

LA MODELACIÓN EN EL CAMPO DE LA INGENIERÍA HIDRÁULICA: REFLEXIONES Y DISCUSIÓN SOBRE LAS CAUSAS DE ERROR Y SUS CONSECUENCIAS

MODELLING IN HYDRAULIC ENGINEERING: REFLEXIONS AND DISCUSSION ON ERROR SOURCES AND THEIR CONSEQUENCES

Juan-C. Garcia-Salas¹, Bernard Chocat²

¹ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

² Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

RESUMEN

La modelación de los sistemas hidráulicos, como herramienta de diseño, revisión y toma de decisiones es actualmente una técnica indispensable dentro de las prácticas modernas de la ingeniería civil. Para emplearla adecuadamente, es necesario considerar conceptos que permitan optimizar recursos humanos, materiales y por consecuencia, económicos. Sin embargo, el técnico (modelador) que se encarga de crear modelos ignora (frecuentemente) cuáles son los elementos principales que van afectar la respuesta de su modelo. Por ello, frente a la utilización cada vez más generalizada de este tipo de herramientas en el campo de la ingeniería hidráulica, en este artículo se propone una amplia reflexión sobre las causas de error que se presentan en un proceso de modelación, haciendo énfasis en el proceso de modelación de sistemas hidráulicos.

Palabras clave: Proceso de modelación, incertidumbre, causas de error.

ABSTRACT

Modelling of hydraulic systems, as design tool and decision making too, represents an indispensable technique for modern practices of the civil engineering. In order to apply it adequately, it is necessary understanding some concepts that converges to optimization of resources. Moreover, modeller frequently unknown which is the most important elements that induces an error in the model response. So that, in face to the generalized use of this tool in the field of the hydraulic engineering, in this paper we propose a large dissertation concerning errors sources that exists in a modelling process.

Keywords: Modelling Process, uncertainly, error sources

INTRODUCCION

Desde principios de la década de los ochenta, la utilización de modelos de simulación dentro de los proyectos de ingeniería se ha generalizado considerablemente. Esto se debe, entre otras cosas, al desarrollo exponencial de los soportes físicos que han permitido generar aplicaciones relativamente complejas, (Chocat, 1997).

En ese sentido, los soportes de modelación representan un laboratorio "virtual" dentro del cual existen condiciones que deben ser controladas para que los resultados esperados tengan, en gran medida, errores mínimos, (Chocat *et al.*, 1999). Actualmente, la modelación en la ingeniería hidráulica, es una herramienta básica para la elaboración de proyectos de desarrollo tecnológico, investigación y diseño. En ellos, se pueden representar fenómenos tan complejos como la lluvia, su transformación en escurrimiento y su propagación por una red de cauces, el decaimiento de sustancias desinfectantes en redes de distribución de agua potable, etc. También, se pueden representar fenómenos hidráulicos que no pueden ser observados al detalle en laboratorio, por ejemplo: distribución de velocidades en saltos

hidráulicos en secciones no prismáticas, efectos de tensión superficial y capa límite, cavitación, etc.

Sin embargo, el personal técnico que se encarga de elaborar los modelos (modelador), y en casos más severos el personal técnico que se encarga de diseñarlos o crearlos, ignoran frecuentemente cuales son los elementos que inducen la mayor parte del error estadístico en las respuestas de los modelos que crean o desarrollan. Aunque el modelador influye de manera importante en la generación de errores, existen otras causas que se sitúan en un plano superior (Garcia-Salas, 2003), por ejemplo:

- Formación en ingeniería no acorde con las técnicas de ayuda al desarrollo tecnológico y al diseño. Esto se observa sobre todo en la formación que tenemos, no solo en los países de América Latina sino en países etiquetados como industrializados. En efecto, nuestra formación se acentúa sobre todo en la comprensión detallada de los fenómenos físicos que gobiernan el funcionamiento de los sistemas hidráulicos, ello sin considerar generalmente que las herramientas que han sido diseñadas para representarlos sirven en

- gran medida como soporte para la optimización de las actividades de un proyecto.
- Manuales de ayuda incompletos o mal adecuados. Se observa recurrentemente que ciertas plataformas de modelación (comerciales sobre todo) no incluyen información básica en las ayudas que acompañan al producto finalizado. Por ejemplo: las expresiones matemáticas fundamentales, los métodos numéricos usados para resolverlas, las potencialidades y alcances reales del uso del programa, los valores de los parámetros a capturar, etc. Estos últimos generalmente no son propuestos y se deja su elección al libre albedrío del modelador. Ello demuestra entre otros factores que los diseñadores no han evaluado las características intrínsecas de las plataformas (bondad, robustez, flexibilidad, sensibilidad, etc.), demuestra también una falta de rigor al redactar el documento o aspectos comerciales asociados a los derechos de autor.
- Paradigmas del concepto "modelación". Esta causa se relaciona al primer punto. La gran mayoría de los que elaboramos modelos, pensamos en un momento dado que representan una "caja de pandora" y que las informaciones arrojadas por ésta son verdades absolutas (la historia ha enseñado a la humanidad que los actos de fe conllevan a la extinción de civilizaciones). Ello implica poca (o nula) capacidad de análisis reflexivo de la interfase que existe entre lo "real" y lo "virtual" es decir, sobre el proceso de modelación.

En este artículo se hace una reflexión sobre una parte de la Teoría de Modelación aplicada al campo de la ingeniería hidráulica. En él se pretende dar respuesta a varias preguntas; ¿qué es la incertidumbre de modelación?, ¿cuáles son las causas que la provocan?, ¿cuáles es la causa que induce la mayor parte de la dispersión de los valores calculados?, etc.; de manera que los ingenieros encargados de crear modelos (diseñadores y usuarios finales incluidos), dispongan de una referencia que permita proporcionar algunos de los elementos necesarios para que el proceso de modelación que ellos inicien, se realice bajo un esquema de calidad, en otras palabras que el modelo cumpla con las necesidades para las cuales fue creado.

Para efectos de una mejor comprensión de este artículo proponemos las siguientes definiciones extraídas de (García-Salas, 2003). Ellas son:

- Error: Diferencia entre un valor de referencia y un valor modelado o medido
- Inconsistencia o causa de error: Acción que se realiza en un proceso de modelación o de medición y que tiene por consecuencia la generación de un error.

- Dispersión: Conjunto de valores que podrían ser atribuidos al valor exacto de un valor modelado o de una medición.
- Incertidumbre: Valor que caracteriza la dispersión asociándolo a un valor modelado o a un valor medido.

