

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Modelación hidrológica.
<i>Autor / Adscripción</i>	Francisco Javier Aparicio Mijares Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, (núm. esp.): 54-61
<i>Fecha de publicación</i>	1990
<i>Resumen</i>	La enorme diversidad de problemas hidrológicos ha inducido, en el desarrollo de la hidrología, a la existencia de una también enorme diversidad de modelos hidrológicos. Los modelos que se han desarrollado tienen ventajas y limitaciones, pero entre los modeladores se suele encontrar una serie de actitudes dogmáticas que inhiben el desarrollo de la hidrología. El artículo desarrolla los apartados sobre modelación y modelos, modelos matemáticos en la determinación de avenidas de diseño así como dogmatismo y equilibrio.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1247

Modelación hidrológica

Francisco Javier Aparicio Mijares

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, CNA

Introducción

De la fórmula racional (Kuichling, 1889) al Sistema Hidrológico Europeo (Abbott *et al.*, 1986a y 1986b; Bathurst, 1986a y 1986b) y modelos similares, la modelación hidrológica ha recorrido un largo trecho en el que se han desarrollado múltiples modelos, de muy diversas características, para resolver problemas sumamente variados. Quizá por la diversidad misma, los usuarios de los modelos suelen tener una tendencia natural a recurrir preferentemente a uno o algunos de ellos en sus aplicaciones, despreciando y aun fustigando el uso de los demás. En este trabajo se pretende mostrar lo negativo de estas actitudes, así como la utilidad de todos los tipos de modelos existentes. Para ello, se definirán, en primer lugar, los modelos que se usan en hidrología, así como el proceso mismo de modelación. Después, se hará una breve reseña de los que se han desarrollado en el último siglo y finalmente se criticarán las actitudes mencionadas.

Sobre modelación y modelos

De acuerdo con Raudkivi (1979), la modelación es la relación entre un sistema real, tal como una cuenca, y sus modelos. Los utilizados en hidrología tienen una gran cantidad de aplicaciones, entre las que se pueden mencionar las siguientes (*ibid.*):

- Determinar avenidas de diseño
- Predecir frecuencias de eventos
- Hacer pronósticos a corto plazo
- Extender mediciones
- Generar secuencias sintéticas
- Predecir el comportamiento hidrológico de una cuenca
- Pronosticar los efectos de cambios físicos en las cuencas

- Optimizar el diseño y los procedimientos de operación de proyectos de recursos hidráulicos.

Antes de discutir sobre los modelos y la modelación en hidrología, conviene tener cierta claridad sobre el significado del término modelo. La acepción de este término aplicable al presente contexto, que registra el Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española es: "representación en pequeño de alguna cosa"; a pesar de que dicho diccionario es una de las formas más deseables de convención, la definición anterior resulta incompleta desde el punto de vista de la ingeniería, pues se restringe exclusivamente a los modelos físicos, mientras que la existencia de otros tipos es universalmente aceptada —por la comunidad ingenieril al menos. Kobus (1980) propone una definición un poco más cercana a la idea intuitiva que los ingenieros tenemos del término: "representación simplificada de una cosa, estado o evento", pero posiblemente resulta más general la que dan Novak y Čábelka (1981): "simulación de un prototipo", que será la que se adopte para este trabajo. Ambos autores después la amplían, señalando que la simulación del prototipo se realiza mediante "un sistema que convierte una entrada o estímulo (geometría, condiciones de frontera, fuerza, etc.) en una salida o respuesta (gastos, niveles, presiones, etc.) útil para el diseño y operación de obras de ingeniería civil". Además, los mismos autores clasifican los modelos de la siguiente forma:

- A escala. También llamados modelos físicos, son a los que se refiere la Real Academia en su definición general de modelo.
- Analógicos. Son sistemas que reproducen el comportamiento de un prototipo en un medio físico diferente.

- Matemáticos. Son sistemas que simulan el prototipo mediante una o más ecuaciones.

Aunque, por supuesto, existen otras formas posibles de clasificación y otros tipos posibles de modelos dentro de la clasificación adoptada aquí, se considerará que los mencionados en este trabajo constituyen una muestra representativa de los desarrollados en este siglo y que bastarán para la discusión de los siguientes apartados.

La selección de uno de los tres tipos anteriores de modelo para el tratamiento de un problema particular depende fundamentalmente de la índole del prototipo. Los modelos físicos simulan estructuras o situaciones muy particulares y sólo pueden ser usados para tales casos; sus resultados, aunque en general cualitativos, son casi siempre muy confiables, pero su utilidad se reduce a la determinación de las dimensiones apropiadas para cierto tipo de obras o bien a la obtención de cifras con las que se retroalimentan los otros dos tipos y, una vez cumplida esta misión, se desechan. Por esto, los modelos físicos juegan un papel poco importante en la hidrología, donde no es suficiente que el modelo prediga las condiciones en que se produce el escurrimiento en una zona dada de la cuenca o en su vecindad inmediata, sino que debe ser capaz de considerar las características de toda la cuenca, su distribución, sus cambios y sus efectos en el escurrimiento.

