

Métodos regionales de análisis de frecuencia

Se discute brevemente la importancia del análisis regional. Los métodos tradicionales de análisis regional de frecuencia son descritos aquí, en especial el nuevo método conocido como momentos ponderados de probabilidad (PWM). Otros temas esbozados son: la robustez del método regional PWM comparado con otras técnicas regionales tradicionales, los méritos relativos de estimación de cuantiles, cuando se realiza de forma puntual y de una manera combinada región/puntual y finalmente se analizan las características hidrológicas del Valle del Cauca con respecto a sus estadísticas.

CARLOS A. GONZALEZ M.
Ing. Agrícola M.Sc. en hidrología
Profesor Asistente
Universidad Nacional de Colombia

INTRODUCCION

Los métodos de análisis de frecuencia comúnmente usados en nuestro país, son aquellos en donde se tienen los registros de una estación particular a los cuales se les considera como una muestra aleatoria e idénticamente distribuida, para ajustarlos a una distribución X .

¿Sabemos los ingenieros por qué se usa una distribución u otra?

¿Qué método de estimación de parámetros de la distribución es el más apropiado?. ¿Se conoce algún estudio en donde se recomiende una distribución o un método determinado para establecer los caudales máximos o mínimos con fines de diseño en ingeniería, como sucede en E.E.UU., Islas Británicas, Australia, Nueva Zelanda, Nepal, etc.?

El mayor problema encontrado en nuestro país es el de los registros de corta duración en las estaciones que los poseen y la gran cantidad de cuencas hidrográficas sin ningún tipo de información, combinado todo esto con la falta de una metodología que le recomiende al ingeniero —según la escasa información en nuestro medio— el método más apropiado para nuestras condiciones.

En países donde se han llevado a cabo estudios serios al respecto, se ha optado por el uso de métodos regionales; el Water Resources Council (1977) de los EE.UU. recomendó usar un coeficiente de asimetría regional cuando el tamaño de la muestra es pequeña (< 100 años). NERC (1975) en las Islas Británicas recomienda usar una curva regional combinada con el promedio de la estación en estudio (\bar{Q}).

Con la ayuda del computador, usando el método de simulación de Montecarlo se ha llegado a determinar que los métodos combinados Región/puntual (similar al recomendado por NERC, 1975) son más robustos que aquellos donde sólo la distribución X se ajuste a una muestra disponible (Puntual), se destaca particu-

larmente el nuevo método regional de momentos ponderados de probabilidad (PWM).

Estos métodos regionales por tanto servirán igualmente para transferir información a la enorme cantidad de cuencas hidrográficas sin registros, que poseemos.

GENERALIDADES

Frecuentemente los hidrólogos necesitan estimar magnitudes de eventos en lugares que no tengan registros o que éstos sean de muy **corta duración** (entendiéndose la duración como el número de años de registros, ya sea de caudales máximos o mínimos).

Cuando sólo se tengan registros de corta duración (**10, 20 años**)* no es aconsejable escoger una distribución basada únicamente en la muestra disponible (NERC 1975). Vol. 1. p. 170), sino que debe usarse la información de que se disponga acerca de la forma de la distribución, por ejemplo, cualquier curva regional existente.

Generalmente, en tales casos, se intenta usar la información disponible, que en primera instancia es aquella perteneciente a estaciones hidrométricas de cuencas hidrográficas vecinas. La información disponible es tratada de diferentes formas con el objeto de calcular la magnitud del suceso de interés.

El uso de información perteneciente a una región particular para establecer estimación de magnitudes en un determinado lugar, es denominado **análisis regional**.

Dalrymple (1960), a fin de justificar el uso del método denominado **Flood Index**, describió un experimento de Benson (1960), en el cual se muestra que el error estándar del evento estimado disminuye cuando los períodos de corta duración de diferentes estaciones son agrupados a fin de obtener la verdadera curva de frecuencia. Kite (1977), señalaba que "el uso de más de un conjunto de datos tiende a reducir el error de muestreo y aun para estaciones con registros, producirá una estimación más confiable acerca de los eventos.

Wallis (1980), establecía que "un adecuado análisis de frecuencia de extremos demanda alguna forma de regionalización, sin embargo regionalizar variables climáticas y luego transformarlas para obtener estimación de caudales extremos es una aproximación, diseñada presumiblemente a maximizar la raíz cuadrada del error cuadrático medio del estimado final".

El esquema generalizado de análisis regional

podría resumirse en la siguiente forma:

1. Determinar una relación adimensional de frecuencia de caudales máximos o mínimos.
2. Estimar el caudal anual (máximo o mínimo) promedio (\bar{Q}) ya sea de una serie hidrológica obtenida en la estación hidrométrica de interés particular o de una ecuación que relacione las características de la cuenca con su promedio.
3. Estimar la magnitud del evento usando la relación ($Q / \bar{Q} = Q_r$), donde Q_r es el estimado de la magnitud del suceso para la región y para cualquier período de retorno, mientras que Q es el estimado de la magnitud del evento en el lugar necesitado y \bar{Q} es el promedio obtenido en el numeral 2.

METODOS DE ANALISIS REGIONAL

En esta sección se discuten algunas de las técnicas de análisis regional en uso, en particular la técnica denominada Momentos Ponderados de Probabilidad (PWM), la cual ha sido desarrollada en años recientes.

Método del Flood Index

Este método ha sido comúnmente usado en los EE.UU., Canadá y algunos otros países.

El método se debe a Dalrymple (1960), y los resultados obtenidos están basados en un período uniforme de registros.

