

Regionalización de Características Medias de la Cuenca con Aplicación en la Estimación de Caudales Máximos

***Oscar José Mesa Sánchez, Jaime Ignacio Vélez Upegui,
Juan Diego Giraldo Osorio y Diana Isabel Quevedo Tejada***

**Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Facultad de Minas, Escuela de Geociencia y Medio Ambiente
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín**

Palabras clave: Caudales Máximos, Regionalización, Cuenca, Hidrología, Características Medias

Resumen

El objetivo de la regionalización de las características medias de la cuenca es inferir la respuesta hidrológica de ésta a partir de sus características geomorfológicas. Gran parte de las características físicas de las cuencas se deben a la acción del agua, por lo que es lógico pensar en una fuerte relación determinística entre las características morfométricas de la cuenca y las variables que describen el comportamiento hidrológico de la misma.

Siguiendo el procedimiento de regionalización de las características medias, es posible relacionar las características geomorfológicas y climáticas de una cuenca sin información con las características medias de los caudales máximos instantáneos. Una vez conocidas estas características medias se pueden estimar caudales máximos instantáneos asociados a diferentes periodos de retorno utilizando diversas distribuciones de probabilidad.

Luego de regionalizar el territorio colombiano e implementar la metodología, se encontró que el área de drenaje no es suficiente descriptor de las cuencas en Colombia. La amplia diversidad de zonas climáticas y su combinación en las cuencas más grandes, como la del río Magdalena, sugiere la utilización de parámetros climáticos para capturar las características medias de los caudales máximos. Un ejemplo muy claro de esta situación se da en la región de la Guajira, donde los caudales máximos medios no crecen de manera lineal log-log con el área; los ríos de montaña que bajan de la Sierra Nevada de Santa Marta son torrenciales y presentan crecientes muy grandes, pero al entrar en la llanura desértica los procesos de infiltración disminuyen la magnitud de dichos escurrimientos. Las variables geomorfoclimáticas precipitación, evaporación y área de drenaje, constituyen unos buenos estimadores de las características medias de la cuenca. Estas combinadas con el Método de Análisis de Frecuencia, entregan resultados satisfactorios, reflejado esto en que los errores para todas las subregiones y período de recurrencia de 100 años no excede el 51\%.

Abstract

The objective of regional analysis of basin's average characteristics is to infer the hydrological answer of this one from its geomorphologic characteristics. Great part of the physical characteristics of river basins are due to the action of water, so that, a strong non-stochastic relation between the morphometric characteristics of the river basin and the variables that describe the hydrological behavior of it, is possible. Following the procedure of regionalisation of the average characteristics, it is possible to relate the geomorphologic and the climatic characteristics of a river basin without information, to the average characteristics of the instantaneous maximum floods. Once these average characteristics are known, peak floods can be considered associated to different return periods using diverse probability distributions.

After using the regional analysis of basin's average characteristics, we found that the drainage area is not a good descriptor of Colombian river basins. The diversity of climatic zones and its combination in the greatest river basins is wide, like the one of the Magdalena river, suggesting the use of climatic parameters to capture the average characteristics of the peak floods. A very clear example of this situation occurs in the region of the Guajira where the average peak flood does not obey log-log linearity with respect to drainage areas. The mountain rivers that come from the Sierra Nevada de Santa Marta are torrential and display very great increases, but when entering the desert plain the infiltration processes diminish the magnitude of these drainings. The geomorphologic and the climatic variables as precipitation, evaporation and drainage area, are good estimators of the average characteristics of the river basin. These results combined with the Frequency Analysis, show that errors for all the subregions and return period of 100 years do not exceed 51%.

Key words: Peak Flood, Regional Analysis, Basin, Hydrology, Average Characteristics

1. Introducción

Uno de los aspectos más importantes del diseño en ingeniería es la cuantificación de los eventos extremos; dentro de este grupo de fenómenos se encuentran los caudales máximos, los cuales por considerarse como unos de los principales agentes geomorfológicos y modeladores de la topografía, se constituyen en objeto de estudio e implantación de nuevas metodologías de estimación.

