

Estimación de avenidas de diseño en la cuenca baja del Río Pánuco: método de regionalización

Del Ángel González Marcelino¹ y Ramón Domínguez Mora²

¹Asociación Mexicana de Hidráulica del Sur de Tamaulipas y Norte de Veracruz
(mdag53@yahoo.com.mx, bihingenieria@gmail.com)

²Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.
(rdm@pumas.iingen.unam.mx, rdominguezm@iingen.unam.mx)

Resumen

Se presenta un método propuesto por el Instituto de Ingeniería, sección Hidráulica, de la Universidad Nacional Autónoma de México para el cálculo de avenidas. En este método se aplican las técnicas de regionalización en las que se consideran los volúmenes de escurrimiento de las estaciones hidrométricas con características similares para generar muestras regionales de gran tamaño y obtener registros confiables de gastos para el diseño de obras hidráulicas para control de inundaciones. Se analizaron 13 estaciones hidrométricas pertenecientes a la cuenca baja del río Pánuco, ríos Moctezuma, Pánuco y Guayalejo. Se establecieron tres regiones con estaciones hidrométricas con características similares de gastos y se determinaron las avenidas de diseño mediante la aplicación de las técnicas estadísticas propuestas por el método para el análisis de valores extremos, Gumbel y doble Gumbel. Mediante las técnicas regionales se obtuvieron en general, valores de gastos menores que lo obtenidos con el registro original, además de hidrogramas menos inestables que permiten resultados más confiables para el análisis de avenidas en ríos.

Palabras clave: técnicas de regionalización, volúmenes de escurrimiento, estaciones hidrométricas.

Introducción

La cuenca del río Pánuco es una de las regiones hidrológicas más importantes de México, tanto por su superficie, 84,956 km², que la sitúa en el cuarto lugar del país, como por el volumen de sus escurrimientos de 20,329 millones de m³ anuales.

Pertenece a la vertiente del Golfo de México y se localiza entre los paralelos 19° 00' y 24° 00' de latitud norte y los meridianos 97° 45' y 101° 20' de longitud oeste (Figura 1).

Debido a lo extenso de su superficie, se ha dividido en dos subregiones: Alto y Bajo Pánuco. El Alto Pánuco lo conforman las cuencas de los ríos Tula y San Juan del Río en cuya confluencia se forma el vaso de la Presa Hidroeléctrica Zimapán y da inicio su recorrido el río Moctezuma por el

Cañón del Infiernillo y por las cuencas de los ríos Metztlán y Amajac, que originan el río Amajac. El Bajo Pánuco se forma por las cuencas de los ríos Extórax, Bajo Amajac, Tempoal, Moctezuma, Tampaón, Guayalejo-Tamesí y Pánuco.

El colector general de la cuenca del Bajo Pánuco, a lo largo de su recorrido, recibe varias denominaciones según los tramos en que se divide, para finalmente recibir el nombre de Pánuco a partir de la estación Hidrométrica Las Adjuntas, situada 500 m aguas abajo de la confluencia del río Tampaón con el Moctezuma, en el municipio de Tamuín, San Luis Potosí y 170 km aguas arriba de la desembocadura en el mar, la cual cuenta con un área drenada de 61,063 km². Sigue un curso sinuoso a través de terrenos planos, atravesando una zona lacustre en las que

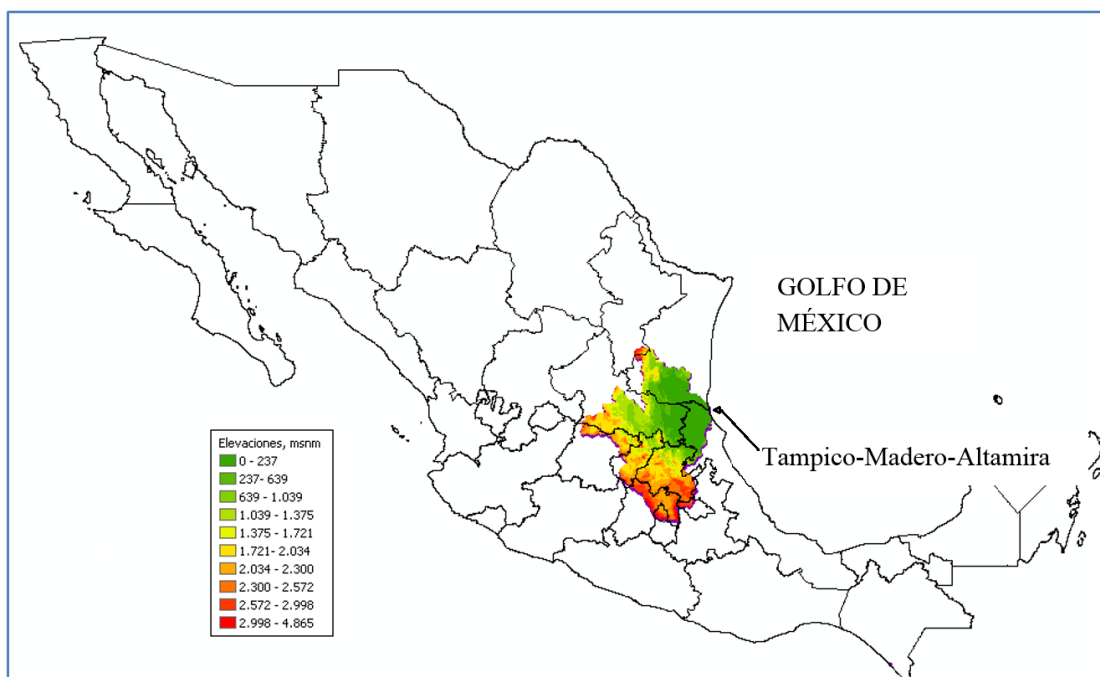


Figura 1. Extensión territorial de la Cuenca baja del río Pánuco en México.

se encuentran las lagunas Tamós, Chairel y Pueblo Viejo. Dicho tramo recibe la aportación de las aguas de los ríos Chicayán por su margen derecha y, aguas abajo, la del Guayalejo-Tamesí por su margen izquierda, a la altura del Puerto de Tampico y Cd. Madero, Tamaulipas, para desembocar finalmente en el Golfo de México, 12 km aguas abajo.

Clima

El clima tropical de la cuenca es variado. Por ser Pánuco el municipio más importante dentro del curso del río, del que toma su nombre, se describe el clima en su territorio. Aguas abajo, en la planicie costera en la desembocadura al mar, se encuentran los municipios de Tampico y Madero.

El clima del municipio de Pánuco, a 40 km, de la costa en línea recta, es cálido subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual

de todo el territorio oscila entre los 24° y 26°C, la precipitación promedio anual del sector noroeste del municipio varía entre 800 a 1,000 mm. En el resto del territorio fluctúa entre 1,000 y 1,200 mm (INEGI, 2005 a-c).

La mayor parte del municipio de Pánuco se encuentra cubierto por pastizal, con presencia de pequeñas zonas de selva en el norte, así como zonas dedicadas a la agricultura a lo largo del cauce del río Pánuco. Las principales especies vegetales son las que corresponden a la selva baja caducifolia y al tular manglar (INEGI, 2005d).

La zona conurbada del sur de Tamaulipas se forma por los municipios de Tampico, Madero y Altamira, ubicándose sobre la margen izquierda de la desembocadura del río Pánuco en el Golfo de México y las lagunas del Chairel y de Champayán que deben su origen al río Tamesí (Guayalejo), afluente del río Pánuco en su desembocadura (Figura 2).

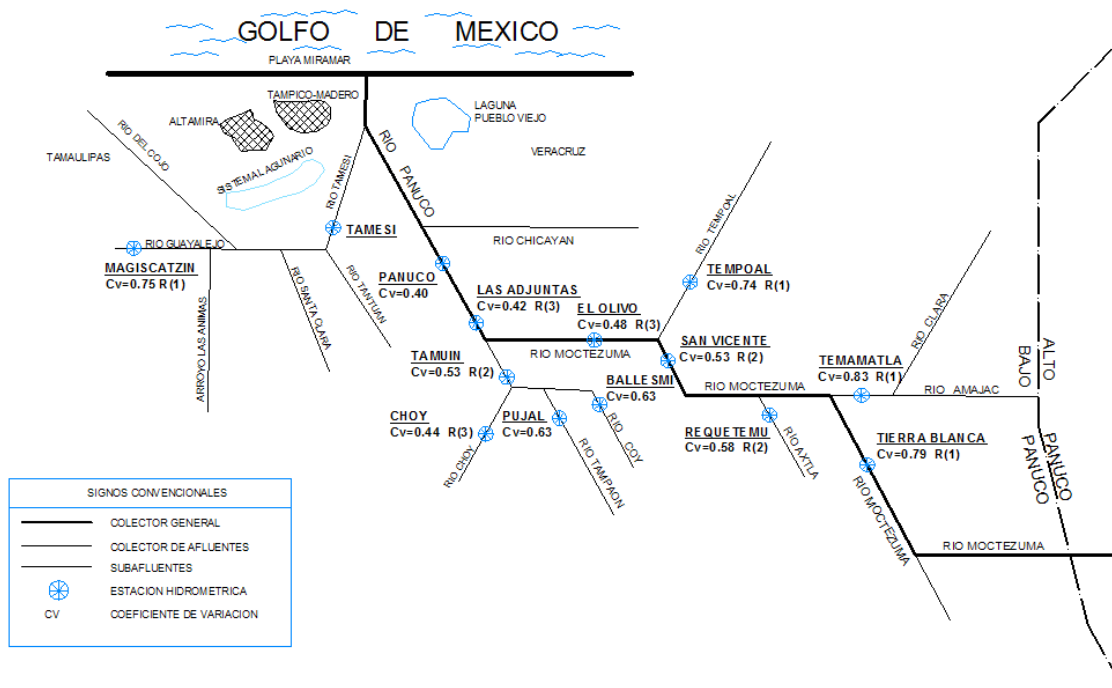


Figura 2. Cuenca baja del río Pánuco.

El clima A(w) predominante en la región es tropical subhúmedo, cálido y extremoso, con temperaturas promedio anuales de 24°C alcanzando las más altas un promedio de 36.8° C, y las mínimas un promedio de 9.7° C. Los vientos predominantes en otoño e invierno son los denominados “nortes”, mientras que en las otras estaciones del año varían de sur a norte. Por estar la región expuesta a los fenómenos de tipo hidrometeorológico son comunes los ciclones y vientos huracanados, que en más de una ocasión han afectado seriamente a los habitantes del municipio. La precipitación anual varía de 788.6 a 1,044.10 mm y el mes más lluvioso es julio arriba de los 1000 mm (Gobierno del Estado de Tamaulipas. Administración 2011-2016).

Inundaciones

La cuenca del bajo Pánuco es una zona sensible a la incidencia de eventos meteorológicos como los ciclones o huracanes que a través de los años han provocado inundaciones de gran importancia.