EL ANALISIS DE LA INCERTIDUMBRE

Adoptaremos el termino modelación para describir el proceso a partir del cual la realidad es estudiada como un mundo virtual (Giré, 1987). Este mundo virtual se explica a partir de la explotación de las respuestas de un modelo. El modelo es entonces, la herramienta, el esquema, la caja, la ecuación o fórmula, que permite representar el mundo real a partir de la abstracción, la síntesis, y/o la idealización de los parámetros que la describen. Los modelos se transforman en un laboratorio virtual (o plataforma de modelación) dentro del cual el modelador puede conducir diversas experiencias (Price, 1996). Al igual que en el campo de la experimentación física, la estimación del valor "exacto" en la modelación digital es imposible. Entonces, para una variable modelada resulta indispensable conocer su dispersión probable alrededor de su valor exacto, esto en función de los errores inducidos en las diferentes etapas de la modelación de un sistema hidráulico en general o de un fenómeno en particular. Esta dispersión es caracterizada por la incertidumbre que asocia varios conceptos propios a la estadística descriptiva y al cálculo de probabilidades.

Considerando la definición de incertidumbre de medición física (AFNOR, 1996; Bertrand-Krajewski, 2001; Ravinovich, 2000), la incertidumbre de una variable modelada es definida como el valor asociado al resultado de un modelo. Este valor caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser atribuidos al valor exacto de la variable modelada.

Dicho valor es estimado utilizando el análisis de incertidumbres. Pero, ¿qué es el análisis de incertidumbres?. Para responder a esta pregunta, emplearemos la clasificación de los modelos según el tipo de utilización (existen otras clasificaciones como por ejemplo el esquema de aproximación a lo real: modelos físicos, conceptuales, mecanistas en 1, 2 o 3 dimensiones, etc.). Originalmente propuesta en (Walliser, 1977) y retomada en (Chocat, 1997), dicha clasificación permite precisar la significación del concepto causa de error así como la significación del concepto propagación de incertidumbres. En ese entendido, un modelo puede ser del tipo:

- Cognitivo
- Predictivo
- Decisional

El objetivo de los modelos cognitivos, consiste básicamente en determinar el transformador (o ecuación de base que representa un sistema o fenómeno), dadas las variables de entrada, los

parámetros geométricos del sistema así como sus variables de salida. Este tipo de modelos se esquematiza en la Ilustración 1. En este caso, la incertidumbre del transformador debe permitir evaluar el error entre el transformador "real" y el transformador del modelo que lo representa. En la práctica esta evaluación es imposible debido a que el valor exacto que supone dar el transformador real, no puede ser conocido. Sin embargo, la incertidumbre del modelo puede asociarse al grado de correlación entre su respuesta y las mediciones reales para condiciones de entrada definidas (variables de entrada y parámetros de control). Este tipo de modelación reposa generalmente en un esquema empírico, es decir en observaciones de terreno o en experimentación en laboratorio. Un ejemplo de este tipo de modelos es el que permite conocer los efectos de la curvatura del perfil a lo largo de un canal con vertedor lateral. Este fenómeno fue estudiado por Balmforth (Balmforth *et al.*, 1983) a partir de observaciones experimentales que le permitieron deducir y validar una expresión (transformador) que fue integrada en la ecuación de cantidad de movimiento del canal principal. La modelación cognitiva sirve entonces para deducir los transformadores que representarán los fenómenos o sistemas de los modelos predictivos y decisionales que son mostrados a continuación.

Los modelos predictivos o también llamados de pronóstico, tienen por objetivo la determinación de las variables de salida (respuesta del transformador) en función de sus variables de entrada, y de los parámetros geométricos del sistema modelado. El análisis de incertidumbres debe permitir entonces la evaluación de la incertidumbre sobre las variables de salida para variables de entrada sintéticas o para variables medidas en condiciones de funcionamiento, evidentemente diferentes a las que permitieron la construcción del transformador (ver Ilustración 2). En este caso, el análisis de la incertidumbre reposa generalmente en técnicas de propagación dentro de la cadena de modelación (lo que supone que las incertidumbres asociadas a los datos de entrada y las incertidumbres asociadas a los parámetros son conocidas, (inclusive la incertidumbre inducida por el mismo transformador). Un ejemplo de este tipo de modelos es el desarrollado por Gromaire (Gromaire *et al.*, 2001). Este autor elabora un modelo que permite pronosticar las concentraciones de zinc, acarreadas por los escurrimientos pluviales en la ciudad de Paris. Este modelo fue creado partiendo de la hipótesis que una gran parte de los techados, de ciertos sectores de la ciudad, contribuyen a la generación de éste metal pesado. Se realizaron mediciones que permitieron validar la hipótesis de partida y en función de esas observaciones, se creó y se validó un modelo digital que permite estimar las concentraciones, considerando para ello el tipo de

techado, de su superficie (parámetros) así como de variables hidrológicas (variables de entrada).

Los modelos decisionales sirven como elemento de ayuda para la toma de una decisión óptima, -elección de los parámetros geométricos-; en función de un contexto específico dado, -variables de entrada-; para alcanzar una meta específica, -variables de salida-, (Hauger *et al.*, 2002). En este tipo de modelación, cuyo esquema se muestra en la Ilustración 3, los errores a tomar en cuenta son los errores inducidos por el transformador, los debidos a la incorrecta definición de los objetivos (variables de salida) y los asociados a un mal conocimiento de las variables de entrada (condiciones de funcionamiento). Estos errores, que se deben en la mayor parte de los casos a variables aleatorias (lluvia por ejemplo), que provocan una incertidumbre en un proceso de decisión. Un ejemplo de este tipo de modelos es el que propone (Alex *et al.*, 1999) en donde se evalúa la factibilidad económica de las medidas estructurales a realizarse en la red de drenaje de la ciudad de Trondheim en Noruega. En realidad, el modelo evalúa el costo beneficio de una modificación en la red (por lo tanto modificación del modelo) dados los objetivos perseguidos por las autoridades (menor costo de realización de obras y máxima protección a los habitantes y medio ambiente). En América Latina éste tipo de modelos es largamente utilizado como una ayuda para evaluar la factibilidad económica dentro de los proyectos de ingeniería hidráulica. Por ejemplo, en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, se prepararon una serie de modelos que servirán para rehabilitar y modificar el sistema de drenaje pluvial de la Ciudad de Morelia (altiplano mexicano). En ellos se modelan diversos escenarios que servirán a las autoridades, como elementos de ayuda a la decisión, para definir, en el corto, mediano y largo plazos, las políticas de reestructuración del sistema de drenaje pluvial de dicha ciudad.

