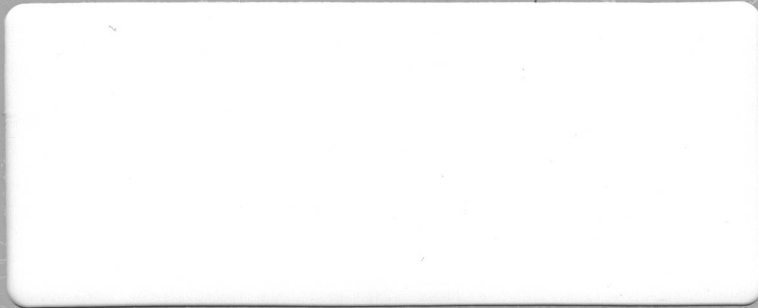


REPUBLICA DE VENEZUELA
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS



DIRECCION GENERAL DE RECURSOS HIDRAULICOS
DIRECCION DE INFORMACION BASICA



DIVISION DE HIDROLOGIA

MOP
78
ej. 1

MOP
18
ej. 1

MODELADO DE CUENCAS:
UN ARTE O UNA CIENCIA?

MODELADO DE CUENCAS: UN ARTE O UNA CIENCIA?

POR

L. DOUGLAS JAMES

Traducción realizada por el Ing.
Ramón José Guilarte, de una
parte de la Publicación original
"Watershed Modeling: An Art
or A Science? ".

INTRODUCCION

Diseñar es conformar un sistema físico el cual cumplirá un propósito determinado o llenará una necesidad dada. Un sistema no está bien diseñado a menos que lleve a cabo satisfactoriamente el servicio que se le asignó. El planificador que trabaja con cuencas, los sistemas hidrológicos de la naturaleza, sin embargo, no tiene manera de probar sus diseños en prototipo antes de la implementación. Consecuentemente, él debe imaginar alguna otra manera de predecir como responderá su diseño a una gran variedad de estímulos. El ingeniero hidrólogo ha tenido que modelar.

Los hidrólogos han hecho amplio uso de las cuencas experimentales.

Algunas han sido áreas bien instrumentadas, pero relativamente pequeñas, expuestas al clima de la región. Otras han sido construidas dentro de laboratorios donde se puede controlar la precipitación y otros factores del tiempo. Sin descontar en ningún sentido la contribución de esta clase de modelado de cuencas y de hecho haciendo uso de muchos descubrimientos obtenidos de tales estudios, el alcance de este artículo define el modelado de cuenca en otra forma: la simulación de la secuencia de los escurrimientos mediante el uso de una computadora digital. La meta del modelado de cuenca definido de ese modo es simular una secuencia continua de escurrimientos durante un período de tiempo preseleccionado a partir de datos climatológicos para una cuenca especificada por su situación geográfica o sus características físicas. El medio utilizado es la combinación de una serie de ecuaciones que representan matemáticamente los procesos hidrológicos que ocurren realmente dentro de la cuenca en un programa para computadoras, el cual producirá una serie de números que representan caudales a partir de otra serie de números que representan precipitación. Mientras más se parezcan los escurrimientos simulados al registro medido, más valioso es el modelo.

En este punto, se hacen manifiestos tanto el arte como la ciencia del modelado de cuenca. La ciencia, en la deducción teórica y la verificación empírica de ecuaciones que describen procesos hidrológicos tan específicos como la infiltración o el movimiento de la onda de una creciente. El arte, en la revisión del gran volumen de ecuaciones disponibles y los datos que las respaldan

y la selección y combinación de expresiones apropiadas en una sola unidad que dé los mejores resultados.

Antes de seguir es necesario limitar una vez más el alcance de este artículo. Muchos modelos hidrológicos valiosos buscan solamente simular los gastos durante los eventos de máximas crecientes, usualmente especificados por la frecuencia. Otros modelos buscan simular los gastos durante algún incremento de tiempo grande, tal como mensual, para estudios de rendimiento de embalses. La atención de este artículo se dirige hacia un modelo hidrológico general capaz de simular secuencias de gastos durante un lapso de tiempo largo y para intervalos de tiempo cortos. Por ejemplo, una salida podría ser los gastos simulados hora por hora para un período de 5 años. Como sub-productos tal modelo hidrológico general puede simular también el almacenamiento de humedad en el suelo, las cantidades parecidas.

