

Modelos regionales de escurrimientos máximos instantáneos en la república mexicana

• Ramón Domínguez-Mora • Maritza L. Arganis-Juárez* •
• Humberto Guzmán-García • Eliseo Carrizosa-Elizondo •
• Gabriela Esquivel-Garduño • Guadalupe E. Fuentes-Mariles •
Universidad Nacional Autónoma de México

*Autor para correspondencia

Resumen

Domínguez-Mora, R., Arganis-Juárez, M. L., Guzmán-García, H., Carrizosa-Elizondo, E., Esquivel-Garduño, G., & Fuentes-Mariles, G. E. (septiembre-octubre, 2016). Modelos regionales de escurrimientos máximos instantáneos en la república mexicana. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 15-32.

En este artículo se presenta un nuevo procedimiento para la regionalización de los escurrimientos máximos instantáneos registrados en estaciones hidrométricas de las 37 regiones hidrológicas en la que se encuentra dividida la república mexicana. Las estaciones hidrométricas seleccionadas se caracterizan por medir escurrimientos de cuencas no influenciadas por la presencia de embalses o lagos de regulación. La relativa simplicidad del método permite aplicarlo en el caso de cuencas con escasa información hidrométrica, pero que cuenten con datos de precipitaciones máximas anuales, y con características fisiográficas y cinemáticas medibles, entre ellas área de la cuenca y tiempo de concentración, además de retención potencial máxima para caracterizar pérdidas. Se utiliza la media de los gastos máximos anuales (MQMIA) como concepto eje, de tal manera que al relacionarlo con características medibles en cualquier cuenca (área, tiempo de concentración, promedio espacial de la media de precipitaciones máximas anuales, retención potencial máxima), es posible estimarla de forma sencilla, aun para cuencas no aforadas; por otro lado, se agrupan estaciones homogéneas en cuanto al comportamiento estadístico de los gastos máximos anuales, para estimar factores que permiten pasar del valor de la MQMIA al correspondiente a distintos periodos de retorno.

Palabras clave: regionalización, algoritmos genéticos, escurrimiento superficial, media de los gastos máximos anuales.

Abstract

Domínguez-Mora, R., Arganis-Juárez, M. L., Guzmán-García, H., Carrizosa-Elizondo, E., Esquivel-Garduño, G., & Fuentes-Mariles, G. E. (September-October, 2016). Regional Models for Instant Maximum Annual Flows in Mexican Republic. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 7(5), 15-32.

A new procedure for maximum annual floods regionalization in hydrometrical stations belonging to 37 hydrologic regions of the Mexican Republic is introduced in this study. The selected stations measures runoff of basins free of reservoirs or regulation lakes upstream. The relative method's simplicity allows its application in case of ungauged basins but they must have rainfall records and measurable physiographic and kinematic characteristics, for example the drained area, concentration time, besides the maximum potential soil moisture to consider the lost. The annual maximum mean inflows (MQMIA) were used as axis concept, such that relating it with measured characteristics in any basin (drained area, concentration time, annual maximum spatial mean rainfall, maximum potential soil moisture) to estimate MQMIA in a simple way is possible, even for ungauged basins; on the other hand homogeneous stations are clustered taking into account the statistical behavior of the annual maximum runoff, to get factors that transforms the value of the historical MQMIA to that one corresponding to different return periods.

Keywords: Regionalization, genetic algorithms, surface runoff, annual maximum mean inflows.

Recibido: 15/06/2015
Aceptado: 09/09/2015

Introducción

En la república mexicana, la información climatológica es considerablemente mayor que la hidrométrica. En 2012, México contaba con 3 817 estaciones climatológicas oficiales operadas por la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE), mientras que las estaciones hidrométricas con registro son 2 226 de las cuales se seleccionaron 309 con 20 o más años de registro, y cuyo funcionamiento no está alterado con obras hidráulicas (Conagua, 2014a).

La estimación de valores máximos del escurrimiento con fines de estudios hidrológicos es un importante problema por resolver. El análisis regional permite hacer agrupaciones de sitios con comportamiento hidrológico estadísticamente similar (escurrimientos, precipitaciones), con lo que se logra la construcción de registros lo más grandes posibles para obtener una función de distribución de probabilidades de toda la zona considerada (Domínguez et al., 2012). Por otra parte, al relacionar estos resultados con las características fisiográficas y de precipitación de las cuencas, es posible deducir datos en sitios con escasa o nula información a partir de los obtenidos en los sitios aforados (Domínguez, Arganis, González, Carrizosa, & Guzmán, 2013).

En distintas partes del mundo se han llevado a cabo estudios de regionalización basados en diversas técnicas para agrupar cuencas, tomando en cuenta datos medidos, así como características fisiográficas, y datos de uso de suelo y climatológicos; entre ellos resaltan los trabajos de Domínguez (1983), quien propuso modificaciones a las ecuaciones de estimación del gasto a partir de características fisiográficas del *Flood Studies Report* (1975), documento valorado también por Hosking, Wallis y Wood (1985); por otra parte, Gottschalk (1985), y Nathan y McMahon (1990), identificaron cuencas regionalmente homogéneas en Suecia y Australia, respectivamente, a partir del análisis de los escurrimientos, usando estudios de componentes principales y regresiones no lineales múltiples; otros modelos

de regionalización basados en técnicas estadísticas y relaciones de tipo no lineales potenciales, análisis multivariado y manejos de sistemas de información geográfica, así como validación de metodologías de regionalización son los de Domínguez (1981); Carrizosa (1997); Allasia y Avruch (2000); Erazo (2004); Cabrera, Guardado, Peláez y González (2004); Azevedo, Demetrius y Reis (2008); Zamanillo (2008); Isik y Singh (2008); Ganancias (2010); Olguín, Rivera y Salas (2011); Luna y Domínguez (2013), y Byzedi, Saghafian, Mohammandi y Siosemarde (2014).

En este trabajo se presenta un procedimiento para obtener funciones que determinan la media del gasto máximo instantáneo anual (MQMIA) para las cuencas de una región, en función de sus características fisiográficas fácilmente medibles y de datos de precipitación. Estos resultados pueden ser aplicables después en sitios de la región que no cuenten con información de escurrimientos, pero que sí se pueden describir a partir de su fisiografía y precipitación.

Además, tomando en cuenta la similitud en las características estadísticas de los gastos máximos registrados en grupos de cuencas, se desarrolló un análisis regional que permite determinar eventos asociados con distintos periodos de retorno mediante factores regionales que multiplican a la MQMIA de las estaciones hidrométricas de cada grupo.

Metodología

Extracción de gastos instantáneos y de gastos medios diarios

La fuente oficial de datos medidos por las estaciones hidrométricas en México se encuentra en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua y del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (Conagua, 2014a); dicha base de datos cuenta con archivos con nombre "concepto regiónclaveestación.dbf" de los que se extraen los registros para los gastos máximos instantáneos (concepto HD) y para los gastos

medios diarios (concepto DD). Se elaboró un programa codificado en Visual Basic© para la conversión de estos archivos del BANDAS a archivos de un hoja de cálculo Excel©, y que además realiza el cálculo de los gastos medios máximos para distintas duraciones y los estadísticos media, desviación estándar, variancia y coeficiente de asimetría. A dichos archivos se les inserta el registro de gastos máximos instantáneos, también obtenido con un programa desde los archivos del BANDAS. Después se realizan comparaciones entre los valores de los gastos máximos instantáneos con respecto a los gastos medios máximos de un día, y en los casos que se observen mayores los medios diarios que los instantáneos, se opta por eliminar el dato o bien se revisa la información de gastos máximos mensuales (concepto DM), que en muchas ocasiones incluye valores máximos no incluidos en el concepto HD. Por último, cuando subsiste la duda y el valor correspondiente puede ser importante, se recurre a conseguir la información original.

Cálculo de estadísticos de los gastos máximos instantáneos

Se determinan la media, variancia, desviación estándar y coeficiente de variación, además del valor máximo y mínimo del registro de gastos máximos instantáneos.