El método consiste en la obtención de una curva adimensional de frecuencia que representa la

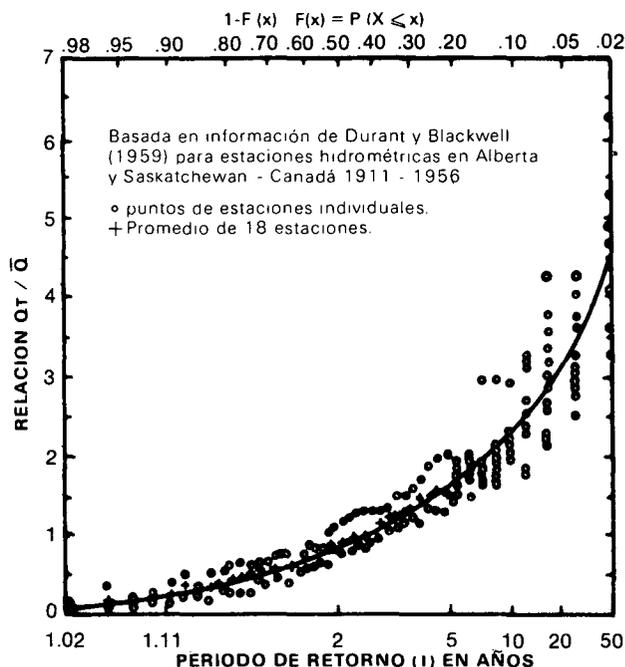


FIGURA 1. Curva regional de frecuencia determinada para Alberta y Saskatchewan (Canadá), por el método del Flood Index. Tomado de: HAAN C.T. (1977).

* Subrayado del autor.

relación del caudal máximo de cualquier frecuencia con un Flood Index (promedio de la serie de caudales máximos); ver Figura 1. Complementariamente, se estiman las relaciones entre las características fisiográficas de la cuenca y el promedio de la serie de caudales máximos (Flood Index).

Generalmente la ecuación que se utiliza es de la forma $\bar{Q} = A^a S^m I^n T^t$; donde las letras **A, S, I, T** representan las diferentes características fisiográficas de la cuenca y las minúsculas **a, m, n, t** son constantes determinadas por regresión lineal múltiple y \bar{Q} es el caudal máximo promedio.

Es importante señalar que la predicción de \bar{Q} por medio de estas ecuaciones deja mucho que desear (Hebson and Cunnane, 1986).

La magnitud del evento para cualquier período de retorno (Cuantiles) en la región se determina a partir de la curva regional, que combinado con la estimación del caudal promedio del lugar de interés y determinado como se mencionó, proporciona la magnitud del evento en el lugar.

El estudio requiere homogeneidad hidrológica en la región. Un test de homogeneidad atribuido a Langbein (1947) es descrito por Dalrymple (1960). Benson (1962) establecía algunas críticas acerca de este método, como:

1. El caudal máximo anual promedio para una región podría no ser típico (representativo) para muestras de corta duración.
2. El test de homogeneidad tiene deficiencias, ya que solamente es usado a un período de

retorno de 10 años. El test puede mostrar homogeneidad a bajos períodos de retorno, pero la curva misma muestra más amplias y sistemáticas diferencias a períodos de retorno altos.

Curvas regionales

NERC (1975) desarrolló su propio análisis regional, mejor conocido como curvas regionales de frecuencia. Esencialmente es una técnica similar a Flood Index, que se diferencia en la forma en que la curva regional es construida.

Después de un tratamiento preliminar de "Outliers" el método empieza dividiendo cada caudal por su correspondiente promedio (el promedio de la estación hidrométrica a la cual el dato corresponda); posteriormente los datos son ordenados de menor a mayor y se les asigna la frecuencia de Gringorten, la cual es la más apropiada para la distribución Gumbel, Cunnane (1978). Esta frecuencia es expresada en términos de variable reducida **Y**. ($Y = -\ln(-\ln(F(Y)))$).

El eje de la variable reducida se dividió en intervalos espaciados uniformemente, se tomaron los valores de la relación Q/\bar{Q} que cayeran en un determinado intervalo y se graficó su valor promedio contra el valor promedio del intervalo en la variable reducida.

Un tratamiento complementario fue dado a los cuatro valores mayores que no fueron desecha-

* Outliers: Término hasta ahora sin una traducción estadística precisa; indica valores muy extremos de la serie hidrológica escogida.

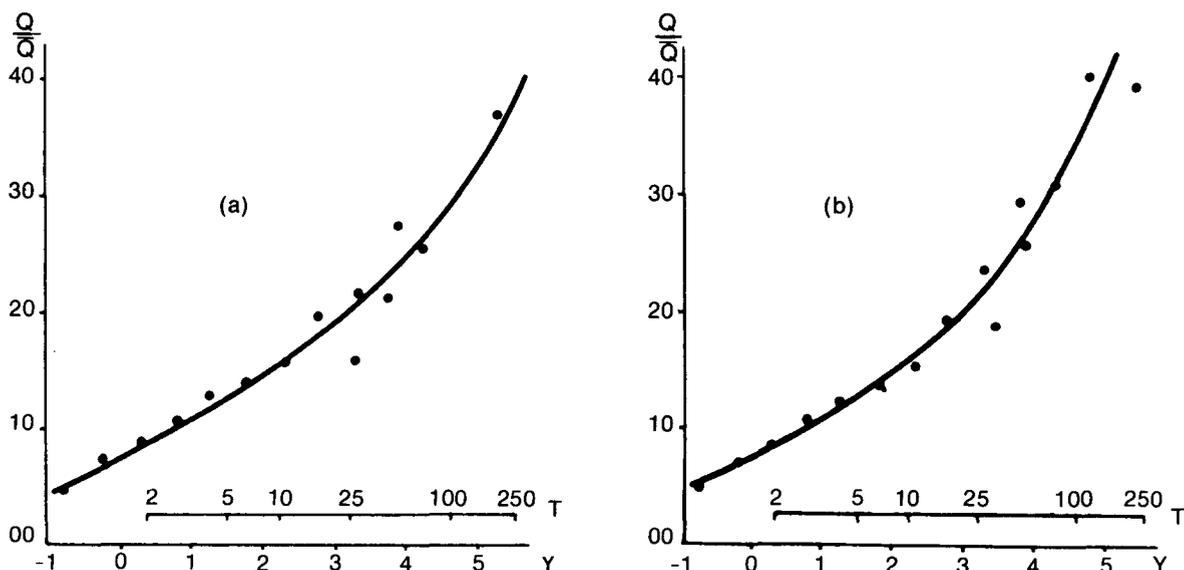


FIGURA 2. Curva regional para la región 5 del Reino Unido.
(a) sin incluir información histórica.
(b) después de incluir información histórica.
T = período de retorno.