Sin embargo, la situación más común es la estimación de los eventos máximos en sitios con información escasa o nula. Una de las herramientas para enfrentar este problema es la regionalización de parámetros de las distribuciones utilizando factores de escala.

La regionalización se apoya en el concepto fundamental de homogeneidad hidrológica en una región, es decir dividir la zona de estudio en regiones cuyas características topográficas, climáticas, orográficas, etc., sean similares (homogeneidad estadística). Utilizando éste concepto, se han desarrollado diferentes métodos entre ellos la Regionalización de Características Medias de la Cuenca, encaminada a regionalizar parámetros que permitan calcular eventos máximos para diferentes períodos de retorno en sitios donde no se tiene información de este tipo y se dispone de variables geomorfoclimáticas de apoyo, fácilmente medibles.

En este estudio se muestra de forma general el planteamiento matemático de la Regionalización de las Características Medias de la Cuenca; para este caso en particular la precipitación y la evaporación, éstas y el área de drenaje con la media y la desviación estándar de los caudales máximos son las variables de interés.

2. Información y aspectos metodológicos

La información de caudales máximos utilizada en el estudio fue suministrada principalmente por el IDEAM, la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (Boletín Hidrológico 1991-1992), Empresas Públicas de Medellín y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, disponibles de trabajos desarrollados anteriormente en el Posgrado de Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Para obtener mayor ilustración acerca del manejo a que fueron sometidos los registros de caudales máximos y del proceso de selección, ver Giraldo y Quevedo, (2001). Finalmente, fueron seleccionadas 241 estaciones con registros de caudales medios multianuales y máximos instantáneos anuales

2.3 Regionalización de Características Medias

El objetivo de la regionalización de los parámetros es inferir la respuesta hidrológica de la cuenca a partir de sus características geomorfológicas. Existen relaciones entre las variables hidrológicas y los parámetros morfométricos, las cuales dan una idea del comportamiento general de estas variables: Gran parte de las características físicas de las cuencas se deben a la acción del agua, por lo que es lógico pensar en una fuerte relación determinística entre las características morfométricas de la cuenca y las variables que describen el comportamiento hidrológico de la misma.

Siguiendo el procedimiento de Regionalización de las Características Medias, es posible relacionar las características geomorfológicas y climáticas de una cuenca sin información con las características medias de los caudales máximos instantáneos. Una vez conocidas estas características medias se pueden estimar caudales máximos instantáneos asociados a diferentes periodos de retorno utilizando las distribuciones de probabilidad Log-Normal y Gumbel. El procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Se definen regiones que puedan tener un comportamiento hidrológico similar ya que en Colombia, se tiene alta variabilidad topográfica, de vegetación, de tipo de suelos, climatológica, etc. y es muy común encontrar que una corriente determinada, cruce una o más regiones donde estas características varían ampliamente. Las subregiones consideradas para esta metodología son las siguientes: Guajira y Sierra Nevada, Cuenca del Río Cesar y Llanura del Caribe, Sinú y Urabá, Catatumbo, Magdalena Medio, Alto Magdalena, Nechí, Cañón del Cauca, Atrato, Pacífico, Valle del Cauca, Sogamoso, Orinoquía y Amazonía.
2. Selección de las estaciones limnigráficas con un número adecuado de años con registros e información confiable. Para cada una de ellas se calculan las características medias de los caudales máximos instantáneos (particularmente la media y la desviación estándar).
3. Para cada una de las cuencas definidas por las estaciones de aforo se miden los parámetros geomorfológicos y se estiman las características climáticas medias como son la precipitación, temperatura, etc.
4. Utilizando procedimientos de regresión múltiple se seleccionan las variables geomorfológicas y climáticas que mayor influencia tienen sobre la variable dependiente (las características medias de los caudales máximos instantáneos). La ecuación resultante para cada subregión es de la forma

$$\xi_{Q_M} = K_{\xi} A^{\alpha_{\xi}} B^{\beta_{\xi}} \quad (1)$$

Donde ξ es el parámetro de la distribución que se quiere ajustar, A y B representan las variables climáticas y geomorfológicas de la cuenca escogidas para realizar el ajuste y K_{ξ} , α_{ξ} y β_{ξ} son calculados con el ajuste.