El uso de modelos analógicos en hidrología ofrece un panorama un tanto más amplio; su desarrollo está fincado principalmente en la analogía eléctrica y, aproximadamente desde la década de los treinta, se ha propuesto un número relativamente considerable de ellos (Chow, 1964). Su utilidad práctica parece, sin embargo, estar limitada por su dependencia de los modelos matemáticos y por su calibración, que debe hacerse en dos niveles: la estimación de los parámetros hidráulicos y la correspondencia entre éstos y los eléctricos. Por ejemplo (*ibid.*), la ley de Darcy es

$$V = K_s \frac{\partial h}{\partial s} \quad (1)$$

donde v es la velocidad del flujo, K_s , la conductividad hidráulica del medio saturado, h , la carga total y s es la distancia en dirección media del movimiento del agua; por otra parte, la ley de Ohm es

$$I = \sigma \frac{\partial V}{\partial x} \quad (2)$$

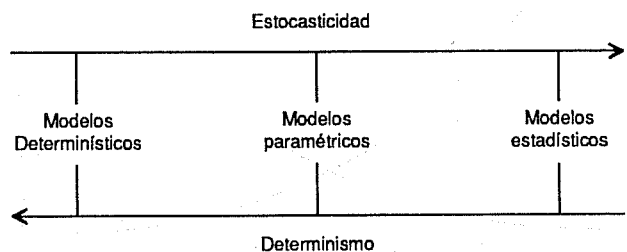
donde I es la intensidad de una corriente eléctrica, σ es la conductividad eléctrica, V es el voltaje y x es la longitud del conductor. Comparando las dos ecuaciones anteriores, se puede ver que I es equivalente a v cuando K_s corresponde a σ , y h y s son semejantes a V y x , respectivamente, por lo que la corriente eléctrica es un modelo analógico del flujo en un medio poroso saturado; el planteamiento de este modelo depende, no obstante, del modelo matemático dado por la ecuación (1) y para su calibración debe estimarse primero el valor de K_s y después establecerse una correspondencia entre dicho parámetro hidráulico y σ , que es su equivalente eléctrico.

Por lo anterior, los modelos matemáticos son, con mucho, los más ampliamente usados en la hidrología. En esta clasificación se encuadra un gran número de modelos de muy variable complejidad. Por ejemplo, para el caso específico de la determinación de avenidas de diseño, los modelos matemáticos se pueden clasificar por su estocasticidad o, de manera equivalente, por su determinismo (véase ilustración 1), de tal forma que un modelo con cero estocasticidad sería del tipo determinístico y otro con cero determinismo sería uno estocástico. Entre ambos se tienen los modelos que, siguiendo a Overton (1979), se denominarán paramétricos. A continuación se analizarán estos modelos con más detalle.

Modelos matemáticos en la determinación de avenidas de diseño

La estocasticidad de un modelo hidrológico no es una propiedad inherente exclusivamente al modelo en sí mismo; el modelador —definido como la persona que usa un modelo— tiene, en general, mucho que ver con esta propiedad. Para empezar, este especialista debe escoger el modelo con el cual va a trabajar. En ello intervienen, desde luego, su experiencia y juicio ingenieril, sus conocimientos, tanto sobre la