Las inundaciones se pueden considerar como uno de los fenómenos naturales más catastróficos

en nuestro planeta; causan severos daños a la infraestructura construida por el hombre, a sus bienes materiales, así como a la agricultura y a la ganadería. En los casos más severos son fuente de pérdida de vidas humanas. En 1995 se presentaron los ciclones Hilda, Janet y Gladis (CENAPRED, 2001 y 2007) que provocaron inundaciones que causaron fuertes daños en la cuenca del bajo Pánuco, principalmente en el sur de Tamaulipas y norte de Veracruz (Figura 3).

En el mes de septiembre de 2013, los huracanes Ingrid y Manuel (Figura 4), provocaron severos daños en todo el país. Estos meteoros incidieron, uno por el Océano Pacífico y el otro por el Golfo de México de manera simultánea, causando desastres prácticamente en la mayoría de los estados de la República Mexicana. A pesar de que sus vientos no tenían características de destructivos (140 km/hr, de Ingrid y 85 km/hr de Manuel), al estar los suelos saturados por las lluvias anteriores, el escurrimiento fue mayor teniendo las consecuentes inundaciones.



Figura 3. Inundación en Tampico-Madero por el ciclón Hilda de 1955.

Las inundaciones se producen por las avenidas que se presentan después de las lluvias, y su magnitud depende de factores tales como la periodicidad con que ocurren las avenidas, la intensidad de las precipitaciones, la capacidad de infiltración y de saturación del suelo, el desbordamiento de cauces, etc. Si se analiza la periodicidad con que se presentan las avenidas con los efectos directos de las inundaciones que provocan, es importante contar con medidas adecuadas para prevenir y mitigar daños. Esto lleva al estudio del comportamiento histórico de los caudales, mismo que puede lograrse mediante el tratamiento estadístico de las muestras históricas para determinar los gastos de diseño para diferentes períodos de retorno (Campos, 2014).

Para llevar a cabo un estudio hidrológico, conforme a sus variables estadísticas, se requiere de registros de gastos de forma ininterrumpida durante el mayor número de años posible. Esto quiere decir que mientras mayor sea el registro, más confiabilidad se tendrá en sus resultados.

Diversos autores (Ramachandra, 2000; Viessman 2003) estudiosos en la materia, han encontrado que si el registro es pequeño, con pocos años de información, los resultados del análisis varían mucho con relación a un registro amplio, teniéndose sobreestimaciones hasta del 120%, y subestimaciones del orden del 2%.



Figura 4. Ciclones Manuel e Ingrid en el 2013.

Contar con información amplia y suficiente no siempre es fácil ya que en México, en muchos de los casos, los registros no siempre son continuos y muchas veces son inexistentes. Esto conlleva a la búsqueda de metodologías que permitan ampliar el tamaño de los registros o bien, generarlos totalmente. Una técnica que permite lograr este objetivo es la regionalización, ya que de manera sencilla, se pueden generar muestras regionales de gran tamaño a partir de la información de sitios con características similares.

El sur de Tamaulipas y norte de Veracruz, ubicados en la cuenca baja del río Panuco el diseño de las obras hidráulicas para protección y mitigación de daños es importante, debido a la incidencia de fenómenos meteorológicos como ciclones y huracanes, el diseño de avenidas con base en registros de las estaciones hidrométricas ubicadas en los ríos Moctezuma, Pánuco y sus afluentes.

En este trabajo, se presenta un método propuesto por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México para el diseño de las avenidas conforme a los registros históricos.

Se analizaron 13 estaciones hidrométricas de la cuenca baja del río Pánuco (Tabla 1) en las que están incluidos los ríos Guayalejo, Moctezuma, Pánuco y sus afluentes. El estudio consistió en determinar primero las avenidas a partir

de la muestra original (registros históricos) y posteriormente mediante su regionalización. La conveniencia de utilizar este método se puede comprobar mediante su aplicación al comparar los eventos regionales contra los eventos resultantes del modelo de una muestra original.

Estimación de avenidas de diseño a partir del registro original

Para llevar a cabo la estimación de las avenidas a partir de la muestra original, se trabajó con 13 estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca baja del río Pánuco. Esta información fue proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (Bandas, 2013) y su proceso permitió determinar los gastos máximos para diferentes períodos de retorno conforme al método estipulado por la UNAM (Del Ángel y Domínguez, 2014).

Las estaciones hidrométricas que se incluyeron en este estudio y sus características principales conforme a la cuenca y su escurrimiento, se presentan en la Tabla 1.

Para el análisis de la información, se llevó a cabo la verificación de su calidad efectuando una comprobación aritmética con registros comunes, considerando que la suma de los gastos de entrada debería corresponder a la magnitud de los gastos de salida.

Se realizó la suma de los gastos de entrada $Q_{entrada}$ y se comparó con los gastos de salida Q_{salida} por medio de un factor: $\text{Factor} = Q_{salida} / Q_{entrada} < 1.20$

Dicha comprobación se realizó en el siguiente orden:

$Q_{entrada} = \text{Temamatla} + \text{Tierra Blanca} + \text{Requetemu}$
 $Q_{salida} = \text{San Vicente}$

$Q_{entrada} = \text{San Vicente} + \text{Tempoal}$ $Q_{salida} = \text{Olivo}$

$Q_{entrada} = \text{Choy} + \text{Pujal} + \text{Ballesmi}$ $Q_{salida} = \text{Tamuín}$

$Q_{entrada} = \text{Olivo} + \text{Tamuín}$ $Q_{salida} = \text{Adjuntas}$

$Q_{entrada} = \text{Adjuntas}$ $Q_{salida} = \text{Pánuco}$

Tabla 1. Estaciones hidrométricas y escurrimientos de la cuenca del bajo Pánuco.

No.	Estación	Corriente	Cuenca	Área (km ²)	No. Años	Periodo	Gasto (m ³ /s)			Volumen Anual
							Mín	Med.	Máx.	(m ³ x10 ⁶)
1	Tierra Blanca	Moctezuma	B. Pánuco	18,169	50	1960-2009	0.377	52.566	2578.732	1671.398
2	Temamatla	Amajac	B. Pánuco	6,884	46	1961-2006	0.011	49.333	3966.667	1573.353
3	Requetemu	Axtla	B. Pánuco	661	56	1954-2009	0.120	42.579	2643.70	999.054
4	San Vicente	Moctezuma	B. Pánuco	26,768	35	1972-2007	0.282	172.485	7279.701	5,456.115
5	Tempoal	Tempoal	B. Pánuco	5275	52	1974-2006	0.00	83.149	6120.00	2,646.763
6	Ballesmi	Coy	B. Pánuco	194	56	1954-2009	0.00	29.523	733.456	0.916
7	Pujal	Tampaón	B. Pánuco	23,373	56	1954-2009	0.00	164.823	6052	5218.461
8	Choy	Choy	B. Pánuco	12	33	1959-1992	1.193	5.546	171.40	0.178
9	Tamuín	Tampaón	B. Pánuco	29,630	36	1974-2009	27.604	180.97	3748.61	5,726.84
10	EL Olivo	Moctezuma	B. Pánuco	33,483	33	1968-2006	0.00	231.946	6200.00	7,347.90
11	Las Adjuntas	Pánuco	B. Pánuco	61,063	44	1956-2009	2.085	397.43	6692.00	12,579.84
12	Pánuco	Pánuco	B. Pánuco	65,577	28	1973-2006	0.00	405.442	7,300.00	13,702.24
13	Magiscatzin	Guayalejo	B. Pánuco	10,968	46	1955-2006	0.00	66.26	5,510.00	2,136.53

Análisis de frecuencias

Para llevar a cabo el análisis de frecuencias de los datos, se obtuvieron los eventos máximos anuales para duraciones de 1 a 15 días.

En la Tabla 2, se presentan los gastos máximos para la estación Las Adjuntas.

Tabla 2. Gastos máximos de la estación Las Adjuntas. Registro original.