Cálculo de los atributos correspondientes a cada cuenca

Área drenada

El valor del área drenada se obtiene de la descripción de estaciones hidrométricas del BANDAS de la Conagua por ser la fuente oficial de la nación. En los casos en que no se cuenta con la información, el área drenada (figura 1) se calcula a partir de una herramienta digital del tipo Arcmap© o Arcview©, ubicando a la estación hidrométrica con sus coordenadas geográficas y utilizando la extensión GeoHMS©. En este estudio se calcularon las áreas drenadas de

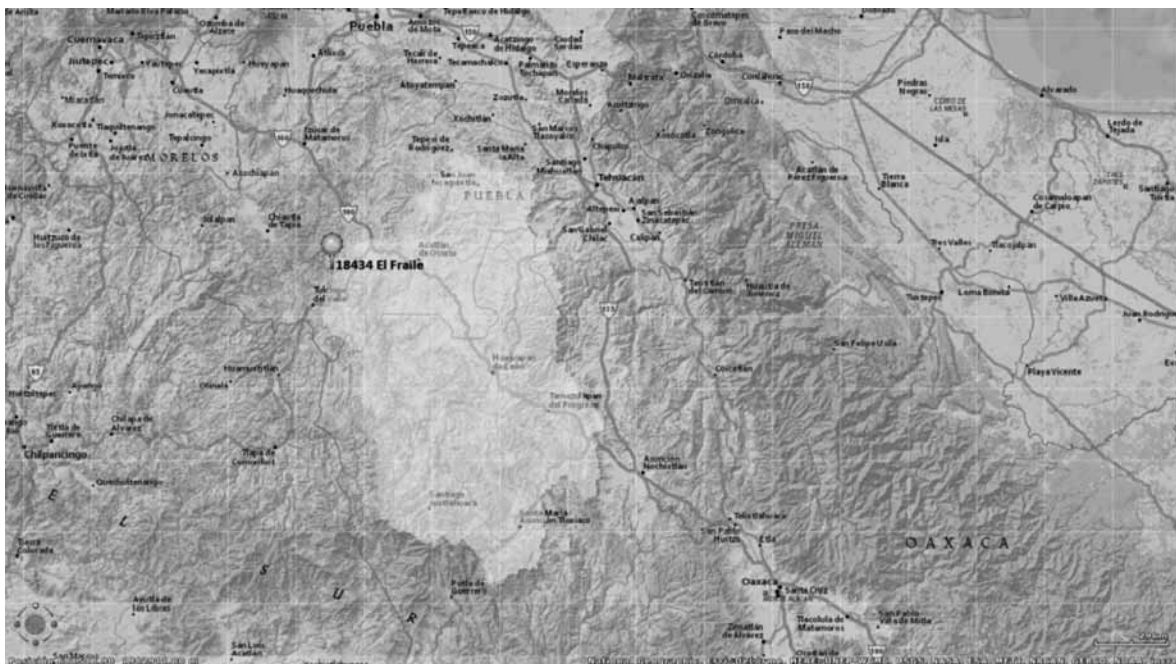


Figura 1. Área drenada. Ejemplo de la estación hidrométrica 18434 El Fraile.

todas las estaciones consideradas y el resultado se verificó con el que proporciona BANDAS, de manera que si se obtenían diferencias importantes, se utilizaron los valores obtenidos con Arcview©.

Tiempo de concentración

El tiempo de concentración (tc) se determina con la longitud (L) y pendiente del cauce principal (S), con la ecuación experimental de Kirpich (Aparicio, 2012):

$$tc = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (1)$$

Donde tc en h, L en m y S en decimales es determinada con el método de la pendiente media.

Precipitación media hp

Se identifican las estaciones climatológicas ubicadas dentro o cerca de la cuenca asociada con cada estación hidrométrica analizada; se calcula la media de las precipitaciones diarias máximas anuales para cada estación climatológica y se obtiene su promedio espacial.

Número de escurrimiento N y retención potencial máxima S

El número N se determina con el tipo y uso de suelo a partir de los cuadros del US Soil Conservation Service. A partir del número de escurrimiento se obtiene el espesor de suelo S (infiltración potencial máxima). En Domínguez et al. (2008) se puede encontrar en forma detallada la determinación de S , dada por la ecuación (2):

$$S = \frac{2540 - ((25.4 \times N))}{N} \quad (2)$$

Donde N es el número de curva y S es el espesor de suelo que corresponde a la retención potencial máxima, en cm.

De la ecuación (2) se observa que el número de curva N depende de un solo parámetro y

de acuerdo con Paz et al. (2010), esta particularidad lo hace atractivo para usar N como un método hidrológico operacional; en este estudio se utilizó la retención potencial máxima como parámetro de caracterización de las pérdidas al escurrimiento.

Agrupación de regiones

Se consideran primero cada una de las 37 regiones hidrológicas señaladas por la Conagua (figura 2).

Enseguida, se construyen gráficas de las áreas drenadas contra la media de los gastos máximos instantáneos anuales MQMIA de las estaciones hidrométricas de cada región hidrológica (o grupo de regiones hidrológicas) para establecer grupos de estaciones, con base en si sus valores de MQMIA están por arriba, por abajo o casi sobre la curva de ajuste (figura 3).

También es de utilidad para verificar la agrupación, analizar la ubicación espacial de las estaciones en esquemas topológicos, como el de la figura 4, a los que se les añade el coeficiente de variación, para observar la homogeneidad de los grupos. En el caso de la región 20, la figura muestra que la agrupación obedece al tipo de escurrimiento: si es del grupo 1, se trata de una corriente principal; el grupo 2 corresponde a ramales secundarios, y el grupo 3 a ramales terciarios.

Registros normalizados para cada grupo de estaciones hidrométricas

Los datos anuales del gasto máximo de cada estación hidrométrica se dividen entre su media y por cada grupo de estaciones hidrométricas se forma un solo registro con todos los datos normalizados, el cual se trabaja como una serie anual.

Análisis estadístico de series normalizadas

La serie anual formada por los datos normalizados de cada grupo de hidrométricas se analiza estadísticamente, ordenándolos de mayor a menor; se obtiene su periodo de retorno con

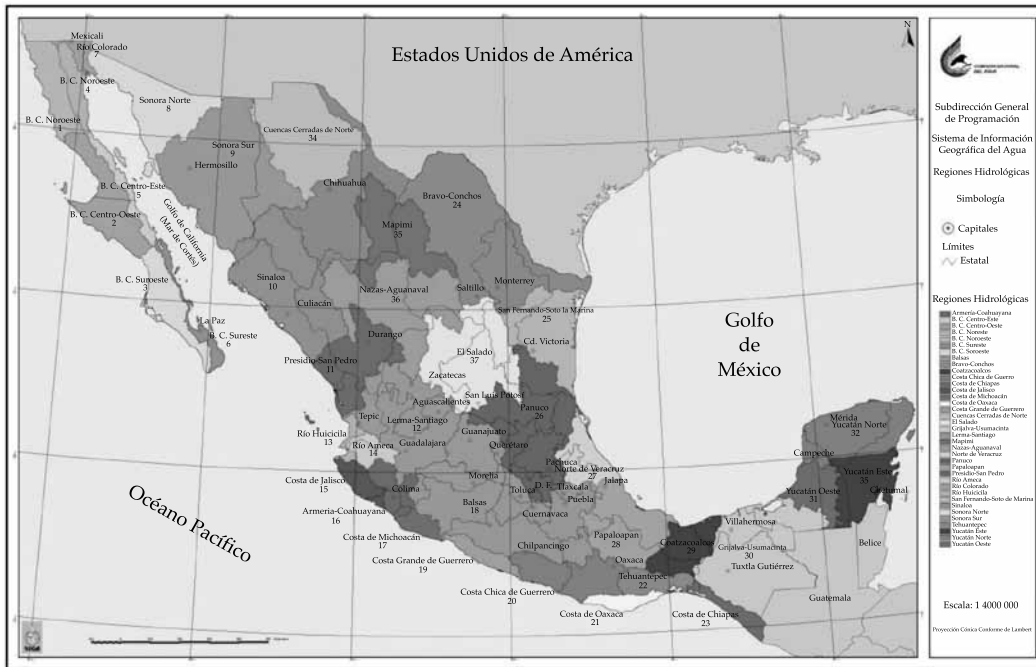


Figura 2. División del país en 37 regiones hidrológicas. Fuente: Conagua, 2014b.