1. Determinismo y estocasticidad en la modelación hidrológica (adaptado de Overton y Meadows, 1976)

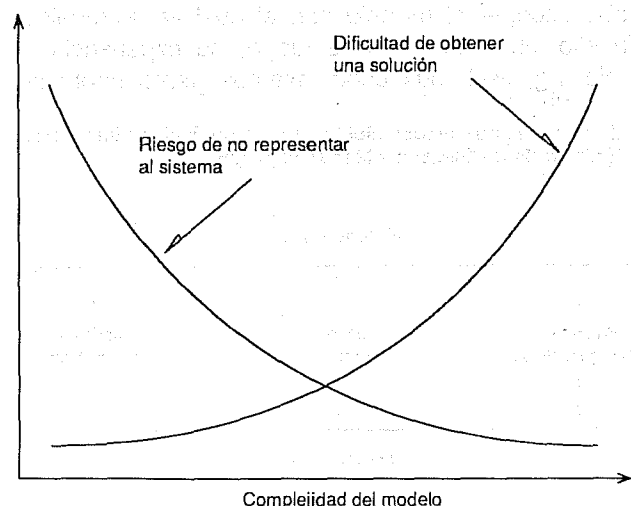


física del fenómeno como sobre las matemáticas, estadística o cualquier otra área necesaria para comprender y usar los modelos y, de manera preponderante, su información sobre la existencia de los modelos mismos. Con todo este bagaje, aunado a sus preferencias personales, el modelador toma en cuenta los datos de que dispone y elige una opción. Dentro del proceso de decisión, el modelador debe considerar también la relación entre la complejidad del modelo matemático y el riesgo de no representar adecuadamente al sistema, por un lado, y la dificultad de obtener una solución por el otro (véase ilustración 2); este esquema supone que la información necesaria para aplicar el modelo en cuestión está disponible en su totalidad. Más adelante se comentará el aspecto de la información con mayor detenimiento.

Es obvio que, como todo proceso de decisión, éste involucra una cierta dosis de estocasticidad, pues no todos los modeladores parten de igual experiencia, iguales conocimientos, información semejante sobre modelos existentes y, mucho menos, de las mismas preferencias personales.

Una vez seleccionado un modelo en la forma estocástica arriba señalada, surge una nueva fuente de estocasticidad, dada por el hecho de que no existe, para fines prácticos, un modelo absolutamente determinista *per se*; esto es, siempre habrá en todos algún grado de parametrismo. Por ejemplo, para pensar en los casos más deterministas posibles de los procesos que intervienen en la relación lluvia-escurrimiento, un modelo que transite la lluvia efectiva mediante las ecuaciones de Saint-Venant (1871) requerirá la estimación de coeficientes de

2. Efectos de la complejidad de los modelos hidrológicos (de Overtone y Meadows, 1976)



rugosidad; así mismo, al calcular la infiltración con la ecuación de Richards (1931) para flujo en medios porosos no saturados, será necesario contar con las funciones que ligan el contenido de humedad θ con la conductividad K y con el potencial capilar ψ del suelo. Estos factores –coeficientes de rugosidad y funciones $K(\theta)$ y $\psi(\theta)$ – difícilmente se conocen con absoluta precisión en toda la extensión de una cuenca real dada; en el mejor de los casos, tales parámetros se conocen como promedios en regiones finitas de la cuenca.

Los modelos puramente estocásticos son en cierto sentido más fáciles de construir: basta que el modelador no use su experiencia y juicio ingenieril ni sus conocimientos acerca de la física del fenómeno en cuestión, sino sólo sus preferencias personales, su información sobre los modelos existentes y sus conocimientos matemáticos y computacionales. Aunque, como señala Kite (1989), existen casos en que tal cosa en realidad ocurre, cabe esperar que, cuando el modelador es un ingeniero, aplique al menos una pequeña dosis de experiencia, juicio y conocimientos de la física del fenómeno, con lo cual la estocasticidad pura se reduce en cierta medida. Por ejemplo, es raro encontrar análisis de gastos máximos anuales o de otros valores extremos que usen distribuciones normales –como no sea con fines didácticos–, aunque sí es frecuente encontrar análisis de datos evidentemente multipoblacionales con funciones de distribución unipoblacionales. Esto ocurre, entre otras razones, debido a que el primer caso requiere de mayores conocimientos que el segundo.

En consecuencia, en la práctica no existe ninguno de los extremos señalados en la ilustración 1 y, en general, ni siquiera es deseable que exista. Todos los modelos usados en hidrología son, por tanto, paramétricos. Ahora bien, cualquier modelo ubicado entre dichos extremos tiene, desde luego, ventajas y limitaciones. Los ubicados más hacia el lado estocástico requieren comparativamente poco conocimiento explícito de los mecanismos que generan un determinado evento, y es por ello que, cuando no se conoce bien un fenómeno desde el punto de vista físico o cuando su análisis a través de las leyes de la mecánica resulta poco práctico, se utiliza este enfoque. Por otra parte, el uso de estos modelos es relativamente simple, pues además de manejar una sola variable (la variable aleatoria, casi siempre el gasto máximo diario, con una función de distribución de probabilidad dada), se han publicado metodologías muy bien establecidas, tanto para estimar los parámetros de las distribuciones como para interpretar los resultados de manera precisa y

objetiva, aun cuando quizá la reciente proliferación de estas metodologías en ciertos círculos mexicanos tienda a oscurecer el panorama. En efecto, los esfuerzos en esta dirección se han dedicado en buena medida a analizar desde diversos puntos de vista funciones de distribución de probabilidad y métodos para la evaluación de sus parámetros, mientras que aquí sería quizá más productivo dar mayor generalidad a este tipo de análisis, por ejemplo tomando en cuenta, además del gasto máximo, el tiempo de pico y el volumen de escurrimiento.