Año	1 día	2 días	3 días	4 días	5 días	6 días	7 días	8 días	9 días	10 días	11 días	12 días	13 días	14 días	15 días
1956	6182.76	6081.21	5989.6	5637.3	5377.99	5005.26	4688.62	4435.6	4224.92	4017.39	3819.47	3635.2	3477.13	3331.46	3204.97
1957	1276.43	1241.04	1162.1	1119.39	1041.21	964.61	920.47	898.25	872.59	850.93	826.14	800.51	774.6	747.81	721.99
1958	6640.92	6582.43	6452.96	6280.51	6033	5824.72	5586.11	5342.5	5125.09	4926.9	4723.25	4523.17	4331.96	4150.67	3979.94
1959	2188.04	2028.37	1838.52	1707.12	1555.99	1430.86	1328.99	1260.63	1217.87	1178.18	1141.35	1116.24	1094.4	1072.42	1049.21
1960	2013.79	1837.63	1730.42	1591.83	1460.36	1343.9	1243.06	1194.04	1173.56	1155.88	1136.6	1118.49	1089.64	1056.91	1027.02
1961	3179.17	3041.04	2956.68	2926.97	2856.41	2785.98	2650.06	2540.61	2408.37	2272.64	2143.13	2025.19	1923.15	1828.13	1741.14
1962	1682.98	1608.64	1560.11	1511.42	1427.36	1358.6	1278.08	1209.09	1141.62	1087.53	1039.67	998.17	958.71	924.6	891.51
1963	3882.94	3600.01	3140.15	2894.15	2616.89	2364.44	2150.72	1979.21	1838.41	1713.27	1606.26	1516.84	1442.94	1380.45	1321.74
1964	1902.38	1769.64	1640.6	1479.62	1334.23	1217.36	1118.93	1033.71	959.93	896.27	841.02	793.12	751.82	715.83	686.99
1965	2575	2476.88	2345.68	2244.02	2214.18	2192.37	2159.94	2084.05	2007.53	1940.17	1874.15	1812.91	1761.23	1726.76	1692.5
1966	5399.6	5345.79	5017.43	4654.78	4376.39	4136.1	3879.77	3631.91	3434.2	3267.33	3116.55	2982.94	2878.73	2780.31	2689.7
1967	5191.52	5130.69	4999.91	4904.9	4842.74	4789.45	4738.92	4636.97	4476.17	4313.46	4283.58	4289.9	4255.16	4191.61	4111.15
1968	2651.53	2521.78	2420.74	2280.12	2122.94	2082.66	2063.02	2037.42	1977.06	1909.33	1850.31	1847.43	1854.95	1831.31	1788.89
1969	4719.16	4697.33	4683.51	4670.16	4649.54	4625.95	4577.05	4527.52	4439.68	4321.8	4218.43	4152.07	4140.34	4111.53	4075.92
1970	4082	3875.95	3790.31	3648.72	3513.97	3386.14	3283.84	3157.49	3022.13	2889.28	2762.03	2651.74	2549.38	2451.58	2358.77
1971	3349.79	3214.55	3225.05	3200.03	3175.88	3066.31	2948.63	2828.44	2701.6	2596.08	2517.65	2487.99	2462.69	2428.72	2391
1972	3118.43	3054.86	3016.34	2978.36	2940.11	2875.6	2821.64	2725.13	2627.26	2532.14	2430.78	2338.92	2269.11	2215.94	2168.72
1973	3198.05	3195.25	3090.56	2966.9	2893.27	2869.9	2816.58	2726.68	2655.8	2566.57	2487.79	2466.76	2470.55	2472.42	2457.47
1974	5712.16	5701.38	5617.1	5437.36	5266.77	5101.37	4959.17	4826.85	4719.49	4622.89	4517.06	4399.23	4272.46	4140	4007.58
1975	6156.81	6111.41	6004.81	5912.29	5733.31	5612.91	5475.2	5359.16	5220.47	5067.66	4927.47	4788.14	4620.69	4468.6	4322.38
1976	5097.04	4985.21	4869.91	4809.62	4728.44	4622.44	4542.79	4459.33	4389.62	4321.72	4270.59	4214.86	4166.59	4109.69	4057.63
1977	1899.96	1776.08	1690.56	1601.78	1507.91	1412.63	1321.25	1250.26	1182.14	1118.45	1060.58	1008.89	966.26	935.51	908.85
1978	5162.51	5156.29	4972.68	4870.95	4665.78	4393.31	4141.43	3930.74	3726.54	3535.44	3357.86	3195.06	3051.54	2953.72	2918.06
1979	3534.92	3513.6	3294.75	3037.34	2861.26	2663.71	2480.03	2320.44	2185.34	2068.47	1979.28	1937.98	1914.5	1877	1828.29
1980	3213.92	3067.14	2861.3	2729.77	2547.92	2377.26	2223.1	2085.48	1964.01	1863.56	1768.73	1679.36	1596.27	1519.4	1448.59
1981	3517.93	3464.21	3413.02	3314.05	3186.34	3074.45	2937.36	2807.61	2817.64	2862.32	2879.55	2866.24	2851.57	2827.16	2791.25
1982	839.66	770.82	715.2	637.23	570.44	521.39	488.89	466.64	445.21	425.91	408.05	391.86	377.47	366.5	361.27
1983	2711.6	2707.51	2668.96	2604.54	2549.01	2491.31	2408.2	2344.92	2257.38	2166.35	2087.17	2007.7	1931.3	1857.68	1786.2
1984	4671	4613.5	4573.33	4494.17	4415.91	4360.73	4290.67	4216.15	4188	4190.51	4182.55	4165.06	4124.94	4084.36	4040.39
1985	2883.18	2859.97	2748.07	2679.63	2567.34	2430.17	2286.36	2151.61	2027.83	1928.94	1846.9	1779.23	1724.41	1669.48	1621.6
1986	1574.65	1502.12	1464.35	1370.69	1310.8	1237.88	1174.76	1128.67	1095.33	1061.43	1033.04	1000.96	972.88	944.6	915.16
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2001	2678.75	2567.4	2524.78	2385.18	2199.37	2064.14	1923.24	1786.72	1671.26	1573.76	1493.9	1435.61	1397.92	1411.11	1434.85
2002	2321.2	2274.65	2211.3	2195.91	2164.27	2100.25	2039.08	1981.95	1930.36	1863.24	1784.59	1713.16	1644.49	1577.97	1515.06
2003	3111.81	3102.07	3028.47	2932.35	2811.98	2658.68	2524.43	2374.42	2255.27	2196.64	2153.21	2126.84	2103.84	2064.67	2026.94
2004	1604.07	1511.53	1471.92	1391.77	1357.08	1305.76	1267.65	1206.53	1141.18	1087.39	1037.55	992.9	953.51	922.94	913.32
2005	3372.48	3341.55	3320.39	3251.43	3204.73	3120.27	3073.42	3066.26	3047.35	3004.17	2934.96	2859.7	2784.51	2699.53	2607.53
2006	1308.92	1258.27	1145.79	1076.5	1000.3	931.5	874.11	824.01	782.68	758.72	742.39	724.67	705.34	713.26	713.8
2007	3618.97	3612.39	3579.45	3562.42	3534.76	3499.7	3463.49	3423.99	3384.58	3345.26	3301.24	3253.47	3205.11	3160.71	3112.8
2008	3524.17	3509.35	3471.54	3433.03	3389.12	3358.03	3314.35	3275.74	3224.35	3171.89	3119.47	3052.86	2981.85	2913.4	2846.42
2009	2668.48	2604.89	2515.57	2459.11	2363.78	2221.73	2087.3	1972.87	1857.85	1750	1651.86	1563.93	1488.39	1420.68	1384.18

El objetivo principal del análisis de frecuencias es correlacionar la magnitud de eventos extremos con la frecuencia con la que ocurren, mediante el uso de funciones de probabilidad, de forma que se pueda estimar la frecuencia con que una variable supera una determinada magnitud (Domínguez et al., 2014).

Los datos se trazaron en papel de probabilidad para verificar su comportamiento dentro de una función de distribución en particular. El análisis de frecuencias establece una relación entre probabilidad de ocurrencia de un evento (período de retorno) y su magnitud de manera que los gastos grandes tendrán un período de retorno grande, o sea una probabilidad de ocurrencia pequeña.

Por ser una distribución de probabilidad desarrollada para el análisis de valores extremos, como gastos máximos y mínimos, se utilizó la función de distribución Gumbel para dibujar las gráficas. En el eje de las ordenadas se encuentran los gastos máximos anuales y en el eje de las abscisas, la variable reducida Z (Tabla 3) misma que depende del período de retorno. Su estimación se llevó a cabo por medio de la distribución de Weibull:

$$Z = -\ln [\ln(T/T-1)]$$

Tabla 3. Variable reducida “Z” para una duración de un día (gastos de mayor a menor) de la estación Las Adjuntas.

No.	Q(m³/s)	T=(N+1)/m	Z=-ln(T/T-1)
1	6640.92	54.00	3.9797
2	6182.76	27.00	3.2770
3	6156.81	18.00	2.8619
4	5712.16	13.50	2.5645
5	5399.6	10.80	2.3314
6	5377.49	9.00	2.1389
7	5191.52	7.71	1.9745
8	5162.51	6.75	1.8304
9	5097.04	6.00	1.7020
.	.	.	.
.	.	.	.
45	1899.96	1.20	-0.5832
46	1822.15	1.17	-0.6469
47	1682.98	1.15	-0.7145
48	1604.07	1.13	-0.7872
49	1574.65	1.10	-0.8669
50	1458.86	1.08	-0.9565
51	1308.92	1.06	-1.0614
52	1276.43	1.04	-1.1927
53	839.66	1.02	-1.3835

Donde

Z es la variable reducida

$T=N+1/m$, Período de retorno

m , posición de los datos en orden descendente,

N , número de elementos.

En la Figura 5 se muestra la gráfica correspondiente a un día para la estación las Adjuntas.

De este análisis se pudo determinar que las estaciones en estudio de la Tabla 1 siguen las funciones de distribución de la Tabla 4.

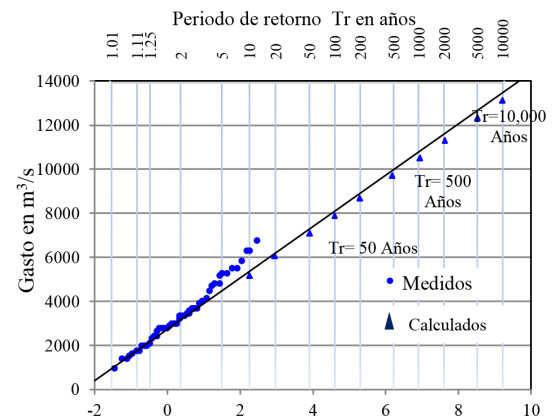


Figura 5. Gráfica en papel Gumbel de la estación Las Adjuntas para una duración de un día.

Tabla 4. Funciones de distribución de las estaciones hidrométricas en estudio.

Estación	Función de Distribución
Tierra Blanca	Doble Gumbel
Temamatla	Doble Gumbel
Requetemu	Gumbel
San Vicente	Gumbel
Tempoal	Doble Gumbel
Ballesmi	Doble Gumbel
Pujal	Doble Gumbel
Choy	Gumbel
Tamuín	Gumbel
El Olivo	Gumbel
Adjuntas	Gumbel
Pánuco	Doble Gumbel
Magiscatzin	Doble Gumbel

Tabla 5. Estación hidrométrica Las Adjuntas. Ajuste a una función de distribución Gumbel para diferentes periodos de retorno.

Duración	Gasto en m³/s para diferentes periodos de retorno en años											
días	Periodo de retorno, T = 2	5	10	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000
1	3048.53	4346.57	5205.99	6030.36	7097.43	7897.04	8693.74	9744.83	10539.22	11333.33	12382.87	13176.74
2	2973.69	4269.03	5126.65	5949.31	7014.15	7812.1	8607.14	9656.04	10448.77	11241.22	12288.57	13080.79
3	2866.27	4149.83	4999.66	5814.83	6870.00	7660.69	8448.51	9487.87	10273.4	11058.65	12096.48	12881.50
4	2773.23	4040.65	4879.8	5684.73	6726.62	7507.38	8285.28	9311.58	10087.24	10862.61	11887.39	12662.54
5	2669.10	3913.47	4737.36	5527.65	6550.60	7317.15	8080.91	9088.55	9850.10	10611.37	11617.52	12378.57
6	2569.88	3790.28	4598.29	5373.35	6376.59	7128.38	7877.42	8865.64	9612.52	10359.12	11345.88	12092.27
7	2459.88	3650.68	4439.09	5195.35	6174.26	6907.81	7638.68	8602.93	9331.69	10060.19	11023.02	11751.3
8	2372.79	3529.37	4295.13	5029.66	5980.44	6692.92	7402.8	8339.34	9047.16	9754.73	10689.89	11397.25
9	2279.22	3405.19	4150.68	4865.77	5791.39	6485	7176.09	8087.85	8776.93	9465.77	10376.18	11064.82
10	2209.1	3305.29	4031.07	4727.25	5628.38	6303.66	6976.47	7864.11	8534.97	9205.59	10091.92	10762.35
11	2134.43	3204.16	3912.42	4591.79	5471.17	6130.15	6786.71	7652.93	8307.6	8962.03	9826.97	10481.21
12	2082.31	3128.76	3821.6	4486.19	5346.44	5991.07	6633.35	7480.71	8121.13	8761.32	9607.44	10247.44
13	2026.86	3052.73	3731.94	4383.45	5226.77	5858.72	6488.36	7319.06	7946.88	8574.47	9403.94	10031.35
14	1954.78	2942.83	3597.01	4231.76	5036.74	5645.4	6251.84	7051.91	7656.59	8261.05	9059.95	9664.23
15	1924.54	2904.68	3553.62	4176.1	4981.84	5585.62	6187.2	6980.88	7580.72	8180.34	8972.84	9572.29

A partir de los ajustes a funciones de distribución obtenidos en la Tabla 5, se dibujaron las curvas Q-d-T, las cuales son de gran utilidad para fines de diseño (Figura 6).