5. En las cuencas sin información, previamente se calculan los valores de las variables requeridas por la ecuación de regionalización y luego se estiman los parámetros de la distribución de caudales utilizando (1).

Siguiendo este proceso, el interés se centró en la estimación de los parámetros de la ecuaciones que determinan el caudal máximo medio μ y la desviación estándar σ , necesarios para el cálculo de caudales máximos para diferentes períodos de recurrencia por medio de las ecuaciones de análisis de frecuencia (*Chow, 1994*).

Sea \bar{Q} el caudal medio multianual dado por la ecuación del balance hídrico (*Vélez, Poveda y Mesa, 2000*)

$$\bar{Q} = C(P - E)A \quad (2)$$

Donde P es la precipitación y E la evaporación media multianual sucedidas en una cuenca de área A , dadas en $[mm/año]$ y $[km^2]$, respectivamente. La constante C es la encargada de realizar la

conversión de unidades que, para pasar a m^3/s , tiene un valor de $3.17E-05$. Para cada una de las estaciones de medición de caudales se estimó el valor de $P-E$ dentro de la cuenca utilizando (3)

$$P-E = \frac{\bar{Q}}{CA} \quad (3)$$

Buscando relacionar los parámetros de las distribuciones de los caudales máximos instantáneos y las variables geomorfológicas y climáticas de la cuenca, el posible vínculo entre éstos, los caudales medios multianuales y el área de la cuenca tiene la siguiente

$$\xi = K_{0\xi} \bar{Q}^{\theta_{0\xi}} A^{\phi_{0\xi}} \quad (4)$$

Donde ξ representa el parámetro estadístico de las series que se quiere estimar (en este caso, la media y la desviación estándar) y K , θ y ϕ son resultado de la regresión. Utilizando (2) es posible relacionar ξ con $P-E$

$$\xi = K_{\xi} (P-E)^{\theta_{\xi}} A^{\phi_{\xi}} \quad (5)$$

Donde los parámetros han sido recalculados de la siguiente manera

$$\begin{aligned} K_{\xi} &= C^{\theta_{0\xi}} K_{0\xi} \\ \theta_{\xi} &= \theta_{0\xi} \\ \phi_{\xi} &= \phi_{0\xi} + \theta_{0\xi} \end{aligned} \quad (6)$$

Se estimaron mediante procedimientos de regresión múltiple se los valores de θ y ϕ tanto para la media como para la desviación estándar para llegar a las siguientes expresiones

$$\mu = K_{\mu} (P-E)^{\theta_{\mu}} A^{\phi_{\mu}} \quad (7)$$

$$\sigma = K_{\sigma} (P-E)^{\theta_{\sigma}} A^{\phi_{\sigma}} \quad (8)$$

El escalado de los momentos se puede inferir a través de las siguientes expresiones

$$\begin{aligned} E[X] &= K_{\mu} (P-E)^{\theta_{\mu}} A^{\phi_{\mu}} \\ \sqrt{\text{Var}[X]} = \sigma[X] &= K_{\sigma} (P-E)^{\theta_{\sigma}} A^{\phi_{\sigma}} \\ \text{Var}[X] &= E[X^2] - (E[X])^2 \end{aligned} \quad (9)$$

De (9), se deduce fácilmente la expresión para el segundo momento

$$E[X^2] = \text{Var}[X] + (E[X])^2 = K_{\sigma}^2 (P-E)^{2\theta_{\sigma}} A^{2\phi_{\sigma}} + K_{\mu}^2 (P-E)^{2\theta_{\mu}} A^{2\phi_{\mu}} \quad (10)$$