MODELADO HIDROLOGICO GENERAL

Como un medio de presentar en orden conceptual al modelo hidrológico general tal como se definió anteriormente, uno podría observar el esquema de la contabilidad de humedad mostrado en la figura 1. Los rectángulos representan las clasificaciones del almacenamiento de humedad. Las flechas representan procesos por intermedio de los cuales la humedad se mueve desde un tipo de almacenaje hasta otro. La línea vertical desde la precipitación hasta el flujo subsuperficial representa la manera en que el agua pasaría hacia abajo a través del material grueso debido a la fuerza de gravedad. Cuando la precipitación acumulada es impedida de moverse hacia abajo a lo largo de esta ruta por alguna limitación de la rata, tal como la permeabilidad del suelo, ésta comienza a ser retenida en los rectángulos superiores; en forma creciente, a medida que se alcanzan las limitaciones de capacidad de almacenamiento, el agua debe moverse lateralmente hacia la corriente de agua y fuera de la cuenca. Simultáneamente, la energía de radiación y las necesidades de humedad de la vegetación, extraen agua de todos los niveles de almacenaje en la cuenca y la devuelven a la atmósfera.

Si uno fuese a tratar de transformar el diagrama de flujo de la figura 1 en un modelo cuantitativo de la cuenca, tendría que hacer dos cosas:

1. Investigar la literatura y establecer contacto con los investigadores actuales para determinar las ecuaciones deducidas teórica o empíricamente, que representan mejor el proceso de movimiento de humedad tipificado por cada flecha.
2. Integrar estas ecuaciones en un programa de prueba, correr el programa hasta que trabaje, y revisar las ecuaciones hasta que estas modelen fielmente los gastos registrados en la cuenca.

El primer paso implica la ciencia y el segundo implica el arte del modelado de la cuenca.

Uno tiene que considerar estos pasos mucho tiempo para apreciar la cantidad de trabajo requerido en este proceso. No es factible desarrollar un modelo a la medida cada vez que se desea un estudio detallado para una cuenca. No es ni siquiera factible para cada persona que pueda beneficiarse con tal modelo, desarrollar uno propio para uso general.