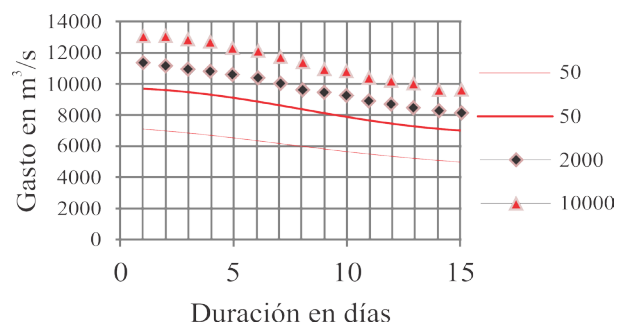


Figura 6. Curvas Q-d-T de la estación Las Adjuntas

Avenida de diseño

Las avenidas de diseño se estiman conforme al procedimiento siguiente:

- 1) Se seleccionan los gastos correspondientes al periodo de retorno de interés y se aísla la columna correspondiente.
- 2) Cada uno de los valores se consideran como gasto promedio (Q_{medio}) de cada duración. A partir de los gastos promedio se obtienen los gastos diarios ($Q_{individual}$), los cuales se obtienen conforme a la siguiente expresión:

$$Q_{ind} = nQ_{medio} - \left(\sum_{i=1}^{n-1} Q_{individual\ i} \right)$$

Siendo n el número del gasto individual a obtener e i el contador de los gastos individuales. Cada uno de los gastos individuales corresponde al gasto medio de un día cualquiera, por lo que la duración del hidrograma será de 15 días.

A partir de los gastos individuales se obtiene el hidrograma de la avenida de diseño, colocando al centro el gasto de mayor magnitud (pico del hidrograma) y a los lados los gastos individuales alternados y ordenados (Tabla 6).

Tabla 6. Avenida de diseño para un T de 50 años de la estación Las Adjuntas.

Días	Q_{medio} m^3/s	nQ_{medio}	$SQ_{individual\ i}$	$Q_{individual}$	Ave. de diseño
1	7097.43	7097.43	0	7097.43	3637.00
2	7014.15	14028.3	7097.43	6930.87	3790.73
3	6870.00	20610.0	14028.30	6581.70	3899.07
4	6726.62	26906.4	20610.00	6296.48	4278.99
5	6550.6	32753.0	26906.48	5846.52	4960.28
6	6376.59	38259.5	32753.00	5506.54	5846.52
7	6174.26	43219.8	38259.54	4960.28	6581.70
8	5980.44	47843.5	43219.82	4623.70	7097.43
9	5791.39	52122.5	47843.52	4278.99	6930.87

Continuación Tabla 6.

10	5628.38	56283.8	52122.51	4161.29	6296.48
11	5471.17	60182.8	56283.80	3899.07	5506.54
12	5346.44	64157.2	60182.87	3974.41	4623.70
13	5226.77	67948.0	64157.28	3790.73	4161.29
14	5077.90	71090.6	67948.01	3142.59	3974.41
15	4981.84	74727.6	71090.60	3637.00	3142.59

A partir de los gastos alternados se dibuja el hidrograma de diseño de la Figura 7.

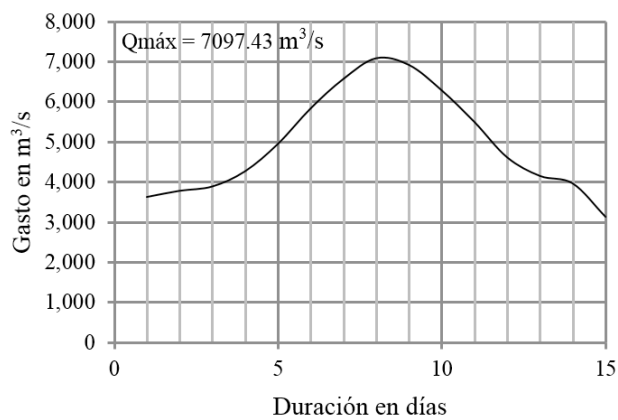


Figura 7. Avenida de diseño para un T de 50 años de la estación Las Adjuntas, del registro histórico de gastos medidos (original).

Estimación de avenidas de diseño a partir de la muestra regional

Como se mencionó inicialmente, en el análisis de registros históricos de gastos de una corriente, es importante contar con una base de datos de escurrimientos amplia, esto es, que se tengan los suficientes registros de gastos para tener la certeza de que el análisis será confiable. Desafortunadamente, en México no siempre se cuenta con la información suficiente para llevar a cabo este análisis, por lo que es necesaria la búsqueda de metodologías que permitan ampliar el tamaño de los registros o bien, generarlos. Esto se puede lograr mediante el método de la Regionalización (Campos, 2014), para generar muestras de mayor tamaño a partir de la información de estaciones hidrométricas con registros de gastos similares.

Identificación de regiones

El análisis regional, se basa en considerar como homogéneos a varios sitios de la región con características similares, esto es, que no dependen del área de captación.

Para identificar el grupo de estaciones hidrométricas con características similares en el análisis de gastos, se utilizó el concepto de Regionalización.

Un método para identificar regiones es la prueba F de Fisher con la cual se define si dos conjuntos forman parte de la misma población por medio de sus varianzas. Para realizar la comparación se utiliza su cociente, siendo el numerador el mayor. Si el cociente se encuentra dentro del valor límite de la función F de Fisher, se acepta (Domínguez et al, 2014).

Para el caso de las estaciones del río Pánuco se consideró que si los máximos anuales de cada estación se dividen entre su promedio, la variancia de la nueva muestra es igual al cuadrado del coeficiente de variación, por lo que se elaboró una tabla en la que se determinaron los coeficientes de variación de todas las estaciones, así como los cocientes de variación $(Cv1/Cv2)^2$, siendo $Cv1$ el mayor.

De la tabulación se determinaron los escenarios de regionalización por lo que se propusieron los de las tablas 7, 8 y 9 (Del Ángel y Domínguez, 2014).

Tabla 7. Región 1. Valores de los cocientes $(Cv1/Cv2)^2$ que forman las regiones de las estaciones hidrométricas.

Coeficiente de variación	Temamatla	Tierra Blanca	Tempoal	Magiscatzin
Cv	0.83	0.79	0.74	0.75
Temamatla	1	1.097	1.257	1.211
Tierra Blanca		1	1.146	1.104
Tempoal			1	1.037
Magiscatzin				1

Tabla 8. Región 2. Valores de los cocientes $(Cv1/Cv2)^2$ que forman las regiones de las estaciones hidrométricas.

Coefficiente de variación	Requetemu	San Vicente	Tamuin
Cv	0.58	0.53	0.53
Requetemu	1	1.163	1.168
San Vicente		1	1.004
Tamuin			1

Tabla 9. Región 3. Valores de los cocientes $(Cv1/Cv2)^2$ que forman las regiones de las estaciones hidrométricas.

Coefficiente de variación	Olivo	Choy	Adjuntas
Cv	0.48	0.44	0.42
Olivo	1	1.199	1.348
Choy		1	1.124
Adjuntas			1

Muestra regional

Mediante el método de estación-año (datos existentes integrados en una muestra grande o única), se lleva a cabo el proceso de regionalización, dividiendo los datos de cada estación por su media para formar la muestra grande o única para cada región y se unen todos los datos en un solo registro. En la Tabla 10 se presentan los gastos para dos días, y en la Tabla 11, los gastos divididos por su media para la estación Las Adjuntas.

Divididos los datos por su media, para todas las estaciones de cada región, se genera la muestra grande uniendo todos los datos en un mismo registro.

En la Tabla 12 se presentan los datos de la muestra grande regional para la estación Las Adjuntas. La muestra grande regional se ordena de mayor a menor (al igual que en la Tabla 3) y se dibuja en papel Gumbel para identificar su comportamiento como en la Figura 5.

Tabla 10. Registro de gastos máximos para dos días de la Región 3 en m^3/s , estación Las Adjuntas (Tabla 2)

Estación:	Olivo	Choy	Las Adjuntas (Tabla 2)
1956			6081.21
1957			1241.04
1958			6582.43
1959			2028.37
-	-	-	-
1968	1816.27	41.76	2521.78
1969	3367.57	94.93	4697.33
1970	2922.41	115.88	3875.95
1971	2395.83	53.92	3214.55
-	-	-	-
2002	1656.78		2274.65
2003	2384.79		3102.07
2004	1137.23		1511.53
2005	3015.52		3341.55
2006	1005.25		1258.27
2007			3612.39
2008			3509.35
2009			2604.89

Tabla 11. Registro de gastos divididos por su media de la Región 3, estación Las Adjuntas.

No.	Región: 3	Las Adjuntas
	Q_{max}	Q_{max}/Q_{med}
1	6081.21	1.894
2	1241.04	0.386
3	6582.43	2.050
4	2028.37	0.632
5	1837.63	0.572
6	3041.04	0.947
7	1608.64	0.501
8	3600.01	1.121
-	-	-
49	3341.55	1.041
50	1258.27	0.392
51	3612.39	1.125
52	3509.35	1.093
53	2604.89	0.811
Suma:	170,188.47	
Media:	3211.103	

Tabla 12. Muestra grande regional para la estación Las Adjuntas

				1 Día	
Dato	Xmuestra regional	Dato	Xmuestra regional	Dato	Xmuestra regional
1	0.723	43	1.123	83	1.580
2	1.243	44	0.135	84	0.807
3	1.081	45	0.642	85	1.437
4	0.919	46	1.244	86	1.243
5	0.725	47	1.675	87	1.020
6	0.884	48	0.521	88	0.949
7	1.851	49	1.258	89	0.974
8	2.005	50	1.415	90	1.739
9	0.921	51	0.867	91	1.874
10	0.233	52	0.740	92	1.552
11	1.566	53	1.103	93	0.578
12	1.195	54	1.920	94	1.572
13	1.055	55	1.204	95	1.076
14	1.356	56	1.877	96	0.978
15	0.266	57	1.821	97	1.071
16	0.843	58	1.184	98	0.256
-	-	-	-	-	-
26	2.091	67	0.672	108	0.859
27	0.787	68	0.906	109	1.637
28	0.568	69	0.983	110	0.705
29	0.645	70	1.614	111	0.609
30	0.473	71	1.514	112	0.842
31	0.934	67	0.672	113	0.798
32	1.232	72	1.882	114	0.886
33	0.405	73	0.389	115	0.555
34	0.813	74	2.022	116	0.815
35	0.620	75	0.666	117	0.707
36	0.880	76	0.613	118	0.947
37	0.420	77	0.968	119	0.488
38	1.103	78	0.512	120	1.027
39	0.390	79	1.182	121	0.398
40	0.346	80	0.579	122	1.102
41	0.904	81	0.784	123	1.073
42	0.347	82	1.644	124	0.812

Mediante el software AX (CENAPRED, 1997), se realizaron corridas para una distribución Gumbel y se obtuvieron los eventos para diferentes períodos de retorno. Este procedimiento se repitió de 1 a 15 días para todas las duraciones. En la Tabla 13 se muestran los resultados del ajuste para la Región 3.

Tabla 13. Resultados del ajuste a una función de distribución Gumbel en la Región 3.