Tomado de: Flood Studies Report (1975).

dos por ser "outliers", así como también fue incorporada la información histórica disponible (información proveniente de investigaciones sobre crecidas en épocas anteriores), a fin de extender la curva en una forma más sistemática. El gráfico fue extendido para períodos de retorno de 200 a 400 años aproximadamente. (Ver Figura 2).

Esta curva regional se usa de la misma forma como la curva derivada mediante el método Flood Index.

Beran (1981) en un estudio del Flood Studies Report (FSR), puntualizaba algunos problemas relacionados con el agrupamiento de caudales máximos, tales como:

1. ¿Podrán los datos estandarizados ser considerados como provenientes de la misma población, de tal forma que sea valedero el hecho de combinarlos en una sola muestra?
2. ¿Podrán los datos ser subdivididos regionalmente o de acuerdo con un criterio objetivo, para responder la pregunta 1 afirmativamente?
3. ¿Qué concesión deberá hacerse por el hecho de que a diferentes cuencas hidrográficas se le supone el mismo fenómeno, o mejor, el mismo patrón que produce las crecidas y por tanto podrían no ser independientes?

Considerando los anteriores puntos, Beran señalaba algunos aspectos:

1. En el FSR fue asumido y de ninguna forma probado que cuando los datos son estandarizados por \bar{Q} pueden ser considerados como derivados de una misma población.
2. El hecho de que el procedimiento de estandarización tiende a suavizar la curva adimensional de frecuencia, constituye una desventaja de este método.

Uno de los puntos que muchos hidrólogos han criticado se refiere a la forma como ha sido hecha la demarcación de las regiones, ya que conocer cuáles cuencas puedan ser consideradas de comportamiento similar es aún un dilema.

En la práctica, muchas regiones hidrológicas se han basado en la proximidad administrativa, la cual podría atravesar fronteras climáticas y topográficas; por ejemplo, el FSR (1975) comenzó su regionalización agrupando áreas hidrométricas (Mosley, 1981).

En general, la proximidad geográfica de las cuencas no es una garantía de que su distribución X sea idéntica o muy similar. Por tanto, tales regiones geográficamente definidas no son necesariamente homogéneas en su distribución X . Su adopción por NERC (1975), no carece, sin

embargo, de criterio, ya que la distribución geográfica adoptada refleja cambios en los patrones de lluvia y topografía, los que a su vez afectan la distribución X . (Cunnane, 1986).

Algunos sofisticados intentos basados en la características fisiográficas de las cuencas a fin de diferenciar regiones, han sido adelantados usando análisis de Cluster, [(Mosley, 1981), (Acreman and Sinclair (1984, 1986))]. Sin embargo, Wiltshire (1986a), citado por Cunnane (1986), señalaba que las regiones geográficamente definidas aún pueden mantener su importancia en el agrupamiento de cuencas hidrográficas con base en sus características fisiográficas ya que proveen indicios en la determinación inicial de las regiones.

Regionalización del coeficiente de asimetría

El Water Resources Council (WRC) de los EE.UU. después de realizar comparaciones con diferentes distribuciones usadas en ese país, y la aplicación de algunos test de bondad de ajuste, recomendó el uso de la distribución logarítmica Pearson tipo 3 (LP3), como la distribución más apropiada para los EE.UU. (Benson, 1968).

El método de momentos fue usado para ajustar los parámetros de la distribución. En el estudio fue reconocido el hecho de que el coeficiente de asimetría (C_s) tiene una mayor variabilidad entre las muestras que el promedio; esto sugirió la posibilidad de usar un valor regional del C_s en lugar del C_s determinado para una estación hidrométrica particular que por lo general posee registros de corta duración.

Hardison (1974), desarrolló un mapa del C_s para los EE.UU.; este C_s podría ser usado en la estimación de los parámetros de la distribución LP3.

Este mapa fue recomendado debido a que disminuye el error estándar del evento estimado, minimiza la necesidad de considerar información histórica y de remover "outliers" en la cola inferior de la distribución de frecuencia. (Hardison, 1974), (ver Figura 3).

En "Guidelines for determining flood flow frequency" (1977), el WRC recomendó el procedimiento antes descrito, especialmente para estaciones con registros de corta duración. Cuando los registros sean lo suficientemente extensos (≥ 100 años), es preferible usar la estimación del C_s determinado con la muestra a disposición; sin embargo esta circunstancia es más la excepción que la regla en muestras hidrológicas.

Algunas de las críticas a este método son:

- 1 El coeficiente de asimetría tiene límites y éstos no dependen de la distribución sino de las

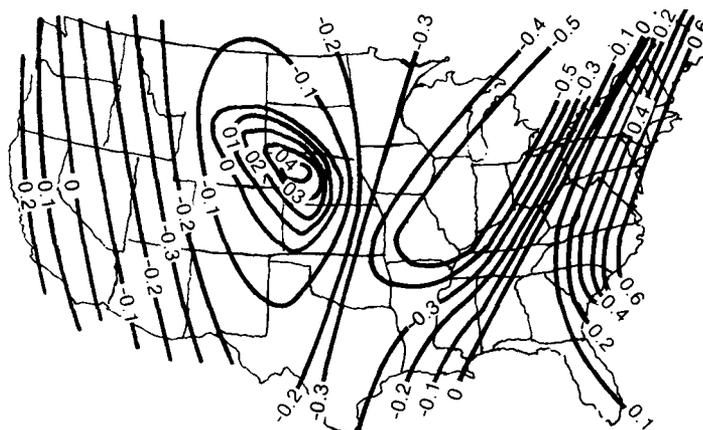


FIGURA 3. Coeficiente de asimetría regionalizado para los EE.UU. Preparado por: U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Tomado de Haan C.T. (1977).

