Algunas consideraciones sobre el desarrollo de la hidrología en el país

José Luis Sánchez Bribiesca*
Ramón Domínguez Mora*

Instituto de Ingeniería, UNAM

Un primer análisis

Hace cincuenta años, los principales cálculos hidrológicos consistían en determinar el "pico" de una avenida, con fórmulas empíricas o con envolventes, en "mayorar" la avenida "histórica" y en "transitarla", para juzgar así la capacidad de la obra de desfogue. Poco a poco el desarrollo de las computadoras introdujo cambios importantes en la tarea del hidrólogo y, actualmente, existen refinados modelos de simulación, elaborados procesos para manejar datos escasos o dispersos, así como un buen número de trabajos sobre distintas facetas de la hidrología. Si sólo se observan estos hechos, parece que se ha logrado un progreso notorio.

Sin embargo, en opinión de mucha gente involucrada en la operación y mantenimiento de las obras hidráulicas, este proceso no ha contribuído mucho a su mejoramiento. Probablemente esta escasa aportación se ha debido, en gran parte, a un divorcio entre el enfoque "práctico", de quienes manejan las obras y el "académico", de quienes las estudian. Más aún, esta separación no parece limitarse sólo a nuestro país (si bien, a decir verdad, tal vez sí esté más acentuada en él).

En efecto ya, desde 1982 V. Klemeš (1982) señaló estos problemas y los expuso con más énfasis en 1990 (véase). En esta segunda intervención señala, acertadamente que:

- "... muchas personas que podrían ser hidrólogos talentosos han sido atraídos por los aspectos más seductores de la matemática, creyendo que están haciendo hidrología.
- "Hay un elemento más que, en el pasado, ha tenido un profundo efecto en el estudio actual de la hidrología (éste es) el desarrollo de la tecnología de la computación. En mi opinión, la hidrología pertenece a aquellas áreas en donde (ésta) ha tenido un balance negativo.
- "Hemos sido empujados a una letanía de computación automática, análisis de sensibilidad y elaboración de modelos. Esto se ha convertido en una nueva religión".

Por otra parte, E. J. Plate (1986) concuerda con varios de los puntos de vista de Klemeš, pues afirma:

- "Históricamente hablando, ha habido una tendencia de la investigación (en hidrología) a concentrarse fuertemente en el mejoramiento de los modelos (matemáticos)." También este autor hace una síntesis correcta del pensamiento de Klemeš, cuando dice:
- "El progreso, en su opinión (de Klemeš) vendrá de una mejor comprensión de los fundamentos físicos de la hidrología... *a causal theory of the hydrologic cycle*".

Además, considera meritorio el punto de vista de Klemeš porque señala que:

- "Tanto los esfuerzos de los ingenieros hidráulicos como el deseo de Klemeš... de involucrar más física en sus modelos es loable en el sentido del avance de las ciencias naturales".

Pero se muestra escéptico respecto a considerar sólo este aspecto, pues en seguida añade:

- "Pero en muchos casos es dudoso que ellos (los deseos de Klemeš) contribuirán mucho al diseño de proyectos de aprovechamiento hidráulicos".

Para comprender el escepticismo de Plate, es conveniente, primero, regresar a Klemeš (1990), quien señala, que en su actividad como hidrólogo:

- "Algunas veces, lo que se miraba como un elemento de nuevo conocimiento hidrológico, resultaba ser solamente una suposición de la clase de las que se habían tenido que hacer cuando, en ausencia de datos firmes, *se tenía que hacer una decisión ingenieril*".

Así mismo, al quejarse de los libros para enseñar hidrología dice que:

- "Tampoco se encuentran en estos textos muchas discusiones sobre lo que aún no se conoce, o la debilidad de las teorías y procedimientos existentes...".

Y en estos dos últimos aspectos concuerda con el punto de vista de Plate (1989), quien señala acertadamente que:

- "Por lo tanto el ingeniero de diseño debe vivir con un gran residuo casual, aun si tuviera un modelo perfecto del ciclo hidrológico".