La estructura de la metodología considera la variabilidad con la escala de los caudales máximos. Para visualizar más fácil esta característica considérese el coeficiente de variación C_v para cada una de las subregiones

$$C_V = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{K_\sigma (P-E)^{\theta_\sigma} A^{\phi_\sigma}}{K_\mu (P-E)^{\theta_\mu} A^{\phi_\mu}} = \frac{K_\sigma}{K_\mu} (P-E)^{\theta_\sigma - \theta_\mu} A^{\phi_\sigma - \phi_\mu} \quad (11)$$

En (11) se observa que el coeficiente de variación de los caudales no es constante y depende de la escala y de la ubicación dentro de la subregión. Una característica importante es que $\phi_\mu > \phi_\sigma$ para todas las subregiones, entonces C_V decrece a medida que crece el área de drenaje. Esto indica que la variabilidad espacial de los caudales es menor a medida que aumenta la escala.

Utilizando $Q_{Tr} = Q_{max\mu} + K_{Tr} Q_{max\sigma}$, y los parámetros K , θ y ϕ , tanto para la media como para la desviación estándar, se estiman entonces los caudales máximos instantáneos.

3. Resultados y análisis

En la tabla (1) se muestran los resultados obtenidos para las regresiones en las respectivas subregiones contempladas para este método. El comportamiento para algunas subregiones es más claro en las figuras (1) y (2), donde \diamond representan los valores reales para la media y la desviación estándar, y $+$ los valores estimados utilizando las ecuaciones de regionalización para las subregiones respectivas.

Tabla 1 Parámetros ajustados para (7) y (8)

Subregión	K_μ	θ_μ	ϕ_μ	R	K_σ	θ_σ	ϕ_σ	R
Orinoquía	0.0012	1.098	0.671	0.96	0.0021	1.031	0.499	0.91
Amazonía	0.0006	1.045	0.780	0.98	0.0015	0.913	0.603	0.93
Pacífico	0.0053	0.905	0.656	0.96	0.0202	0.623	0.581	0.86
Atrato	0.0005	1.052	0.697	0.99	0.0196	0.685	0.371	0.93
Sogamoso	0.0039	0.755	0.837	0.98	0.123	0.498	0.767	0.97
Mag. Medio	0.0176	0.657	0.735	0.95	0.1046	0.490	0.490	0.75
Alto Magdalena	0.0709	0.440	0.756	0.95	0.2810	0.211	0.620	0.87
Caribe	0.2069	0.436	0.604	0.98	2.3310	0.231	0.331	0.92
Guajira - S. N.	0.4849	0.521	0.398	0.79	2.9310	0.412	0.121	0.38
Sinú y Urabá	0.0228	0.763	0.581	0.90	0.3175	0.546	0.231	0.56
Catatumbo	0.0001	1.453	0.675	0.98	0.0004	1.295	0.505	0.90
Nechí	0.0008	1.009	0.758	0.92	0.0002	1.213	0.561	0.89
C. del Cauca	0.157	0.659	0.718	0.98	0.0796	0.508	0.508	0.94
V. del Cauca	0.3542	0.303	0.610	0.94	0.4035	0.235	0.490	0.82
Colombia	0.0120	0.719	0.720	0.95	0.0947	0.433	0.547	0.85