- fórmulas algebraicas que lo definen, (Kirby, 1974).
- 2. El Cs computado de las muestras, generalmente, es sesgado inferiormente, (Wallis et al. 1974).
- 3. Recientemente este procedimiento ha sido comparado con el método regional PWM por Wallis and Wood (1985), mostrando ser menos robusto que este nuevo método regional.

Método de los momentos ponderados de probabilidad (PWM)

El método fue introducido por Greenwood et al., (1979); es en realidad un método de estimación de parámetros, útil para aquellas distribuciones que pueden ser explícitamente definidas en forma inversa ($X=X(F)$). **Este procedimiento es simple y no sesgado (Cunnane, 1985).**

Los momentos son definidos de la siguiente forma:

$$M_{l,j,k} = E[X^l F^j (1 - F)^k] = \int_0^1 [X(F)]^l F^j (1 - F)^k dF \dots 1$$

Donde l, j, k son números reales y $F=F(X)=P(x \leq X)$

De la ecuación 1 se observa que ésta es una forma más generalizada de los momentos convencionales, ya que si $j = k = 0$, quedaría de la forma $M_{l,0,0}$ representando el momento acerca del origen del orden l.

Con el propósito de estimar los parámetros de las diferentes distribuciones, los casos especiales $l = 1$ y $j = 0$ o $k = 0$ son lo suficientemente generales; de tal forma que las expresiones $M_{1,0,k}$ y $M_{1,j,0}$ son usadas para ello.

Las relaciones entre los parámetros y los PWM son de estructura analítica más simple que las encontradas entre éstos y los momentos convencionales (Greenwood et al, 1979) especialmente cuando se utiliza X elevado a la primera potencia.

Para estimar los parámetros de las distribuciones Weibull, Gumbel, Lambda generalizada, logística, Wakeby y Kappa, Greenwood et al, (1979) usaron la expresión $M_{1,0,k}$, definida como:

$$M_{1,0,k} = \sum_{j=0}^k \binom{k}{j} (-1)^j M_{1,j,0} \dots 2$$

Hosking et al, (1985) usaron la expresión $M_{1,j,0}$ para estimar los parámetros de la distribución general de valores extremos (GVE), definida de la siguiente forma:

$$M_{1,j,0} = \sum_{k=0}^j \binom{j}{k} (-1)^k M_{1,0,k} \dots 3$$

Cuando se usa $M_{1,0,k}$ donde k es un entero positivo, un estimador no sesgado de $M_{1,0,k}$ es dado por Landwehr et al, (1979) como:

$$M_{1,0,k} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N-K} X_j \left(\frac{N-j}{K} \right) \dots 4$$

Donde $X_1 \leq X_2 \leq X_3 \leq \dots \leq X_N$

N: Tamaño de la muestra.

Landwehr et al, (1979) encontraron que el algoritmo PWM dio buenos resultados usando un estimador moderadamente sesgado de $M_{1,0,k}$ cuando se determinaron los parámetros de la distribución Wakeby. Este estimador se expresa como:

$$M_{1,0,k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i (1 - P_i)^k \dots 5$$

$$P_i = (i - 0.35)/N \quad \dots\dots 6$$

Donde P_i es la i ésima frecuencia
 i es el orden del evento, ordenados de menor a mayor
 N : es el tamaño de la muestra.

La misma fórmula de frecuencia (P_i), fue encontrada apropiada por Hosking et al. (1985) cuando se usó la expresión $M_{1,j,0}$ en lugar de la expresión $M_{1,0,k}$ para estimar los parámetros de la distribución GVE.

El método PWM ha sido comparado por Landwehr et al. (1979), con métodos tradicionales de estimación de parámetros, tales como momentos y máxima probabilidad para la distribución Gumbel; ellos concluyeron que esta técnica produce estimados no sesgados de los parámetros y de los cuantiles cuando las muestras son extraídas de un proceso aleatorio.

Estaciones

$X_{1,1}$	$X_{1,2}$	....	$X_{1,N}$
$X_{2,1}$	$X_{2,2}$	....	$X_{2,N}$
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
$X_{n,1}$	$X_{n,2}$	....	$X_{n,N}$

↓
Ordenar columnas

$Y_{1,1}$	$Y_{1,2}$	....	$Y_{1,N}$
$Y_{2,1}$	$Y_{2,2}$	....	$Y_{2,N}$
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
$Y_{n,1}$	$Y_{n,2}$	....	$Y_{n,N}$

↓
Obtener PWM_k

$M_{0,1}$	$M_{0,2}$	$M_{0,N}$
$M_{1,1}$	$M_{1,2}$	$M_{1,N}$
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$M_{k,1}$	$M_{k,2}$	$M_{k,N}$

→ **Estandarizar**

1.0	....	1.0
$M_{1,1}/M_{0,1}$	....	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$M_{k,1}/M_{0,1}$	....	$M_{k,N}/M_{0,N}$

→ $\frac{\text{SUMA}}{N}$

M_0
M_1
.
.
.
.
M_k

FIGURA 1. Método para obtener momentos ponderados de probabilidad regionales; $M_k = M_{1,0,k}$ para N estaciones. (Tomado de Wallis, 1980).

Hosking et al. (1985), usando esta técnica para ajustar los parámetros de la GVE, encontraron que este método tiene una menor varianza y un sesgo no severo, comparando de forma favorable con los estimados obtenidos por el método de máxima probabilidad y sextiles. Ellos también encontraron que el método PWM tienen consistentemente la más baja desviación estándar entre los tres estimadores del parámetro de forma k , su ventaja es particularmente marcada en muestras de tamaño pequeño. El método tuvo en general un mayor sesgo que los otros estimadores, pero éste es pequeño, cercano al importante valor de k igual a cero.