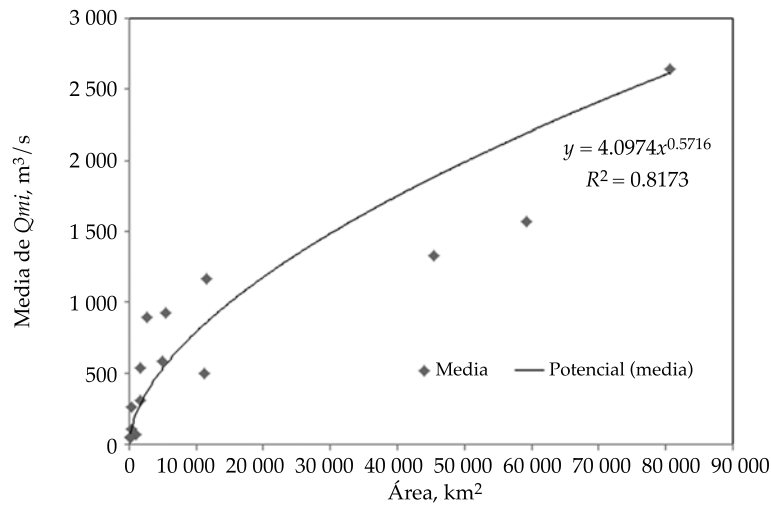


Figura 3. Ejemplo de gráfica de la MQMIA vs. el área drenada (RH18).

una ecuación empírica (en este caso se usó la de Weibull; Aparicio, 2012) y se hace el ajuste con distintas funciones de distribución, de las cuales se selecciona aquella que proporciona el

mejor ajuste. Con la función de distribución de mejor ajuste se calculan valores de los gastos máximos instantáneos normalizados para distintos periodos de retorno.

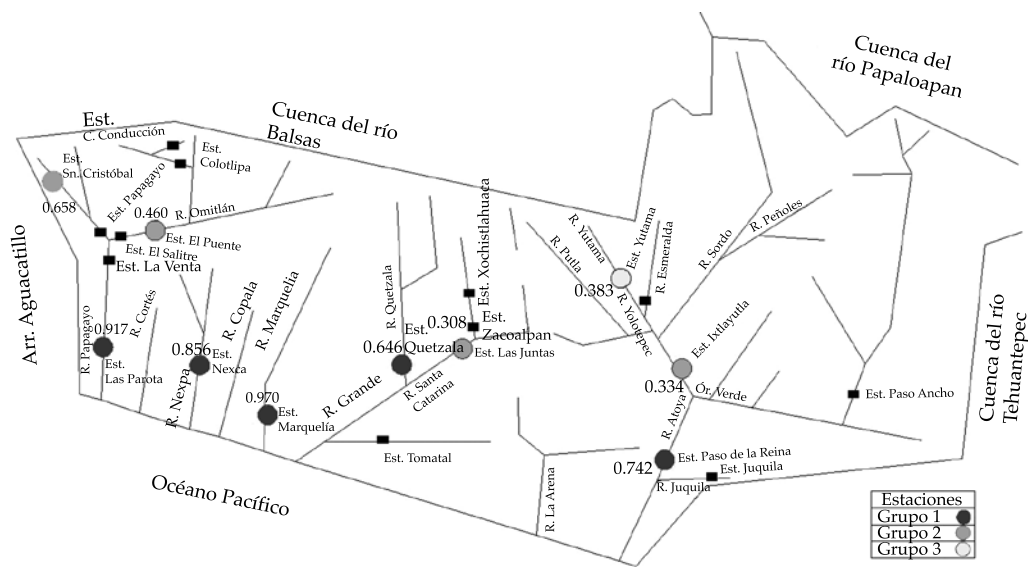


Figura 4. Ubicación de los grupos de hidrométricas. Ejemplo de una porción de la RH20.

Los valores así obtenidos para cada grupo de estaciones hidrométricas constituyen factores normalizados, de tal manera que al multiplicarlos por la MQMIA de cada estación hidrométrica del grupo correspondiente se obtiene una estimación regional de gastos máximos para distintos periodos de retorno.

Debido a que las muestras de cada grupo contienen muchos más elementos que cuando se trabaja con cada estación por separado, los resultados del análisis descrito permiten una estimación confiable de los gastos de diseño para las estaciones hidrométricas usadas en el análisis o para algunas otras que no fueron utilizadas porque su registro es corto, pero que puede considerarse suficiente para estimar la media (p. ej., cuando dicho registro es de entre 15 y 20 años). En los sitios sin registro histórico se requiere un procedimiento alternativo para estimar la media, como el que se describe a continuación.

Curvas regionales para estimar la MQMIA

Se proponen modelos no lineales de tipo potencial como los de las ecuaciones (3), (4) y (5):

$$MQMIA = C1A^{C2} \quad (3)$$

$$MQMIA = C1A^{C2}tc^{C3} \quad (4)$$

$$MQMIA = C1V^{C2}tc^{C3}S^{C4} \quad (5)$$

Donde MQMIA es la media de los gastos máximos anuales obtenida para cada estación hidrométrica de la región o grupo de regiones considerada, en m^3/s ; A , el área de la cuenca, en km^2 ; tc , el tiempo de concentración en h ; V , un indicador del volumen de precipitación en la cuenca, obtenido al multiplicar el área (km^2) por la precipitación hp (mm) (determinada como el promedio en la cuenca de la media de las precipitaciones diarias máximas anuales. El valor correspondiente a dicha precipitación, así como los valores asociados con distintos periodos de retorno y duración pueden consultarse en Domínguez, Carrizosa, Fuentes, & Galván, 2010, en la que se usó la información de poco más de dos mil estaciones pluviométricas con más de 20 años de registro), y S es la retención potencial máxima del suelo en cm .

Se determinan los parámetros $C1$, $C2$, $C3$ y $C4$ de los modelos (3), (4) y (5); para ello se

utilizaron algoritmos genéticos que son herramientas del cómputo evolutivo (Holland, 1975; Goldberg, 1989; Jiménez, 2004; Domínguez, Fuentes, Arganis, & Mendoza, 2009; Rodríguez, Arganis, Cruickshank, & Domínguez, 2012).

Selección del modelo

La selección del modelo debe hacerse tomando en cuenta la información disponible en la cuenca analizada, los coeficientes de correlación entre los datos medidos y calculados por el modelo, y la simplicidad del mismo; para la obtención de

los coeficientes de correlación se construyen gráficas de los datos medidos contra los calculados por cada modelo en relación con una función identidad (figura 5).

En la figura 5, el modelo que presenta un mayor coeficiente de correlación y determinación ($r = 0.9131$ y $R^2 = 0.8338$) es el que relaciona a la MQMIA con el volumen, tiempo de concentración y espesor del suelo; este modelo considera de forma implícita al área de la cuenca y precipitación, además de procesos de infiltración y tiempo de respuesta de la cuenca al volumen llovido.