La precisión y objetividad propias de las metodologías mencionadas dependen fundamentalmente de la longitud de los registros; casi siempre, en nuestro país los gastos máximos medidos son tan escasos que los valores de los parámetros de la función de distribución de probabilidad seleccionada resultan poco confiables, con el agravante de que, con frecuencia, dichos gastos máximos registrados pertenecen a más de una población, como sucede en zonas sujetas a tormentas ciclónicas o a escurrimientos debidos a deshielos. Otra desventaja de este tipo de modelos en su forma usual es que proporcionan información relativa únicamente al pico de la avenida de diseño, mientras que muchas veces la forma del hidrograma y, sobre todo, el volumen de dicha avenida es tanto o más importante que el gasto máximo.

Los modelos ubicados más hacia el lado determinista, que analizan la relación lluvia-escurrimiento, pueden también clasificarse en dos tipos: los de parámetros concentrados y los de parámetros distribuidos. Los primeros ven el fenómeno como una gran "caja negra", a la que se introduce un estímulo, representado por la lluvia, previamente tratada de cierta manera, para que la respuesta aparezca manifestada como alguna característica del escurrimiento. Es el caso, por ejemplo, de la fórmula racional (Kuichling, 1889):

$$Q = C i A \quad (3)$$

donde Q es el gasto máximo posible suponiendo una intensidad i de la lluvia, constante y uniformemente distribuida en la cuenca durante, al menos, el tiempo de concentración, A es el área de la cuenca y C es un "coeficiente de escurrimiento" que se determina de manera empírica.

Al igual que los métodos estadísticos en su forma usual, la fórmula racional proporciona información concerniente sólo a la magnitud de los gastos máximos. De esta fórmula se han derivado múltiples modelos (Chow, 1962; Jens y McPherson, 1964), algunos de los cuales incluso se han tomado como estándares en algunos organismos mexicanos, como

en el caso de la fórmula de Gregory y Arnold (1932; véase también Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1972). Aunque estas estandarizaciones son hasta deseables en algunos casos, en otros han ido más allá de los límites razonables.

De las diversas hipótesis involucradas en el planteamiento de la fórmula racional (3) y sus derivaciones, tal vez la más importante sea la referente al área de la cuenca: ésta debe ser lo suficientemente pequeña como para que el tiempo de concentración sea menor a la duración de una tormenta razonablemente larga; de otra manera, la probabilidad de que se alcance el gasto de equilibrio implicado en la fórmula (3) sería muy pequeña.

Por otra parte, a pesar de los intentos que se han hecho desde hace un siglo para establecer normas con las cuales seleccionar el coeficiente C de la ecuación (3) o bien para regionalizar sus valores, los resultados han sido en general poco satisfactorios; en muchos casos, los valores del coeficiente de escurrimiento que se usan son envoltentes excesivamente conservadores.

Sin embargo, aunque la fórmula racional cuenta con un número considerable de detractores, las hipótesis involucradas en su planteamiento se cumplen razonablemente bien en cuencas pequeñas como muchas de las que aportan a cruces de caminos, a sistemas de drenaje de aeropuertos o zonas urbanas, etc. En esos casos, en que además casi nunca se tiene más información que la de precipitación a través de curvas intensidad-duración-periodo de retorno y un plano topográfico a escala 1:50 000, es probable que sea el mejor modelo.

Un modelo algo más refinado que el anterior es el del hidrograma unitario. En este modelo se supone, bajo el principio de superposición, que cada elemento infinitesimal de un hidrograma de lluvia efectiva $h(t - \tau)$ de duración t_0 produce un hidrograma de escurrimiento directo, formado por el producto de $h(t - \tau)$ por una función de transferencia, llamada hidrograma unitario instantáneo $q(t)$, de modo que la ordenada en el tiempo t del hidrograma de escurrimiento directo que sale de la cuenca está dada por la integral de convolución

$$Q(t) = \int_0^{t'} h(t - \tau) q(\tau) d\tau \quad (4)$$

donde $t' = t$ si $t \leq t_0$ y $t' = t_0$ si $t \geq t_0$. En este caso, la función de transferencia $q(t)$ es el parámetro de calibración que se determina empíricamente. Se ha desarrollado una amplia metodología a partir de esta idea; una de las formas más usuales de explotarla, llamada "hidrograma unitario tradicional"

(vgr., Aparicio, 1989), es suponer que $q(t)$ tiene la misma forma que $Q(t)$ pero está descrita para cuando $h(t - \tau) = 1$. De este modo, teniendo la función $q(t)$, bastaría multiplicar sus ordenadas por la altura de precipitación efectiva para obtener el hidrograma de escurrimiento directo (Sherman, 1932).