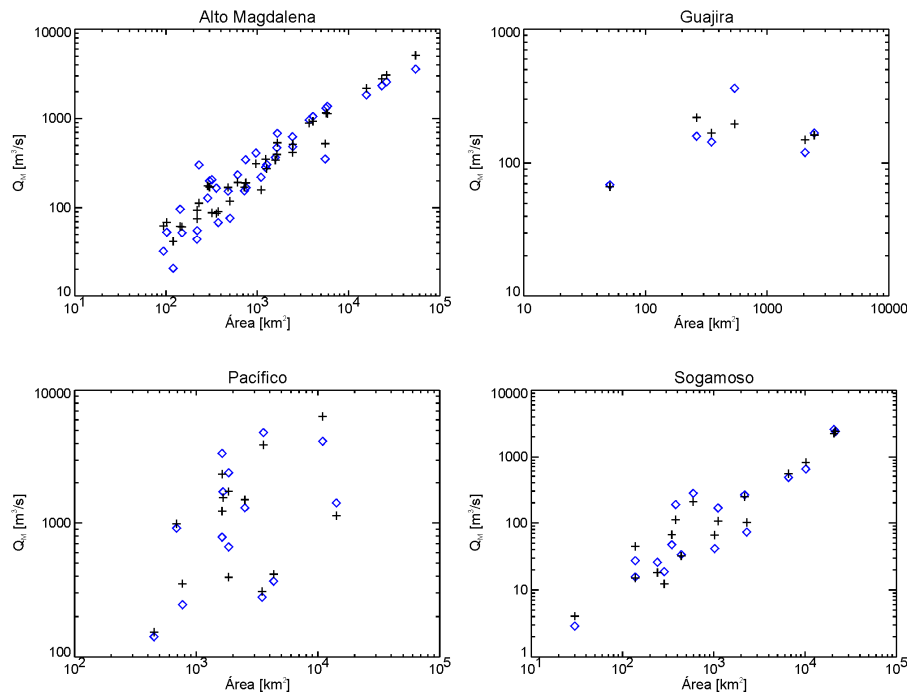


Figura 1 Caudales máximos medios estimados (+). Caudales reales (◇)

Las subregiones de la Guajira y Sinú - Urabá presentan los valores del coeficiente de correlación más bajos para ambos ajustes. En estas subregiones se tienen serios problemas con la cantidad y calidad de la información; sin embargo, apartándose de este condicionamiento, en estas subregiones el crecimiento del parámetro no es lineal log-log con el área, como sucede en las otras regiones. Esta tendencia de los caudales refleja las características físicas de cada una de las subregiones; posiblemente el comportamiento de los caudales máximos está fuertemente determinado por la relación entre la evaporación y la precipitación (en las subregiones de La Guajira y Sinú - Urabá se evaporará más del 80% del agua que cae en forma de lluvia) y las condiciones del suelo.

En las subregiones del Pacífico y Atrato los caudales tienen una influencia importante de la relación entre P y E ; en estas subregiones la precipitación está vinculada con la topografía, es así como las estaciones con cotas más bajas y mayores precipitaciones tienen caudales máximos medios mayores que las estaciones más elevadas, sin importar que tengan áreas similares. Esta misma situación se repite en la Orinoquía, donde las estaciones con áreas más pequeñas se ubican muy cerca del piedemonte de la Cordillera Oriental, donde la precipitación tiene una componente orográfica importante.