Días	Periodo de retorno en años					
	50	500	1000	2000	5000	10000
1	2.19	3.01	3.26	3.50	3.83	4.08
2	2.31	3.21	3.49	3.76	4.12	4.39
3	2.33	3.25	3.53	3.8	4.17	4.45
4	2.34	3.28	3.56	3.84	4.21	4.49
5	2.36	3.31	3.60	3.88	4.26	4.54
6	2.38	3.34	3.62	3.91	4.29	4.58
7	2.36	3.31	3.60	3.88	4.26	4.55
8	2.390	3.360	3.65	3.940	4.330	4.620
9	2.390	3.360	3.65	3.950	4.330	4.620
10	2.41	3.39	3.68	3.97	4.36	4.65
11	2.42	3.41	3.71	4.00	4.39	4.69
12	2.43	3.42	3.72	4.01	4.41	4.70
13	2.44	3.43	3.73	4.03	4.43	4.73
14	2.44	3.44	3.74	4.04	4.43	4.73
15	2.44	3.44	3.74	4.04	4.4	4.74

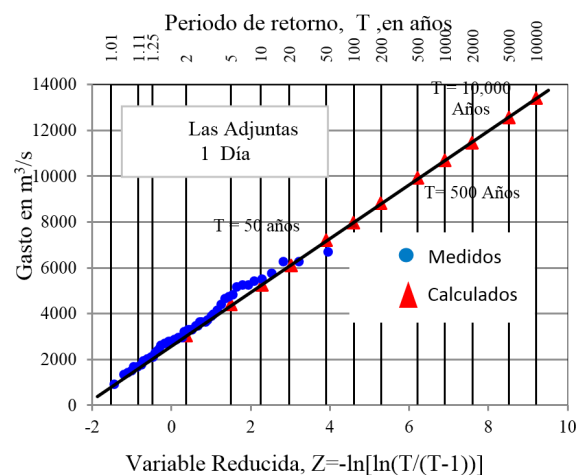


Figura 8. Ajuste a una función de distribución Gumbel de los datos medidos y regionales calculados para 1 día de duración.

Al multiplicar los eventos regionales por la media de los datos de cada estación, se obtienen los eventos para cada una de ellas. En la Figura 8, y en la Tabla 14 se muestran los resultados de la regionalización para la estación Las Adjuntas.

Tabla 14. Región 3. Resultados de la regionalización en la Estación las Adjuntas.

Días	Gasto medio en m^3/s	Gasto en m^3/s para diferentes períodos de retorno			
		50	500	2000	10000
1	3285.06	7194.2	9888.04	11497.7	13403.06
2	3211.103	7417.6	10307.6	12073.7	14096.7
3	3117.35	7263.4	10131.4	11845.9	13872.1
4	3012.85	7050.1	9882.1	11569.3	13527.6
5	2903.56	6852.4	9610.7	11265.8	13182.1
6	2794.26	6650.3	9332.8	10925.5	12797.7
7	2690.23	6348.9	8904.6	10438.1	12240.5
8	2590.67	6191.7	8704.6	10207.2	11968.9
9	2501.91	5979.5	8406.4	9882.5	11558.8
10	2421.7	5836.3	8209.6	9614.2	11260.9
11	2349.9	5686.9	8013.3	9399.8	11021.3
12	2285.8	5554.5	7817.4	9166.1	10743.3
13	2227.3	5434.6	7639.6	8976.0	10535.1
14	2171.5	5298.6	7470.2	8773.2	10271.6
15	2119.2	5170.9	7290.1	8561.7	10045.1

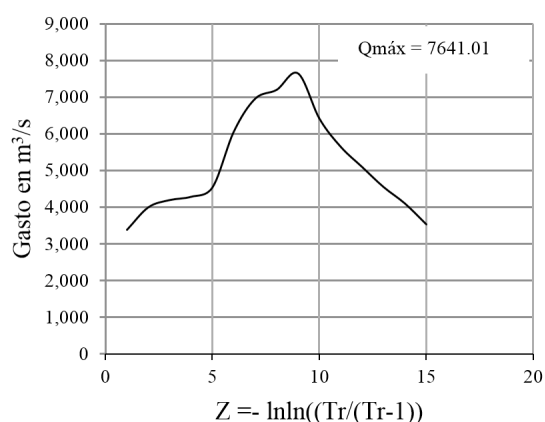


Figura 7. Avenida de diseño de la estación las Adjuntas para un T de 50 años.

Avenida de diseño en m^3/s

Conforme al método de bloques alternos descrito anteriormente, se pueden generar las avenidas de diseño. En la Tabla 15, se presenta el cálculo de la avenida de diseño para un T de 50 años de la estación Las Adjuntas y, en la Figura 9, el hidrograma correspondiente.

Tabla 15. Región 3. Cálculo de la avenida de diseño para un T de 50 años.

Las Ad-juntas	Gasto en m³/s				
No.	Q Medio	nQ medio n	SQ individual	Q individual	Avenida diseño
1	7194.29	7194.29	0	7194.29	3382.57
2	7417.65	14835.3	7194.29	7641.01	3995.71
3	7263.42	21790.2	14835.30	6954.95	4192.82
4	7050.07	28200.2	21790.25	6410.01	4282.53
5	6852.39	34261.9	28200.26	6061.70	4540.52
6	6650.34	39902.0	34261.96	5640.08	6061.70
7	6348.94	44442.5	39902.04	4540.52	6954.95
8	6191.70	49533.6	44442.56	5091.07	7194.29
9	5979.57	53816.1	49533.63	4282.53	7641.01
10	5836.33	58363.2	53816.16	4547.10	6410.01
11	5686.92	62556.0	58363.26	4192.8	5640.08
12	5554.53	66654.4	62556.09	4098.33	5091.07
13	5434.62	70650.1	66654.41	3995.71	4547.10
14	5298.67	74181.4	70650.12	3531.31	4098.33
15	5170.93	77564.0	74181.43	3382.57	3531.31

Análisis comparativo

Con base en el análisis anterior, se hicieron las comparaciones de las avenidas original y regional, las cuales se presentan en la Tabla 16 para la estación Las Adjuntas y en la Figura 10, el comparativo para un T de 50 años.

Tabla 16. Región 3. Comparación de avenidas original y regional para la estación Las Adjuntas para un T de 50 años.

Días	Avenida de diseño original	Avenida de diseño regional
1	3637.00	3382.57
2	3790.73	3995.71
3	3899.07	4192.82
4	4278.99	4282.53
5	4960.28	4540.52
6	5846.52	6061.70
7	6581.70	6954.95
8	7097.43	7194.29
9	6930.87	7641.01
10	6296.48	6410.01
11	5506.54	5640.08
12	4623.70	5091.07
13	4161.29	4547.10
14	3974.41	4098.33
15	3142.59	3531.31

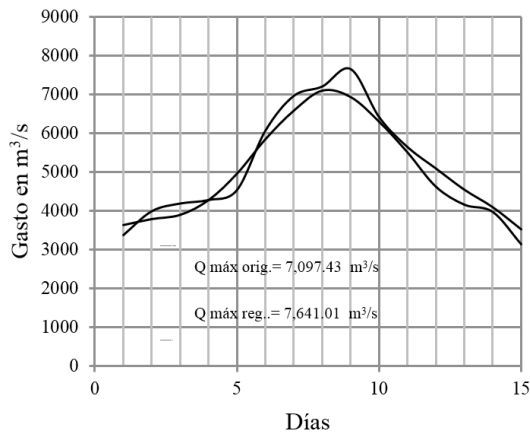


Figura 10. Región 3. Comparación de resultados para un T de 50 años para la estación Las Adjuntas.

Una vez obtenidos los hidrogramas para ambos casos (registros original y regional), se calculó la diferencia entre las áreas bajo las curvas. Dicha área representa la diferencia entre los volúmenes escurridos. En la figuras 11, 12, 13, 14

y 15, se muestran las diferencias de volúmenes para la estación Las Adjuntas para períodos de retorno de 50, 100, 1,000, 5,000 y 10,000 años. Las comparaciones para el resto de las estaciones y períodos de retorno se muestran en las figuras 19 a 63.

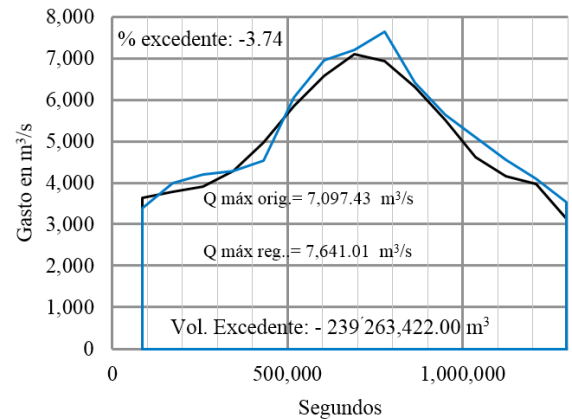


Figura 11. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 50 años para la estación Las Adjuntas.

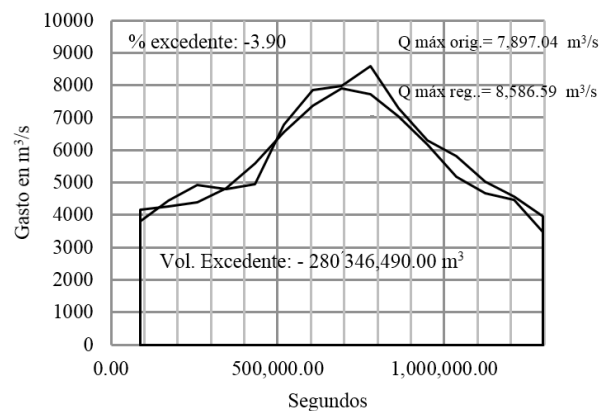


Figura 12. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 100 años para la estación Las Adjuntas.

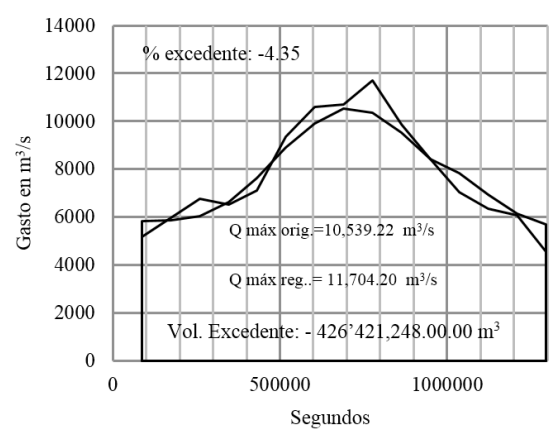


Figura 13. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un Tr = 1000 años para la Estación Las Adjuntas.

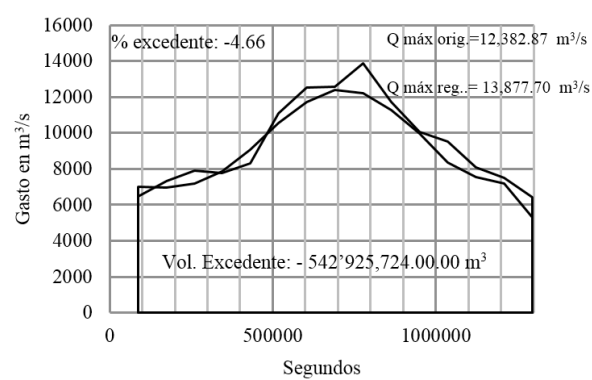


Figura 14. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 5000 años para la Estación Las Adjuntas.