Por esto, los modelos de este tipo se denominan lineales. De hecho, la linealidad es una de las hipótesis básicas del hidrograma unitario (vgr., Aparicio, 1989). Las otras dos hipótesis fundamentales son que el tiempo base es el mismo para todas las tormentas con la misma duración en exceso y que es válida la superposición de causas y efectos.

Si se emplea en su forma original, este modelo requiere al menos de un evento en que se haya medido la lluvia y el hidrograma resultante, para obtener un hidrograma unitario que después se transforma para diferentes alturas de precipitación y diferentes duraciones de lluvia efectiva. Después han surgido diversos métodos para obtener hidrogramas unitarios sintéticos mediante los cuales las características de los hidrogramas unitarios se determinan usando las características de las cuencas, tales como la longitud y pendiente del cauce principal, el tipo y uso del suelo, etc. (ver, por ejemplo, Chow, 1962 y Mockus, 1957).

Si bien los hidrogramas unitarios sintéticos han logrado sortear el escollo de las cuencas no aforadas, el método no parece poder aplicarse en cuencas tan grandes como para que la variación espacial de la precipitación modifique sustancialmente la forma del hidrograma resultante.

Sin embargo, comparado con el modelo dado por la fórmula racional (ecuación 3), el hidrograma unitario proporciona mucho más información: no sólo da el gasto de pico, sino también la forma del hidrograma resultante de una tormenta específica, lo cual podría ser de fundamental importancia en diversos tipos de proyectos. Por supuesto, el modelo del hidrograma unitario requiere de más datos; además del área de la cuenca, la precipitación y una estimación más o menos burda del coeficiente de escurrimiento o un parámetro similar, es necesario conocer la distribución temporal de la lluvia y, al menos, un hidrograma medido junto con su correspondiente tormenta, o bien la serie de características de la cuenca mencionada arriba, en el caso de las cuencas no instrumentadas. Por otra parte, su aplicación se limita a tormentas distribuidas más o menos uniformemente en el espacio (en el caso del hidrograma unitario tradicional, la lluvia también debe estar uniformemente distribuida en el tiempo) o bien a tormentas cuya distribución sea

similar a la de aquella que sirvió para calibrar la función de transferencia $q(t)$.

Además, para aplicar el modelo del hidrograma unitario en cualquiera de sus formas, es necesario saber antes qué parte de la precipitación total está constituida por la "efectiva" $h(t - \tau)$; a pesar de que el proceso de pérdidas —es decir, el paso de precipitación total a efectiva— reviste una importancia innegable en relación con estas cuestiones, los métodos que se usan hoy en día para calcularlo recurren a hipótesis simplificadoras demasiado gruesas; es el caso, por ejemplo, del índice de infiltración media ϕ , que supone que las pérdidas son constantes durante una tormenta, a pesar de que su variación con el tiempo es evidente.

Este es un problema especialmente delicado. De los procesos físicos que intervienen en la conversión de lluvia total a efectiva, el más importante es, sin duda, la infiltración. Este parámetro es, entre los diversos componentes de la relación lluvia-escurrimiento, el único que no se mide de manera sistemática; esto, aunado a la mencionada sobresimplificación que se suele usar para su cálculo, hace que con frecuencia la infiltración se convierta en el punto débil de cualquier modelo de la relación lluvia-escurrimiento.

Los modelos como los arriba citados, que tratan a la cuenca como si sus características, así como la precipitación, fueran homogéneas en toda su área, se denominan "modelos de parámetros concentrados". Ellos tienen, además, una particularidad en común con los modelos estocásticos: pierden validez a medida que el sistema de escurrimiento varía debido a cambios hechos por el hombre, como urbanización, tala, reforestación, construcción de obras para el control y uso del agua, etc., o bien a fenómenos naturales, como erosión o cambios de clima. Cada vez que estas variaciones producen modificaciones significativas en el patrón de escurrimientos de la cuenca, es necesario volver a calibrar, ya sea el coeficiente de escurrimiento C (ecuación 3) o la función de transferencia $q(t)$ (ecuación 4) en el caso de los modelos de parámetros concentrados, o bien los parámetros de la función de distribución de probabilidad en los modelos estocásticos. Este inconveniente adquiere especial importancia si se piensa que por lo general la nueva calibración requiere de un cierto número de registros que a veces toma algunos años conseguir.