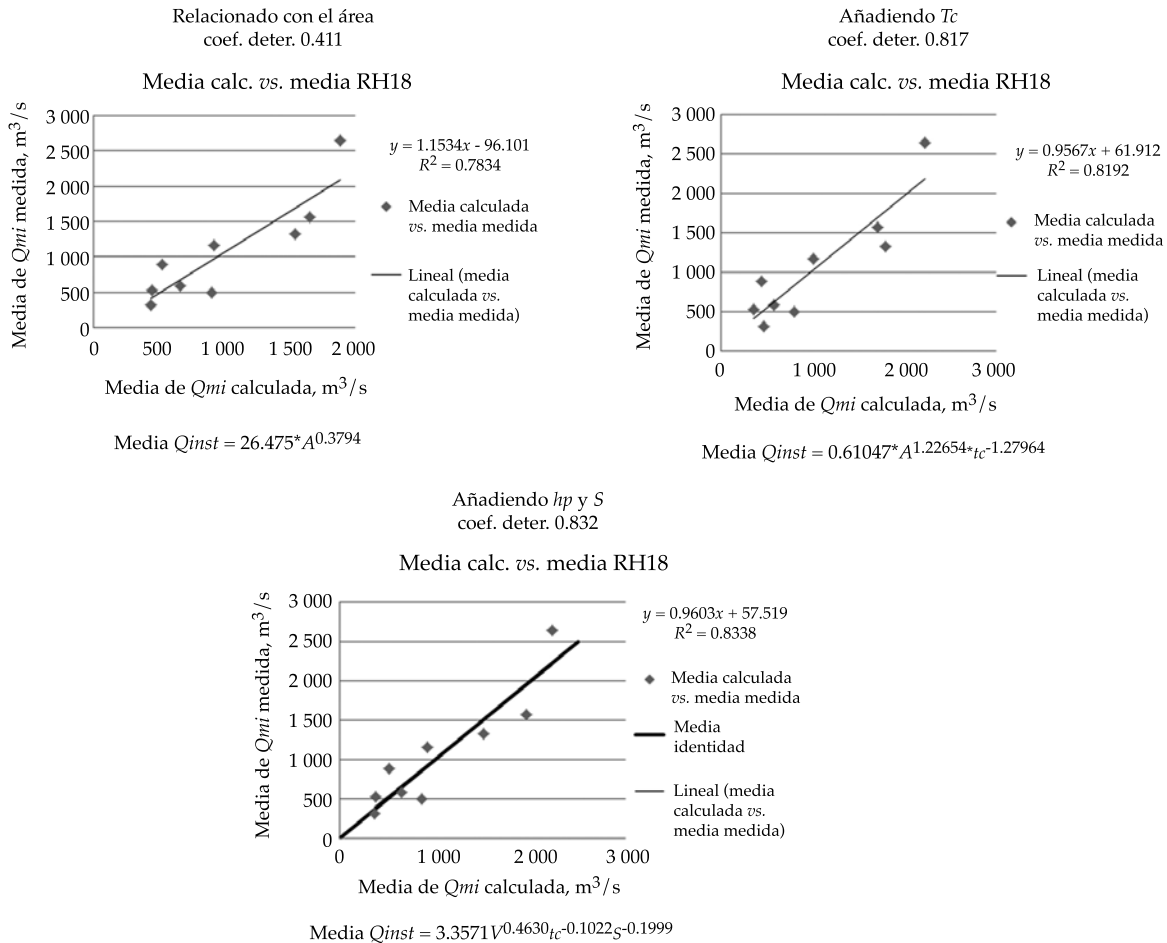


Figura 5. Ejemplo de resultados de ecuaciones regionales de la media calculada en relación con la media medida y la función identidad.

Aplicación y resultados

Estimación de factores regionales para cuencas aforadas

Se escogieron 309 estaciones hidrométricas con más de 20 años de registro histórico, con la revisión ya descrita. Se procuró que dichas estaciones no estuvieran influenciadas por embalses aguas arriba. Los grupos de regiones hidrológicas se establecieron como se indica en el cuadro 1 (ver figura 2).

Para dar como ejemplo el caso de la región hidrológica 18 (RH18), con el procedimiento descrito se comparó la MQMIA contra el área de la cuenca (figura 3) y con base en esta figura se establecieron tres grupos de hidrométricas (columna 9 del cuadro 2). El grupo 1 correspondió a las estaciones que quedaban por arriba de la curva; el grupo 2, a las hidrométricas que quedaron por debajo de esa curva; el grupo 3, a los datos que quedaron aproximadamente en la curva o muy cercanas a ella.

Cuadro 1. Agrupación de regiones.

Grupos	RH
1	1 y 3
2	7 y 8
3	9
4	10
5	11
6	12
7	13 a 16 y 19
8	18
9	20 y 21
10	22
11	23
12	24
13	25
14	26
15	27
16	28 y 29
17	30
18	36 y 37

Además, en el cuadro 2 se indican los estadísticos del gasto máximo instantáneo, en particular la media y el área drenada por cada hidrométrica.

Por otro lado, se normalizó la información de los gastos máximos anuales de las estaciones correspondientes a cada grupo y se construyó un gran registro por grupo, al que se le hizo un análisis estadístico para determinar los gastos máximos instantáneos normalizados para distintos periodos de retorno (en la figura 6 se muestra la extrapolación para el grupo 1 (G1) y en el cuadro 3 se presenta el resumen de los factores extrapolados para los tres grupos (G1, G2 y G3) de la RH18).

En el cuadro 4 se muestran los factores calculados para todos los grupos.

Los valores del cuadro 4 se utilizan como factores, de manera que al multiplicarlos por la MQMIA de cada estación se obtienen las estimaciones de sus gastos máximos asociados con distintos periodos de retorno, como se muestra en el siguiente ejemplo.

Ejemplo del uso de factores para cuencas aforadas

El siguiente ejemplo tiene la finalidad de mostrar la aplicación de los resultados del cuadro 4, así como contrastar los resultados que se obtienen del análisis regional con los que se obtendrían analizando de forma individual los gastos máximos anuales de una cuenca aforada.

Si se sabe que la MQMIA histórica de la estación 18481 La Caimanera es de 2 643.804 m³/s, y que pertenece al grupo 3 de la RH18, considerando el factor de 3.09 del cuadro 4, el gasto máximo instantáneo de diseño —correspondiente a un periodo de retorno de 50 años, considerando un análisis regional, en el que se toman en cuenta los datos de ocho estaciones— es de 2 643.804 x 3.09 = 8 166.99 m³/s. Si se hace el análisis estadístico de los gastos máximos registrados en esa estación, sin regionalización, el gasto de diseño resulta de 11 008.09 m³/s, obtenido con una función doble Gumbel. Es decir, la regionalización da un resultado menos

Cuadro 2. Grupos RH 18. Estadísticos del gasto máximo instantáneo, área drenada y agrupación de hidrométricas.

Estación	Nombre	Máximo	Media	Desv. est.	Coef. var.	Mínimo	Área, km ²	Grupos
18481	La Caimanera	9 906	2 643.804	1 737.300	0.657	826	80 592.475	3
18230	Santo Tomás	3 881	1 569.484	748.473	0.477	405.21	59 153	2
18439	San Juan Tetelcingo	3 264	1 329.194	572.351	0.431	382	45 361.7	2
18434	El Fraile	1 569.74	498.872	274.995	0.551	201	11 175.5	2
18494	Los Panches	4 778	1 167.623	1 009.516	0.865	128	11 596.4	1
18459	Río Grande	136	73.696	23.224	0.315	10	943.5	3
18432	Ixcamilpa	3 210	586.302	472.631	0.806	159	4 946.6	3
18487	Los Pinzanes	5 422	924.308	896.867	0.970	146	5 525.1	1
18195	Ziritzácuaro	1 230.2	533.451	296.523	2.440	155	1 701.4	1
18201	El Cajón	1 116	264.983	242.082	0.914	28.12	395	3
18495	La Pastoría	2 873	891.102	527.682	0.592	365	2 655.9	1
18461	Zitácuaro	297.47	112.922	56.465	0.500	40.9	372.5	3
18129	Los Granjenos	258	50.957	50.421	0.989	11	171.4	3
18281	La Limonera	673.56	316.476	114.098	0.361	173	1 681.3	3
18460	Río Chiquito	875	71.904	115.542	1.607	12	247.8	3

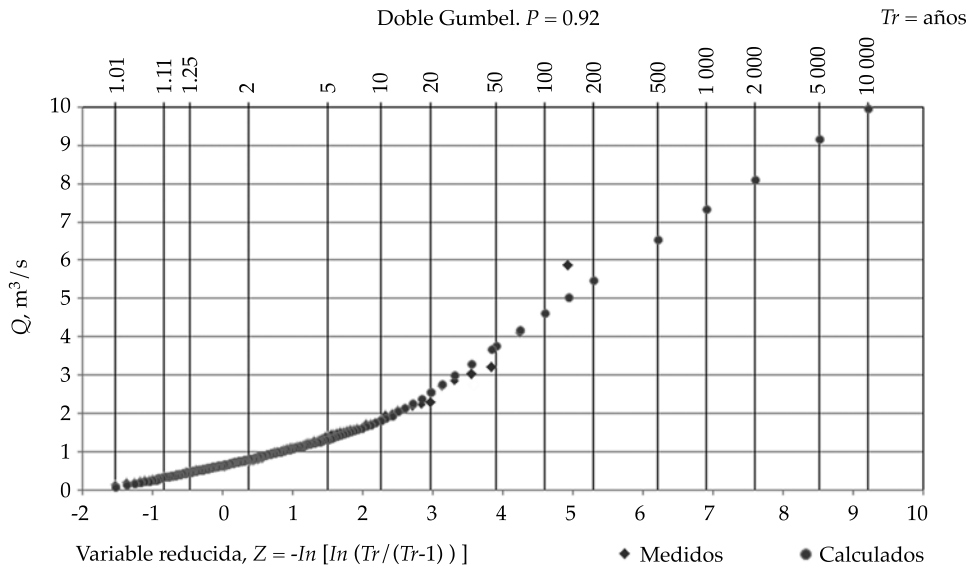


Figura 6. Ejemplo de la extrapolación probabilística para el Grupo 1 (G1) de la Región Hidrológica 18.

conservador que tomar en cuenta la cuenca en forma independiente de los sitios restantes.

Cabe mencionar que los factores del cuadro 4 pueden aplicarse para cuencas “vírgenes”, aunque cuenten con un número de años de registro menor (p. ej., 15 años).

