

Modelos Hidrológicos

Juan Cabrera, Civ. Eng.

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Civil

1. Introducción

La base del estudio de la Hidrología es la comprensión del ciclo hidrológico, de sus procesos e interrelaciones tanto superficiales y subsuperficiales, y esta comprensión implica “medir”. Si bien los métodos y técnicas de medición de caudales y precipitaciones han evolucionado en el tiempo, también es cierto que otras componentes del ciclo hidrológico no han corrido la misma suerte pues se presentan bajo el suelo. La infiltración, la percolación profunda, el flujo subsuperficial, el flujo subterráneo, entre otros, son procesos que se miden usualmente de manera indirecta y/o remota, lo que conlleva a una fuerte incertidumbre respecto al funcionamiento del ciclo hidrológico.

Bajo este marco, los modelos hidrológicos se presentan como una necesidad y una herramienta para conocer mejor el funcionamiento y el comportamiento de las diferentes componentes del ciclo hidrológico. Como consecuencia de ello, los modelos hidrológicos se usan:

- Como herramienta para la gestión y planeamiento.
- Para una mayor comprensión del rol de los componentes del ciclo hidrológico en una determinada cuenca.
- Para extrapolar potenciales condiciones futuras a partir de condiciones actuales.
- Como base para la modelación de otros procesos, como la calidad de agua, erosión, etc.

2. Modelación de cuencas

Entender el ciclo hidrológico implica entender la “respuesta” de la cuenca de manera continua en el tiempo y en el espacio, por este motivo la base de la modelación hidrológica es la modelación de cuencas.

Los modelos de cuenca son un reflejo de cómo entendemos el sistema cuenca y su respuesta. Su capacidad predictiva depende de cómo los construimos y cómo los aplicamos, y la calidad de las predicciones es generalmente consistente con la calidad de nuestra comprensión del sistema y del modelo que lo representa. Esto significa que no existe el modelo perfecto aplicable a todas las cuencas del planeta: cada cuenca tiene condiciones muy particulares de clima, geografía, geología, etc que incrementan la importancia de un proceso por sobre otros y condicionan la estructura del modelo.

3. El sistema hidrológico “cuenca”

El ciclo hidrológico puede tratarse como un sistema cuyos componentes son precipitación, evaporación, escorrentía y otras fases del ciclo hidrológico, los cuales pueden agruparse en subsistemas del ciclo total. Éste “sistema hidrológico” posee una estructura (o volumen) en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y produce salidas. La figura 1 esquematiza un sistema hidrológico.



Figura 1 : Esquema de un sistema hidrológico, mostrando entradas y salidas.
Fuente: Chow, 1994.

Este concepto puede aplicarse claramente a una cuenca hidrográfica, pues a ella ingresa agua, por medio de la precipitación y otras formas; y una cantidad de ella sale de la cuenca, por medio de su cauce principal o por el uso que adquiera el agua.

Una vez entendida la cuenca como sistema, debemos comprender las interacciones que existen entre sus elementos; por ejemplo, la deforestación irracional de la cuenca alta puede conllevar a inundaciones en la época de lluvias en la parte baja. De esta manera necesitamos reconocer los procesos hidrológicos actuantes y los mecanismos físicos presentes.

Los procesos hidrológicos presentes en el ciclo hidrológico de una cuenca se caracterizan:

- Por ser no lineales, pues tienen variaciones complejas en el espacio y en el tiempo.
- Por ser no estacionarios, pues están afectados a periodicidad y tendencias..
- Por ser variables en el espacio, debido a las características variables del suelo, del uso y del clima a lo largo de la cuenca.
- Por ser variables en el tiempo, en todas las escalas, ya sea horaria, diaria, mensual, etc.

Debido a esta variabilidad, las mediciones de los procesos hidrológicos solo pueden considerarse como un punto de información, y la comprensión de las leyes que gobiernan el ciclo hidrológico cobra mayor importancia. Es en este punto que empezamos a delinear lo que será nuestro modelo hidrológico: definiendo cuales son los procesos principales y las variables que intervienen en la generación de caudales.