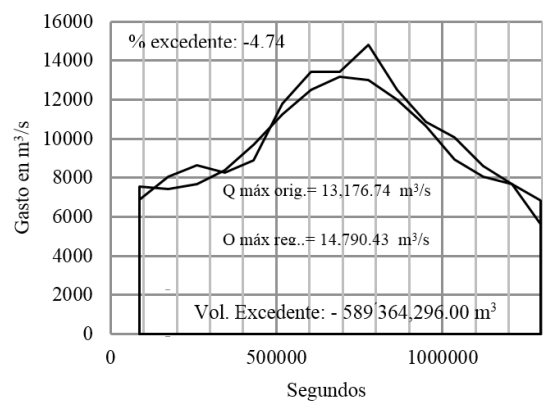


Figura 15. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T =10,000 años para la Estación Las Adjuntas.

Con la finalidad de hacer una comparación entre el porcentaje que representan dichas diferencias, se divide la diferencia entre los volúmenes, esto es, entre el volumen excedente y el volumen obtenido del registro regional:

$$\% \text{ excedente} = (\text{Vol}_{\text{excedente}} / \text{Vol}_{\text{regional}}) \times 100.$$

Para el caso de la estación Las Adjuntas se obtiene:

$$\% \text{ excedente} = (-239,263,422 / 6402,849,774) \times 100 = -3.74\%$$

La Tabla 17 muestra los volúmenes excedentes correspondientes a la estación Las Adjuntas para diferentes periodos de retorno.

Tabla 17.Volúmenes excedentes en la estación Las Adjuntas.

Las Adjuntas T (años)	Volumen en m³			% Exc
	Original	Regional	Excedente	
50	6163'586,352.00	6402'849,774.00	-239,263,422.00	-3.74
100	6909'738,912.00	7190'085,402.00	-280,346,490.00	-3.90
1000	9375'274,368.00	9801'695,616.00	-426,421,248.00	-4.35
5000	11,095'653,024.0	116,438'578,748.0	-542,925,724.00	-4.66
10,000	11,136'450,080.0	12,425'814,376.0	-589,364,296.00	-4.74

Los resultados que se presentan en la Tabla 17 se cotejan al comparar los ajustes de las muestras original y regional. Estas diferencias se ilustran en las figuras 16, 17 y 18 en donde se muestran los comportamientos de los ajustes para las duraciones de escurrimientos de 1, 8 y 15 días respectivamente, de la estación Las Adjuntas. En las gráficas se presentan, además, los valores de los gastos máximos anuales.

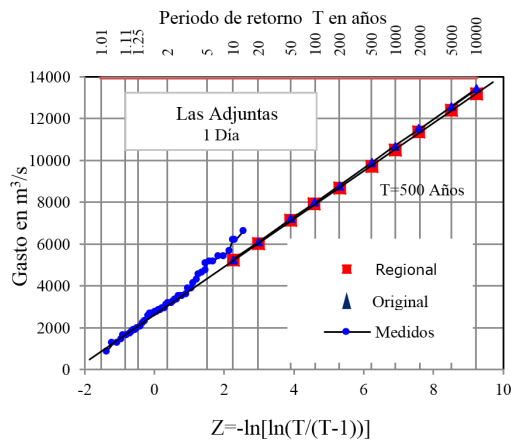


Figura 16. . Comparativo entre ajustes.

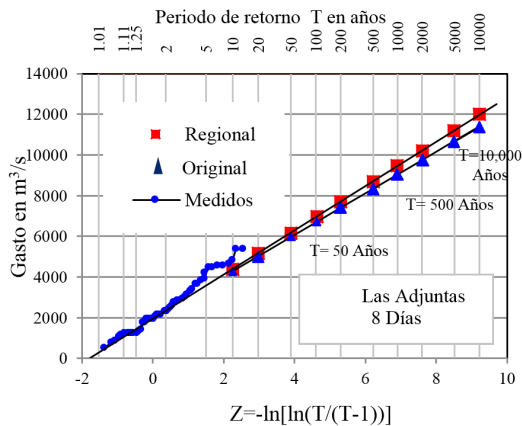


Figura 17. Comparativo entre ajustes para 8 días en la estación Las Adjuntas.

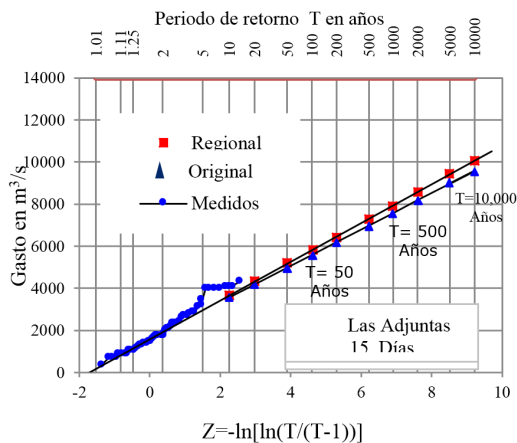


Figura 18. Comparativo entre ajustes para 15 días en la estación Las Adjuntas.

Siguiendo el mismo procedimiento se determinaron los volúmenes y sus gráficos para las estaciones en estudio. En las figuras 17, 18, 19, 20 y 21, se muestran las comparaciones de volúmenes de escurrimiento para la estación El Olivo y en las 22, 23, 24, 25 y 26 las de la estación Choy para diferentes períodos de retorno para la Región 3 y en las tablas 18 y 19, se presentan los volúmenes excedentes.

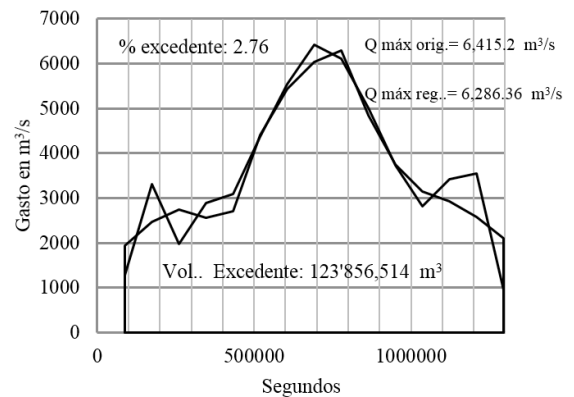


Figura 19. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 50$ años de la estación El Olivo.

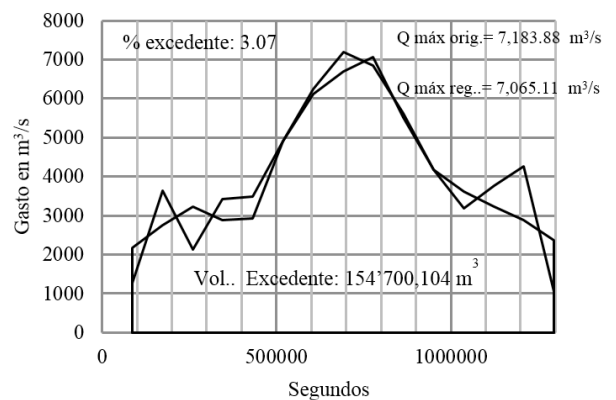


Figura 20. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 100$ años de la estación El Olivo.

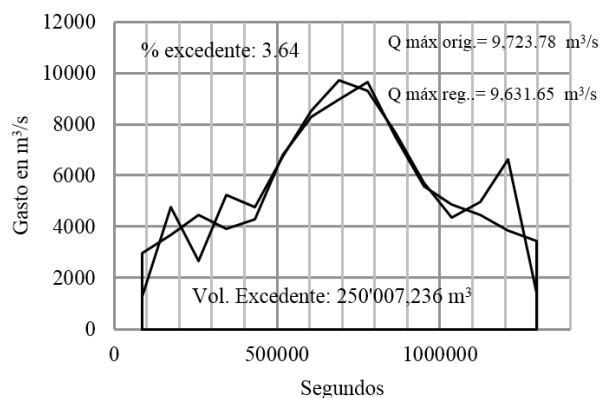


Figura 21. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 1000 años en la estación El Olivo.

Tabla 18. Volúmenes excedentes en la estación El Olivo

El Olivo T (años)	Volumen en m³			% Exc
	Original	Regional	Excedente	
50	4,609'433,520.00	4,485'577,006.00	123'856,514.00	2.76
100	5,191'782,480.00	5,037'082,376.00	154'700,104.00	3.07
1000	7,116'607,296.00	6,866'600,060.00	250'007,236.00	3.64
5000	8,458'748,352.00	8,153'445,923.00	305'302,429.00	3.74
10,000	9,036'919,008.00	8,704'951,292.00	331'967,716.00	3.81

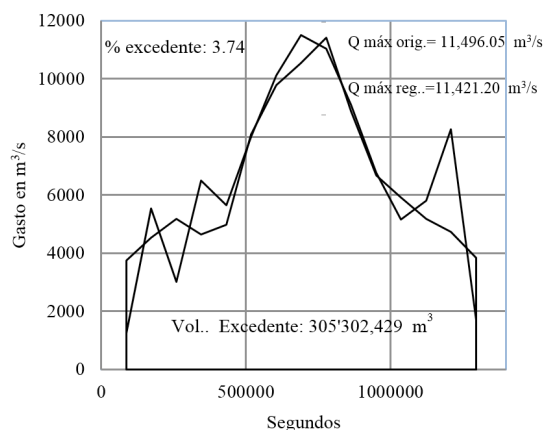


Figura 22. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 5000 años en la estación El Olivo

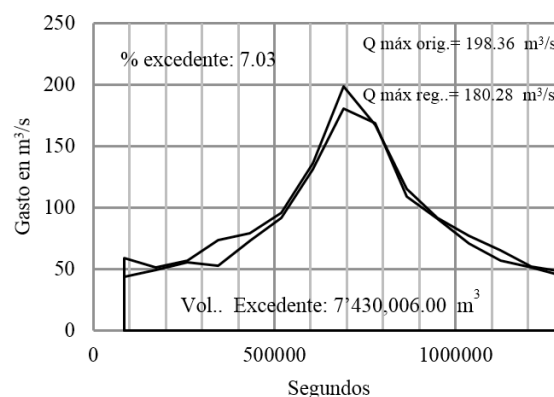


Figura 24. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 50 años en la estación Choy.

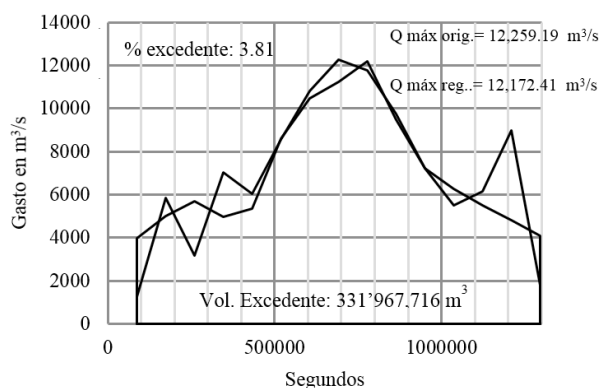


Figura 23. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 10,000 años en la estación El Olivo.