Estimación de la MQMIA en sitios no aforados

Por otra parte, con el área de la cuenca y datos de precipitación, infiltración y cinemáticos (tiempo de concentración), se obtuvieron mo-

Cuadro 3. Factores de diseño normalizados.

Tr	RH 18		
	G1	G2	G3
Años			
2	0.82	0.89	0.86
5	1.34	1.31	1.27
10	1.83	1.67	1.63
20	2.56	2.02	2.14
50	3.78	2.45	3.09
100	4.64	2.75	3.82
200	5.47	3.05	4.54
500	6.54	3.43	5.45
1 000	7.34	3.73	6.14
2 000	8.12	4.02	6.83
5 000	9.18	4.4	7.74
10 000	9.96	4.7	8.41

Cuadro 4. Factores de diseño normalizado para todos los grupos de regiones.

Tr	RH 1 a 3			RH 1 (sin 3)			RH 7 y 8	RH 9			RH 10	
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G1	G2	G1	G2	
Años												
2	0.32	0.49	0.53	0.32	0.42	0.33	0.73	0.83	0.77	0.68	0.88	
5	1.03	1.14	1.34	1.03	0.92	0.94	1.34	1.34	1.37	1.32	1.51	
10	4.16	3	2.32	4.16	3.89	3.85	1.91	1.87	2.03	2.22	1.92	
20	5.89	5.57	5.19	5.89	6.12	7.86	3.18	2.45	2.87	3.42	2.32	
50	7.64	8.34	8.85	7.64	8.37	11.91	6.07	3.04	3.84	4.72	2.83	
100	8.86	10.29	11.29	8.86	9.93	14.73	7.99	3.43	4.51	5.61	3.22	
200	10.04	12.2	13.62	10.04	11.45	17.47	9.82	3.82	5.15	6.48	3.6	
500	11.58	14.68	16.64	11.58	13.43	21.04	12.16	4.31	5.99	7.6	4.1	
1 000	12.74	16.55	18.91	12.74	14.93	23.71	13.92	4.68	6.62	8.44	4.49	
2 000	13.9	18.43	21.13	13.9	16.42	26.43	15.66	5.05	7.25	9.27	4.87	
5 000	15.4	20.84	24.11	15.4	18.34	29.97	17.91	5.55	8.06	10.39	5.37	
10 000	16.54	22.68	26.33	16.54	19.89	32.61	19.62	5.92	8.68	11.27	5.75	

Tr	RH 11			RH 12			RH 13 a 16 y19			RH 18		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
Años												
2	0.7	0.68	0.8	0.87	0.75	0.8	0.69	0.72	0.77	0.82	0.89	0.86
5	1.37	1.67	1.5	1.38	1.37	1.39	1.41	1.3	1.4	1.34	1.31	1.27
10	2.27	2.48	2.06	1.83	2.03	2.01	2.49	1.83	1.97	1.83	1.67	1.63
20	3.12	3.17	2.77	2.34	3.15	2.79	3.2	2.88	2.81	2.56	2.02	2.14
50	4.12	4.02	3.97	3	4.43	3.67	3.98	5.55	4.13	3.78	2.45	3.09
100	4.84	4.63	4.95	3.48	5.26	4.26	4.52	7.39	5.08	4.64	2.75	3.82
200	5.54	5.23	5.93	3.95	6.05	4.82	5.06	9.14	6	5.47	3.05	4.54
500	6.46	6.02	7.2	4.56	7.07	5.55	5.76	11.4	7.18	6.54	3.43	5.45
1 000	7.16	6.62	8.15	5.02	7.83	6.1	6.28	13.09	8.06	7.34	3.73	6.14
2 000	7.86	7.21	9.11	5.47	8.58	6.65	6.81	14.77	8.94	8.12	4.02	6.83
5 000	8.75	8.01	10.34	6.07	9.58	7.36	7.5	16.93	10.1	9.18	4.4	7.74
10 000	9.48	8.6	11.33	6.55	10.38	7.89	8.02	18.68	10.97	9.96	4.7	8.41

Cuadro 4 (continuación). Factores de diseño normalizado para todos los grupos de regiones.

Tr	RH 20 y 21			RH 22		RH23	RH24			RH 25	
	G1	G2	G3	G1	G2	G1	G1	G2	G3	G1	G2
Años											
2	0.79	0.82	0.86	0.65	0.7	0.84	0.65	0.54	0.74	0.81	0.57
5	1.29	1.43	1.34	1.43	1.42	1.41	1.37	1.32	1.34	1.42	1.35
10	1.93	2.06	1.77	2.17	2.18	1.89	2.31	2.05	1.85	2.02	1.99
20	2.92	2.66	2.26	3.44	3.45	2.41	3.73	3.81	2.74	2.76	2.43
50	3.57	3.25	2.9	5.53	4.95	3.09	5.22	8.45	5.45	3.69	2.93
100	3.99	3.65	3.37	6.96	5.94	3.59	6.22	11.51	7.51	4.33	3.29
200	4.38	4.04	3.83	8.33	6.87	4.08	7.18	14.39	9.47	4.95	3.65
500	4.89	4.54	4.43	10.09	8.08	4.73	8.43	18.11	11.99	5.76	4.11
1 000	5.28	4.91	4.88	11.41	8.98	5.21	9.35	20.89	13.87	6.36	4.46
2 000	5.66	5.28	5.33	12.72	9.88	5.7	10.3	23.68	15.75	6.96	4.81
5 000	6.16	5.77	5.93	14.41	11.06	6.35	11.5	27.33	18.23	7.75	5.26
10 000	6.54	6.16	6.37	15.77	12	6.83	12.41	30.22	20.07	8.38	5.63

Tr	RH 26 Pánuco			RH 26 Valle de México					RH 27		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G2	G3	G1	G2	G3
Años											
2	0.84	0.79	0.81	0.91	0.81	0.8	0.88	0.86	0.83	0.85	0.77
5	1.37	1.47	1.38	1.42	1.41	1.71	1.51	1.6	1.28	1.4	1.27
10	1.9	2.05	2.01	1.76	2.08	2.22	1.93	2.08	1.78	1.88	1.84
20	2.42	2.79	2.67	2.08	2.6	2.66	2.32	2.54	2.48	2.23	2.91
50	2.96	3.99	3.29	2.5	3.13	3.19	2.84	3.15	3.2	2.61	3.92
100	3.33	4.92	3.7	2.82	3.49	3.58	3.23	3.6	3.67	2.88	4.57
200	3.68	5.84	4.09	3.13	3.84	3.96	3.61	4.04	4.12	3.14	5.18
500	4.14	7.02	4.6	3.54	4.3	4.47	4.12	4.64	4.71	3.49	5.97
1 000	4.49	7.92	4.98	3.86	4.64	4.85	4.5	5.08	5.14	3.74	6.56
2 000	4.84	8.8	5.37	4.17	4.98	5.23	4.89	5.53	5.58	4	7.15
5 000	5.29	9.99	5.86	4.58	5.45	5.73	5.4	6.12	6.15	4.35	7.93
10000	5.63	10.86	6.24	4.9	5.79	6.14	5.78	6.57	6.58	4.59	8.54

Tr	RH 28			RH 30			RH 36 y 37		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G2
Años	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)
2	0.89	0.92	0.76	0.9	0.87	0.77	0.72	1.02	1.01
5	1.31	1.37	1.17	1.21	1.27	1.22	1.61	1.75	1.8
10	1.72	1.67	1.45	1.49	1.61	1.6	2.32	2.24	2.32
20	1.96	1.96	1.71	1.84	2.07	2.32	2.88	2.71	2.81
50	2.19	2.33	2.05	2.34	2.85	5.66	3.54	3.32	3.46
100	2.35	2.61	2.31	2.7	3.44	8.18	4.02	3.77	3.94
200	2.51	2.89	2.56	3.04	4.02	10.57	4.5	4.23	4.42
500	2.73	3.26	2.9	3.49	4.77	13.63	5.12	4.83	5.06
1 000	2.89	3.53	3.15	3.83	5.33	15.93	5.59	5.28	5.54
2 000	3.05	3.81	3.41	4.17	5.89	18.19	6.05	5.73	6.02
5 000	3.28	4.18	3.74	4.61	6.63	21.28	6.68	6.33	6.65
10 000	3.45	4.45	3.99	4.94	7.22	23.38	7.12	6.78	7.13

delos regionales para estimar la MQMIA en función de dichas características (cuadro 5). En el cuadro 6 se presenta el coeficiente de determinación obtenido con cada modelo.