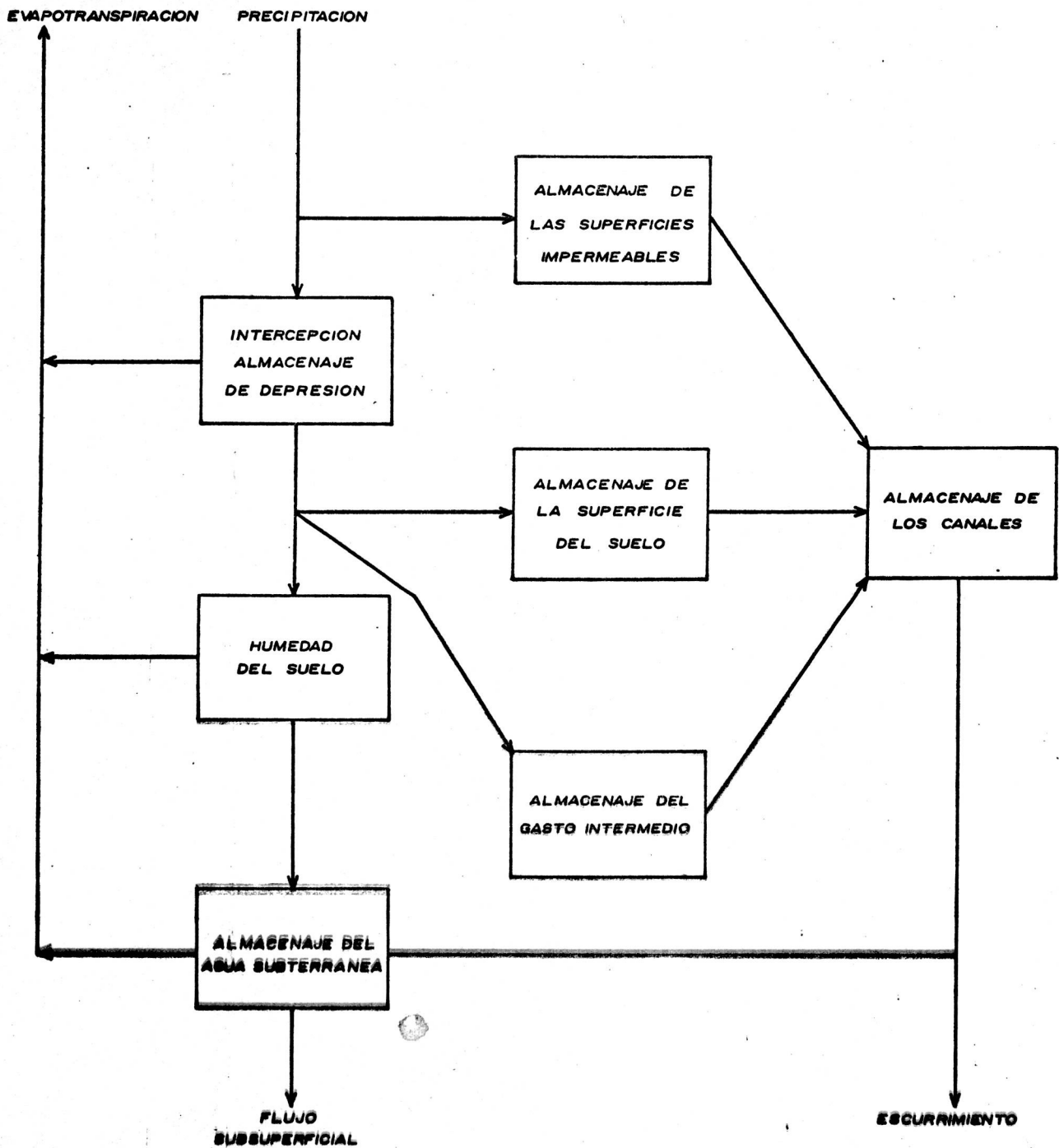
Para que el modelado de cuenca se haga una herramienta viable, alguien tiene que usar su arte para completar el paso 2, de tal manera que su modelo pueda ser aplicado en una gran variedad de situaciones.

EL MODELO DE CUENCA DE STANFORD

Crawford y Linsley (1962) proveyeron el esfuerzo pionero para hacer práctico el modelado de cuenca para el uso general a través de su desarrollo del Modelo de Cuenca de Stanford. Ellos representaron cada proceso por una ecuación o una serie de ecuaciones que contienen parámetros los cuales varían sus valores de una cuenca a otra de acuerdo a unos números leídos en los datos de entrada. El concepto consistió en expresar cada ecuación en una forma general la cual se aplicaría a todas las cuencas. De acuerdo al grado en que se alcance este objetivo, para lo único que es necesario aplicar el modelo es para encontrar una combinación aceptable de valores de los parámetros basados en los criterios relacionados con la comparación de los gastos o los almacenajes de humedad simulados con los medidos, hasta que sean similares. Claro, con el pro

FIGURA 1

CONTABILIDAD DE LA HUMEDAD EN UN MODELO HIDROLOGICO GENERAL



grama en la mano, el usuario es libre de cambiar las ecuaciones con el objeto de reflejar la información científica nueva, introducir un ordenamiento diferente de las ecuaciones para representar mejor la hidrología de la cuenca, o reemplazar ecuaciones individuales por sistemas de cómputo que representen más fielmente los procesos hidrológicos. Al evaluar un cambio prospectivo, uno debe añadir a los criterios de mejor ajuste las consideraciones del costo o el ahorro en términos del tiempo de máquina requerido.