Finalmente, donde las opiniones parecen discrepar más es en la solución a los problemas planteados pues, mientras para Klemeš habrá que crear una hidrología próxima a la perfección, para Plate, en tanto que eso sucede, se puede recurrir al análisis de confiabilidad de los diseños hidráulicos, pues para él, hay dos fuentes de incertidumbre: una, que depende de la confiabilidad de los datos disponibles y, la otra, que será función de la confiabilidad de los modelos empleados, lo que le permite expresar que:

- "La mayor ventaja del enfoque de confiabilidad en el diseño hidráulico es que suministra medios para separar la influencia del mejoramiento de los datos base y de los modelos empleados".

Ahora bien, para tomar partido, es necesario, en primer término, saber en qué consiste el tipo de análisis que propone Plate. Esto se hará a continuación.

Discusión

A fin de hacer una discusión del análisis previo, parece adecuado recurrir a un ejemplo concreto.

Se plantea determinar el área a de la sección transversal de la alcantarilla de un camino, que va a drenar un área de terreno de magnitud A y que se conoce la carga H máxima con la que puede funcionar la estructura sin que el agua pase encima del camino dañádolo de manera total o parcial (véanse ilustraciones 1 y 2).

Independientemente de la discusiones previas a la selección de las fórmulas que permitan calcular el gasto escurrido Q_E y el gasto que pueda transportar la alcantarilla, Q_A, y negando cualquier efecto de almacenaje, supóngase que se hubiera llegado a aceptar que:

$$Q_E = k\,A\,h \qquad (1)$$

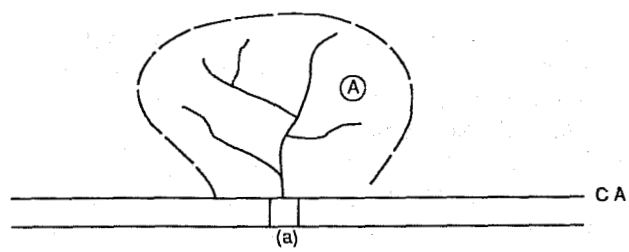
$$Q_A = \frac{c\,a\sqrt{2gH}}{B} \qquad (2)$$

En estas fórmulas k y c son coeficientes empíricos que hacen homogéneas a las expresiones y h es la altura de lluvia en la cuenca de captación de la alcantarilla. Ahora bien, si el diseño se hiciera mediante el procedimiento tradicional, se iniciaría un alegato para determinar los valores de dichos coeficientes, cuyo resultado final dependería de la capacidad persuasiva de los optimistas o de los pesimistas.

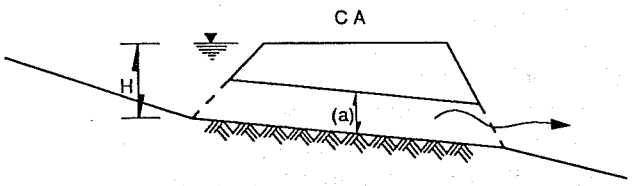
Nadie, o casi nadie, expresaría dudas sobre el valor de A, sin que importara mucho si se obtuvo de mediciones hechas en el sitio, o mediante un plano escala 1:5000 ó 1:500. En cambio, sobre el valor de h (la altura de lluvia), la discusión sería muy extensa. Algunos optarían por escoger un "periodo de retorno" de 25 años, en atención a que esa sería tal vez la vida útil del camino, en tanto que otros eligirían uno de 100 años, pues dada la importancia del camino, si en ese lapso cayera una tormenta extraordinaria que interrumpiera la comunicación, se tendrían fuertes pérdidas económicas. Y todo esto sin contar con que algunos considerarían la ley de probabilidades que expresa la variación de h, dado que se trataría de datos dispersos; y así sucesivamente.

