el curso de acción a tomar en futuros eventos de inundación.

CONCLUSIONES

- Los modelos de pronósticos de crecidas en tiempo real son una herramienta en creciente desarrollo en el Reino Unido y en diferentes países del mundo a fin de minimizar las pérdidas humanas y económicas generadas por inundaciones. No obstante, no resulta frecuente la transmisión de la experiencia obtenida en cada caso y muchas veces sus resultados tienen menos peso frente a otros elementos de decisión.
- Una vez implementados los modelos calibrados, su uso cotidiano y los análisis post-evento son fundamentales para incrementar la experiencia y la sensibilidad respecto de la calidad de los resultados de los modelos de pronóstico, y así aumentar la confiabilidad en los mismos.
- El uso de pronósticos de lluvia de radar permite maximizar el tiempo de preaviso a la población hasta en seis horas (dependiendo del tipo de datos de radar utilizado) con respecto al uso de lluvia observada en pluviógrafos, aunque la calidad de los resultados está fuertemente ligada a la precisión de los pronósticos del radar. De todos modos, los pronósticos de lluvia de radar suelen tener un costo económico no despreciable, por lo que la elección de su uso debe ser evaluada cuidadosamente.
- El modelo PDM se presenta como una herramienta robusta en su fundamento teórico y de gran flexibilidad práctica para representar el comportamiento de diferentes tipos de cuencas, habiendo sido probado en muchas con características hidrológicas similares a cuencas que se desarrollan en Argentina.
- La actualización de las condiciones iniciales de los modelos con valores observados en tiempo real en diferentes puntos de la cuenca permite incrementar significativamente la precisión de los pronósticos, reflejando la importancia de modelos que permitan la actualización continua de los parámetros de estado de almacenamientos.
- La evaluación de los resultados utilizando diferentes escalas de tiempo permite incrementar la sensibilidad al momento de juzgar la calidad de los pronósticos. Dado el objetivo de predecir eventos de inundación, una escala de tiempo que se focalice en la rama ascendente y el pico del evento resulta de particular interés.
- Los métodos de evaluación de resultados resumidos en el presente trabajo proveen al operador del sistema de herramientas de decisión rápida, así como de una estimación del

error asociado al pronóstico de acuerdo al tipo de datos, configuración del modelo y tiempo de preaviso elegidos.

- Además de juzgar la precisión de los resultados del modelo, el análisis post-evento permite también evaluar la eficacia del plan de evacuación implementado que resulta ser el factor determinante para valorar la calidad del servicio prestado. Este análisis debe incluir los siguientes aspectos: cantidad de gente que efectivamente recibe el alerta, celeridad y claridad en el curso de acción, fluidez en las comunicaciones, etc.
- La zonificación de los centros urbanos de acuerdo a su nivel de riesgo de inundación, uso del suelo y cantidad de propiedades en riesgo permite desarrollar diferentes metodologías de envío de alertas y de evacuación. Así es natural que, por ejemplo, la evacuación de una zona con hospitales o escuelas se programe de manera distinta que la de una zona con baja densidad de población.

Agradecimiento. Los autores desean agradecerle a María Silvina Otonelo por su invaluable ayuda en todo lo referido a los esquemas y las imágenes mostradas en el presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Halcrow, HR Wallingford (2000): *ISIS PDM User Manual*, Reino Unido

Hill, David (2006): Capítulo 5 de *Guidance: Tips and advice for developers of flood forecasting model types used in NFFS*, Environment Agency, Reino Unido

Moore, R. J. (2007): “The PDM rainfall-runoff model”, *Hydrology and Earth System Sciences*, pp. 483-499

Moore, R. J. and Bell, V. A. (2002): “Incorporation of groundwater losses and well level data in rainfall-runoff models illustrated using the PDM”, *Hydrology and Earth System Sciences*, pp. 25-38

Moore, R.J. (1985): “The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales”, *Hydrology Science Journal* 30, pp. 273–297

Moore, R. J. et al (2004): “Forecasting for flood warning”, *Revista Geoscience* 337 pp. 203–217