

Predicción de crecidas

por Carlos E.M. Tucci y Walter Collischonn*

Introducción

Las predicciones del caudal de un río pueden hacerse a corto plazo, para un período de validez de unas pocas horas o unos pocos días, y a largo plazo, hasta nueve meses (Georgakakos y Krzysztofowicz, 2001). Habitualmente las predicciones de caudal a corto plazo se utilizan para la gestión de crecidas, pero hay muchos otros contextos en los que son útiles, como la navegación en ríos no regulados en los que la carga transportada depende de la profundidad, la irrigación y el suministro de agua, y los usos integrados tales como alertas y prevención de inundaciones y energía hidroeléctrica.

La predicción de caudal a corto plazo puede desarrollarse continuamente o solo después de una situación peligrosa. La primera es habitualmente necesaria con fines operativos tales como la energía hidroeléctrica y la navegación y puede clasificarse según el período de validez o según el tiempo de respuesta de la cuenca a las precipitaciones.

Crecidas repentinas

Las crecidas repentinas tienen un tiempo de acción muy corto y son una combinación de un episodio meteorológico, relacionado habitualmente con una tormenta

de origen convectivo, y una situación hidrológica particular como puede ser una cuenca pequeña, una pendiente pronunciada o una baja capacidad de infiltración. Este tipo de predicción depende en gran medida de la predicción cuantitativa de la precipitación (PCP), puesto que el tiempo que transcurre entre la lluvia y el máximo de caudal es muy breve a efectos de alertas y medidas de socorro durante una crecida (Krzysztofowicz, 1995). Según Georgakakos y Hudlow (1984), el 25% de las comunidades de los EEUU tienen un tiempo de retardo de menos de cuatro horas entre la lluvia y el flujo en la cuenca.

Las crecidas repentinas están, por lo general, relacionadas con las cuencas rurales pero, en las grandes ciudades (como São Paulo, Buenos Aires o Barcelona), con el aumento

de la impermeabilización y con el cambio de arroyos naturales por canales y tuberías, el tiempo de concentración se reduce y aumenta el caudal máximo. La gestión del sistema de drenaje urbano y canalizaciones, y el control del tráfico los días de lluvia fuerte durante la estación húmeda, requiere un sistema de alertas basado en una rápida evaluación y predicción. En Brasil, la ciudad de São Paulo usa el radar y una relación empírica entre la señal del radar y las condiciones de inundación del canal de drenaje principal de la ciudad, para alertar y organizar el tráfico de la misma.

Predicción de crecidas en cuencas medias y grandes

Las cuencas medias y grandes tienen habitualmente un mayor



* Instituto de Investigaciones Hidráulicas de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre (Brasil), Tucci@iph.ufrgs.br

tiempo de concentración que permite un período de validez más largo, pero hay muchas obras hidráulicas, operaciones y ciudades que requieren una mejor cobertura de control y modelización, teniendo en cuenta las limitaciones físicas y operativas de espacio, ocupación del suelo y uso del agua, entre otras.

Una predicción de caudal es un activo para la gestión de riesgos relacionados con los recursos hídricos, la reducción de daños, el suministro de socorro, la mejora del uso eficiente del agua y la protección del medio ambiente. Para construir un sistema de alerta es importante la integración de las actividades de control, modelización y gestión operativa

Predicción cuantitativa de la precipitación (PCP)

Los datos de precipitación que se utilizan en combinación con un modelo hidrológico para predecir caudales son los registrados hasta el tiempo t . Esta precipitación se mide por medio de pluviómetros, y para el intervalo de tiempo entre t y $t+\tau$ (tiempo de antelación) se necesita predecir la precipitación. Se dice que la predicción es de muy corto plazo cuando el tiempo de antelación de la predicción es de 0 a 3 horas; de corto plazo, si es de 6 a 24 horas; y de largo plazo, si es de 3 a 24 meses (Collier y Krzysztofowicz, 2000).