Similares resultados se obtuvieron con la estimación de los parámetros de escala y localización.

En cuanto a la estimación de los cuantiles especialmente en las colas de las distribuciones usadas para propósitos hidrológicos, los estimados obtenidos para períodos de retorno altos son algo sesgados, sin embargo son aún preferibles a los estimados obtenidos por el método de máxima probabilidad.

Wallis (1980) sugirió que este método podría ser útil en aquellas situaciones donde los registros son de corta duración (aspecto común en nuestros países) y sugirió un método regional para hacerlo.

El procedimiento puede ser descrito como sigue:

1. Ordenar las muestras de menor a mayor.
2. Calcular los PWM para cada estación.
3. Estandarizarlos PWM altos ($M_{1,0,k}$ donde $k \geq 0$) por $M_{1,0,0}$; esto es, dividir cada PWM por el promedio de los datos en la estación hidrométrica.
4. Promediar los estandarizados PWM sobre toda la región.
5. Ajustar la distribución a los valores regionales de PWM.
6. Multiplicar el promedio de cada estación por los estimados regionales obtenidos de la distribución ajustada en el paso anterior, a fin de obtener la magnitud del evento regionalmente estimado para la estación en particular.

La Figura 4, tomada de Wallis (1980), clarifica los pasos anteriores.

De acuerdo con Wallis (1980), si los datos son en realidad **homogéneos o cuasi-homogéneos**, del procedimiento antes descrito pueden esperarse resultados de estimación de eventos que son mejores que las estimaciones hechas en cada estación particular. Además, si la región es heterogénea, del procedimiento pueden esperarse resultados de estimación de eventos que son superiores para la mayoría de las estaciones y en particular para aquellas que puedan ser consideradas como representativas de la región.

ESTUDIOS RECIENTES EN ANALISIS REGIONAL

El uso del método PWM hace posible la estimación de cuantiles a períodos de retorno altos usando un método sencillo que promedia los valores del PWM para la región. El método es particularmente robusto cuando la muestra hidrológica disponible es de muy corta duración, altamente kurtótica o asimétrica (Grenwood et al., 1979).

Greis and Wood (1981) investigaron el uso de la distribución Gumbel, ajustada por el método PWM, en cuencas con y sin registros. Este estudio mostró que los estimados regionales en las diferentes estaciones son mejores que los estimados cuando se ajusta la distribución por métodos comunes tales como momentos y máxima probabilidad. En el mismo estudio, respecto de la estimación de parámetros de la distribución se concluye: "...mientras el método PWM parece proveer estimación de parámetros más adecuados que los métodos de máxima probabilidad y momentos, la robustez del método es evidente cuando el tamaño de la muestra es de menor duración".

Con respecto a la consideración de combinar registros de corta duración con los de larga duración, establecieron: "...El efecto neto es el de que los estimadores regionales en las estaciones de registros de corta duración es mejorado pero a expensas de los estimados en aquellas estaciones de más larga duración". Este hecho hace cuestionable la recomendación de usar registros de muy corta duración en estimaciones regionales.

Cuando este método (Gumbel/PWM) es aplicado a cuencas sin registro, proporciona mejores resultados que otras técnicas empleadas antes en la región bajo estudio, a pesar del hecho de que hubo dudas razonables acerca de la homogeneidad de ésta.

Hosking et al. (1985), compararon el algoritmo regional usado en el FSR (1975), con las distribuciones GVE y la Wakeby (WAK) ajustadas para la región por el método PWM. Ellos observaron que el algoritmo usado en el FSR puede llevar ocasionalmente a resultados de eventos que

parecen irreales desde el punto de vista de ingeniería, especialmente en los cuantiles correspondientes a períodos de retorno altos.

En relación a los algoritmos GVE/PWM y WAK/PWM, es evidente que una vez el número de estaciones en estudio es relativamente grande, la contribución de una estación a la curva regional es pequeña y la distorsión introducida a la curva regional por el hecho de incluir una cuenca hidrográfica no representativa de la región es igualmente pequeña.

Considerando al algoritmo del FSR se observó que es muy sensitivo a la presencia o ausencia de grandes eventos cuando los registros son de corta duración. Cuando la información histórica es analizada a fin de modificar la curva regional, se ha sugerido que este procedimiento resultaría en una pequeña ganancia o quizá en una pérdida neta de información y su uso en análisis de frecuencia de crecidas debería ser desestimulado.

Los tres métodos regionales fueron comparados por medio de un análisis de robustez y se encontró que el algoritmo GVE/PWM dio como resultado un pequeño o no existente sesgo, inclusive para una base de datos relativamente pequeña. La variabilidad del estimado regional para el mismo algoritmo fue siempre más pequeña que la obtenida por el método del FSR, y generalmente por un factor de 4, también se evidenció que este algoritmo fue más eficiente y consistente. Resultados similares fueron obtenidos con el algoritmo WAK/PWM.

Hosking et al., (1985), finalmente recomendaron el algoritmo GVE/PWM como sustituto para el algoritmo del FSR, con el WAK/PWM como una alternativa robusta.

Wallis and Wood (1985), llevaron a cabo un estudio comparando el método del WRC con los algoritmos regionales GVE/PWM y WAK/PWM, y el método puntual GVE/PWM*.

Ellos usaron una metodología similar a la usada por Hosking et al., (1985). En su caso la población que generó las muestras aleatorias fue siempre la distribución LP3.

Usaron dos regiones hipótéticas la primera una región heterogénea de 20 estaciones con un tamaño de muestras variando de 30 a 39 años, con un coeficiente de variación de 0.51 a 0.891 y un coeficiente de asimetría de 1.8 a 3.3; la comparación entre los algoritmos regional y del WRC mostraron:

* El método puntual se refiere al ajuste de la distribución mediante el método de estimación de parámetros PWM con los datos pertenecientes a una estación hidrométrica particular, mientras el regional es aquel procedimiento señalado por Wallis (1980) explicado en este artículo.