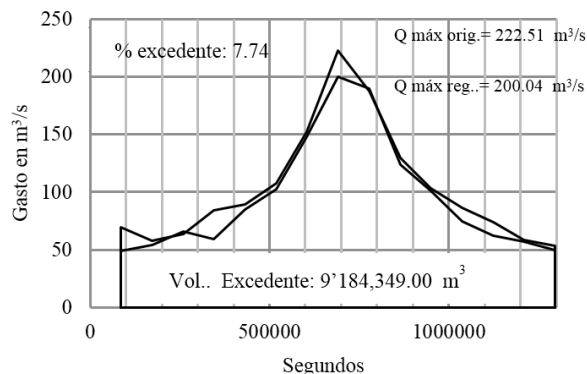


Figura 25. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 100 años en la estación Choy.

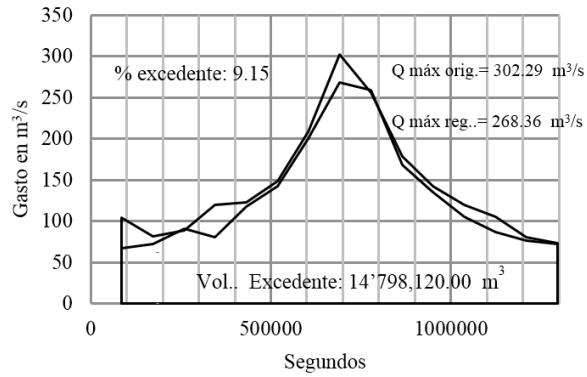


Figura 26. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 1000 años en la estación Choy.

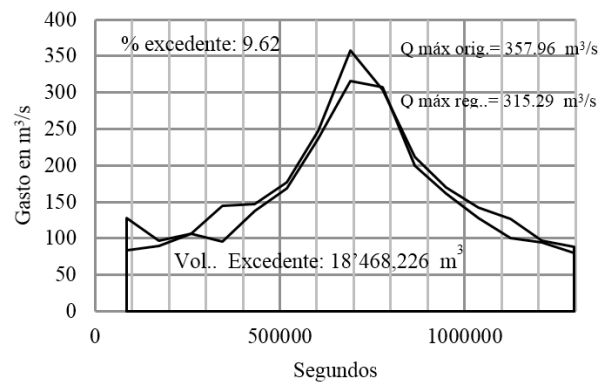


Figura 27. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 5000 años en la estación Choy.

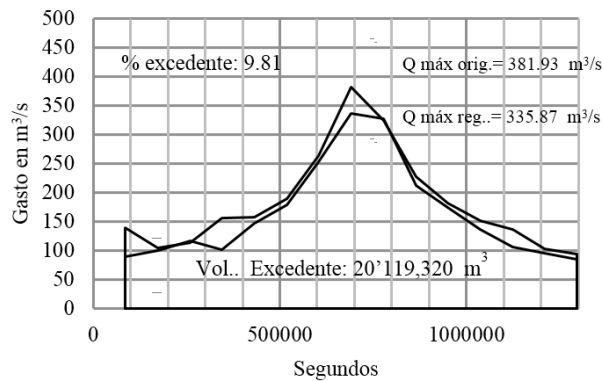


Figura 28. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 10,000 años en la estación Choy.

Tabla 19. Volúmenes excedentes en la estación Choy

Choy T (años)	Volumen en m³			% Exc
	Original	Regional	Excedente	
50	1130'94,576.00	105'664,569.70	7'430,006.00	7.03
100	127'840,464.00	118'656,115.1	9'184,349	7.74
1000	176'550,624.00	161'752,504.00	14'798,120.00	9.15
5000	210'534,336.00	192'066,110.00	18'468,226.00	9.62
10,000	225'176,976.00	205'057,655.60	20'119,320.00	9.81

Siguiendo el mismo procedimiento se determinaron los hidrogramas para las avenidas de diseño de las regiones 1 y 2 de las tablas 7 y 8, con sus volúmenes excedentes.

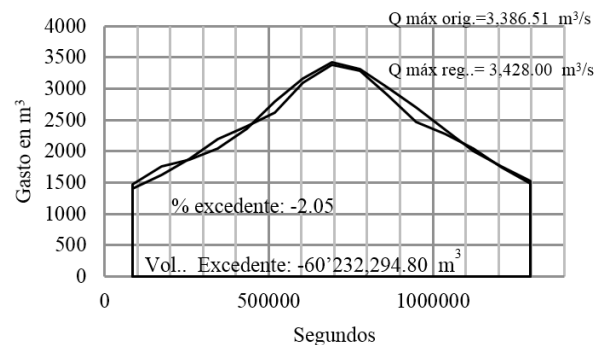


Figura 29. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 50 años en la estación Tamuín.

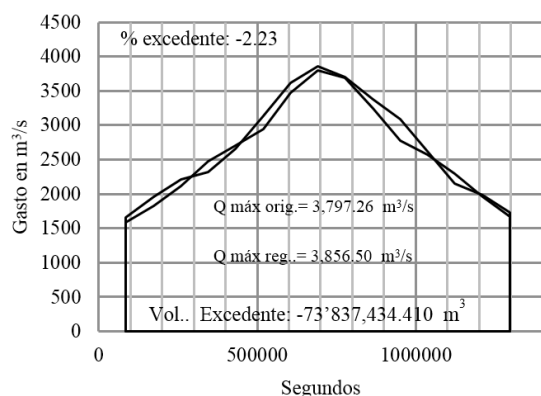


Figura 30. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 100 años en la estación Tamuín.

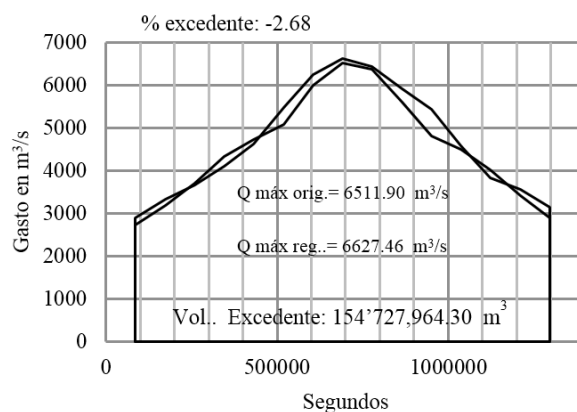


Figura 33. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 10,000 años en la estación Tamuín.

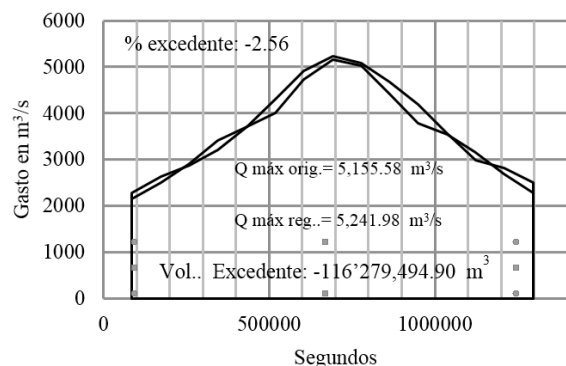


Figura 31. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 1000 años en la estación Tamuín.

Tabla 20. Volúmenes excedentes en la estación Tamuín

Tamin T (años)	Volumen en m³			%
	Original	Regional	Excedente	
50	2,881'175,616.0	2,941'407,911.00	-60'232,294.80	-2.05
100	3,241'082,592.0	3,314'920,026.0	-73'837,434.41	-2.23
1000	4,430'321,136.0	4,546'600,631.0	-116'279,494.90	-2.56
5000	5,260'141,296.0	5,410'347,398.0	-150'206,102.3	-2.78
10,000	5,617'459,296.0	5772'187,260.0	-154'727,964.3	-2.68

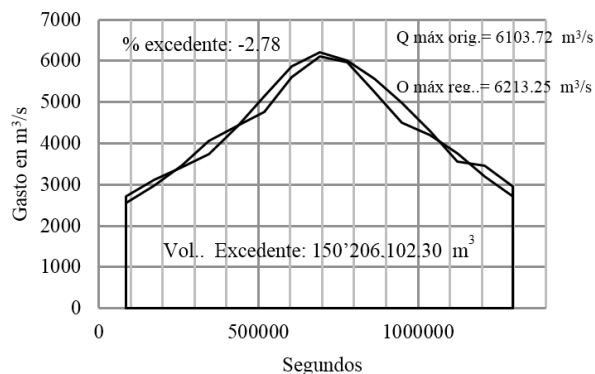


Figura 32. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 5000 años en la estación Tamuín.

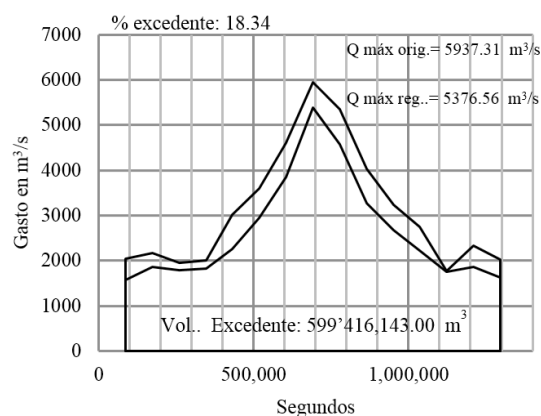


Figura 34. Región 2. San Vicente. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 50 años en la estación San Vicente.

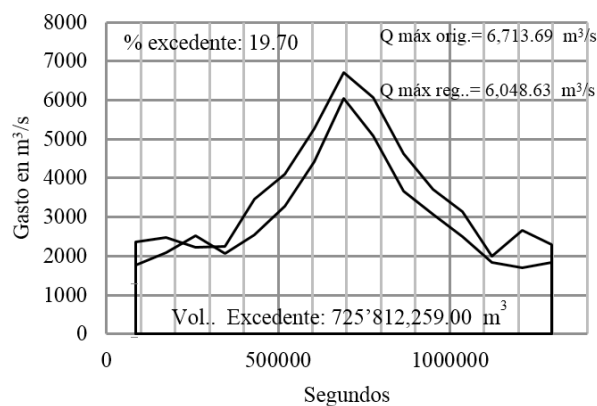


Figura 35. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 100$ años en la estación San Vicente.

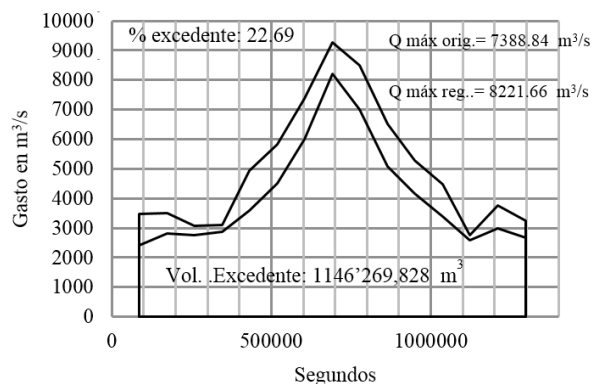


Figura 36. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 1000$ años en la estación San Vicente.