La predicción cuantitativa de la precipitación se ha desarrollado utilizando herramientas estadísticas, medidas de radar, imágenes de satélite y modelización meteorológica. Durante muchos años, la predicción de la precipitación no se tuvo en cuenta en la predicción del caudal hidrológico. Para cuencas con un tiempo de concentración alto, esta circunstancia no introduce demasiado error si el tiempo de antelación es pequeño, pero en el caso de crecidas repentinas y mayores tiempos de antelación, la estimación de la lluvia supone un requisito importante. Se han usado modelos estocásticos para predecir la precipitación junto con los modelos hidrológicos (Bertoni y otros, 1992; Mine, 1998), pero este procedimiento no aportó mayores

beneficios dado que la lluvia no suele presentar autocorrelaciones significativas. Los radares y la precipitación telemétrica permiten evaluar las condiciones meteorológicas y la distribución espacial y dirección de las tormentas. El uso de modelos atmosféricos de mesoescala para predecir la precipitación en una rejilla comparable con la de los modelos hidrológicos distribuidos es una de las herramientas combinadas que pueden mejorar las estimaciones (Ibbitt y otros, 2000). Los modelos atmosféricos regionales utilizan como condición de contorno la predicción de un modelo global que simula la Tierra entera. La rejilla del modelo atmosférico regional es menor que la del global con el fin de representar mejor los cambios en el espacio.

Modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos que se utilizan en la predicción pueden calificarse como empíricos, conceptuales o una combinación de ambos. Los modelos empíricos emplean ecuaciones matemáticas sin relación con la física del sistema. Los modelos conceptuales usan los conceptos hidrológicos para simular el comportamiento de la cuenca. Los modelos conceptuales tienen generalmente dos componentes principales: (a) un módulo de precipitación y escorrentía, que transforma la lluvia en escorren-

tía teniendo en cuenta el balance hídrico entre los distintos componentes hidrológicos tales como la interceptación, el flujo superficial y subsuperficial, y la infiltración; y (b) un módulo de conducción que simula el flujo en los ríos y embalses.

Los modelos de lluvia y escorrentía pueden ser agregados o distribuidos. Por lo general, los modelos agregados no tienen en cuenta la variabilidad espacial de la precipitación, ni de las variables de estado ni de los parámetros del modelo. Para cuencas pequeñas, este tipo de modelo es muy útil debido a su estructura simple y al hecho de que pueden actualizarse fácilmente sus parámetros o variables de estado. Los modelos distribuidos pueden estar divididos en subcuencas o rejillas. La ventaja de estos modelos es que pueden tener en cuenta la variación espacial de las características físicas y de las condiciones de la precipitación dentro de la cuenca. Actualizar las variables de estado o los parámetros de los modelos distribuidos es más complejo que en un modelo estocástico, pero puede introducir información a partir del comportamiento futuro del sistema. El modelo estocástico utiliza información pasada para predecir el futuro.

La simulación para la predicción de crecidas tiene las siguientes etapas: ajuste y verificación de los pará-

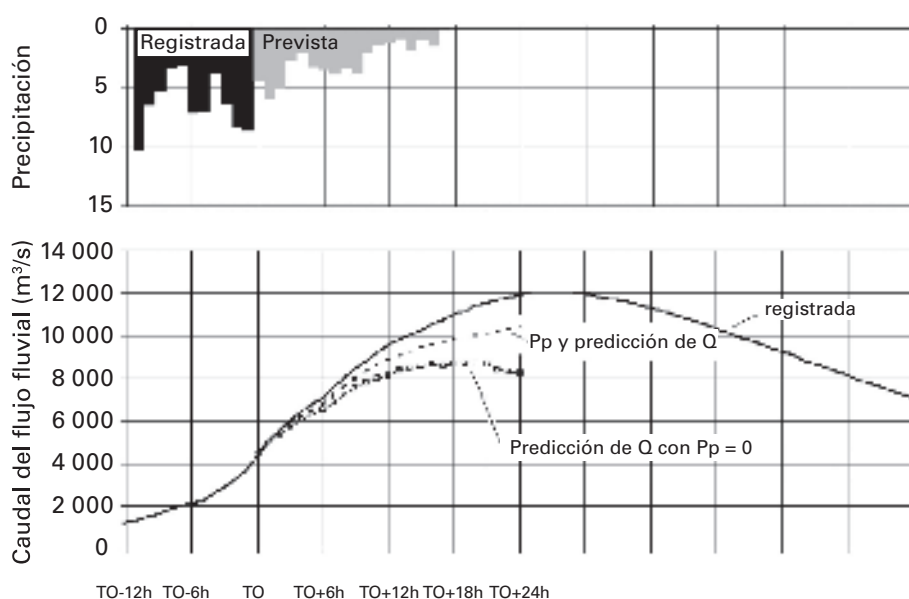


Figura 1 — Predicción de precipitación y predicción de caudal: Q = caudal, Pp : predicción de la precipitación