1. El método regional WAK/PWM se comportó mejor que el GVE/PWM, no teniendo sesgo e intervalos de confianza muy pequeños. El procedimiento GVE/PWM tuvo intervalos de confianza similares al WAK/PWM, pero presentó mayor sesgo.

2. El algoritmo del WRC se comportó de la peor forma y mostró tener mayor variabilidad que el método PWM, cuando los períodos de retorno aumentaban.

A fin de observar si los resultados fueron debidos a heterogeneidad en la región, otros dos experimentos con regiones homogéneas se llevaron a cabo, con coeficientes de variación iguales a 0.692 para uno y de 0.981 para otro.

Se observó que el método regional del WRC dio los cuantiles más pobres, en términos de la raíz cuadrada del error cuadrático medio (rmse). El procedimiento WAK/PWM, se comportó mejor en términos del rmse y del sesgo. El algoritmo GVE/PWM se comportó de una forma más pobre en los cuantiles altos (períodos de retorno > 500 años), para regiones homogéneas.

Los procedimientos regionales PWM se comportaron mejor que el método regional del WRC, cuando el tamaño de la muestra fue pequeño.

Wallis and Wood finalmente sugirieron la reevaluación del procedimiento recomendado por el WRC.

Lettenmaier and Potter (1984) usaron la técnica conocida como Bootstrap descrita por Efron (1982), para establecer comparaciones entre los diferentes métodos regionales.

Este procedimiento es similar a la simulación de Montecarlo, en que repetidas muestras son extraídas de una forma aleatoria, pero difiere en que la forma de la distribución que genera las muestras **no se aume a priori**.

Las distribuciones ajustadas de forma puntual (ajustadas para los datos de una estación particular), fueron la Gumbel y GVE usando PWM, las distribuciones regionales ajustadas fueron la Gumbel, GVE y WAK usando PWM. También se probó el procedimiento del WRC.

Los resultados que dieron estos experimentos fueron muy similares a aquellos obtenidos por simulación de Montecarlo, (Greis and Wood (1981), Hosking *et al.*, (1985), Wallis and Wood, (1985).

Los procedimientos regionales WAK/PWM, GVE/PWM y Gumbel/PWM, fueron los menos variables. El procedimiento regional del WRC se comportó de la peor forma y aun más variable que el método puntual Gumbel/PWM.

En términos de sesgo, los procedimientos regional y puntual de Gumbel/PWM fueron sesgados inferiormente. El método WAK/PWM tuvo un ligero sesgo inferior, mientras los otros procedimientos regionales estuvieron sesgados superiormente.

Las principales conclusiones de este estudio, resumidas por Lettenmaier (1985), son:

1. Como se muestra en los resultados de la simulación de Montecarlo, los métodos puntuales que usan distribuciones de 3 parámetros son mucho más variables que los métodos regionales; por tanto no deben ser usados si existe una razonable oportunidad de aplicar un método regional.

2. Las distribuciones de dos parámetros, cuando se usan con un apropiado método de regionalización, pueden resultar en estimación de cuantiles con baja variabilidad, pero a expensas de un sesgo considerable.

3. Los algoritmos regionales WAK/PWM y GEV/PWM rinden estimaciones de cuantiles con baja variabilidad y sesgo pequeño, y en la ausencia de información adicional acerca de la forma de la distribución que genera el proceso, debería ser el método escogido de estimación.

Hebson and Cunnane (1986) llevaron a cabo un experimento para comparar el error estándar de los cuantiles de caudales estimados de tres diferentes maneras: puntual, regional usando la combinación región/ puntual y puramente regional usando la relación entre las características de la cuenca y el caudal máximo anual promedio (\bar{Q}).

Tres grupos de la distribución GVE fueron usados como generadores de las muestras para estudio. Se representaron desde regiones altamente heterogéneas hasta regiones homogéneas.

El principal objetivo de este trabajo fue el de examinar el caso donde no existiera información (datos, registros); en este aspecto sus conclusiones fueron:

1. El estimado regional de \bar{Q} tiene menos valor que el uso de un único valor de caudal máximo anual como el estimado de \bar{Q} .

2. Los estimadores puntuales basados en un período de registro de pocos años fueron también superiores al estimado puramente regional.

3. Los resultados fueron consistentes con previas investigaciones sobre el uso de información regional, lo cual ha sugerido lo inapropiado de la estimación por regresión del promedio de caudales máximos para luego usarlo con algún método regional existente.

TABLA 1
Estadísticas de poblaciones usadas en algunos estudios de simulación

Estadístico	Rango	Promedio	Desviación estándar (Sd)	Coficiente de variación (Cv)
Hosking et al. 1985				
Coficiente de asimetría (Cs)	2.15 - 3.0	2.54	0.262	0.10
Coficiente de variación (Cv)	0.38 - 0.60	0.47	0.066	0.14
Wallis and Wood, 1985				
Coficiente de asimetría (Cs)	1.8 - 3.3	2.5	0.30	0.12
Coficiente de variación (Cv)	0.612 - 0.89	0.7	0.15	0.21

Una comparación entre la estimación puntual y la estimación combinada regional (PWM) / puntual ya ha sido discutida antes; sus conclusiones fueron muy similares a aquellas anotadas en estudios previos mostrando la superioridad del último algoritmo.

En general, los estudios mostraron que a pesar de la heterogeneidad en la región, el algoritmo regional que usa la probabilidad de momentos ponderados se comporta mejor que los otros procedimientos regionales aquí descritos y es muy superior a cualquier método puntual. Además el procedimiento aparece más robusto cuando el tamaño de la muestra es pequeño.

V. HETEROGENEIDAD DEL VALLE DEL CAUCA

González (1986), llevó a cabo un estudio de caudales máximos tomando al Valle del Cauca como región, usó información de 30 estaciones hidrométricas, 11 de ellos pertenecientes al Río Cauca y las 19 restantes a tributarios de éste.