Es más, en el caso de que se llegara a un consenso, o a la necesidad de acatar una orden superior, determinados los valores de k, A, h y c

1. Alcantarilla (a) y área por drenar (A)



2. Estructura con carga H máxima



(ecuaciones 1 y 2), se concluiría que el área de la sección transversal de la alcantarilla estaría dada por

$$a = \frac{k\,A\,h}{c\,B} \qquad (3)$$

Después de haber llegado a esta conclusión, muy pocos de los que tomaron parte en las discusiones volverían a recordar esta alcantarilla y, si alguien observara su comportamiento, los resultados de sus mediciones quedarían inmersos en un mar de información totalmente dispersa, de suerte que, si ocurriera una falla de la alcantarilla, no se podría conocer su causa.

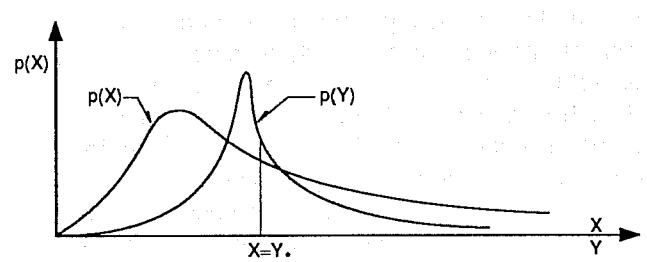
Por otra parte, si se establece que $Q_E = X$ y $Q_A = Y$, y se conocieran las funciones de densidad de probabilidad $p(X)$ y $p(Y)$ se podrían dibujar las gráficas que se muestran en la ilustración 3. Si se supone que el gasto que puede transportar la alcantarilla tuviera un cierto valor Y^*, se llamaría riesgo de falla a la magnitud definida por

$$P(X > Y^*) = \int_{X=Y^*}^{\infty} p(X)\,dX \qquad (4)$$

Pero, en atención a que dicho gasto es incierto, por cuanto no se tiene una confianza absoluta en la ecuación (2), ni en el coeficiente c, el riesgo de falla de una alcantarilla con cierto valor $B = a\sqrt{2gH}$ estaría dado por

$$P(X > Y) = \int_{Y=0}^{\infty} P(Y) \int_{X=Y}^{\infty} p(X)\,dX\,dY \qquad (5)$$

3. Curvas de densidad de p(X) y p(y)



Se comprende que, aun cuando $p(X)$ fuera siempre la misma, $p(Y)$ sería diferente para cada valor de B, lo cual, al emplear la ecuación (5), permitiría juzgar cuánto más "riesgosa" es una alcantarilla que otra. Sin embargo, el problema principal estriba en que no se conocen las funciones $p(X)$ ni $p(Y)$. Para determinarlas existen varios procedimientos; el más empleado, que se llama "del segundo momento", se esboza a continuación.

Supóngase que se establece una función $G(x)$ definida por

$$G(X) = McB - NKAh \qquad (6)$$

En esta ecuación, M y N son dos variables adimensionales que representan el grado de confianza que se tiene en las ecuaciones (1) y (2), respectivamente. Es obvio que la falla ocurrirá si $G(X) < 0$, de modo que la condición límite correspondería a $G(X) = 0$.

Ahora bien, las discusiones descritas previamente pueden sistematizarse para cada una de las variables que intervienen en la ecuación (6).

Así, por ejemplo, suponiendo una distribución normal para el parámetro K, tomando las opiniones diversas (véase ilustración 4), sería factible fijar las probabilidades $P(K > k_2)$ y $P(K < k_1)$, lo cual permitiría establecer que

$$K_1 = \overline{K} + \sigma_k\, Z\left[P(K < K_1)\right] \qquad (7a)$$

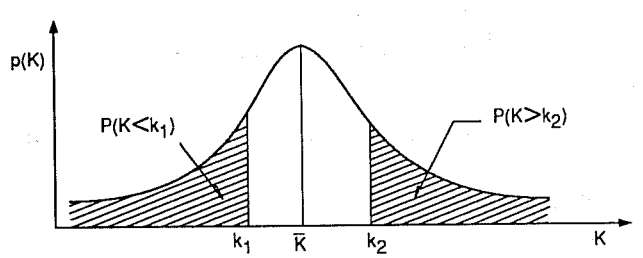
$$K_2 = \overline{K} + \sigma_k\, Z\left[P(K < K_2)\right] \qquad (7b)$$

donde $Z[P(K < K_1)]$ es el valor de una variable normal estándar asociado a la probabilidad $p(K < K_1)$.