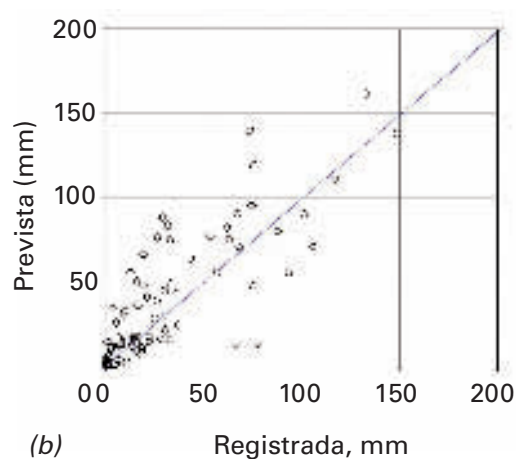
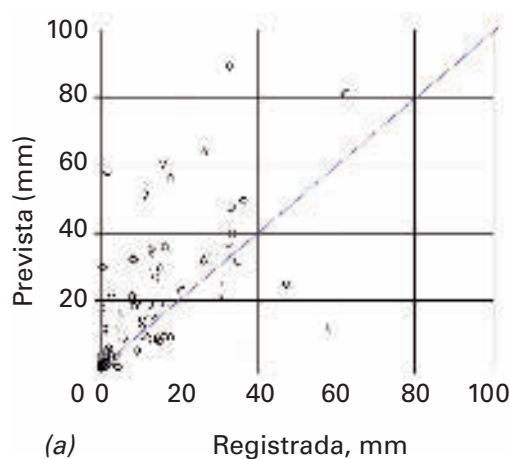


Figura 2 — Precipitación acumulada registrada y prevista con (a) tres días y (b) siete días de antelación por el modelo ETA en Três Marias, cuenca del río San Francisco (Brasil)

metros del modelo, y predicción. En las dos primeras situaciones, el modelo muestra su comportamiento sobre datos históricos. Durante la predicción, se emplea con los parámetros ajustados a la predicción de precipitación.

Predicción del caudal

La predicción del caudal puede desarrollarse mediante (a) una combinación de observaciones aguas arriba del nivel del agua y la precipitación registrada (hasta el momento de la predicción) en la cuenca intermedia; (b) una vigilancia de la precipitación (registrada hasta el momento de la predicción) y un modelo de lluvia y escorrentía; (a) y (b) son los procedimientos utilizados durante los últimos 50 años, basados en una sencilla modelización conceptual o estocástica de las variables hidrológicas; ó (c) una predicción de la precipitación mediante un modelo atmosférico, junto con una modelización de la lluvia y escorrentía para estimar el caudal (Anderson y otros, 2002; Koussis y otros, 2003; y Collischonn y otros, 2005). La precipitación hasta el momento de la predicción (precipitación en tono más oscuro en la Figura 1) puede evaluarse mediante pluviómetros telemétricos, satélite o radar. En los países desarrollados, la precipitación se estima mediante la combinación de estas herramientas pero, en los países en vías de desarrollo, los datos telemétricos y de radar son escasos. Las estimaciones de lluvia por satélite son más baratas pero necesitan una evaluación de su utilidad en función de los resultados.

Se estima una predicción cuantitativa de la precipitación (PCP) (tiempo futuro, $t+\tau$, en gris en la Figura 1) mediante el siguiente procedimiento: (a) se supone que la precipitación es nula, lo que trasladará un error importante para la predicción del caudal después de un tiempo más corto que el tiempo de concentración (predicción menor de la Figura 1); (b) lluvia prevista por un modelo estocástico que usa la información pasada con salidas poco fiables; ó (c) lluvia prevista mediante un modelo atmosférico que muestra cierta mejoría (predicción superior de la Figura 1).

A continuación se presentan algunos resultados de la salida de la combinación de una predicción con un modelo atmosférico y un modelo distribuido de lluvia y escorrentía a fin de predecir el

caudal en algunas grandes cuencas de Brasil.