Los modelos de parámetros distribuidos representan un paso adicional en grado de complejidad respecto a los antes citados. Estos modelos (por ejemplo, Crawford y Linsley, 1966; Aparicio, 1982; Palacios y Cuevas, 1990) consideran a la cuenca como

formada por un conjunto de elementos con características uniformes en cada uno de ellos y simulan, mediante representaciones matemáticas de diversos grados de complejidad, los procesos físicos que ocurren en cada elemento, tales como la interceptación, la infiltración, el escurrimiento sobre la superficie del terreno, el flujo en corrientes, etc. Como en los dos tipos de modelos ya citados, la actividad en el desarrollo de los modelos de parámetros distribuidos ha sido considerable, particularmente en los últimos años (Beven, 1989). Los modelos de parámetros distribuidos, en especial los que se basan en parámetros físicos, son útiles en los problemas hidrológicos relacionados con el impacto de las actividades humanas en el cambio del uso del suelo y la calidad del agua y, en general, con cambios naturales o artificiales en la cuenca, en los casos en que la precipitación o alguna otra variable tenga una distribución espacial poco uniforme o, equivalentemente, cuando la distribución espacial de dicha variable sea determinante en el hidrograma de salida. En cuencas no aforadas (Abbott *et al.*, 1986a, 1986b), este tipo de modelos tiene también gran utilidad.

Todas estas ventajas de los modelos de parámetros distribuidos sobre los de parámetros concentrados tienen, obviamente, un costo: la información necesaria para su calibración y funcionamiento es mucho más abundante y su obtención es mucho más costosa. Aunque en general estos modelos no requieren largas series de datos hidrometeorológicos para su calibración, sí necesitan la evaluación de un número más o menos grande de parámetros que describan las características físicas de la cuenca en forma distribuida en el espacio (*ibid.*). Los parámetros que tienen más influencia en la simulación del escurrimiento son, en general, los relativos a las características hidráulicas de los suelos y los coeficientes de rugosidad, tanto sobre la superficie del terreno como en las corrientes. Estos parámetros se evalúan en cada una de las celdas (Abbott *et al.*, 1986a, 1986b), facetas (Palacios y Cuevas, 1990), elementos finitos (Aparicio, 1982), etc., en que se haya dividido la cuenca. La evaluación se hace de diversas maneras, dependiendo de los recursos de que se disponga: midiendo directamente los parámetros en algunas de las celdas en el campo, interpolándolos de mediciones en la misma cuenca, extrapolándolos de otras cuencas, etc. Aun cuando se tengan mediciones puntuales de los parámetros, subsiste el problema del escalamiento (Abbott *et al.*, 1986a; Beven, 1989): los parámetros se requieren a la escala de la malla y no en un punto. Esto quita, evidentemente, distributividad a cualquier modelo.

Otros problemas en el uso de este tipo de

modelos son (Abbott *et al.*, 1986b) los referentes a las interacciones entre elementos (por ejemplo, la lluvia efectiva generada en un elemento se puede infiltrar en el siguiente) o entre diferentes procesos hidrológicos, cada uno de ellos con sus propias escalas características espacial y temporal. Algunos de estos problemas se pueden solucionar, al menos en parte, mediante la experiencia y el juicio ingenieril del modelador, con datos estimados a partir de técnicas de percepción remota, analizando la importancia relativa de los diversos parámetros mediante análisis de sensibilidad, etcétera.

Dogmatismo y equilibrio

Como se aprecia, el espectro de modelos para resolver problemas de ingeniería hidrológica es amplio y muy variado. Esto ocurre básicamente porque el espectro de los problemas mismos es también amplio y variado. Entrelazado con ambos aspectos —problemas y modelos para resolverlos— está el relacionado con los datos, la eterna preocupación de los ingenieros hidrólogos. La salud del trabajo del modelador descansa en buena medida en un equilibrio entre los tres aspectos citados: es cierto que los problemas simples no requieren de modelos complicados, pero los problemas complejos se resolverían defectuosamente con modelos simples. Por ejemplo, casi nadie pensaría en determinar el gasto de diseño de una alcantarilla pequeña de cruce de un camino con un modelo de parámetros distribuidos y pocos intentarían aplicar la fórmula racional para determinar el gasto de diseño de una presa grande. Sin embargo, entre estos extremos se suelen encontrar actitudes más o menos dogmáticas, en algunos casos comprensibles por naturales, pero nunca admisibles. Estas actitudes, provocadas por muy diversas causas, conducen con frecuencia a frases como las siguientes:

"La fórmula racional no sirve porque es muy vieja."

"La fórmula racional no sirve porque es muy simple."

"No se acepta ningún resultado si no está calculado con el método m1."

"El método m2 no sirve porque usa computadoras."

"El método m3 no sirve porque no usa computadoras."

"El modelo m4 no sirve porque es de parámetros distribuidos."

"El modelo m5 no sirve porque no es de parámetros distribuidos."

"Yo siempre uso el método m6 porque me ha dado buenos resultados."

"No se deben desarrollar modelos del tipo t1 porque no se cuenta con los datos necesarios para aplicarlos."

Estas frases, y muchas otras que se suelen escuchar, ignoran uno o más de los tres aspectos que se mencionaron arriba y que deberían equilibrarse; en algunos casos, introducen nuevos aspectos, irrelevantes para el equilibrio mencionado, tales como la simplicidad de un método o el que se use o se deje de usar la computadora.