De estas dos expresiones se podría definir el valor medio k y la desviación estándar σ_k.

En la misma forma, podrían definirse los valores medios y las desviaciones estándar de las variables restantes, incluyendo a M y N, cuyas medias deberían valer 1 e incluso de h, que aun cuando no tuviera una distribución normal, se puede asimilar a ella con procedimientos especiales y dentro de cierto rango (Sánchez *et al.*, 1989).

4. Posibilidad de que K sea menor o mayor a K_1 y K_2



Por otro lado, es posible definir las derivadas parciales de $G(x)$ respecto a cada una de las variables que intervienen en ella, es decir, se pueden obtener:

$$\frac{\partial G(x)}{\partial M} = cB \tag{8a}$$

$$\frac{\partial G(x)}{\partial C} = MB \tag{8b}$$

$$\frac{\partial G(x)}{\partial h} = -NKA \tag{8c}$$

Y de aquí se pueden obtener los "cosenos directores" dados por

$$\alpha_M = \frac{\partial G(x)}{\partial M} \cdot \sigma_M / \sqrt{\Sigma S^2} \tag{9a}$$

$$\alpha_C = \frac{\partial G(x)}{\partial c} \cdot \sigma_c / \sqrt{\Sigma S^2} \tag{9b}$$

$$\vdots$$

$$\alpha_h = \frac{\partial G(x)}{\partial h} \cdot \sigma_h / \sqrt{\Sigma S^2} \tag{9c}$$

En donde

$$\Sigma S^2 = \left(\frac{\partial G(x)}{\partial M} \cdot \sigma_M\right)^2 + \left(\frac{\partial G(x)}{\partial C} \cdot \sigma_C\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial G(x)}{\partial h} \cdot \sigma_h\right)^2 \tag{10}$$

Hechas todas estas determinaciones se procede como se indica en seguida:

1° Se establece que $M = \overline{M}$, $c = \overline{c}$, $\cdots$, $h = \overline{h}$
2° Con estos valores se calculan los valores de los "cosenos directrices" con ayuda de las ecuaciones (8), (9) y (10)
3° Se establece la ecuación correspondiente a la (6) haciendo

$$O = B(M + \alpha_M \beta\sigma_M)(c + \alpha_c \beta\sigma_c) - \left[(N + \alpha_N \beta\sigma_N)(K + \alpha_K \beta\sigma_K)(A + \alpha_A \beta\sigma_A)(h + \alpha_h \beta\sigma_h)\right] \tag{11}$$

Obsérvese que en esta ecuación la única incógnita es β.

4° Se resuelve la ecuación (11) y se encuentra un primer valor β_1
5° Se establece que $M = \overline{M} + \beta_1\sigma_M$, $c = \overline{c} + \beta_1\sigma_c, \cdots$, $h = \overline{h} + \beta_1\sigma_h$
6° Se repiten los pasos 2° y 3°
7° Se repite el 4° paso para obtener un nuevo valor β_2
8° Se reitera el procedimiento, a partir del 2° paso, para obtener valores sucesivos β_3, $\beta_4, \cdots$
9° Cuando entre dos iteraciones sucesivas se encuentra que $\beta_{i+1} \simeq \beta_1$, se considera determinado el valor de β que corresponde a la alcantarilla cuyas características están definidas por el parámetro B.

Este valor de β define al coeficiente $Z[P(X > X_F)]$ de una variable X con distribución normal que, representando al conjunto, ocasionaría la falla en caso de ser rebasado el valor límite X_F, de tal modo que la β permite conocer el riesgo de falla de la alcantarilla seleccionada. Tal cosa significa que, para cada alternativa que se escoja, con distinto valor de B (recordando que $B = a\sqrt{2gH}$) habrá un valor de β correspondiente, lo que permitirá comparar los riesgos que implican las diferentes soluciones.