Predicción de caudal en el río San Francisco

La extensión de la cuenca del río San Francisco en su sección en el embalse de Três Marias es de 50 784 km². Este embalse se usa para generar energía hidroeléctrica. Se ha elaborado la predicción del caudal de entrada en el embalse con fines de operatividad de la presa y su seguridad. El estudio (Tucci y otros, 2005) se desarrolló para la cuenca completa del San Francisco (639 000 km² y 2 700 km) y los resultados presentados se referían a su cuenca aguas arriba.

La precipitación se estimó mediante el modelo atmosférico regional ETA

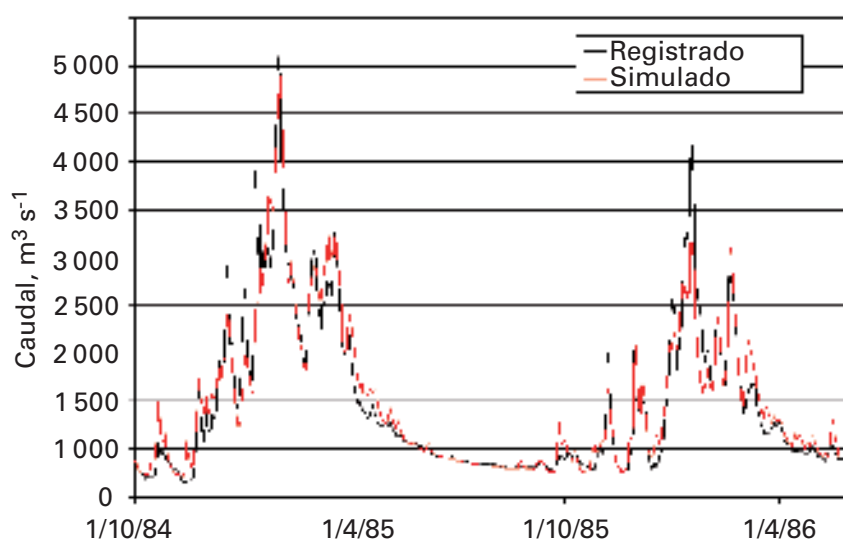


Figura 3 — Caudal registrado y simulado mediante el modelo hidrológico en el río San Francisco en Três Marias, de octubre de 1984 a mayo de 1986

(Black, 1994) con una rejilla de 40 × 40 km en una predicción a 10 días. La Figura 2 muestra la lluvia acumulada registrada y prevista a tres y siete días vista. La predicción se ve apoyada por una red de medidores de precipitación y caudal dentro de la cuenca.

Se ajustó el modelo hidrológico distribuido MGB-IPH (Collischonn y Tucci, 2001) a la cuenca (Figura 3) y se verificó el modelo con el período de datos, obteniéndose unos resultados fiables. En la predicción, algunas de sus variables pueden actualizarse mediante el caudal registrado reciente, mejorando así el rendimiento del modelo.

En la predicción se utilizaron las tres alternativas siguientes: (a) la precipitación registrada como entrada para el modelo hidrológico de predicción de caudal (Pobs); en este escenario, el error proviene del modelo de lluvia y escorrentía, pero no es un escenario real puesto que se desconoce la precipitación futura, aunque ofrece una medida del límite de la predicción de la precipitación; (b) la predicción de la precipitación mediante el modelo atmosférico ETA como entrada para el modelo hidrológico; (c) el modelo estocástico usado por la compañía eléctrica (Previvaz). El modelo estocástico predice el futuro a partir de los datos pasados. En la Figura 4 puede observarse que hay una reducción importante del error estándar medio de la predicción de caudal con la integración de los modelos, siendo esta reducción de un 45% para la predicción a una semana y de un 27% para la segunda semana. La figura muestra también que, en la segunda semana, la predicción que emplea los dos modelos tiene más espacio de mejora para el pronóstico de lluvia.

Cuenca del río Uruguay

Se ensayaron también las predicciones del flujo fluvial basadas en la predicción cuantitativa de la precipitación en el río Uruguay en la presa de Machadinho, donde el área de drenaje es de casi 32 000 km². En este caso, reseñado por Collischonn y otros (2005), el paso temporal del modelo se cambió a una hora, debido al escaso tiempo de