Asimismo, la topografía y geomorfología, y los mecanismos físicos que representan, son heterogéneas y anisotrópicas en una cuenca pues varían en todas las direcciones en que son analizadas. El desconocimiento (o poco conocimiento) de las características de una cuenca solamente conducirá a modelos ineficientes, de baja capacidad predictiva. Por lo tanto, un modelo de cuenca debe representar un punto de equilibrio entre complejidad y exactitud de la representación, basado en nuestra comprensión del sistema y al manejo matemático.

4. El proceso de modelación

El primer paso de toda modelación hidrológica es establecer un “modelo perceptual”, es decir, decidir cuáles son los principales procesos y variables que intervienen en la generación de caudales. Este proceso implica observar y analizar las características del suelo, subsuelo y clima, como elementos principales y discriminar cuales son los procesos más importantes que intervienen en la formación de escorrentía: evaporación, evapotranspiración, infiltración, humedad de suelo, flujo subterráneo, etc.

Una vez reconocidos, se debe relacionar estos procesos y variables principales entre sí por medio de ecuaciones, obteniéndose un “modelo conceptual”. En esta etapa se incluyen coeficientes y parámetros a los cuales posteriormente se les deberá asignar valores adecuados mediante un proceso de calibración.

Si las ecuaciones constitutivas son demasiado complejas, como es el caso de ecuaciones diferenciales, se hace necesario simplificarlas de manera que puedan ser reconocidas y procesadas por un sistema de cómputo; este modelo simplificado es una aproximación al modelo conceptual y suele llamársele “modelo procedimental”. Como es evidente, la simplificación del modelo conceptual implica la inclusión de nuevos coeficientes y parámetros que entrarán al proceso de calibración.

El proceso de calibración es la etapa en la cual se asignan valores a todos los parámetros del modelo de manera tal que “la salida del modelo se ajuste lo mejor posible a los datos históricos registrados”. Este “mejor ajuste” implica utilizar herramientas estadísticas para buscar minimizar la diferencia entre valores simulados y registrados, mediante procesos de optimización. Algunos indicadores utilizados son el error medio cuadrático, el criterio de Schultz, el coeficiente de Nash-Sutcliffe y el balance de masas, entre otros.

Finalmente, el modelo debe pasar a una etapa de validación, en la cual se evalúa su capacidad de predicción. La descripción de este proceso se analizará más adelante.

La Figura 2 resume el proceso de modelación descrito.