La justificación y el alcance del método esbozado exceden los límites de este escrito. El lector interesado en estos temas puede acudir a Sánchez *et al.* (1989), donde encontrará, también, ejemplos numéricos que le ayuden a comprender mejor las ideas expuestas.

Por lo demás, cuando Plate habla de métodos de confiabilidad, se refiere a procedimientos como el que acaba de exponerse. Cabe señalar que obviamente entre mayor sea el conocimiento de las "leyes" que gobiernan un proceso hidrológico, menor será la incertidumbre de los resultados obtenidos; pero que, como puede verse, no se pretende introducir procedimientos de la hidrología estocástica que sustituyan a los métodos basados en el conocimiento de la física del proceso, sino, por el contrario, de complementar a éstos, cuando sea necesario "tomar las decisiones ingenieriles" que señala el mismo Klemeš. Más aún, si se medita en los enfoques propuestos por Plate, puede verse que ellos hacen posible no sólo la comparación de soluciones como base para seleccionar la más adecuada, sino que, por una parte, permiten conciliar y sistematizar las opiniones de quienes intervienen en el problema, tomando en cuenta su experiencia y, por otra, hacen posible detectar a los parámetros que, en una situación determinada, resultarían ser los que deben ser valuados con mayor cuidado.

Para terminar con esta discusión, conviene destacar que los procedimientos basados en el

concepto de riesgo se usan ya, con éxito y muy ampliamente, en varias ramas de la ingeniería, de suerte que no se trata de introducir en la hidrología procedimientos esotéricos y de dudosa validez (Ang y Tang, 1984).

Una posible conclusión

De acuerdo con el material expuesto, todo parece indicar que las dos tendencias para hacer que progrese la hidrología, representadas por las opiniones de Klemeš y Plate, concuerdan en muchos aspectos, por cuanto ambas señalan las desviaciones de algunos hidrólogos que han limitado el desarrollo de su disciplina, así como las grandes dificultades que confronta el ejercicio de la misma.

Por lo demás, el problema principal no consiste en aceptar uno de los dos puntos de vista sino, más bien, en buscar la manera de complementarlos para poder avanzar, aun cuando sea un poco, dentro del vasto y complejo campo de la hidrología.

Así, al pensar que en nuestro medio hay muy pocos hidrólogos y muchos problemas por resolver, resultaría deseable que en las tareas de los especialistas (tanto en investigación como en la enseñanza y el ejercicio profesional) se incluyeran ambos aspectos. Por un lado, la realización de más y mejores mediciones, la concentración sistemática de la información y el estudio más cuidadoso de las disciplinas que sirvan de base para construir una hidrología, si no científica, sí, en lo posible, menos empírica. Pero, por el otro, el conocimiento y utilización de métodos como los descritos en el segundo apartado, y aun otros que ayuden a mejorar la operación y el funcionamiento de las obras hidráulicas que, después de todo, debe ser la última meta. Y todo esto conservando el espíritu crítico que impida confundir el fin con los medios.

* Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM

Referencias

Ang, A.H.S. y Tang, W.H., *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, vols. 1 y 2, Wiley, Nueva York, 1984.

Klemeš, V., *Empirical and Causal Models in Hydrology*, National Research Press, Washington DC, EUA, 1982, pp. 95–104.

Klemeš, V., *The science of hydrology*, IX Reunión del Consejo Intergubernamental del Programa Hidrológico Internacional, París, 1990.

Plate, E.R., "Reability Analysis in Hydraulic Design", en *Stochastic and Risk Analysis in Hydraulic Engineering*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, EUA, 1989.

Sánchez B., J.L., *et al.*, "Aplicaciones de análisis estocástico en problemas hidráulicos", Informe interno, Instituto de Ingeniería, Proyecto 9112, México, D.F., 1989.