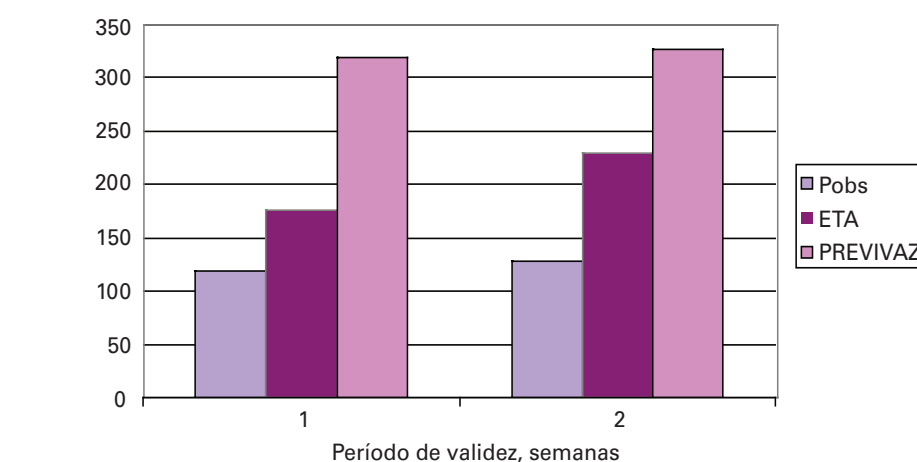


Figura 4 — Error estándar medio de la predicción a una y dos semanas usando (a) la precipitación registrada (Pobs) + un modelo hidrológico; (b) un modelo atmosférico + un modelo hidrológico (ETA); (c) un modelo estocástico (PREVIVAZ)

respuesta de la cuenca y a la disponibilidad de datos horarios de lluvia. Las predicciones de precipitación se obtuvieron a partir del modelo ARPS (Xue y otros, 2003) funcionando en tres dominios anidados, con resoluciones espaciales de 40, 12 y 4 km. Este modelo ha estado funcionando operativamente desde principios de 2003 en la Universidad Federal del Estado de Santa Catarina (Haas, 2002).

Se evaluó el rendimiento de las predicciones de descarga durante un período continuo de 167 días y desde un episodio de crecida seleccionado utilizando predicciones de precipitación en las tres resoluciones espaciales. Estas predicciones se compararon también con las observadas suponiendo (a) que no caería lluvia adicional, y (b) que las predicciones de lluvia eran iguales a la lluvia realmente registrada. Esto representa un sucedáneo de predicciones de lluvia “perfectas”.

La metodología de predicción propuesta se ensayó en primer lugar durante el episodio de crecida de 2001, cuyo período de retorno se estimó que estaba cercano a los 100 años. El nivel de agua del embalse se registraba sólo una vez al día durante esta crecida, así que el hidrograma observado, obtenido a partir del balance hídrico del embalse, tiene una resolución temporal muy baja. La Figura 5(a) muestra las predicciones emitidas a las 07:00 del 30 de septiembre utilizando predicciones de lluvia iniciadas a las 21:00 del 29 de

septiembre, y usando los datos de lluvia observada hasta las 07:00. En ese momento, la cuenca no había recibido todavía mucha lluvia y la predicción del caudal de corriente basada en la predicción de lluvia cero muestra una recesión.

Las predicciones del caudal fluvial basadas en la predicción numérica del tiempo muestran mejores comportamientos, aunque las tres versiones del modelo ARPS parecen subestimar la precipitación para este episodio. Las predicciones del caudal basadas en las predicciones de lluvia a una resolución de 40 km del modelo ARPS (ARPS-40) predicen correctamente la elevación del caudal, pero la descarga máxima se estima en menos de 3 000 m³/s, mucho menor que la descarga máxima observada de casi 14 000 m³/s. El modelo ARPS-12 funcionó un poco mejor, proporcionando predicciones de descarga máxima de casi 5 000 m³/s con más de 24 horas de antelación. Aunque la predicción de descarga sigue subestimada, en condiciones operativas señalaría la aparición de una crecida relativamente alta durante las horas siguientes, alertando de la posible necesidad de adoptar medidas de prevención de daños.