En la Tabla 2 se encuentran resumidos los valores de los estadísticos que comparados con los

valores de los estudios de simulación de Montecarlo, muestran una región más heterogénea que los analizados en dichas investigaciones, de acuerdo con los valores índices dados por Lettenmaier (1985).

En dicho estudio, González (1986) ajustó las distribuciones GVE, WAKEBY, GUMBEL y WEIBULL (2 y 3 parámetros) por medio del algoritmo regional PWM. Para seleccionar la distribución más apropiada se utilizaron cuatro test de bondad de ajuste (Chi cuadrado, "DMAX" (Njenga, 1985), gráfico y un nuevo test gráfico (González, 1986), finalmente, la distribución que se escogió fue aquella que se comportó mejor a través de los cuatro test, siendo ésta la distribución Gumbel.

CONCLUSIONES

1. Sin tener el país una normalización para llevar a cabo diseños de estructuras hidráulicas, basadas en una curva de frecuencia de caudales máximos recomendada después de un estudio técnico lo suficientemente riguroso, no es posible desarrollar planes coordinados y coherentes a fin de reducir los daños causados por inundaciones.

TABLA 2
Estadísticas para caudales máximos en 30 estaciones del Valle del Cauca determinados por González (1986)

Estadístico	Rango	Promedio	Desviación estándar (Sd)	Coficiente de variación (Cv)
Muestras de igual tamaño y años concurrentes 1973 - 1982				
Coficiente de asimetría (Cs)	-1.402 - 2.332	0.197	1.212	6.139
Coficiente de Variación (Cv)	0.102 - 0.708	0.310	0.153	0.495
Muestras de diferente tamaño				
Coficiente de asimetría (Cs)	-1.41 - 2.472	0.507	0.923	1.821
Coficiente de variación (Cv)	0.101 - 0.793	0.323	0.176	0.543

2. No es posible para las instituciones encargadas de la construcción y la operación de obras de control de inundaciones, establecer en forma objetiva la comparación entre diferentes propuestas técnicas realizadas, así como comparar los costos, a menos que los análisis económicos y determinaciones de frecuencias de caudales máximos sean hechos de acuerdo con estándares previamente establecidos.

3. La diversidad de métodos para la estimación de crecidas con una determinada probabilidad de excedencia para una región o sitio genera valores diferentes y si estos son presentados al público, tal situación conllevaría a crear confusión, traduciéndose de hecho en incredulidad y creando desconcierto al respecto, porque con frecuencia estos valores difieren sustancialmente.

La existencia de valores tan disímiles puede causar cuestionamiento del público o autoridades competentes acerca de la ingeniería misma, así como sobre el profesionalismo de los ingenieros y de las entidades involucradas en un determinado proyecto.

El profesional puede reconocer los errores e incertidumbres inherentes en la determinación de valores de crecidas con una determinada frecuencia de ocurrencia; sin embargo, tales problemas no pueden ser explicados satisfactoriamente a los propietarios ni a las entidades gubernamentales que deseen desarrollar obras de control de inundaciones. Esto hace imperativo

que los problemas estadísticos sean resueltos a nivel profesional.

4. En el país es aconsejable establecer normas o estándares para la determinación de crecidas de acuerdo a las diferentes regiones existentes en el país. El ingeniero o compañía consultora que desconoce el método más recomendado de acuerdo a las condiciones específicas en la región de estudio tal vez aplique una metodología que no sea la más adecuada para la zona.

5. No se debe considerar que un estudio tendiente a estandarizar la curva de frecuencia a usar en una región sea la solución definitiva, pero tiene la gran ventaja de que fundamentada en estudios estadísticos se obtiene una alternativa técnicamente mejor sustentada que la que hasta el momento se ha llevado a cabo.

6. En países donde se ha avanzado más al respecto, se están utilizando curvas o metodologías determinadas por las oficinas de investigación de los recursos hídricos, dictados por la necesidad de llevar a cabo planes coordinados para tratar de reducir daños causados por las inundaciones. Esto hace suponer que en nuestro país estamos en mora de llevar a cabo un estudio que nos permita determinar la metodología a usar en las diferentes regiones de Colombia, teniendo en cuenta las características propias de las regiones previamente escogidas, sea en una forma geográfica o empleando técnicas más sofisticadas recientemente incorporadas en los estudios hidrológicos.

BIBLIOGRAFIA

1. ACREMAN, M.C. and SINCLAIR, C.D.: Classification of Drainage Basins According to their Physical Characteristics; An Application for Flood Frequency Analysis in Scotland, Subm. to Journal of Hydrology, 1986.
2. BEAR, L. R.: Guidelines for Determining Flood Flow Frequency, U.S. Water Resources Council, Bull. 17A of the Hydrology Committee, Washington, D.C., Dec. 1977.
3. BEABLE, M.E. and McKERCHAR, A.I.: Regional Flood Estimation in New Zealand national Water and Soil Conservation Org. Water and Soil Tech., Publ. 20, 132p, 1982.
4. BENSON, M.A.: Characteristics of Frequency Curves on the theoretical 1000 year record, USGS Water Supply Paper No. 1543, 51-73, 1960.
5. BENSON, M.A.: Evolution of Methods for Evaluating the Occurrence of Floods, U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 1550-A, 1962.
6. BENSON, M.A.: Uniform Flood Frequency Estimating Methods for Federal Agencies, Water Resour. Res., 4(5), 891-908, 1968.
7. BERAN, M.A.: Recent Advances in Statistical Flood Estimation Techniques, Flood Studies Report-Five Years On, Institute of Hydrology, p. 25-32, 1981.
8. BERAN, M.A., HOSKING, J.R.M. and ARNELL, N.: Comment on 'Two Component Extreme Value Distribution for Flood Frequency Analysis' by Rossi et. (1984). Water Resour. Res., 22 (2),

263 - 266, 1986.