En los cuadros 5 y 6, la ecuación potencial (3) se logró usando una hoja de cálculo Excel© al dibujar la MQMIA de las hidrométricas de cada grupo de regiones contra el área de la cuenca correspondiente, y proponiendo una línea de tendencia potencial de la que se estableció su ecuación y coeficiente de determinación. El siguiente modelo fue del tipo de la ecuación (4), cuyos parámetros se definieron usando algoritmos genéticos; dicho modelo, además del área de la cuenca, considera el tiempo de concentración en la precisión de la MQMIA.

En las ecuaciones del tipo (5) se consideró el volumen medio llovido (al tomar en cuenta el área de la cuenca y precipitación promedio en la cuenca, calculada con el promedio espacial y la media de las precipitaciones diarias máximas anuales, además del tiempo de concentración y efectos de infiltración en la cuenca al añadir al espesor de suelo S).

Cabe destacar que en el tercer modelo se agrupó el área con la precipitación y con ello se logró mejorar los coeficientes de determinación, aumentando sólo en 1 el número de parámetros que se requiere calcular.

En el caso de cuencas no aforadas y dependiendo de las características fisiográficas y los datos de precipitación, primero se debe estimar

Cuadro 5. Ecuaciones para estimar la MQMIA usando un modelo potencial y modelos no lineales a partir de AG.

RH	Ecuación potencial	Ecuación AG con A y tc	Ecuación AG con V, tc y S
1 y 3	$MQMIA = 0.0002 * A^{1.7535}$	$MQMIA = 0.30529 * A^{0.79293} * tc^{-0.09583}$	$MQMIA = 0.0001V^{0.3104}tc^{0.7405}S^{3.0198}$
7 y 8	$MQMIA = 142.39 * A^{0.0054}$	$MQMIA = 0.30529 * A^{1.60802} * tc^{-2.51320}$	$MQMIA = 877.7123V^{1.1838}tc^{-1.3504}S^{-4.4633}$
9	$MQMIA = 11.66 * A^{0.4349}$	$MQMIA = 2.44158 * A^{1.01968} * tc^{-1.03305}$	$MQMIA = 1.2208V^{1.2204}tc^{-0.51}S^{-3.5978}$
10	$MQMIA = 20.745 * A^{0.4412}$	$MQMIA = 6.71417 * A^{0.73861} * tc^{-0.52889}$	$MQMIA = 0.6105V^{0.7187}tc^{-0.3586}S^{-0.4141}$
11	$MQMIA = 5.6048 * A^{0.5886}$	$MQMIA = 0.61047 * A^{1.68572} * tc^{-2.10456}$	$MQMIA = 0.3053V^{1.8204}tc^{-1.3797}S^{-4.6715}$
12	$MQMIA = 0.1459 * A^{0.8966}$	$MQMIA = 0.30529 * A^{1.51708} * tc^{-1.73559}$	$MQMIA = 0.3053V^{1.5354}tc^{-1.3102}S^{-3.5441}$
13 a 16	$MQMIA = 1.3419 * A^{0.7677}$	$MQMIA = 8.54528 * A^{0.59389} * tc^{-0.18403}$	$MQMIA = 0.3053V^{1.5354}tc^{-0.1883}S^{0.1273}$
19	$MQMIA = 2.0168 * A^{0.8458}$	$MQMIA = 0.30529 * A^{1.23234} * tc^{-0.36103}$	$MQMIA = 0.0001V^{1.2564}tc^{0.1871}S^{0.4636}$
18	$MQMIA = 26.475 * A^{0.3794}$	$MQMIA = 0.61047 * A^{1.22654} * tc^{-1.27964}$	$MQMIA = 3.3571V^{0.4630}tc^{-0.1022}S^{-0.1999}$
20 y 21	$MQMIA = 11.974 * A^{0.4763}$	$MQMIA = 36.01194 * A^{0.20478} * tc^{0.52705}$	$MQMIA = 0.001V^{0.9165}tc^{-0.3745}S^{2.551}$
22	$MQMIA = 27.621 * A^{0.3628}$	$MQMIA = 38.45342 * A^{0.44545} * tc^{-0.52248}$	$MQMIA = 0.6105V^{0.5567}tc^{-0.5667}S^{0.4416}$
23	$MQMIA = 6.442 * A^{0.6202}$	$MQMIA = 3.35714 * A^{0.8249} * tc^{-0.36103}$	$MQMIA = 46.083V^{0.0488}tc^{-0.4575}S^{0.1926}$
24	$MQMIA = 0.256 * A^{0.8301}$	$MQMIA = 0.30531 * A^{1.5373} * tc^{-1.9288}$	$MQMIA = 0.3053V^{1.2622}tc^{-1.4725}S^{-1.7765}$
25	$MQMIA = 115.98 * A^{0.1343}$	$MQMIA = 107.7304 * A^{0.1473} * tc^0$	$MQMIA = 9\ 974.3645V^{0.2414}S^{-1.7038}$
26 P	$MQMIA = 33.527 * A^{0.3752}$	$MQMIA = 7.3245 * A^{0.9372} * tc^{-1.0324}$	$MQMIA = 10.9868V^{0.8591}tc^{-0.7047}S^{-1.8973}$
26 VM	$MQMIA = 5.1785 * A^{0.3734}$	$MQMIA = 11.2919 * A^{0.0162} * tc^{1.0361}$	$MQMIA = 7.0194V^{0.9488}S^{0.2963}$
27	$MQMIA = 1.6791 * A^{0.7634}$	$MQMIA = 31.7394 * A^{0.2689} * tc^{0.4324}$	$MQMIA = 0.3053V^{0.445}tc^{-0.4141}S^{0.5802}$
28 y 29	$MQMIA = 69.115 * A^{0.3194}$	$MQMIA = 60.73193 * A^{0.34651} * tc^0$	$MQMIA = 0.6105V^{0.492}tc^{0.2768}S^{0.1541}$
30	$MQMIA = 40.932 * A^{0.3921}$	$MQMIA = 0.61047 * A^{0.81301} * tc^{-0.13215}$	$MQMIA = 3.6623V^{0.8805}tc^{-0.1621}S^{-2.9502}$
36 y 37	$MQMIA = 18.941 * A^{0.326}$	$MQMIA = 1.83121 * A^{0.93387} * tc^{-0.72726}$	$MQMIA = 10\ 000V^{0.5316}tc^{-0.1279}S^{-3.6222}$

Nota: VM: Valle de México; P: Pánuco.

Cuadro 6. Coeficiente de determinación de los modelos del cuadro 5.

RH	Ecuación potencial	Ecuación AG con A y tc	Ecuación AG con V, tc y S
1 y 3	0.442	0.544	0.897
7 y 8	0.038	0.997	1
9	0.684	0.749	0.994
10	0.661	0.697	0.690
11	0.172	0.769	0.903
12	0.769	0.928	0.976
13 a 16	0.663	0.703	0.810
19	0.730	0.760	0.822
18	0.411	0.817	0.832
20 y 21	0.390	0.443	0.827
22	0.115	0.402	0.524
23	0.488	0.504	0.513
24	0.436	0.648	0.919
25	0.522	0.528	0.629
26 P	0.630	0.736	0.870
26 VM	0.364	0.647	0.652
27	0.259	0.365	0.454
28 y 29	0.318	0.325	0.438
30	0.571	0.864	0.940
36 y 37	0.430	0.790	0.984

Nota: VM: Valle de México; P: Pánuco.

la MQMIA utilizando las ecuaciones indicadas en el cuadro 5, y después se utilizaría el factor correspondiente a la región y grupo del sitio analizado.

En el cuadro 6 se observa que el modelo de la ecuación potencial, que sólo toma en cuenta el área, da coeficientes de determinación bajos, menores a 0.2, en las regiones agrupadas 7 y 8, y en las regiones hidrológicas 11 y 22; esto es, que en esas regiones, los parámetros tc , V y S deben considerarse en la estimación de la MQMIA.

Ejemplo de aplicación de la ecuación regional para la MQMIA en la RH19

En 2013 se registraron eventos de precipitación extraordinarios en Guerrero, en particular en el río La Sabana, que ocasionaron fuertes caudales. Si se toma en cuenta la ecuación regional obtenida en este estudio, la estimación de la MQMIA para la estación 19018 Tuncingo

tendría una magnitud aproximada de 325 m³/s (cuadro 7). Dicho valor se calcula al considerar que dicha hidrométrica se encuentre en la región hidrológica 19, cuya ecuación regional (figura 7) estima la MQMIA, en m³/s, en función del volumen llovido en km².mm, obtenido como el producto del área de la cuenca drenada hasta el sitio de aforo, en km², por la media de las precipitaciones diarias máximas anuales hp en mm, el tiempo de concentración en horas y espesor del suelo S en cm.