Como se muestra en la Figura 5(a), las predicciones de descarga basadas en el modelo ARPS 4, con una resolución de 4 km, parecen ser mejores que las demás. Sin embargo, las predicciones de ARPS4 sólo fueron posibles para un período de 24 horas, que es dema-

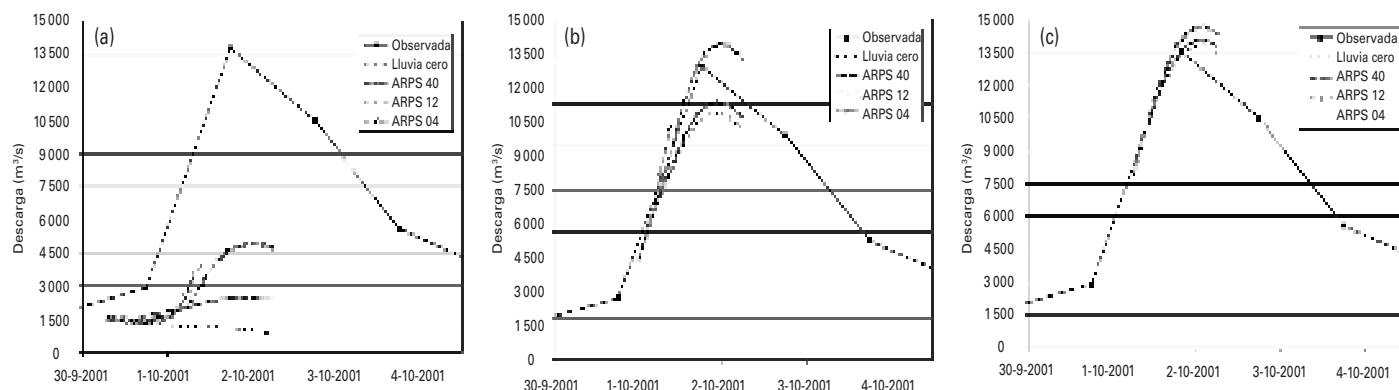


Figura 5 — Caudales de entrada en el embalse de Machadinho: (a) predicciones iniciadas a $t_0 = 07:00$ horas del 30 de septiembre de 2001; (b) predicciones iniciadas a $t_0 = 00:00$ horas del 1 de octubre de 2001; (c) predicciones iniciadas a $t_0 = 06:00$ horas del 1 de octubre de 2001 (según Collischonn y otros, 2005)

siado corto para predicciones hasta el máximo hidrográfico. La Figura 5(b) muestra las predicciones de descarga realizadas en la medianoche del 30 de septiembre, con las mismas operaciones de predicción de lluvia de la Figura 5(a) y datos de lluvia observada hasta la medianoche. En ese momento había caído una gran cantidad de lluvia, y el caudal de entrada en Machadinho ponía de manifiesto que la descarga máxima se elevaría muy por encima de los 5 000 m^3/s , como se predijo a las 07:00. Incluso la predicción del caudal de entrada, suponiendo que no hubiera lluvias adicionales, mostró que el hidrograma se elevaría durante las siguientes 20 horas, con un máximo de aproximadamente 12 000 m^3/s . Esta predicción, interpretada como el límite inferior de un intervalo de incertidumbre, sería muy útil con fines operativos para la presa. La Figura 5(b) muestra también que las predicciones basadas en los tres modelos ARPS con diferentes resoluciones proporcionaban estimaciones de descarga máxima muy por encima de 12 000 m^3/s , incluso aproximándose a 15 000 m^3/s en el caso del modelo ARPS 12.

Finalmente, las predicciones iniciadas a las 06:00 del 1 de octubre son muy similares para las diferentes predicciones de lluvia (Figura 5(c)). Como puede observarse, incluso las predicciones de lluvia cero proporcionaron buenas predicciones del caudal de entrada en el embalse. Aunque el momento del caudal máximo observado es muy cuestionable, se estimó que los caudales de entrada máximos aparecerían en las primeras horas del 1 de septiembre, de modo que los buenos resultados

de la Figura 5(c) podrían haberse obtenido 10 horas antes de los caudales máximos observados.

Los resultados obtenidos para el período continuo de 167 días no fueron tan buenos (Collischonn y otros, 2005). En muchos casos, podrían haberse obtenido resultados si se hubiera supuesto que no aparecería lluvia en absoluto, sugiriendo que sería mejor ignorar la lluvia futura que usar la PCP.

Conclusión

La predicción de crecidas se ha convertido en un activo social y económico importante en la gestión de recursos hídricos para la gestión de riesgos. La mejora en la predicción de caudales requiere investigación en materia de modelización meteorológica e hidrológica. En las grandes cuencas, representa una integración del conocimiento de modelización meteorológica e hidrológica en el espacio y el tiempo con el comportamiento físico integrado, junto con análisis de series temporales. Los resultados de las grandes cuencas presentadas en este artículo muestran que hay mucho que desarrollar, pero que hay una mejora en comparación con la herramienta estocástica usada a menudo operativamente. El uso de estas herramientas en países en vías de desarrollo requiere una mejora de la red de estaciones de vigilancia telemétrica. La estimación de la lluvia por satélite tiene un futuro importante en este tipo de entornos para complementar la falta de fondos y estaciones.