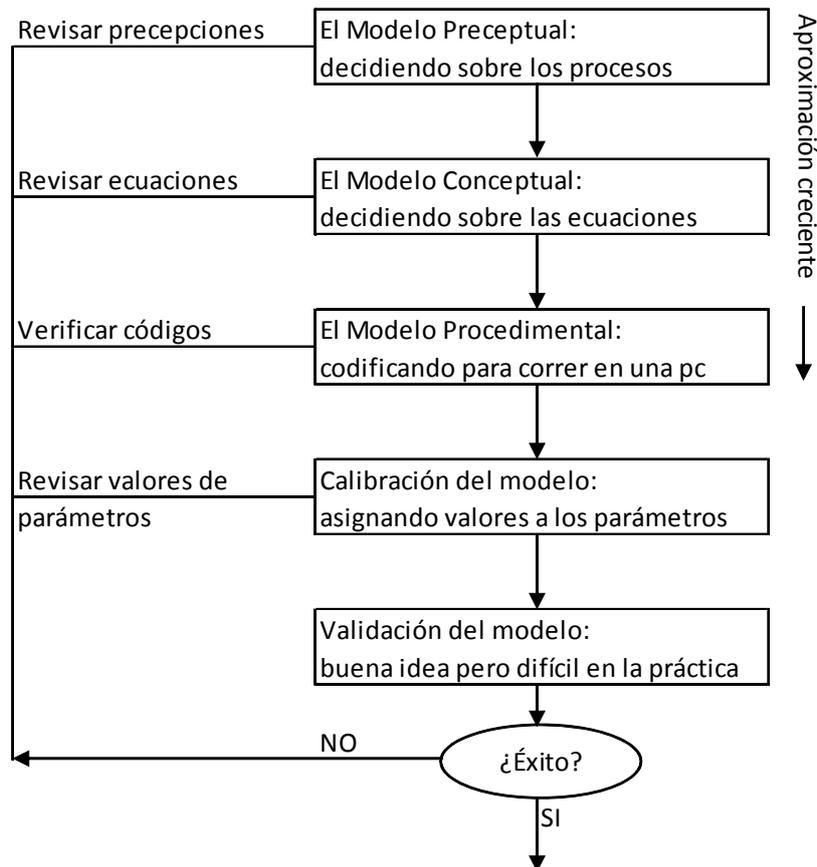


Figura 2 : Esquema de un sistema hidrológico, mostrando entradas y salidas.
Fuente: Beven, 2012.

5. Complejidad de modelos vs. disponibilidad de datos

La disponibilidad de datos es determinante en la selección del modelo a utilizar y en la capacidad predictiva de dicho modelo. Van de la mano y debe entenderse claramente la relación que existe entre ellas. Si la data es pobre (de baja resolución), incrementar la complejidad del modelo no ayudará a

mejorar su capacidad predictiva, ésta será también baja. Si la data es de alta resolución pero el modelo es simple (poco complejo), entonces la capacidad predictiva también será baja pues la simplicidad del modelo introduce incertidumbre. La Figura 3 muestra la relación entre estas tres variables.

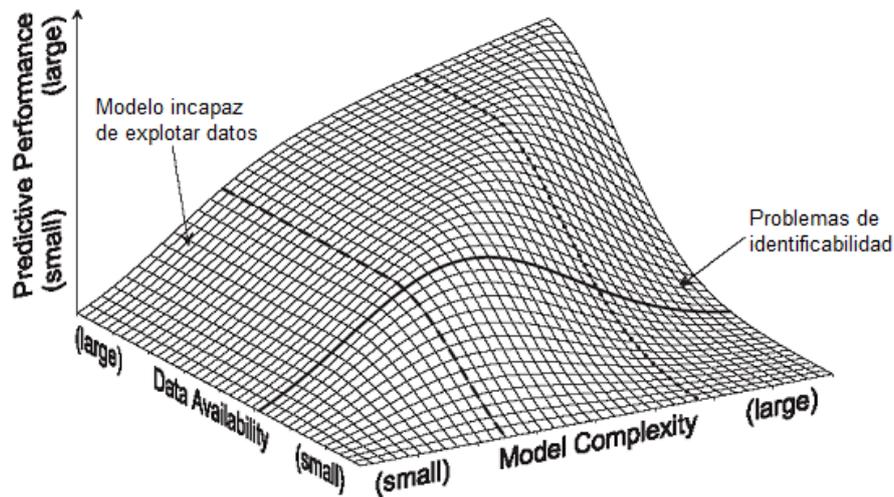


Figura 3 : Relación entre complejidad del modelo, disponibilidad de datos y capacidad predictiva.

Fuente: Grayson, R. y Blöschl, G., 2000.

De esta manera podemos concluir que:

- Para datos de baja resolución es recomendable utilizar modelos poco complejos.
- Para datos de alta resolución es recomendable utilizar modelos de mayor complejidad.

6. Clasificación de modelos hidrológicos

La literatura está repleta de modelos y de diferentes formas de clasificarlos, sin embargo, podemos enfocarnos en el análisis de tres características básicas útiles para la modelización hidrológica de cuencas:

- De acuerdo a la conceptualización de los procesos básicos; pueden ser empíricos, conceptuales o basados en procesos;
- De acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos; pueden ser determinísticos o estocásticos;
- De acuerdo a su representación espacial; pueden ser agrupados o distribuidos.