El análisis de incertidumbres debe alcanzar dos objetivos:

- Identificar y evaluar las causas de error asociadas a las variables de entrada y al transformador que son susceptibles de provocar una dispersión en la variable modelada.
- Evaluar la incertidumbre asociada la variable modelada estudiando al mismo tiempo, cómo los errores inducidos por sus causas, se propagan cuando se pone en marcha el modelo.

El análisis de incertidumbres permite también jerarquizar las causas de error y evaluar la robustez del modelo. Es decir, identificar qué parámetro de calibración o qué parámetro geométrico dentro del modelo, debe recibir la mayor parte de los esfuerzos, ello con la finalidad de reducir al máximo la incertidumbre de su respuesta (Lei *et al.*, 1994).

ORIGEN Y CAUSAS DE LOS ERRORES

La identificación de las causas de error en los modelos es necesaria para efectos del análisis de incertidumbres (Simonovic, 2000). Para cualquier esquema de modelación (física, conceptual, mecánica, etc.), por ejemplo las causas de error en un modelo predictivo provienen de:

- las variables de entrada
- los parámetros de control
- del transformador mismo.

Las variables de entrada

En el campo de la modelación de la ingeniería hidráulica, los datos o variables de entrada corresponden a aquellas que van a transformarse al interior de un sistema (ó modelo ó transformador) para producir la respuesta del modelo o las variables de salida. El papel del modelo es por lo tanto el de representar dicha transformación. Por ejemplo, las principales variables que intervienen en un estudio de modelación en hidrología o hidráulica son las siguientes:

- Lluvia (alturas o intensidades)
- Volúmenes de escurrimiento
- Gasto (o velocidades asociadas a presiones)
- Contaminantes (tipo, causa, cantidad), etc.
- Desinfectantes

En todos los casos, estos datos son conocidos a partir de una cadena de mediciones. La primera causa de error a tomar en cuenta se asocia por lo tanto, a la calidad de las mediciones de las variables de entrada.

Sin embargo, los sistemas hidráulicos son complejos (Delleur, 2003 y Alex *et al.*, 1999) y su modelación a partir de un solo transformador es, en la mayoría de los casos, imposible. En ese sentido, en la modelación de un sistema global, el modelo esta compuesto de diferentes modelos interconectados, estos "sub-modelos" representan el funcionamiento de los diferentes componentes del sistema. Se puede inducir entonces que, la incertidumbre asociada a los datos de entrada de un "sub-modelo" particular corresponde a la incertidumbre de la respuesta de los modelos que representan los fenómenos situados jerárquicamente en un nivel superior. La evaluación de la incertidumbre de la respuesta del modelo global implica por lo tanto, la necesidad de propagar las incertidumbres en los diferentes sub-modelos que constituyen la cadena de modelación. Dicha propagación se puede realizar a partir de un análisis de sensibilidad, a través de métodos de generación sintética de datos de entrada y en menor medida, con la ayuda de un análisis de primer orden (Clemens, 2001). La Ilustración 4 esquematiza la propagación de las incertidumbres entre los modelos de niveles sucesivos.

Los parámetros de control

Los parámetros de control considerados aquí son los parámetros geométricos que describen el sistema modelado. En el campo de la ingeniería hidráulica pueden ser, entre otros, los siguientes:

- Las características fisiográficas de una cuenca
- La geometría de conductos y cauces
- Las características topográficas de una red de agua potable, drenaje o de cauces
- Las dimensiones de las obras especiales
- El volumen disponible de almacenamiento y regulación en un sistema de agua potable
- El volumen de regulación en un sistema de presas, etc.

Un error en estos parámetros de control puede tener fuertes consecuencias en el valor de las variables de salida. Por ejemplo en un estudio realizado en la Unidad de Investigaciones en Ingeniería Civil del Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Lyon, Francia, se observó sobre una muestra de 98 modelos de pozos de tormenta construidos por 14 personas diferentes que, del 100% de inconsistencias identificadas, 75% corresponden a inconsistencias en la descripción (captura) de los parámetros geométricos que definen a los pozos de tormenta (diámetros de orificios, altura y ancho de vertedores, alturas de caídas, etc.). Este 75% de inconsistencias induce 60% del error estadístico entre las variables calculadas y las variables de referencia, (García-Salas *et al.*, 2006).

En la práctica, la manera de describir un sistema físico, es función de la elección de los modelos matemáticos que representan los fenómenos que suceden dentro de él. Por ejemplo, en la modelación de sistemas de drenaje pluvial (o combinado) la división de una red en secciones sucesivas y, la elección de los parámetros geométricos que describen cada una de estas secciones elementales (longitud, pendiente, cotas, sección transversal, etc.) están íntimamente ligadas al modelo de propagación de los escurrimientos elegido (por ejemplo, Saint Venant, Muskingum, etc.).

Según Clemens (2001) y Clemens *et al.* (1999), las causas de error de los parámetros geométricos se asocian a:

- las inconsistencias estructurales o de descripción del sistema por modelar
- las incertidumbres de los parámetros geométricos levantados.

Sin embargo, los autores de este artículo proponen además:

- las inconsistencias asociadas al modelador
- Estas últimas siendo función de la inadecuación entre la descripción geométrica (lo real) y el modelo (lo virtual).

Inconsistencias estructurales o de descripción del sistema por modelar

Las inconsistencias estructurales refieren al desconocimiento del sistema. En teoría, los recursos económicos no deberían imponer limitaciones reales para el conocimiento de la "totalidad" del sistema por modelar. El costo elevado de levantamientos precisos, no representa más que una parte ínfima del valor presente del sistema (valor de infraestructura, de terrenos, de equipo, etc.).

En la práctica las cosas son diferentes. Por ejemplo, en un proyecto de modelación de un sistema de drenaje urbano o de agua potable, el costo del levantamiento de los componentes del sistema (variables de entrada y parámetros) representa un porcentaje elevado del costo total del proyecto. Según Blanpain (1998), éste puede variar entre el 60% y el 80%.

Las inconsistencias estructurales aparecen sobre todo cuando los sistemas a modelar son viejos o complejos. Tal es el caso de las redes agua potable y de drenaje localizadas en los centros históricos de las ciudades. Debido a su naturaleza topológica, ver (Dupuy, 1983) para más detalles, a su carácter inaccesible en ciertos puntos y a la gran cantidad de infraestructuras por levantar, el sistema no puede conocerse al cien por cien. Por lo tanto, los parámetros geométricos levantados pueden estar incompletos.