Al multiplicar la MQMIA de 325 m³/s por el valor del gasto máximo instantáneo normalizado de diseño para periodos de retorno de 50 y 100 años, obtenido a partir del análisis regional (ver cuadro 4), se determinan gastos máximos instantáneos de 1 335.70 m³/s y 1 621.69 m³/s, para los periodos de retorno de 50 y 100 años, respectivamente (cuadro 8).

Por otra parte, la Conagua (2013), utilizando el registro histórico de gastos máximos anuales

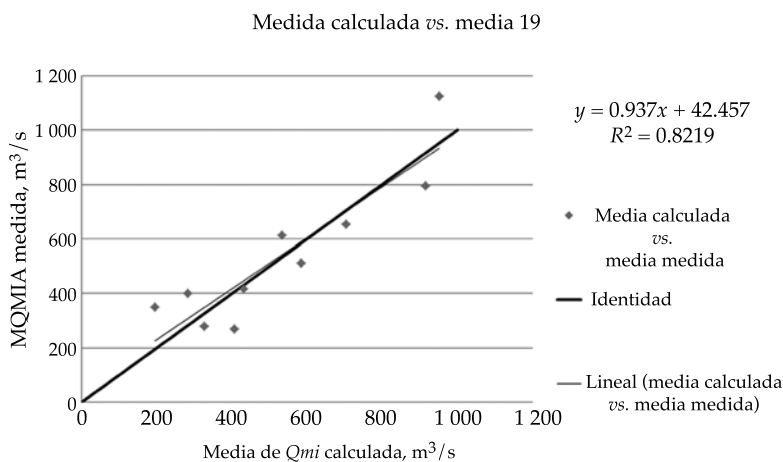


Figura 7. Ecuación regional para la RH19.

Cuadro 7. MQMIA obtenidos con la ecuación regional para la estación 19018 Tuncingo, Guerrero.

Clave	Nombre	Área km ²	hp hp mm	V km ² .Mm	tc h	S espesor	MQMIA con ec. regional AG m ³ /s	Grupo RH13 a 16 y 19
19018	Tuncingo	399	127.49	50 868.51	5.44	10	324.99	3

Cuadro 8. Gastos máximos instantáneos obtenidos con análisis regional para la estación 19018 Tuncingo.

Clave	Nombre	Ajustes de MQMIA normalizados		Q de diseño m ³ /s	
		Tr		Tr	
		50 años	100 años	50 años	100 años
19018	Tuncingo	4.11	4.99	1 335.7	1 621.69

de 1969 a 2013 (este último dato estimado con la huella del agua registrado por la creciente de septiembre de 2013 ante los eventos de los huracanes *Manuel* e *Ingrid*), determinó gastos de diseño de 1 207 m³/s para el periodo de retorno de 50 años y de 1 389 m³/s para el periodo de retorno de 100 años; es decir, valores ligeramente menores a los calculados en el cuadro 8 con el estudio regional.

Además, se realizó una comparación utilizando un modelo de pronóstico de escurrimien-

to (MPE) (Domínguez et al., 2008) para estimar el gasto máximo en el río La Sabana, a la altura de la estación hidrométrica 19018, con el evento de precipitación total de 619.33 mm ocurrido entre el 12 y 18 de septiembre de 2013 (cuadro 9 y figura 8). Al considerar los parámetros del cuadro 10, se obtuvo el hidrograma que se muestra en la figura 9, con un gasto pico de 1 419.42 m³/s, el cual corresponde al gasto máximo instantáneo comprendido entre los periodos de retorno de 50 y 100 años.

Cuadro 9. Precipitación y gastos obtenidos en el MPE.

Fecha	19018 Tuncingo, cuenca del río La Sabana	
	hp (mm)	Q total(m ³ /s)
12/09/2013 14:00	0	0
12/09/2013 20:00	17.26	0
13/09/2013 02:00	2.63	3.52
13/09/2013 08:00	0.12	5.19
13/09/2013 14:00	4.72	1.91
13/09/2013 20:00	1.16	2.88
14/09/2013 02:00	32.5	3.34
14/09/2013 08:00	35.6	61.82
14/09/2013 14:00	35.75	200.43
14/09/2013 20:00	81.1	331.45
15/09/2013 02:00	32.59	714.29
15/09/2013 08:00	87.72	776.19
15/09/2013 14:00	101.15	882.25
15/09/2013 20:00	49.7	1 419.42
16/09/2013 02:00	40.69	1 202.35
16/09/2013 08:00	20.18	688.91
16/09/2013 14:00	24.62	366.67
16/09/2013 20:00	38.55	190.39
17/09/2013 02:00	3.59	312.03
17/09/2013 08:00	9.5	240.62
17/09/2013 14:00	0.2	34.37
17/09/2013 20:00	0	4.91
18/09/2013 02:00	0	0.7

Cuadro 10. Parámetros de calibración.

Parámetros de calibración	Río La Sabana
ΔT (h)	6
λ	0.2
F_s	1
F_o	0.97
t_c (h)	5
K (h)	4

Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se utilizó la media de los gastos máximos anuales (MQMIA) como concepto eje, de tal manera que al relacionarla con características medibles en cualquier cuenca

(área, tiempo de concentración, promedio espacial de la media de precipitaciones máximas anuales, retención potencial máxima) es posible estimarla de forma sencilla, aun para cuencas no aforadas y, por otro lado, al multiplicarla por los factores indicados en el cuadro 4, se obtiene una estimación de los máximos



Figura 8. Precipitación en la cuenca La Sabana.

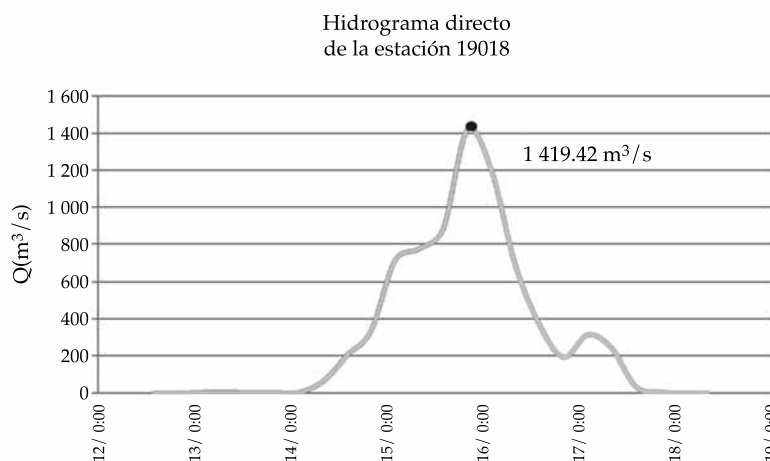


Figura 9. Hidrograma obtenido a partir de la precipitación.

instantáneos asociados con distintos periodos de retorno.

Los resultados relativos a la estimación de la MQMIA se resumen en los cuadros 5 y 6. En el primero se presentan las ecuaciones que permiten estimarla a partir de características fácilmente medibles en cuencas no aforadas, considerando tres posibles modelos de regresión.

La confiabilidad de los modelos se refleja en el coeficiente de determinación, aunque también es importante buscar su simplicidad y lógica de las variables involucradas, de tal manera que un análisis del cuadro 6 muestra que el modelo más simple (en función sólo del área de cuenca) podría aplicarse en los casos de las regiones 9, 10, 12 y 19; por otra parte, el tercer modelo (con

V , tc y S), que involucra precipitación, es el mejor en todos los casos, excepto para las regiones 7, 8, 10, 18, 23 y 26, en las que el incremento en el coeficiente de determinación es pequeño.

Por otra parte, para varios grupos de regiones se obtuvieron exponentes positivos asociados con la retención potencial máxima y/o tiempo de concentración, lo cual no parece lógico, por lo que se recomienda estudiar posibilidades, como la de acotar los valores de estos exponentes al usar la optimización vía algoritmos genéticos, así como la influencia en resultados de la correlación entre el área de las cuencas y su tiempo de concentración.