Esta flexibilidad ha incrementado la oportunidad e inclusive ha provisto un reto a que uno pruebe su arte en la construcción de un modelo mejor. El programa se ha convertido casi en una entidad viviente en el sentido de que los usuarios lo ajustan continuamente para satisfacer nuevas necesidades, obrar de acuerdo a la capacidad de la computadora disponible, incorporar nuevos hallazgos de la investigación, incorporar enfoques analíticos más refinados o más rápidamente ejecutables, o manejar nuevas situaciones hidrológicas. Crawford ha estado trabajando con el modelo casi continuamente desde 1960. Él desarrolló el Modelo IV (1966) y, más recientemente, un sistema llamado Programa de Simulación Hidrológica (Hydrologic Simulation Programming) (Hydrocomp International, 1970) incorporando una técnica de tránsito mucho más sofisticada capaz de simular gastos simultáneos en un número grande de puntos dentro de la cuenca.

Otras personas han adaptado varias versiones del Modelo de Cuenca de Stanford para sus propias investigaciones o necesidades de aplicación. Muchos han modificado el programa mediante traducciones de lenguaje u otros cambios requeridos por las facilidades de computación disponibles localmente. Otros han tratado de incrementar la capacidad del programa o extender la salida impresa para proveer información adicional o incorporar nuevos descubrimientos de la investigación. En adición a las publicaciones de Stanford (Anderson y Crawford, 1964) y al material disponible a través de Hydrocomp International, se han escrito reportes que describen sus aplicaciones en Kentucky (Dempsey, 1968), Ohio State (Balk, 1968, y Briggs, 1969), New Hampshire (Drooker, 1968), Clemson (Ligon, Law y Higgins, 1969), y Texas (Claborn y Moore, 1970).

El Modelo simula un hidrograma continuo a partir de:

1. Datos climatológicos registrados, principalmente precipitación y evaporación, pero también, opcionalmente, temperatura donde se tome en cuenta la nieve.
2. Características medibles de la cuenca (p.e., el área y la fracción de cuenca con superficie impermeable).
3. Parámetros los cuales se sabe que varían en magnitud entre las cuencas pero no en la formulación del modelo, relacionada cuantitativamente a propiedades específicas medibles de la cuenca. La lista precisa de parámetros ha cambiado a medida que las ecuaciones usadas para modelar procesos específicos han sido variadas a través de los años por diferentes individuos.

El conjunto de parámetros usado en la versión del modelo en Fortran, hecha en Kentucky tal como la describe Ross (1970) se presenta en el diagrama esquemático de la figura 2. Los parámetros subrayados son aquellos que no estaban relacionados a características medibles de la cuenca. Cada parámetro aparece próximo al proceso o a la capacidad de almacenaje a la cual pertenece. Ross describe cada parámetro en detalle con ecuaciones y diagramas específicos, pero para ahorrar espacio y evitar repeticiones innecesarias en este artículo, refirámonos solo a dos. Los dos que han sido encontrados consistentemente como los más críticos son:

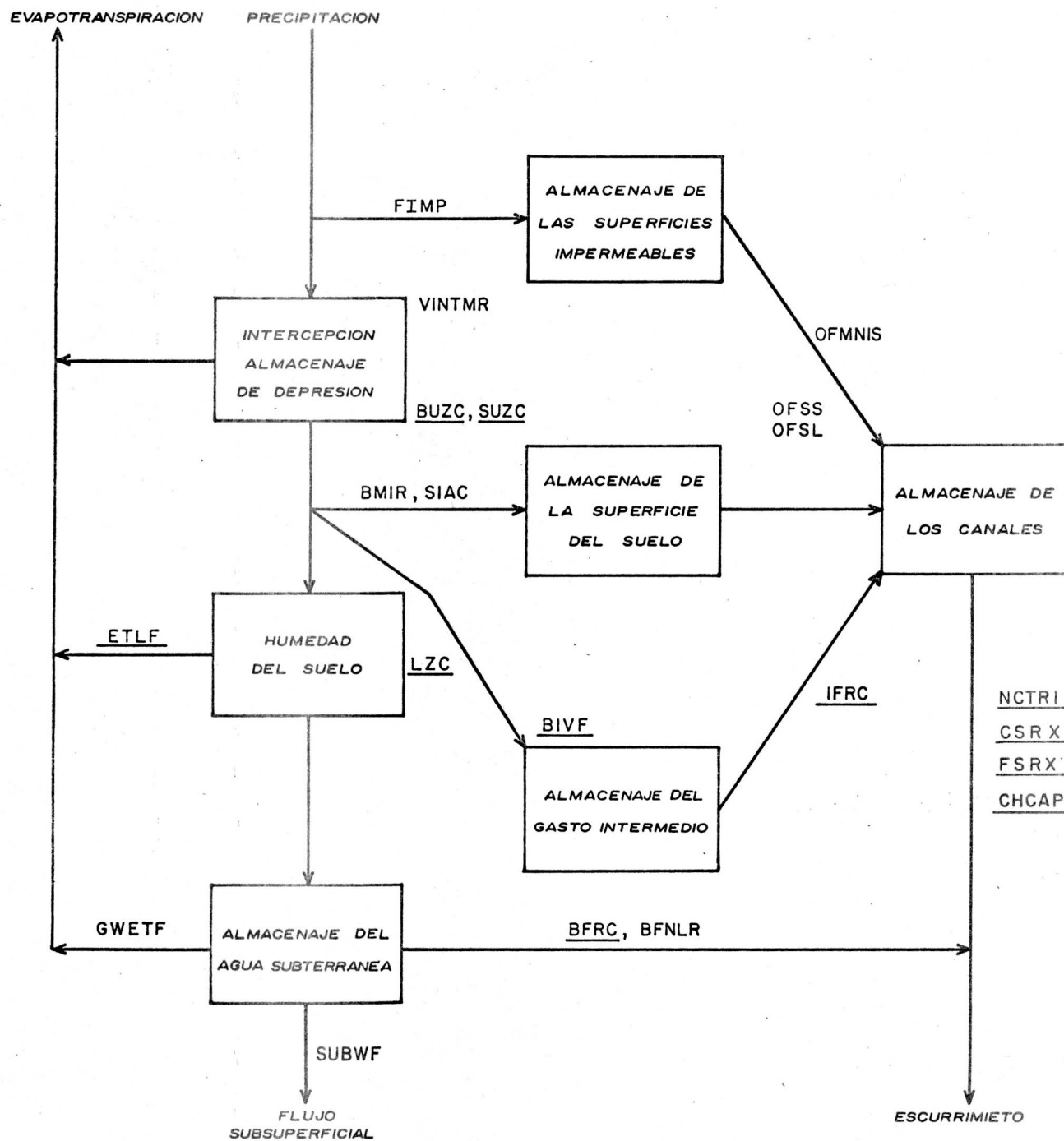
1. LZC - Un índice de la capacidad de almacenaje del suelo de la cuenca.
2. BMIR- Un índice de la rata a la cual ocurre la infiltración en la cuenca.

Cuando un usuario aplica el Modelo a una cuenca, tiene que recolectar los datos climatológicos necesarios a partir de los registros históricos, medir las características de la cuenca necesarias, asignar los valores apropiados para los parámetros subrayados en la figura 2, y ajustar estos valores de los parámetros por tanteo hasta que está satisfecho con el grado de parecido entre los registros simulado y registrado.