6.1 De acuerdo a la conceptualización de los procesos básicos

Si el modelo funciona como una relación calibrada entre entradas y salidas, recibe el nombre de modelo "de caja negra", empírico o de regresión. Estos modelos se basan en relaciones entrada-salida, sin ningún intento de describir el comportamiento causado por procesos individuales. Dentro de éstos podemos mencionar al método Kostiakov y Green Ampt (para estimación de infiltración), método racional y método de la curva número (generación de caudales), y, especialmente, los modelos estocásticos de series de tiempo.

En el extremo opuesto se encuentran los modelos “de caja blanca” (también llamados “de base física” o “teóricos”), en los cuales se conocen todos los procesos involucrados en la transformación. Estos modelos se apoyan en ecuaciones físicas que representan todos los procesos involucrados en el fenómeno a simular y haciendo **innecesario el proceso de calibración**; sin embargo, la falta de suficiente información relativa a los procesos que se desarrollan en el suelo, en el subsuelo y en la vegetación (entre otros), genera incertidumbre y la calibración se hace necesaria. Algunos ejemplos son TOPMODEL, TOPKAPI, SHE, etc.

Asimismo, suele hablarse de modelos “conceptuales” o “de caja gris” cuando se trabaja con modelos en los cuales se conocen algunos de los procesos internos del modelo. En general, los modelos conceptuales consideran leyes físicas en forma simplificada. Entre estos podemos mencionar al modelo abc y el modelo HBV.