Para la estimación de los coeficientes regionales mostrados en el cuadro 4 se utilizaron 305 estaciones asociadas con cuencas “vírgenes” (es decir, no afectadas de modo sensible por zonas de regulación naturales o artificiales) y que contaran con más de 20 años de registro; sin embargo, los resultados pueden usarse para estaciones con menos años de registro (p. ej., del orden de 15 años), debido a que en esos casos no sería necesario hacer un análisis estadístico que requiera momentos de orden mayor a uno, y sólo se necesitaría estimar la media de los valores máximos anuales registrados.

Se recomienda actualizar el estudio de forma periódica (p. ej., cada cinco años, como se sugiere para la revisión de avenidas de diseño).

Asimismo, con los datos generados en este estudio (se cuenta con bases de datos para las más de 300 cuencas analizadas, que contienen valores depurados de los gastos máximos anuales instantáneos y para duraciones de 1 a 60 días, así como sus áreas, también depuradas, tiempos de concentración, número de curva, etc.) pueden realizarse otros (p. ej., los autores de este trabajo están llevando a cabo un estudio estadístico de los coeficientes de escurrimiento). Para los investigadores interesados en el tema, se cuenta también con valores de lluvia máximos anuales para duraciones de 1 a 60 días depurados para más de dos mil estaciones, y las extrapolaciones correspondientes a diversos periodos de retorno y duración.

Referencias

- Allasia, D. & Avruch, G. J. (2000). *Regionalización de caudales en la región del Alto Uruguay Río Grande do Sul – Brasil*. Corrientes, Argentina: Universidad Nacional del Nordeste, Comunicaciones Científicas y Tecnológicas.
- Aparicio, M. F. (2012). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México, DF: Limusa.
- Azevedo, M. F., Demetrius, D. D., & Reis, C. (2008). *Stream, Flows Regionalization in Watersheds on the Right Margin of River Araguaia and Left Margin of the River Tocantins*. XXXVII Congreso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Brazil.
- Byzedi, M., Saghafian, B., Mohammadi, K., & Siosemarde, M. (2014). Regional Analysis of Streamflow Drought: A Case Study in Southwestern Iran. *Environ. Earth Sci.*, 71, 2955-2972, doi: 10.1007/s 12665-013-2674-7.
- Cabrera, J., Guardado, R., Peláez, R., & González, N. (2004). Regionalización hidrogeológica de la provincia Pinar del río en un SIG. *Minería y Geología*, 1(2), 24-31.
- Carrizosa, E. E. (1997). *Regionalización de gastos máximos en la cuenca de la vertiente del Pacífico centro de la república mexicana*. México (147 pp.) Tesis para Maestría en Ingeniería. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Posgrado.
- Conagua (2013). *Análisis de la inundación de la región en llano largo municipio de Acapulco, Guerrero* (31 pp.). Informe. México, DF: Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos.
- Conagua (2014a). *Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS)*. México, DF: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>.
- Conagua (2014b). *Subgerencia de Información Geográfica del Agua (SIGA)*. México, DF: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de <http://siga.cna.gob.mx/mapoteca/regiones%20hidrologicas/mapareghidro.htm>.
- Conagua (2012). *Sistema Nacional de Información del Agua, Atlas Digital del Agua México*. México, DF: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo10.html>
- Domínguez, M. R. (1981). *Análisis regional de tormentas y avenidas de diseño. Aplicación a la cuenca del Papaloapan, México*. Tesis de Maestría de Ingeniería. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Postgrado.
- Domínguez, M. R. (1983). Design Floods for Mixed Urban/ Rural Catchments. *Hydraulics Research Station*. Wallingford, Inglaterra, 221(1), 1-60.
- Domínguez, M. R., Carrizosa, E. E., Fuentes, M. G., & Galván, T. A. (2010). *Actualización de mapas de precipitaciones para diferentes periodos de retorno y diferentes duraciones*.

- Elaborado para Centro Nacional de Prevención de Desastres. México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Domínguez, M. R., Arganis, J. M., Gonzáles, V. F., Carrizosa, E. E., & Guzmán, G. H. (2013). Regionalización de datos de escurrimientos de las regiones hidrológicas de México para la estimación de avenidas de diseño. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.
- Domínguez, M. R., Esquivel, G. G., Baldemar, M. A., Méndez, A. B., Mendoza, R. A., Arganis, J. M. L., & Carrizosa, E. E. (2008). *Manual del Modelo Pronóstico de Escurrimiento MPE*. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.
- Domínguez, M. R., Fuentes, M. O. A., Arganis, J. M. L., & Mendoza, R. A. (2009). Calculation of Bivariate Double Gumbel Probability Density Function Via a Genetic Algorithm: Application to Huites Dam Basin. *Journal of Flood Engineering (IFE)*, 1(1), 41-54.
- Domínguez, M. R., Arganis, J. M. L., Capella, V. A., Luna, V. J. A., Fuentes, M. O. A., Carrizosa, E. E., Peña, D. F., Carabela, H. J. C., & Reyes M. H. (2012). *Análisis estadístico. Manual de diseño de obras civiles*. México, DF: Comisión Federal de Electricidad.
- Erazo, C.A. (2004). *Regionalización de caudales máximos y medios en el Salvador*. San Salvador: Servicio Hidrológico Nacional de El Salvador.
- Flood Studies Report (1975). *Natural Environment Research Council* (pp. 1-5). London: Flood Studies Report.
- Ganancias, M. F. (2010). *Evaluación de metodologías de regionalización hidráulica: aplicación a los caudales máximos de cuencas representadas de la región sur-oeste de la provincia de Córdoba, Argentina* (370 pp.). Tesis de Maestría en Ingeniería. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Reading, USA: Addison Wesley Pub. Co. Inc.
- Gottschalk, L. (1985). Hydrological Regionalization of Sweden. *Hydrological Sciences- Journal-des Sciences Hydrologiques*, 30(1), 65-83.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, USA: The University of Michigan Press.
- Hosking, J. R., Wallis, M. J. R., & Wood, E. F. (1985). An Appraisal of the Regional Flood Frequency Procedure in the UK Flood Studies Report. *Hydrological Sciences Journal*, 30(1), 85-109, doi: 10.1080/02626668509490973.
- Isik, S. & Singh, V. (2008). Hydrologic regionalization of watersheds in Turkey. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13, 824-834.
- Jiménez, M. (2004). *Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable utilizando un algoritmo genético*. Tesis de maestría en Ingeniería. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Postgrado.
- Luna, V. J. A., & Domínguez, M. R. (2013). Un método para el análisis de frecuencia regional de lluvias máximas diarias: aplicación en los Andes bolivianos. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 21(1), 111-124. Recuperado de: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052013000100010&lng=es&nrm=iso. ISSN 0718-3305.
- Nathan, R. J., & McMahon, T. A. (1990). Identification of Homogeneous Regions for the Purposes of Regionalization. *Journal of Hydrology*, 121, 217-238.
- Olguín, G., Rivera, F., & Salas, N. (2011). Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 12(3), 277-284.
- Paz, P. F., Marín, S. M. I., López, B. E., Zarco, H. A., Bolaños, G. M. A., Oropeza, M. J. L., Martínez, M. M., Palacios, V. E., & Rubiños, P. E. (2010). Elementos para el desarrollo de una hidrología operacional con sensores remotos: suelo desnudo. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(2), 59-70.
- Rodríguez, V. K., Arganis, J. M. L., Cruickshank, V. C., & Domínguez, M. R. (2012). Rainfall-Runoff Modelling Using Genetic Programming. *Journal of Hydroinformatics*, 14(1), 108-121.
- Zamanillo, E. (2008). *Tormentas de diseño para la provincia de Entre Ríos*. Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional, Grupo de Investigación en Hidrología e Hidráulica Aplicada (GIHHA), Facultad Regional Concordia.

Dirección institucional de los autores

Dr. Ramón Domínguez-Mora
 Dra. Maritza L. Arganis-Juárez
 M.I. Humberto Guzmán-García
 M.I. Eliseo Carrizosa-Elizondo
 M.I. Gabriela Esquivel-Garduño
 M.I. Guadalupe E. Fuentes-Mariles

Universidad Nacional Autónoma de México
 Instituto de Ingeniería
 Circuito escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán
 04510 Ciudad de México, MÉXICO
 RDomínguezM@iingen.unam.mx
 MArganisJ@iingen.unam.mx
 HGuzmanGa@iingen.unam.mx
 ECarrizosaE@iingen.unam.mx
 GESquivelG@iingen.unam.mx
 GFuentesM@iingen.unam.mx