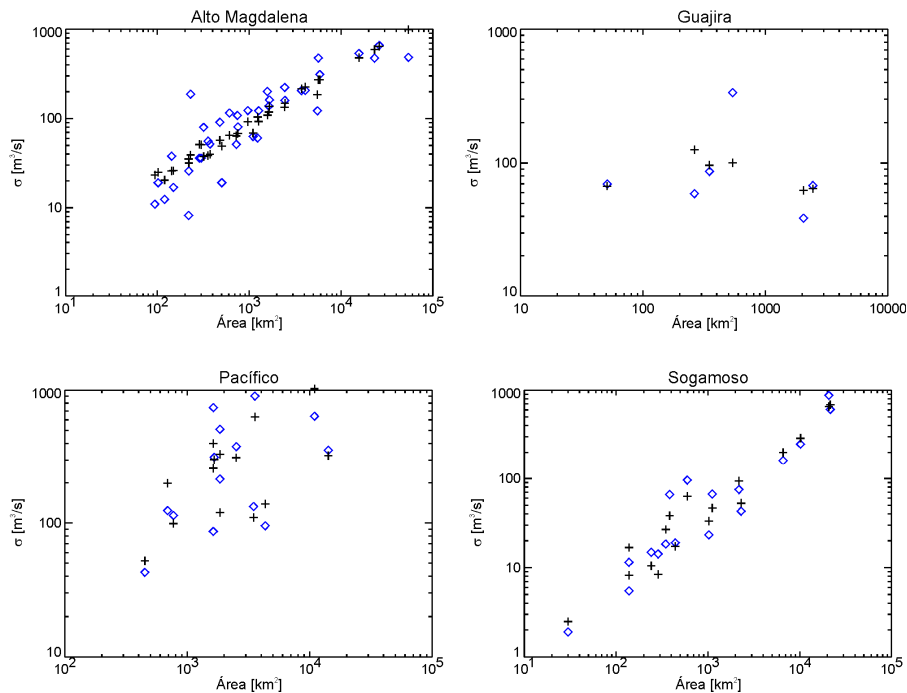


Figura 2 Desviación estándar de los caudales máximos (+). Caudales reales (◇)

Para ambas regresiones la subregión del Catatumbo presenta una influencia muy marcada de la diferencia entre P y E , lo cual se ve reflejado en altos valores de los exponentes θ_μ y θ_σ . En general, si se asumen los exponentes calculados para Colombia como los promedios, el escalado de las características medias de los caudales máximos con el área es bastante homogéneo para todas las subregiones del país, excepto para la Guajira y Sinú - Urabá, donde los exponentes están bastante alejados de los reportados en la literatura. En estas subregiones la climatología es heterogénea y tiene una importante influencia en el comportamiento de los caudales máximos.

Los resultados de la predicción de los momentos según el método de Regionalización de Parámetros está en la figura (3), donde las subregiones más heterogéneas en su comportamiento hidrológico presentan momentos que no son lineales log-log con el área (en la gráfica, Pacífico y Guajira), pero que el método, incluyendo $P-E$ como parámetro de la cuenca, predice bastante bien. Subregiones como Sogamoso y Alto Magdalena muestran un comportamiento lineal entre el logaritmo de los momentos y de las áreas.

Finalmente, se calculan los caudales máximos instantáneos asociados a diversos períodos de retorno en cuencas sin información; es importante el conocimiento de las características hidrológicas de la región al momento de escoger la distribución de probabilidades y los valores respectivos de K_{Tr} , dada la sensibilidad de los estimados con probabilidades de excedencia más bajas a este parámetro.