Estas actitudes, que a veces incluso se convierten en modas o, peor aún, en políticas, conducen invariablemente a limitaciones en el desarrollo de la ingeniería mexicana. Tan negativo es el connubio del modelador con un modelo dado como su divorcio tajante.

La aplicación de modelos simples a problemas complejos casi siempre conduce a obras costosas en exceso o peligrosas, pero la existencia de problemas complejos no implica la desaparición de los simples: el país no ha dejado de tener problemas tales como el diseño de alcantarillas de cruce de caminos, y ojalá nunca deje de tenerlos; por tanto, los modelos del tipo de la fórmula racional no han perdido vigencia y probablemente siempre la tendrán. Pero, por otra parte, el país tiene cada vez más problemas propios de una sociedad industrial. Por ejemplo, cada vez modificamos más las condiciones naturales de escurrimiento de partes importantes de algunas cuencas. El análisis cuantitativo de los posibles efectos de dichas modificaciones no se puede realizar con modelos de parámetros concentrados y, por tanto, es necesario el desarrollo de modelos más complejos. Esto es una consecuencia natural del crecimiento económico, como puede deducirse al observar el surgimiento de ciertos modelos distribuidos en comunidades desarrolladas, como por ejemplo el Sistema Hidrológico Europeo, SHE (Abbott *et al.*, 1986a, 1986b; Bathurst, 1986a, 1986b). La falta de datos para aplicar este tipo de modelos no debería ser un argumento para desecharlos sin mayor análisis. Si existen problemas que ameriten la aplicación o desarrollo de cualquier tipo de modelo y éste requiere de datos que no se miden sistemáticamente, la solución no es aplicar un modelo para el que sí se tienen datos, sino medir las variables que sean necesarias. Si esto parece una tarea titánica, habremos medido mal la magnitud del problema o bien nuestras fuerzas para resolverlo; hay problemas que no deben resolverse desde los escritorios, sino que más bien requieren

de campañas de medición tan costosas como exijan los propios problemas y de reconocimientos *in situ* tan minuciosos como sean necesarios. Un modelo hidrológico, por complejo que sea, no genera información sobre la cuenca: sólo la procesa. Por tanto, si se desea mucha información sobre la respuesta de una cuenca, igual de abundante deber ser la que alimente al modelo. Por ello, no es de sorprender que un modelo complejo arroje resultados similares a los de uno más simple cuando ambos se alimentan con los mismos datos. Es inútil aplicar los modelos complejos con datos escasos.

Lo anterior no pretende ser una apología de los modelos de parámetros distribuidos o los que usan leyes físicas para modelar el proceso lluvia-escurrimiento. Se sabe que estos modelos, en sus condiciones actuales, presentan una serie de inconveniencias y graves dificultades teóricas y prácticas para su uso (*vgr.*, Beven, 1989). Sin embargo, constituyen hasta ahora la única herramienta disponible para atacar problemas hidrológicos complejos. Para desecharlos, sería necesario proponer modelos alternativos; sin ello, se corta toda salida posible al desarrollo de la modelación hidrológica. Es probable que el camino adecuado para resolver estas dificultades consista en reevaluar el enfoque eminentemente técnico que se le da a la hidrología y encaminar más esfuerzos a tratarla como una ciencia de la tierra (*vgr.*, Klemesš, 1986, 1990). De ahí seguramente surgirán nuevos enfoques y modos diferentes de analizar cuantitativamente los problemas hidrológicos. No obstante, este proceso podría durar varios años; mientras tanto, los ingenieros tenemos la responsabilidad de resolver problemas para los que se requieren cifras de diseño y no hay más remedio que determinarlas con la mejor herramienta disponible. En este sentido, de nuevo, el dogmatismo es el enemigo a vencer.

Conclusiones

La enorme diversidad de problemas hidrológicos ha inducido, en el desarrollo de la hidrología, a la existencia de una también enorme diversidad de modelos hidrológicos. Dentro de esta diversidad, intervienen tres elementos que no pueden disociarse: problemas, modelos y datos. Los modelos que se han desarrollado tienen, todos ellos, ventajas y limitaciones, pero entre los modeladores se suele encontrar una serie de actitudes dogmáticas que inhiben el desarrollo de la hidrología. Estas actitudes deben evitarse para dar paso al razonamiento y a la selección de los modelos y mediciones apropiadas a los problemas actuales.

Debe revisarse, si es necesario, la filosofía completa de la hidrología y reencaminarse su tarea, pero no es posible hacer de lado los problemas existentes, por lo que no puede detenerse el desarrollo de la herramienta necesaria para resolverlos.