9. CUNNANE, C.: Unbrassed Plotting Position - A Review, Journal of Hydrology, 37(3/4), 205-222, 1978.
10. CUNNANE, C.: Condition of Separation of Skewness of Random Samples from the General Extreme Value Distribution, Unpub. Re., Dept. Eng. Hydrol., Univ. Coll. Galway, 7 p., 1984.
11. CUNNANE, C.: Stochastic Hydrology Section (A) and (B) for M.Sc Course, Univ. Coll. Galway, Ireland, 1985.
12. CUNANANE, C.: Factors Affecting Choice of Distribution for Flood Series, Hydrological Science Journal, 30(1), 25-36, March 1985.
13. CUNNANE, C.: Review of Statistical Models for Flood Frequency Estimation, Keynote Adress Presented at the International Symposium on Flood Frequency and Risk analysis, U.S.A., 1986.
14. GONZALEZ, M.C.A.: Regional flow Analysis for the Valle del Cauca Region in Colombia, M.Sc. Thesis, Univ. Coll. Galway, Ireland, 1986.
15. DALRYMPLE, T.: Flood Frequency Methods, U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 1543A, p. 11-51, Washington, 1960.
16. GREENWOOD, J.A., LANDWEHR, J.M., MATALAS, N.C. and WALLIS, J.R.: Probability Weighted Moments: Definition and Relation to Parameters of Distributions Expressible in inverse Form, Water Resour. Res., 15(5), 1049-1054, 1979.
17. GREIS, N.P.: Flood Frequency Analysis: A Review of 1979-1982, Reviews of Geophysics and Space Physics, U.S., Vol 21(3),

699-706, April 1983.

18. GREIS, N.P. and WOOD, E.F.: Regional Flood frequency Estimation and Network Design, *Water Resour. Res.* 17(4), 1167-1177, 1981.
19. HAAN, T.C.: *Statistical Methods in Hydrology*, Iowa State University Press, Ames, 1977.
20. HARDISON, C.H.: Generalized Skew Coefficients of Annual Floods in the United States and their Applications, *Water Resour. Res.* 10(4), 1974.
21. HEBSON, C.S. and CUNNANE, C: Assesment of Use of at-site and Regional Flood Data for Flood Frequency Estimation, Paper Presented at Int. Symposium of Flood Frequency and Risk Analysis, Baton Rouge, U.S.A., 1986.
22. HOSKING, J.R.M., WALLIS, J.R. and WOOD, E.F.: Estimation of the Generalised Extreme Value Distribution by the Method of Probability Weighted Moments, *Technometrics*, 27(3), 251-261 1985.
23. HOSKING, J.R.M., WALLIS, J.R. and WOOD, E.F.: An Appraisal of the Regional Flood Frequency Procedure in the U.K. Flood Studies Report, *Hydrological Science Journal*, 30(1), 85-109, 1985.
24. HOUGHTON, J.C.: Birth of a Parent: The Wakeby Distribution for Modelling Flood Flows, *Water Resour. Res.*, 14(4), 1105-1109, 1978.
25. KIRBY, W.: Algebraic Boundness of Sample Satatistics, *Water Resour. Res.* 10(2), 220-222, 1974.
26. KITE, G.W.: *Frequency and Risk Analysis in Hydrology*, Water Resour. Publication, Fort Collins, Colorado 80522, U.S.A., 1977.
27. KITE, G.W.: Case of Study of Regional Analysis Techniques for Design Flood Estimation, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1974.
28. KUCZERA, G.: Robust Flood Frequency models, *Water Resour. Res.*, 18(2), 315-324, 1982.
29. LANDWEHR, J.M., MATALAS, N.C. and WALLIS, J.R.: Probability Weighted Moments Compared with Some Traditional Techniques in Estimating Gumbel Parameters and Quantiles, *Water Resour. Res.* 95(5), 1055-1064, 1979.
30. LANDWEHR, J.M., MATALAS, N.C. and WALLIS, J.R.: Quantile Estimation with More or Less Flood Like Distributions, *Water Resour. Res.* 16(3), 547-555, 1980.
31. LETTENMAIER, D.P. Regionalization in Flood Frequency Analysis: Is it the Answer symposium - Nanjing, 1985. U.S. - China Bilateral.
32. MATALAS, N.C., SLACK, J.R. and WALLIS, J.R.: Regional Skew in Search of a Parent, *Water Resour. Res.*, 11(6), 815-826, 1975.
33. MOSLEY, M.P.: Delimitation of New Zealand Hydrologic Region *Journal of Hydrology*, 1980.
34. NERC.: *Flood Studies Report*, Nat. Environ. Resour. Council, London, Vols. 1-5, 1100 p., 1975.
35. NJENGA, M.: Simulation Applied to the Inference Problem of the underlying Distribution of hydrologic Random Variables, M. Sc. Thesis, University College Galway, Ireland, 1985.
36. ROSSI, F., FIORENTINO, M. and VERSAGE, P.: Two Component Extreme Value Distribution for Flood Frequency Analysis, *Water Resour. Res.* 20(7), 847-856, 1984.
37. WALLIS, J.R., MATALAS, N.C. and SLACK, J.R.: Just a Moment, *Water Resour. Res.*, 10(2), 211 -219, 1974.
38. WALLIS, J.R., MATALAS, N.C. and SLACK, J.R.: Apparent Regional Skew, *Water Resour. Res.*, 159 -182, 1977.
39. WALLIS, J.R.: Risk and Uncertainties in the Evaluation of Flood Events for the Design of Hydrologic Structures, Keynote Address at "Seminar on Extreme Hydrological Events- Floods and Droughts", Erice, Italy, 33 p., 1980.
40. WALLIS, J.R. and WOOD, E.F.: Relative Accuracy of Log Pearson III procedures A.S.C.E. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(7) 1043-1056, July 1985.
41. WU, B. and GOODRIDGE, D.J.: On the Selection of Probability Distributions for Hydrologic Frequency Analysis, Dept. of Water Resources, State of California, 85 p., Sacramento, June 1976.