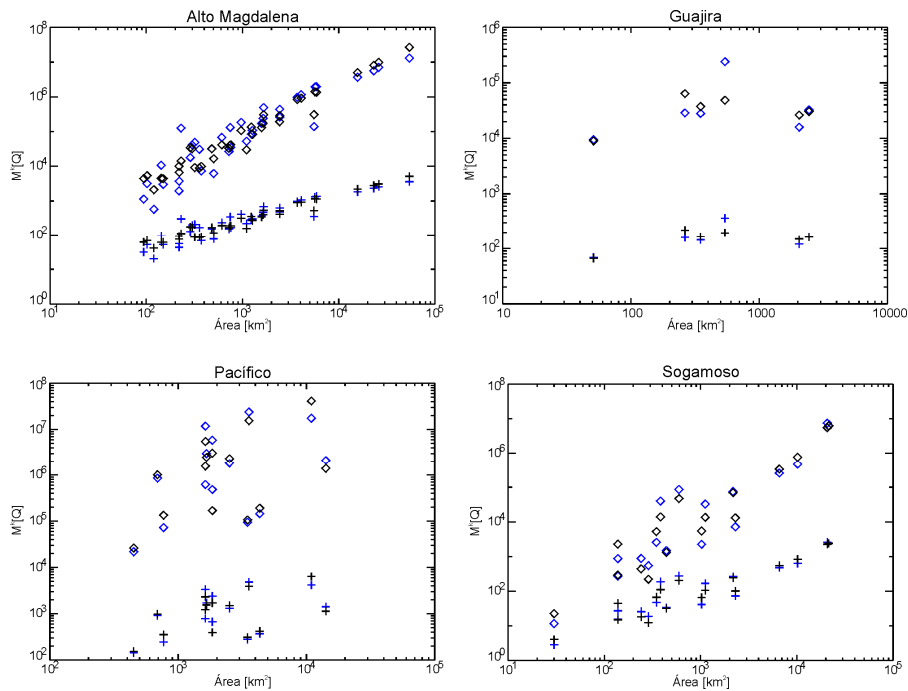


Figura 3 Predicción de los momentos de primer y segundo orden; (azul) Reales, (negro) Estimados

La validación del método se efectuó graficando Q_{Real} vs $Q_{Estimado}$ para cada período de recurrencia en todas las subregiones. En la figura (4) se presentan los resultados obtenidos para los Tr de 2.33 y 100 años en la subregión del Alto Magdalena; en la misma figura el histograma de errores relativos ilustra el comportamiento de éstos y su magnitud para los períodos de retorno considerados, utilizando las mismas marcas de clase en todos los casos. De manera particular para esta subregión, el error promedio más bajo se presenta en los estimados para un periodo de retorno de 5 años, mientras que para el periodo de retorno de 100 años el error porcentual medio es más alto.

En general, el comportamiento del error medio es creciente con el período de retorno, excepto para las subregiones del Nechí y el Cañón del Cauca, donde los errores medios calculados para $Tr=100$ años son sensiblemente menores que los calculados para $Tr=2.33$ años. La tabla (2) contiene los errores medios calculados en cada una de las subregiones para cada periodo de retorno.

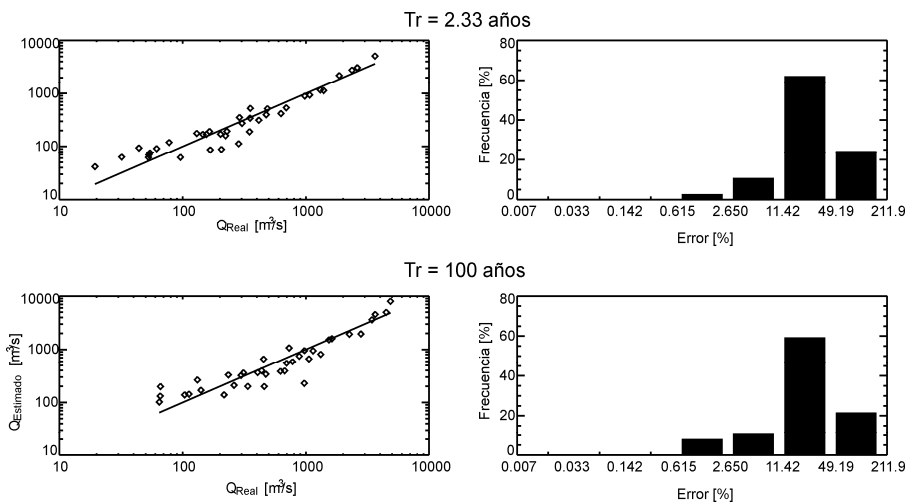


Figura 4 $Q_{Estimado}$ vs. Q_{Real} (izq.). Histograma de Frecuencia de Errores Relativos (der). Subregión Alto Magdalena