Además, dado que existe una gran cantidad de datos a almacenar en un estudio de este tipo, no es sorprendente encontrar informaciones incorrectas.

Por lo tanto, las inconsistencias estructurales más frecuentes son las siguientes:

- Levantamiento incorrecto de los datos topográficos del sistema
- Falta de identificación de ciertos puntos de interés
- Falta de levantamiento de obras especiales

Incertidumbres de los parámetros geométricos levantados

Aunque las características geométricas del sistema modelado hayan sido correctamente levantadas, las mediciones tienen incertidumbres intrínsecas. Esta incertidumbre de medición depende de los dispositivos utilizados. En función de la escala del sistema, ellas pueden ser relativamente pequeñas. Su importancia relativa sobre las variables de salida (respuesta del modelo) han sido estudiadas largamente en (Clemens, 2001) donde, se expone la influencia de la incertidumbre de medición sobre la incertidumbre de los valores calculados por un modelo. En este caso los errores de ciertos parámetros descriptivos (por muy pequeños que fueren) pueden tener consecuencias graves en las variables de salida de modelos. Por ejemplo la altura de la cresta de un vertedor sobre el volumen vertido, la superficie de

una cuenca sobre el volumen escurrido, la longitud y pendiente de un cauce sobre la propagación del escurrimiento, la longitud de una tubería sobre la dispersión de contaminantes, el estado de operación de una válvula sobre las presiones de servicio de agua potable en una zona, etc.

Inconsistencias asociadas al modelador

Además de las incertidumbres inherentes a la recopilación de los datos estructurales, el modelador agrega una incertidumbre que se asocia a la representación (o interpretación) del sistema por modelar (interacciones entre componentes del sistema).

Varios autores insisten en la importancia de este tema, (Beck, 1998; Henrion *et al.*, 2000; Koniger, 1996), a partir de reflexiones sobre la representación e interpretación de la complejidad de un sistema. Un ejemplo, de las inconsistencias asociadas al modelador se presenta en el estudio antes mencionado que se realizó en Lyon, Francia, (Garcia-Salas *et al.*, 2006). En este estudio se observó que, del 100% de las inconsistencias cometidas, 25% corresponden a inconsistencias de interpretación de sistemas complejos, ver Ilustración 5. Es decir, inconsistencias en la forma de cómo el sistema fue modelado (pozo de tormenta.) dentro de la plataforma de modelación utilizada. Este 25% de inconsistencias induce 40% del error estadístico entre las variables calculadas y las variables de referencia. Esta inadecuación entre el mundo "real" y el "virtual" puede inducir también una fuerte dispersión en la respuesta del modelo, y por consiguiente la imposibilidad de calibrarlo y validarlo correctamente, tal como lo muestra la Ilustración 6.

El modelo

Es evidente que un transformador o modelo, no puede dar más que una representación simplificada de la realidad. Su pertinencia (bondad) corresponde entonces a su capacidad para representar los fenómenos físicos en cuestión. En la ingeniería hidráulica, las incertidumbres asociadas al transformador deben ser consideradas. La afirmación anterior es aún más verdadera cuando se trata de modelos globales que consideran la complejidad real de los fenómenos y de los sistemas físicos.

Por otra parte, Geldof (1999) desarrolla una larga reflexión sobre el "cómo" hacer para construir, calibrar y validar modelos cada vez más globales (o integrados). Para responder a ello, dicho autor realiza un análisis en dos direcciones. El primero, de tipo determinista que se fundamenta en el aumento del número de fenómenos considerados en un modelo y en las interconexiones entre ellos, de manera que la mayoría de los procesos que se realizan al interior del sistema, puedan ser modelados (en términos absolutos, una representación perfecta de

un sistema permitiría estimar todos los parámetros de calibración del modelo a partir de parámetros geométricos medibles). El segundo, de tipo sistémico, pretende que la complejidad del sistema debe ser conservada proponiendo, una descripción fundada en los procesos de adaptación y de aprendizaje (interacción, independencia, autonomía y evolución de sistemas) a partir de esquemas más apropiados, por ejemplo redes neuronales, algoritmos genéticos, lógica difusa, etc., ver (Manic *et al.*, 2005)

De manera pragmática, en este apartado se consideran tres aspectos que son susceptibles de ser considerados como causas de error de un transformador:

- La fineza de representación de los fenómenos
- La capacidad del modelo para aplicarse en el caso de estudio
- La selección de los parámetros de calibración.

Estas tres causas existen para cualquier tipo de modelo (según el esquema de aproximación a lo real). Por razones de claridad, se explicarán utilizando dos esquemas de aproximación: el mecanísta (postulados de las ciencias exactas, por ejemplo los postulados de Newton) y el esquema físico o experimental (modelación en laboratorio o en campo).

Fineza de representación de los fenómenos y de los objetos

Una causa de error es inevitablemente introducida en la respuesta de un modelo si, a partir de su construcción, no fueron considerados ciertos fenómenos (Johnson, 1996). Esta reducción del espacio fenomenológico esta ligada principalmente a:

- Las hipótesis teóricas a partir de las cuáles los modelos fueron construidos
- Las condiciones y/o a las limitantes experimentales
- La elección de simplificaciones del modelador

Para ilustrar la idea aquí expuesta, se propone desarrollar estos conceptos apoyándonos en un ejemplo. En un vertedor lateral (objeto), los mecanismos de vertido están estrechamente ligados a la variación de las diferentes componentes de velocidad que existen a lo largo de la longitud del vertedor (Hager, 1994, Balmforth *et al.*, 1983, El-Khashab *et al.*, 1976)

Si se utiliza un esquema teórico mecanísta para la construcción de un modelo, que tiene por objetivo reproducir el funcionamiento de un vertedor lateral, es necesario realizar hipótesis de simplificación (Hager, 1987), siendo entre otras las siguientes:

- conservación de la energía a lo largo del vertedor
- distribución uniforme de velocidades

- pendiente de fondo suave en el canal principal
- componentes verticales de velocidad nula

Estas hipótesis tienen por causa (o consecuencia) la elección del número de dimensiones del espacio de análisis (1, 2 o 3 dimensiones espaciales y/o una dimensión temporal) y la definición de los parámetros de control (parámetros de descripción geométrica del objeto) necesarias a la definición de los fenómenos considerados. Teniendo en cuenta los medios disponibles en laboratorio (sistemas metrológicos utilizados) durante la etapa experimental del modelo, la observación es realizada únicamente sobre los fenómenos que han sido considerados, dentro del esquema teórico de aproximación (a lo real) retenido, como los más representativos. En la mayoría de los casos, tales fenómenos corresponden, a aquellos que saben medirse. Sin embargo, las condiciones experimentales, al igual que los dispositivos de medición, son imperfectas. Por esta razón, ciertos fenómenos considerados, sobre el plano teórico como importantes, no son observados (y en consecuencia medidos) correctamente. En ese sentido, el dispositivo experimental, que permitió observar un fenómeno, genera una nueva degradación del modelo en relación a los fenómenos físicos que supone reproducir.