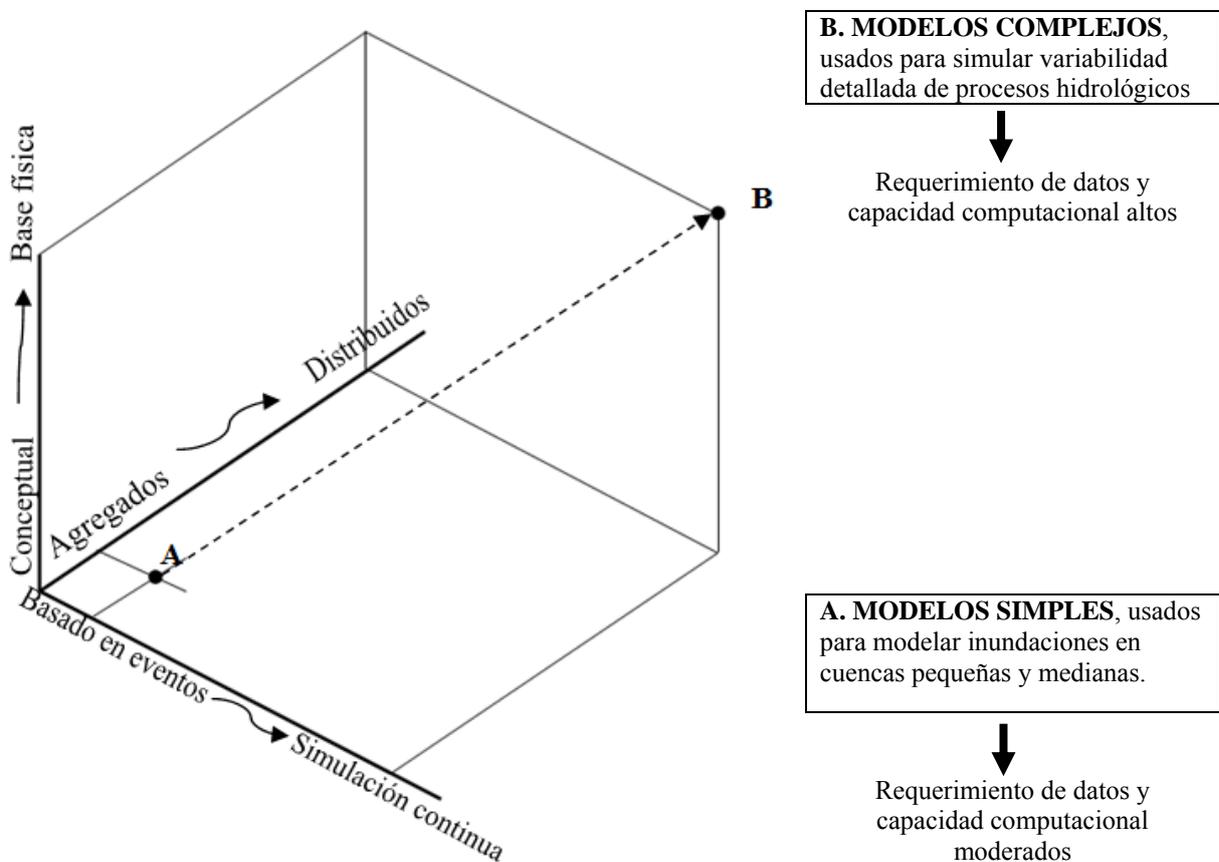


Figura 4: Relación entre las características espacio-temporales de modelos hidrológicos y su conceptualización de procesos básicos.

Fuente: Molnar, 2011.

6.2 De acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos

Un modelo formal puede escribirse como una expresión simbólica en términos lógicos de una situación idealizada, compartiendo las propiedades estructurales del sistema original. Éstos expresan el comportamiento del sistema por un conjunto de ecuaciones, como

$$y_t = f^*(x_t, x_{t-1}, x_{t-2}, \dots; y_{t-1}, y_{t-2}, \dots; a_1, a_2, \dots) + \varepsilon_t$$

donde x_t es la variable de entrada, $f^*(\cdot)$ es una función de forma específica y a_i , $i = 1, 2, \dots$, son parámetros medidos o estimados, y ε_t es una expresión de la falta de ajuste entre la salida observada y_t y la salida ajustada $f^*(\cdot)$.

Si alguna de las variables x_t , y_t , ε_t es considerada como variable aleatoria (con una distribución de probabilidad), entonces el modelo es llamado “estocástico”: este término enfatiza la dependencia temporal de las variables hidrológicas relacionadas por el modelo. Si todas las variables se consideran libres de la variación aleatoria tal que ninguna tiene una distribución probabilística, entonces el modelo es considerado como determinístico.

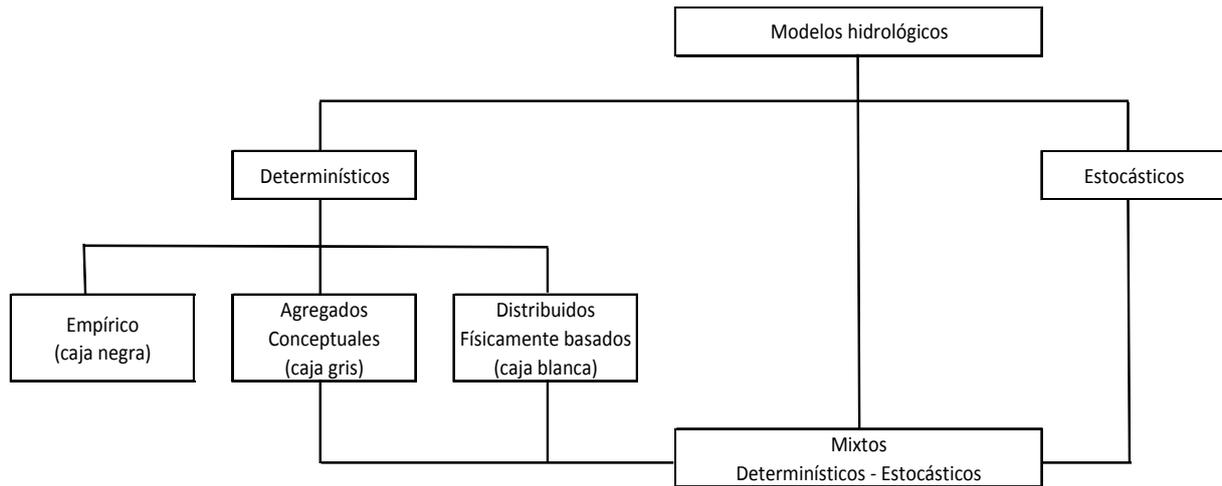


Figura 5 : Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos.