Tabla 2 Error porcentual medio para diferentes períodos de retorno

Subregión	Tr [años]					
	2.33	5	10	25	50	100
Orinoquía	35.88	36.73	36.87	37.31	36.82	36.03
Amazonía	15.64	18.70	20.21	21.59	22.94	23.01
Pacífico	25.89	26.08	25.64	26.65	27.45	28.42
Atrato	10.52	11.07	11.61	12.23	12.76	13.23
Sogamoso	28.53	28.17	27.91	28.74	27.36	30.59
Magdalena Medio	30.38	31.51	34.55	37.67	39.47	40.87
Alto Magdalena	33.15	32.95	33.88	34.50	35.61	36.85
Caribe	21.97	20.17	18.31	18.67	20.04	22.27
Guajira	20.29	27.00	29.04	31.99	34.77	44.75
Sinú-Urabá	35.35	38.92	41.34	43.86	45.43	47.87
Catatumbo	13.17	17.18	19.52	22.09	23.68	26.28
Nechí	42.10	38.31	36.04	34.30	34.89	31.77
Cañón del Cauca	28.01	18.52	14.36	14.92	15.01	16.51
Valle del Cauca	33.34	36.75	39.61	43.89	44.91	50.63
Colombia	40.36	40.97	41.64	43.07	43.25	43.71

4. Conclusiones

En la regionalización de parámetros medios, parece que el área de drenaje no es suficiente como descriptor de las cuencas en

Colombia. La amplia diversidad de zonas climáticas y su combinación en las cuencas más grandes, como la del río Magdalena, hace conveniente la utilización de parámetros climáticos para caracterizar las características medias de los caudales máximos. Un ejemplo muy claro de esta situación se da en la región de la Guajira, donde los caudales máximos medios no crecen de manera lineal log-log con el área; los ríos de montaña que bajan de la Sierra Nevada de Santa Marta son torrenciales y presentan crecientes muy grandes, pero al entrar en la llanura desértica los procesos de infiltración disminuyen la magnitud de dichos escurrimientos. Las variables geomorfoclimáticas precipitación, evaporación y área de drenaje, constituyen unos buenos parámetros para estimar las características medias de los caudales máximos. Estas combinadas con el Método de Análisis de Frecuencia, entrega resultados satisfactorios, lo que se refleja en que los errores para todas las subregiones y período de recurrencia de 100 años no excede el 51%.

Los exponentes de escalado del área para la desviación estándar son siempre menores que los correspondientes para la media de los caudales máximos. La variabilidad espacial de los caudales, representada por el coeficiente de variación C_v , decrece a medida que aumenta el área de la cuenca. Esta característica de decrecimiento en la variabilidad de los caudales también es precedida por el método del multiescalamiento para las cuencas grandes.

El método de Regionalización de Parámetros es de fácil aplicación, con requerimientos de información más flexibles que los del multiescalamiento. La división en subregiones fue más detallada para este método, lo que permitió que los estimados fueran mejores dado que se cumplieron mejor las condiciones de homogeneidad hidrológica dentro de las subregiones.

Se recomienda utilizar en Colombia el método de Regionalización de Parámetros. Además de ser un método fácil respeta la variabilidad climática del país y las propiedades de escalado con el área de los caudales máximos.

5. Referencias bibliográficas

BATES, B. C. & BURGESS, S. J., *Review of regional Flood Frequency Estimation Techniques*

CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R. & MAYS, L.W., *Hidrología Aplicada*, McGraw Hill, 1a ed., Santafé de Bogotá, 1994, pags 391-406

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, *Boletín Hidrológico 1991-1992*

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES IDEAM, *Estadísticas Hidrológicas de Colombia 1990-1993*, Tomos I y II, Santafé de Bogotá, 1995

GIRALDO, J. D. Y QUEVEDO, D. I., *Adaptación del Método de Multiescalamiento para la Estimación de Caudales Máximos en Colombia*, Trabajo dirigido de grado presentado como requisito

parcial para optar por el título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil, Medellín, 2001

SMITH, R, Y VÉLEZ, M. V., *Hidrología de Antioquia*, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Medellín, 1997, pags 24-27, 30-33, 57-72, 118-119, 145-148

VÉLEZ, J. I., POVEDA, G. Y MESA, O. J., *Balances Hidrológicos de Colombia*, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2000, pags 6-8

<http://poseidon.unalmed.edu.co/hidrosig>