La calibración por tanteo sigue siendo un arte. Requiere ingenio, familiaridad con el modelo, y cierto entendimiento de la sensibilidad de los gastos simulados a ajustes específicos. Se obtiene una gran ayuda en el proceso me-

FIGURA 2

PARAMETROS DEL MODELO DE CUENCA DE KENTUCKY



diante un entendimiento cualitativo completo del ciclo hidrológico y la publicación guía provista por Crawford y Linsley (1966, pp 62-82) y actualizada por Hydrocomp International (1970 a), pero la desición final sobre el conjunto de valores a seleccionarse para los parámetros es fundamentalmente subjetiva. Uno no puede nunca hacer coincidir exactamente los gastos simulados a los registrados, mucho menos a los verdaderos gastos libres de todo error de medición. Varias combinaciones de parámetros pueden producir resultados casi igualmente buenos. Una combinación puede simular mejor los picos de crecientes mientras que otra combinación puede simular mejor los gastos bajos.

Asumiendo para cada cuenca que algún valor para cada parámetro del Modelo de Cuenca de Stanford es el que mejor representa la reacción de la cuenca a la lluvia en la forma de escurrimiento, se puede esperar lógicamente que los errores en la estimación de este valor provengan de varias causas, siendo una de las más importantes la estimación incorrecta del escurrimiento. Cualquier proceso de medición está asociado con un error de medición al azar el cual puede ser manejado a través de técnicas estadísticas bien conocidas para determinar el número de mediciones independientes que deben ser promediadas para conocer el valor verdadero, dentro de un nivel de confianza establecido. En términos del problema en cuestión, un registro más largo dará lugar a cálculos mejores.

Hay dos fuentes de errores particularmente problemáticas en el proceso de estimación por tanteo de los valores de los parámetros. Puede ser que los datos de lluvia no distribuyan la cantidad total anual a lo largo del año en el mismo patrón en el cual ésta ocurrió realmente sobre la cuenca (las diferencias en la cantidad anual puede ser resuelta por un multiplicador de la lluvia). Individuos diferentes quedan satisfechos con diferentes grados de parecido entre los gastos simulados y registrados (en parte debido a diferencias en los objetivos de los estudios).

Los errores al azar en la distribución anual de los eventos climatológicos especificados por los datos disponibles se manejan mejor usando más años de registro para calibrar el modelo. El número de años requerido para estimar un valor con un nivel de confianza establecido variará lógicamente con la magnitud y la regularidad de las diferencias entre el registro medido y la experiencia histórica

de la cuenca. Un índice parecido al número de años óptimos sería la distancia promedio de la cuenca a las estaciones utilizadas.

Un problema importante que surge cuando en la correlación de estimaciones de parámetros por el método de tanteo y "deténgase cuando esté satisfecho" utilizando características medibles de la cuenca, ha sido el asociado con variaciones en las estimaciones entre usuarios individuales. La dispersión usada por una subjetividad inevitable es aceptable cuando, el valor de un parámetro es estimado con el propósito de simular gastos para una cuenca dada, pero se hace intolerable para estudios que intenten correlacionar estimaciones de valores de parámetros con características medibles de la cuenca. La dispersión causada por la variación subjetiva al estimar la aceptabilidad introduce mucho ruido.

El problema no es diferente al asociado con la variación en las líneas que los individuos trazan a ojo a través de un campo de puntos esparcidos. La estimación a partir de una línea dibujada por un individuo puede ser aceptable cuando se necesita un número solamente; sin embargo, la situación es diferente del todo cuando el número deseado debe ser tomado como la diferencia entre dos estimaciones tomadas de curvas dibujadas al ojo independientemente a través de dos campos de puntos cada uno de los cuales está basado en un valor diferente de una tercera variable.

El error al estimar la diferencia puede ser reducido grandemente usando un enfoque normalizado por mínimos cuadrados para ajustar las dos líneas.

Un procedimiento normalizado análogo sería muy útil para estimar los parámetros de una cuenca. Reduciría a un corrido en la computadora el tiempo que el usuario debe emplear en estimar los valores de los parámetros. Sería todavía más efectivo en la reducción del tiempo de entrenamiento requerido por un nuevo usuario para desarrollar la confianza en el uso del modelo. El aspecto más interesante es la posibilidad de poder reducir la dispersión de tipo humano lo suficiente como para revelar patrones de correlación entre los valores de los parámetros y las características de la cuenca.