Por otra parte, el modelador efectúa la elección final de modelación en función de las hipótesis teóricas y de los resultados experimentales. Además de los elementos precedentes (teóricos o experimentales), el modelador considera problemas prácticos de aplicación (tiempo de cálculo, cantidad de datos a proporcionar, medios materiales a movilizar, etc.), que lo orillan a simplificar, aún más, el modelo.

Estas simplificaciones del espacio fenomenológico y espacial son consideradas por el modelo, agregando coeficientes como lo supone Johnson (1996). En nuestro ejemplo: coeficiente de vertido, coeficiente de distribución de velocidades, coeficientes de pérdida de carga debida a la fricción. Durante la puesta en marcha del modelo, esos coeficientes (o parámetros de calibración) deberán ser discretizados, induciendo así otra simplificación en el modelo, (Muslu, 2001).

Capacidad del modelo para aplicarse en el caso de estudio

Si las características del modelo no son las adecuadas para la aplicación deseada, otra causa de error, también asociada al modelo, emerge. Para explicar mejor el significado de esta nueva causa, se propone continuar con el ejemplo del caso anterior, sin embargo el lector podrá consultar en (Garcia-Salas *et al.*, 2005, y Lhomme, 2004) tres ejemplos del cómo aplicar correctamente un modelo a un caso de estudio o a una necesidad técnica dada.

Si se quiere evaluar la variación transversal y longitudinal de los tirantes de agua a lo largo del

vertedor lateral, considerando para ello diferentes fenómenos (por ejemplo los efectos de tensión superficial a lo largo de la cresta, los efectos de pérdida de energía por fricción, los efectos de distribución no uniforme de presiones, etc.), es necesario elaborar un modelo que considere tales fenómenos.

Por el contrario, si se construye un modelo que no los considere, pero que ha sido concebido con los mismos objetivos (evaluación de la variación de los tirantes en dos direcciones), el modelo de vertedor lateral induce un error, siendo éste asociado a los coeficientes que engloban los fenómenos ignorados.

En el mismo sentido, si los fenómenos preponderantes no son considerados (por ejemplo componentes longitudinales de velocidad) a lo largo de un vertedor lateral, entonces ninguna calibración fiable será posible y la capacidad de generalización (aplicación con otros rangos de aplicación) del modelo será muy escasa.

Selección de los parámetros de descripción del objeto

Es evidente que, si el modelo es capaz de representar de manera específica una gran cantidad de fenómenos, el objeto debe también estar definido con una gran cantidad de parámetros de descripción, como sucede en la modelación tridimensional (Shilton *et al.*, 1999).

Por el contrario, si el modelo es capaz de englobar fenómenos múltiples a partir de uno o dos parámetros, el objeto puede ser representado con pocos parámetros de descripción, (Chocat *et al.*, 1999, Muslo, 2001). Entonces, debe existir coherencia entre el nivel de fineza de descripción de los fenómenos y la manera de representar el objeto (García, 2003).

Por ejemplo, si el modelador desea estudiar la variación longitudinal y transversal de los tirantes en un canal con un vertedor lateral, considerando explícitamente un gran número de fenómenos, éste deberá describir las características físicas (del vertedor) que tienen una influencia sobre cada uno de esos fenómenos. Un error será inducido cada vez que los parámetros de control del modelo consideren solamente una parte del espacio dentro del cual, los fenómenos se desarrollan.

DISCUSION

Como se ha definido anteriormente en este artículo, el proceso de modelación es el que permite pasar de lo "real" a lo "virtual". En este proceso existen, como en cualquier otro, factores que alteran la calidad del producto final, para el tema abordado por este artículo el producto final es el modelo, que permite establecer la interfase entre lo real y lo virtual.

La modelación como proceso, requiere en la mayor parte de las veces la movilización de recursos importantes que son, en lo absoluto, sensiblemente

inferiores a los recursos movilizados en una campaña de medición. La modelación emerge en muchos casos, como la "única" solución para poder estudiar el comportamiento de los sistemas complejos. Sin embargo, ella no puede disociarse por completo de las campañas de medición, es decir siempre será necesario establecer campañas con carácter temporal para elaborar modelos confiables (García, 2003). Un ejemplo de lo expresado en este párrafo es el estudio del comportamiento hidráulico y de calidad del agua de los sistemas de drenaje combinados y/o de los sistemas de distribución de agua potable que se caracterizan por ser altamente complejos y cuya instrumentación resulta excesivamente onerosa. Bajo esta perspectiva, el papel de los ingenieros es preponderante porque deben dar respuesta a tres preguntas fundamentales durante el proceso de modelación, siendo éstas las siguientes: (i) ¿en donde medir?, (ii) ¿durante cuanto tiempo medir? y (iii) ¿cómo eliminar las a priori las causas de error de mi modelo para poder calibrarlo y validarlo movilizando a la vez la menor cantidad de recursos?.

Las dos primeras preguntas pueden ser respondidas de manera relativamente fácil porque se conjugan dos aspectos de suma importancia: la experiencia de los encargados del proyecto en cuestión y los recursos técnicos y económicos disponibles. Ello, sin olvidar que la modelación puede ser un elemento de gran ayuda para definir los puntos de medición, de ahí el carácter sinérgico de las dos técnicas tal como se sugiere en (Korving *et al.*, 2002).

La tercera respuesta es no es tan evidente de responderla, ello debido a la existencia de una gran cantidad de causas probables de error, que no necesariamente son del conocimiento del modelador y, que deben ser controladas durante el proceso de modelación.

Una técnica que puede ser de gran ayuda es la utilización de diagramas causa – efecto. Uno de los más utilizados a nivel industrial es el propuesto en 1953 por Ishikawa (1988). Este diagrama se basa en la identificación, la clasificación y la puesta en evidencia de las causas probables al origen de los problemas específicos que afectan la calidad, tanto de un proceso como del producto final de dicho proceso. En la Ilustración 7 se muestra un diagrama causa – efecto, basado en las ideas de Ishikawa (1988) y en las reflexiones plasmadas en este artículo para el proceso de modelación de un vertedor de tormenta.