Referencias

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A. O'Connell, P.E., y Rasmussen, J., "An Introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen, 'SHE', 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system", *J. Hidrol.*, vol. 87, pp. 1–59, 1986a.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A. O'Connell, P.E., y Rasmussen, J., 2: "Structure of a physically based, distributed modelling system", *J. Hydrol.*, vol. 87, pp. 61–77, 1986b.
- Aparicio, M.F.J., *Un modelo distribuido de la relación lluvia-escurrimiento*, tesis de maestría, DEPI, UNAM, 1982.
- Aparicio, M.F.J., *Fundamentos de hidrología de superficie*, Limusa, México, 1989.
- Bathurst, J.C., "Physically-based distributed modelling of an upland catchment using the Système Hydrologique Européen", *J. Hydrol.*, vol. 87, pp. 79–102, 1986a.
- Bathurst, J.C., "Sensitivity analysis of the Système Hydrologique Européen for an upland catchment", *J. Hydrol.*, vol. 87, pp. 103–123, 1986b.
- Beven, K., "Changing ideas in hydrology – the case of physically-based models", *J. Hydrol.*, vol. 105, pp. 157–172, 1989.
- Crawford, N.H., Linsley, R.K., *Digital simulation in hydrology: Stanford watershed model IV*, Tech. Rep. 39, Dept. Civ. Eng., Stanford Univ., Stanford, 1966.
- Chow, V.T., *Hydrologic determination of waterway areas for the design of drainage structures in small drainage basins*, Univ. Ill. Eng. Expt. Sta. Bull. 462, 1962.
- Chow, V.T., (ed.), *Handbook of applied hydrology*, McGraw-Hill, 1964.
- Gregory, R.L., Arnold, C.E., "Runoff-rational runoff formulas", *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* vol. 96, pp. 1038–1099, 1932.
- Jens, S.W., McPherson, M.B., *Hydrology of urban areas*, sec. 20 de Chow, V.T. (ed.) 1964.
- Kite, G., "Some statistical observations", *Water Res. Bull.*, AWRA, vol. 25, núm. 3, jun., pp. 483–490, 1989.
- Klemeš, V., "Dilettantism in hydrology: Transition or destiny?", *Water Res. Res.*, vol. 22, núm. 9, pp. 1775–1885, 1986.
- Klemeš, V., "A hydrological perspective", *J. Hydrol.*, vol. 105, pp. 3–28, 1988.
- Klemeš, V., *The science of hydrology: where have we been? Where should we be going? What do hydrologists need to know?* IX reunión del Consejo intergubernamental del Programa Hidrológico Internacional, París, 19–24 de marzo (traducido en este número), 1990.
- Kobus, H. (ed.), *Hydraulic modelling*. Cap. 1. Fundamentals, German Assoc. for Water Res. and Land Improv., Bull. 7, Verlag, Hamburgo, 1980.
- Kuichling, E., "The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts", *Trans. ASCE*, vol. 20, pp. 1–56, 1889.
- Mockus, V., Use of storm and watershed characteristics in synthetic unit hydrograph analysis and application, *U.S. Soil Cons. Serv.*, 1957.
- Morel-Seytoux, H., Salas, J.D., Sanders, T.G., Smith, R.E. (eds.), Surface and subsurface hydrology, *Water Res. Publ.*, Fort Collins, 1979.
- Novak, P., Čábelka, J., *Models in hydraulic engineering. Physical principles and applications*, Pitman, Londres, 1981.
- Overton, D.E., Meadows, M.E., *Stormwater modelling*, Academic Press, 1976.
- Overton, D.E., "Catchment hydrology. General report", en Morel-Seytoux *et al.* (eds.), 1979.
- Palacios, V.O.L., Cuevas R.B., *SHIFT: Sistema hidrológico de facetas triangulares*, Colegio de Posgraduados, Centro de Hidrociencias, Montecillo, México, 1990.
- Raudkivi, A.J., *Hydrology*, Pergamon Press, Oxford, 1979.
- Richards, L.A., "Capillary conduction of liquids through porous mediums", *Physics*, vol. 1, pp. 318–333, 1931.
- Saint-Venant, De B., "Theorie du mouvement non-permanent des eaux avec application aux crues des rivières et a l'introduction des mares dans leur lit", *Acad. Sci. (Paris) Comptes rendus*, vol. 73, pp. 148–154, 237–240, 1871.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos, *Proyecto de zonas de riego*, México, 1972.
- Sherman, L.K., "Stream-flow from rainfall by the unit-graph method", *Eng. News-Rec.*, vol. 108, abril, pp. 501–505, 1932.

Agradecimiento

El Ing. Ramón Domínguez Mora revisó el manuscrito e hizo útiles observaciones al mismo.