Algunas recomendaciones adicionales relativas a la investigación son: actualizar los procedimientos, usar datos de nivel de agua y caudal de corriente para mejorar las condiciones iniciales para las predicciones del modelo; evaluar los beneficios económicos y sociales de unas mejores predicciones (Collischonn y otros, 2006); adaptar las normas de operación del embalse al uso de predicciones de caudal de corriente que pueden tener diversos grados de incertidumbre (Bravo, 2006); y utilizar datos que están disponibles a escala mundial tales como las estimaciones de lluvia por satélite (Collischonn, 2006).

Referencias

- ANDERSON, M.L., Z.-Q. CHEN, M.L. KAVVAS, A. FELDMAN, 2002: Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of watershed Runoff. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7, 4, 312-318.
- BERTONI, J.C., C.E.M. TUCCI, R.T. CLARKE, 1992: Rainfall-based real-time flood forecasting. *Journal of Hydrology*, 131, 323-339.
- BRAVO, J.M., 2006: Reservoir operation optimization based on streamflow forecasts (en portugués). Tesina de máster. IPH UFRGS, Brasil.
- BLACK, T.L., 1994: The new NMC mesoscale ETA model: description and forecast examples. *Weather Analyses and Forecasting*, 9, 265-278.
- COLLIER, C.G., R. KRZYSZTOFOWICZ, 2000: Quantitative precipitation forecasting. *Journal of Hydrology*, 239, 1-2.
- COLLISCHONN, B., 2006: Use of TRMM satellite rainfall in a distributed hydrological model (en portugués). Tesina de máster. IPH UFRGS, Brasil.

- COLLISCHONN, W., J.M. BRAVO, C.E.M. TUCCI, B.C. SILVA, 2006: Assessment of benefits of meteorological forecasts used for operation of multiple-use water reservoirs (en Portugués). IPH UFRGS.
- COLLISCHONN, W., R. HAAS, I. ANDREOLLI, C.E.M. TUCCI, 2005: Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. *Journal of Hydrology*, 205, 87-98.
- COLLISCHONN, W., C.E.M., TUCCI, 2001: Hydrological simulation of large basins (en portugués). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 6, 1.
- GEORGAKAKOS, P.K., M.D. HUDLOW, 1984: Quantitative Precipitation Forecast Techniques for use in Hydrological Forecasting. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 65, 1186-1200.
- GEORGAKAKOS, K.P., R. KRZYSZTOFOWICZ, 2001: Probabilistic and ensemble forecasting. *Journal of Hydrology*, 249, 1.
- HAAS, R., 2002: Simulation of orographic precipitation associated to an extra tropical cyclone (en portugués). Tesis doctoral. IAG USP, Brasil.
- IBITT, R.P., R.D. HENDERSON, J. COPELAND, D.S. WRATT, 2000: Simulating mountain runoff with mesoscale weather model rainfall estimates: a New Zealand experience. *Journal of Hydrology*, 239, 19-32.
- KOUSSIS, A.D., K. LAGOUVARDOS, K. MAZI, V. KOTRONI, D. SITZMANN, J. LANG, H. ZAISS, A. BUZZI, P. MALGUZZI, 2003: Flood forecasts for urban basins with integrated hydro-meteorological model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 8, 1, 1-11.
- KRZYSZTOFOWICZ, R., 1995: Recent advances associated with flood forecast and warning systems. *Ver. Geophys.*, supl. 33.
- MINE, M., 1998: Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias. Tesis doctoral. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS.
- TUCCI, C.E.M., W. COLLISCHONN, B.C. da SILVA, P. da SILVA DIAS, G. SAMPAIO, SIN CHAN CHOU, J. MARENGO, R.T. CLARKE, 2005: Previsão Hidroclimática no rio São Francisco. ANEEL IPH-UFRGS, 400 pp.
- XUE, M., D.H. WANG, J.D. GAO, K. BREWSTER, K.K. DROEGEMEIER, 2003: The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation. *Meteor. Atmos. Physics*, 82, 139-170.