Finalmente, el proceso de modelación no es exclusivo de una sola persona, en la mayoría de los casos se realiza a partir de los esfuerzos de un grupo de trabajo. Este grupo debe ser capaz de aislar los problemas de cada una de las etapas elementales del proceso y resolverlos según las experiencias propias a cada uno de los integrantes. Ello estimula su participación activa dentro del proceso de modelación, ayudando así a la eliminación a priori de las causas de error de un modelo. La consecuencia de la identificación de tales causas de error se verán reflejadas en las

características intrínsecas del modelo: sensibilidad, robustez, generalización, pertinencia o bondad, etc. así como en los recursos movilizados para su calibración y validación.

CONCLUSION

La modelación es una técnica indispensable en las prácticas actuales de ingeniería. Sin embargo, dicha técnica necesita ser aplicada bajo contextos favorables que involucren conceptos de la teoría de modelación, calidad, sistémica, estadística y probabilidad, además de los propios al campo de aplicación del modelo.

La práctica de la modelación en el campo, no solo de la ingeniería hidráulica, tiende fuertemente a la elaboración de modelos numéricos cada vez más globales, sobre todo para representar sistemas complejos (Delleur, 2003). Esto, sin duda alguna, es de gran ayuda para el diseño, revisión y toma de decisiones en un proyecto. Sin embargo, no se puede soslayar el que una parte (importante) de los modeladores desconoce tanto las causas de error más importantes dentro de los procesos de modelación en los que están involucrados como las características intrínsecas de los modelos que desarrollan.

En este artículo hemos realizado una reflexión amplia sobre las incertidumbres en la modelación, sus causas principales y las formas como podrían ser eliminadas a priori. Estos conceptos son fundamentales para establecer los esquemas de calidad dentro de los procesos de modelación que, como modeladores debemos adoptar para que como ingenieros propongamos mejores soluciones.

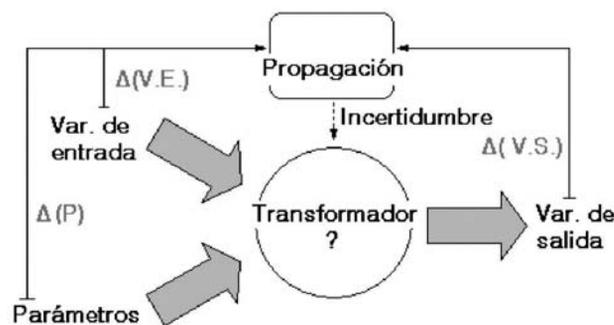


Ilustración 1. Esquema del principio de un modelo cognitivo. El sentido de las flechas representa el flujo de información. Las flechas continuas representan las causas de error asociadas a cada elemento del modelo. La flecha discontinua representa la incertidumbre del elemento a determinar en el modelo. Donde P: Parámetro; V.E.: Variable de entrada; V.S.: Variable de salida.

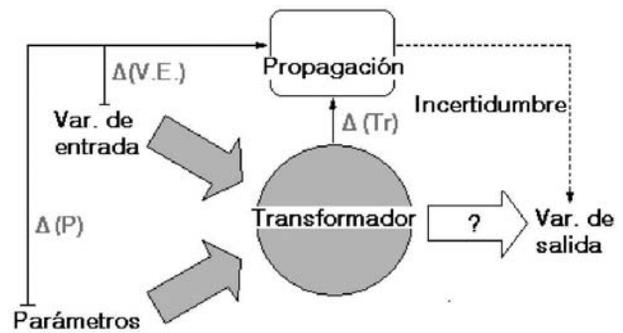


Ilustración 2. Esquema del principio de un modelo predictivo. El sentido de las flechas representa el flujo de información. Las flechas continuas representan las causas de error asociadas a cada elemento del modelo. La flecha discontinua representa la incertidumbre del elemento a determinar en el modelo. Donde P: Parámetro; V.E.: Variable de entrada; Tr.: Transformador.

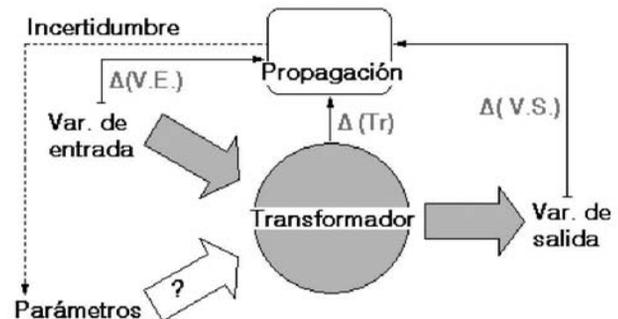


Ilustración 3. Esquema del principio de un modelo decisional. El sentido de las flechas representa el flujo de información. Las flechas continuas representan las causas de error asociadas a cada elemento del modelo. La flecha discontinua representa la incertidumbre del elemento a determinar en el modelo. Donde V.E.: Variable de entrada; V.S.: Variable de salida; Tr: Transformador

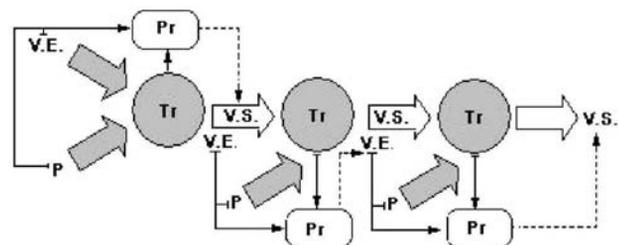


Ilustración 4. Esquema de un modelo predictivo complejo con tres niveles. El sentido de las flechas representa el flujo de información. Las flechas continuas representan las causas de error asociadas a cada elemento del modelo. La flecha discontinua representa la incertidumbre del elemento a determinar en el modelo. Donde P: Parámetro; V.E.: Variable de entrada; V.S.: Variable de salida; Tr Transformador.