Fuente: Refsgaard y Abbott, 1996.

6.3 De acuerdo a su representación espacial

Una de las principales limitaciones en la modelación de cuencas es el desconocimiento de las propiedades del suelo y de los procesos involucrados en los flujos sub superficial y subterráneo. Esta limitación es superada si se asume que la cuenca es homogénea, tanto en sus procesos superficiales, sub superficiales y subterráneos, afirmación que es válida para cuencas muy pequeñas. Siendo la cuenca homogénea, se puede representar como un único elemento de características constantes, dando lugar a los llamados “modelos agregados” o “agrupados”.

A medida que el tamaño de la cuenca se incrementa, es más probable que los tipos de suelo y sus características varíen a lo largo y ancho de la cuenca y el uso de éste tipo de modelo va perdiendo representatividad. Es así que a mayores áreas, se puede discriminar zonas de similar comportamiento hidrológico (HRU) y analizar cada una de ellas de forma independiente para luego combinar y/o superponer sus efectos. Éstos son los llamados modelos “semi distribuidos”.

A pesar que los modelos semi distribuidos representan mejor las posibles variaciones de las características del suelo, efectos de pendiente, entre otros, aún así representa una simplificación. Con el fin de alcanzar la mayor representatividad, la cuenca se divide en elementos mucho más pequeños, de geometría usualmente uniforme, llamados “grillas”. Estos modelos son llamados “modelos distribuidos” y realizan un balance hídrico en cada grilla, transmitiendo su efecto a las grillas adyacentes.

La Figura 6 muestra un esquema de la representación espacial de cuenca bajo estos tres tipos de modelo.



Figura 6 : Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a su representación espacial. **a)** Modelo agregado. **b)** Modelo Semidistribuido. **c)** Modelo Distribuido

Fuente: Chong-yu Xu, 2002.

7. Elementos de un modelo

Los modelos determinísticos suelen presentar tres tipos de elementos:

- **Variables de entrada;** series espacio-temporales de precipitación, temperatura, etc.
- **Parámetros;** parámetros asumidos constantes en el modelo, por ejemplo, la conductividad hidráulica, la velocidad de infiltración, etc.
- **Variables de estado;** series espacio-temporales de humedad de suelo, etc, las cuales permiten establecer condiciones iniciales.

Asimismo, suele hablarse de variables de salidas, que usualmente son las descargas.

8. Calibración y Validación

Modelar una cuenca implica establecer una relación entre variables de entrada; esta relación implica introducir parámetros (con significado físico o no) que permitan simular lo mejor posible la variable de salida. Ya que estos parámetros son inicialmente desconocidos, se requiere de un proceso de “calibración” para identificar sus valores. De esta manera podemos definir “calibración” como el proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulados se ajusta de manera óptima a la serie de datos observados.

Dependiendo del uso que se le quiera dar al modelo, éste puede requerir pasar por un proceso de “validación”. La validación tiene por objetivo determinar la bondad del modelo para realizar predicciones en un lugar específico para períodos fuera del período de calibración.

Los procesos de calibración y validación se explicarán con mayor detalle en los siguientes capítulos.

9. Referencias

Beven, K. (2012). “Rainfall-Runoff Modelling. The Primer”. John Wiley & Sons Ltd. West Sussex, England.

Chong-yu Xu. (2002). “Hydrologic models”. Uppsala University. Suecia.

Chow, V. (1994). "Hidrología aplicada". Mc Graw Hill. Mexico..

Grayson, R. y Blöschl, G. (2000). "Spatial Patterns in Catchment Hydrology". Cambridge University Press. United States of America.

Molnar, P. (2011). Notes of Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.

Refsgaard, J. y Abbott, M. (1996). "Distributed hydrological modelling". Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.

Zappa, M. (2011). "Basics of Hydrological Modelling". Hydrological Processes and Modelling, SS 2011. ETH Zürich. Switzerland.