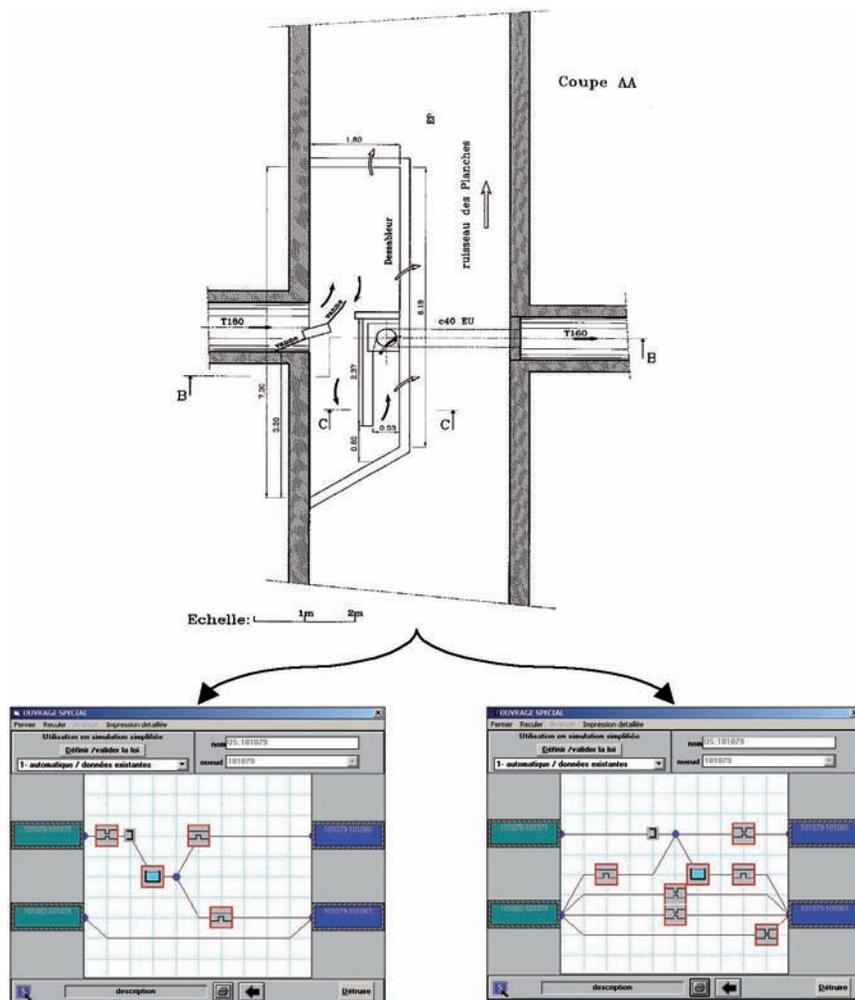


Ilustración 5. Ejemplo de dos representaciones diferentes de una misma obra, realizadas por dos modeladores diferentes, dentro de un programa de simulación de sistemas de drenaje.

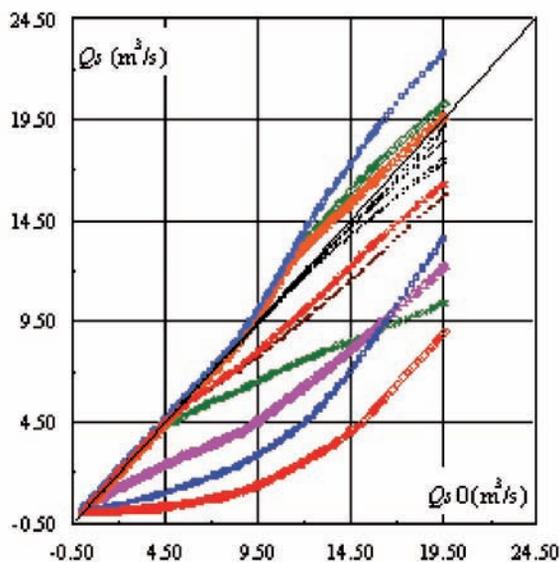


Ilustración 6. Ejemplo de dispersión de los modelos de una misma obra (pozo de tormenta), construidos por diferentes personas, dentro de un programa de simulación de sistemas de drenaje.

Donde: Q_{s0} . Gasto de referencia conservado en la red. Q_s . Gasto calculado por los modelos construidos por diferentes modeladores.

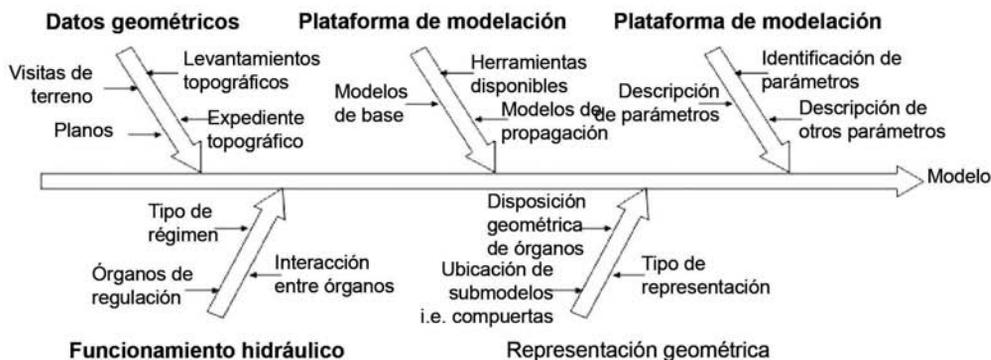


Ilustración 7. Diagrama causa efecto asociado al proceso de modelación numérica de un vertedor de tormenta en un programa de modelación de redes de drenaje urbano.

REFERENCIAS

- AFNOR. *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*. NF XP X 07-020. Paris, France: Association Française de Normalisation. 1996, 113 p.
- ALEX, J., SCHILLING, W., y RISHOLT, L.P. *Integrated modelling system for simulation and optimization of wastewater systems*. In Proceedings of 8th International Conference on Urban Storm Drainage, 8ICUSD. August 30 – September 3. Sydney, Australia: IAHR/IAWQ Joint Committee. 1999, pp.1553-1561.
- BALMFORTH, D.J. y SARGINSON, E.J. *The effects of curvature in supercritical side weir flow*. Journal of Hydraulic Research. 1983, vol. 21, n° 5, pp. 333-343.
- BECK, M.B. *Coping with ever larger problems models, and data bases*. In: Proceedings of the Conference on Application of Models in Water Management, Aquatec'98. September 24-30, Amsterdam, The Netherlands : IAWQ / EWPCA/ NVA. 1998 pp. 13-24.
- BERTRAND-KRAJEWSKI, J.L. *Mesures en hydrologie urbaine et assainissement*. Paris: Lavoisier Tec & Doc. 2001, 794 p.
- BLANPAIN, O., HUC, A. y KARNIB, A. *Une méthodologie permettant la modélisation des réseaux d'assainissement à partir des données incomplètes - résultats préliminaires*. In Proceedings. of 3th International Conference on Innovative Technologies in Urban Drainage, NOVATECH'98. Mai 4-6, Lyon, France: GRAI 1998, pp. 223-230.
- CHOCAT, B. y CABANE, P. *Hydrologie urbaine: modélisation et effet d'échelle*. La Houille Blanche, SHF. 1999, n° 7/8, pp. 106-111.
- CHOCAT, B. *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*. Paris: Lavoisier Tec & Doc. 1997, 1124 p.
- CLEMENS, F. *Hydrodynamic models in urban drainage: applications and calibration*. PhD Thesis of Delft University. Delft, the Netherlands: 2001, 367 p. (publicada y distribuida por DUP Sciences).
- CLEMENS, F. y HEIDE, W. *Effects of geometrical data errors in hydrodynamic calculations in urban drainage*. In Proceedings of 8th International Conference on Urban storm Drainage, 8ICUSD. August 30 – September 3. Sydney, Australia: IAHR/IAWQ Joint Committee. 1999, pp.955-963.
- DELLEUR, J. *The evolution of urban hydrology: past, present and future*. Ven Te Chow Lecture, presented at the ASCE, 9th International Conference on Urban Drainage, Portland, Ore. September 11, 2002. Journal of Hydraulic Engineering. 2003, vol. 129, n° 8, pp. 563-573.
- DUPUY, G. *Systèmes, réseaux et territoires. Principes de réseautique territoriale*. Paris: Presses de l'Ecole National des Ponts et Chaussées. 1985, 168 p.
- EL-KHASHAB, A. y SMITH, K.V.H. *Experimental investigation of flow over side weirs*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE. 1976, vol. 129, n° 8, pp. 563-573.
- GARCIA-SALAS, J.C. y CHOCAT B. *Assessment of uncertainties in the modelling of CSOs*. Water Science & Technology. 2006, vol. 54, n° 6-7, pp. 247-254.
- GARCIA-SALAS, J.C. y CHOCAT B. *Modelisation unidimensionnelle des déversoirs d'orage lateraux*. La Houille Blanche, SHF. 2005, n° 2, pp. 63-71.
- GARCIA-SALAS, J.C. *Evaluation des performances, sources d'erreur et incertitudes dans les modèles de déversoirs d'orage*. Thèse de Doctorat en Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Villeurbanne, France, 2003, 395 p.
- GELDOF, G. *Complexity: the end of determinism?*. In Proceedings of 8th International Conference on Urban Storm Drainage, 8ICUSD. August 30 – September 3. Sydney, Australia: IAHR/IAWQ Joint Committee. 1999, pp.817-824.

- GIRE, A. *Modèles mathématiques de systèmes évolutifs héréditaires*. Lyon: Presses Universitaires de Lyon. 1987, 404 p.
- GROMAIRE, M., WAITROP, N. y CHEBBO, G. *Importance of zinc roofs in Paris and their impact on urban runoff pollutant loads*. In Proceedings of 4th International Conference on Innovative Technologies in Urban Drainage, NOVATECH'01. June 25-27. Lyon, France: GRAI, 2001, pp. 937-944.
- HAGER, W. *Abwasserhydraulik*. Berlin, Deutschland: Springer-Verlag. 1994, 628 p.
- HAGER, W. *Lateral outflow over side weirs*. Journal of Hydraulic Engineering. 1987, vol. 113 n° 4, pp. 491-504.
- HAUGER, M.B., RAUCH, W., y LINDE, J.J. *Cost benefit risk : a concept for management of integrated urban wastewater systems*. Water Science & Technology. 2002, vol. 45 n°3, pp. 185-193.
- HENRION, G., y DESSEZ, P.J. *Amélioration des résultats d'une campagne de mesures par la modélisation en vue de l'autosurveillance*. In Autosurveillance et mesures en réseau d'assainissement. Colloque d'hydrotechnique de la Société Hydrotechnique de France. 5-6 décembre. Lyon, France: 2000, pp. 33-40.
- ISHIKAWA, K. *What is total quality control?: the japanese way*. Prentice Hall. 1988. New York, USA. 240 p.
- JOHNSON, P. *Uncertainty of hydraulic parameters*. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 1996, vol. 122, n° 2, pp. 112-114.
- KONIGER, W. *Modelling of complex hydraulic structures in urban drainage systems by a generalized rainfall-runoff model*. In Proceedings of 7th International Conference on Urban Storm Drainage, 7ICUSD. September 9-13. Hannover, Germany: IAHR/IAWQ Joint Committee, 1996, pp.635-640.
- KORVING, H. y CLEMENS, F. *Bayesian decision analysis as a tool for defining monitoring needs in the field of effects of CSOs on receiving waters*. Water Science & Technology. 2002, vol. 45 n° 3, pp. 175-184.
- LEI, J. y SCHILLING, W. *Parameter uncertainty propagation analysis for urban rainfall runoff modelling*. Water Science & Technology. 1994, vol. 29, n° 1-2, pp. 145-154.
- LHOMME, J., BOUVIER, C. y PERRIN, J.L. *Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchments*. Journal of Hydrology. 2004, vol. 299, 3-4, pp. 203-216.
- MANIC, G. y GOGIEN, F. *Modelling sewer network behaviour using artificial neural Networks*. In CD-Proceedings of 10th International Conference on Urban Drainage, 10ICUD. 21-26 August. Copenhagen, Denmark: IAHR/IAWQ Joint Committee. 2005, 8 p.
- MUSLU, Y. *Numerical analysis for lateral weir flow*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2001, vol. 127, n° 4, pp. 246-252.
- PRICE, R. *Monitoring and modelling in urban drainage*. In Proceedings of 7th International Conference on Urban Storm Drainage, 7ICUSD. September 9-13. Hannover, Germany: IAHR/IAWQ Joint Committee 1996, pp.1701-1706.
- RAVINOVICH, S. *Measurement errors and uncertainties*. New York: Springer-Verlag, 2000, 293 p.
- SHILTON, A. y GLYNN, D. *The potencial of CFD technology*. Water 21. 1999, July-August, pp. 37-38.
- SIMONOVIC, S. *Tools for water management*. Water International. 2000, vol. 25, n° 1, pp. 76-88.
- WALLISER, B. *Systèmes et modèles*. Paris: Editions du Seuil. 1977, 220 p.

Juan Carlos García Salas,
Doctor en Ingeniería Civil
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
Paseo Cuauhnáhuac 8532,
Coordinación de Hidráulica
Jiutepec, Morelos, 62550, México
jcgarcia@tlaloc.imta.mx

Bernard Chocat
Doctor en Ingeniería Civil
Laboratoire de Genie Civil
et d'Ingenierie Environnementale,
Institut National des Sciences Appliquées
Bât. J. C. A. Coulomb
34 Avenue des Arts
69621, Villeurbanne Cedex, France,
Bernard.Chocat@insa-lyon.fr