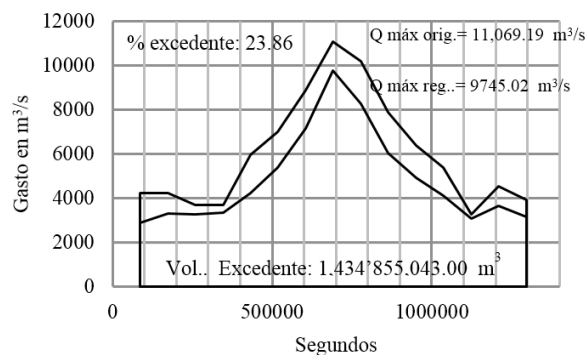


Figura 37. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 5000$ años en la estación San Vicente.

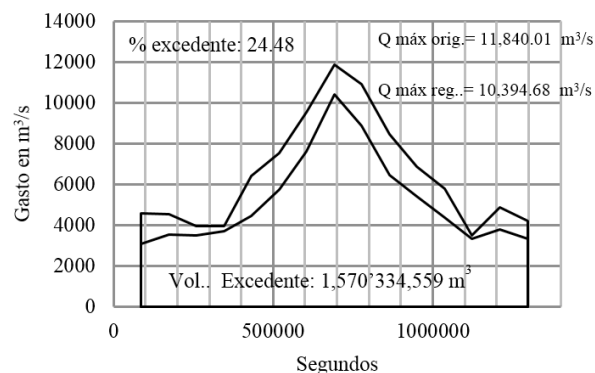


Figura 38. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 10,000$ años en la estación San Vicente.

Tabla 21. Volúmenes excedentes en la estación San Vicente

San Vicente T (años)	Volumen en m^3			% Exc
	Original	Regional	Excedente	
50	3,868'426,512	3,269'010,369	599'416,143	18.34
100	4,409'935,056	3,684'122,797	725'812,259	19.70
1000	6,199'240,176	5,052'970,348	1,146'269,828	22.69
5000	7,447'772,880	6,012'917,837	1,434'855,043	23.86
10,000	7,985'392,560	6,415'058,001	1,570'334,559	24.48

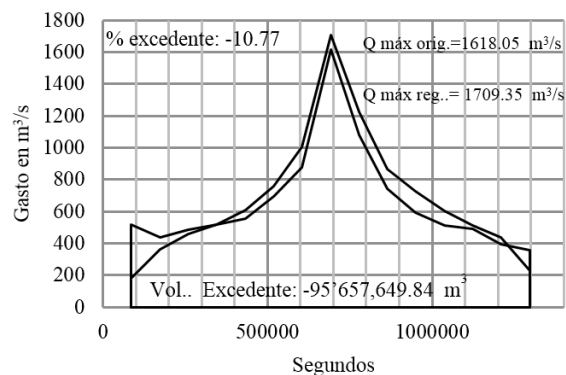


Figura 39. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 50$ años en la estación Requetemu.

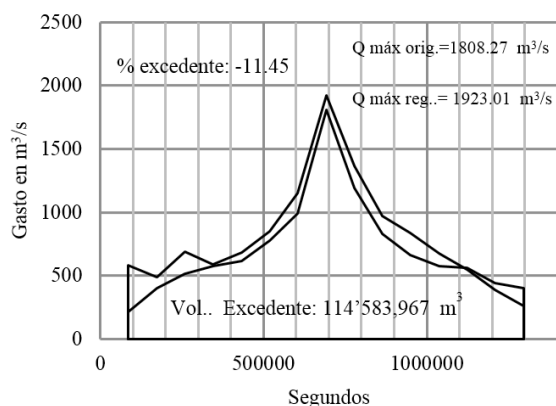


Figura 40. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 100$ años en la estación Requetemu.

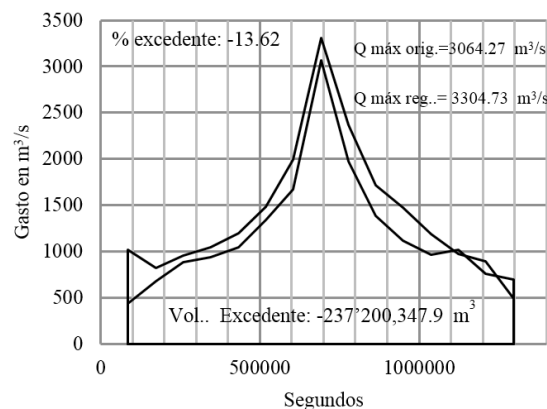


Figura 43. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 10,000$ años en la estación Requetemu.

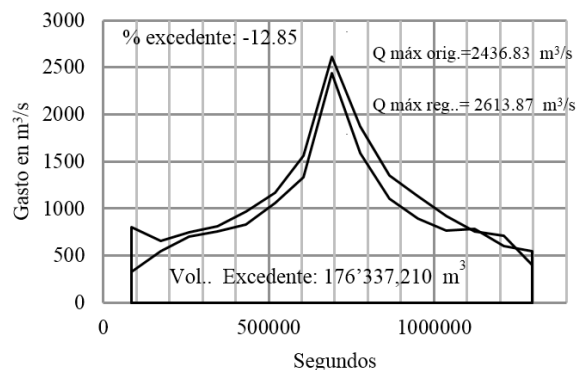


Figura 41. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 1000$ años en la estación Requetemu.

Tabla 22. Volúmenes excedentes en la estación Requetemu

Requetemu T (años)	Volumen en m^3			%
	Original	Regional	Excedente	
50	792'117,792	887'775,441.8	-95'657,649.84	-10.77
100	885'924,864	1,000'508,831	-114'583,967.3	-11.45
1000	1,195'903,872	1,372'241,082	-176'337,209.8	-12.85
5000	1,412'202,384	1,632'937,045	-220'734,660.8	-13.52
10,000	1,504'947,168	1,742'147,516	-237'200,347.9	-13.62

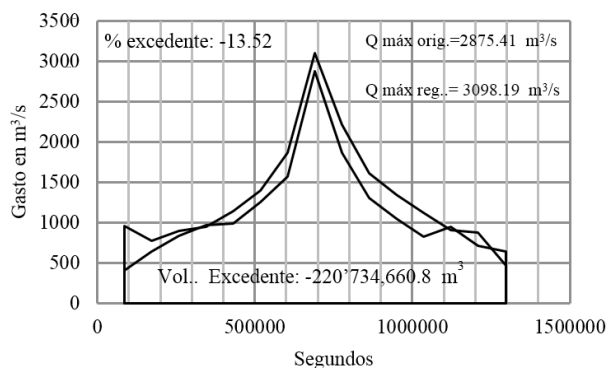


Figura 42. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 5000$ años en la estación Requetemu.

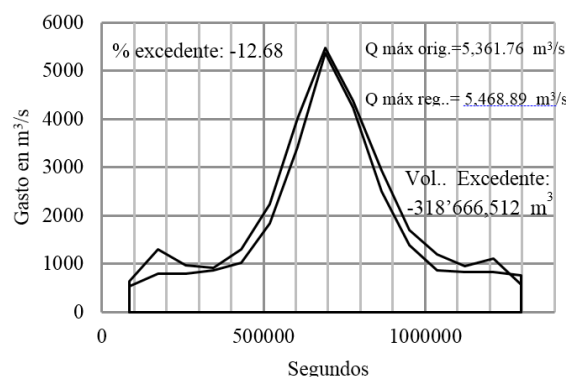


Figura 44. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 50$ años en la estación Tempoal.

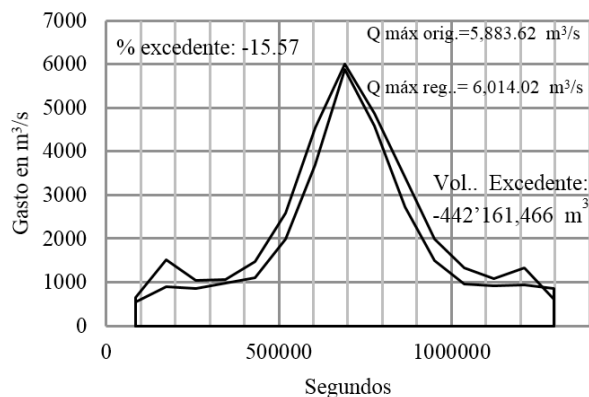


Figura 45. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 100 años en la estación Tempopal.

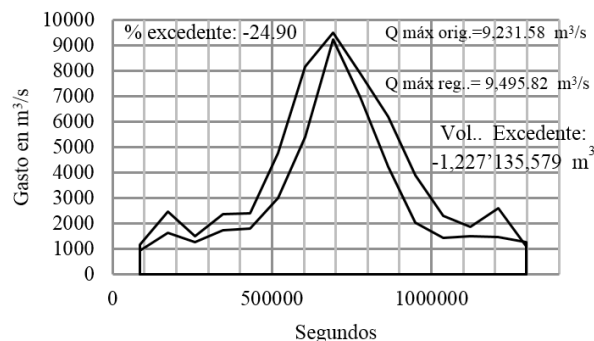


Figura 48. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 10,000 años en la estación Tempopal.

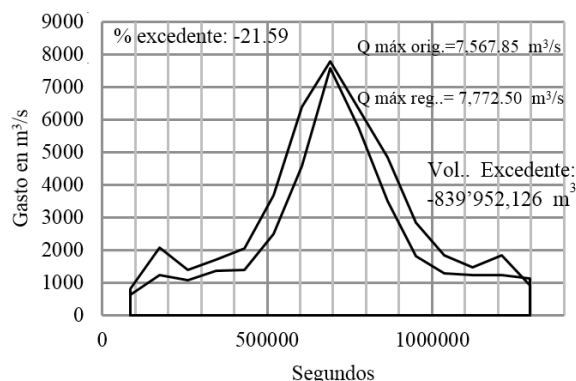


Figura 46. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 1000 años en la estación Tempopal.

Tabla 23. Volúmenes excedentes en la estación Tempopal

Tempopal T (años)	Volumen en m³			% Exc
	Original	Regional	Excedente	
50	2,195'401,968	2,514'068,480	-318,665,512	-12.68
100	2,396'923,056	2839'084,522	-442,161,466	-15.57
1000	3,049'906,176	3,889'858,302	-839,952,126	-21.59
5000	3,501'531,072	4,619'462,169	-1,117'931,097	-24.20
10,000	3,701'717,280	4,928'852,859	-1,227'135,579	-24.90

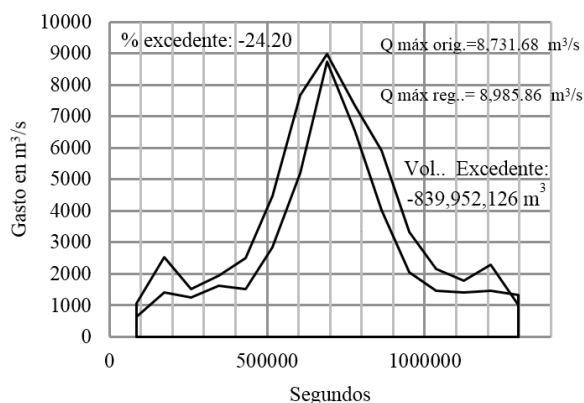


Figura 47. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 5000 años en la estación Tempopal.

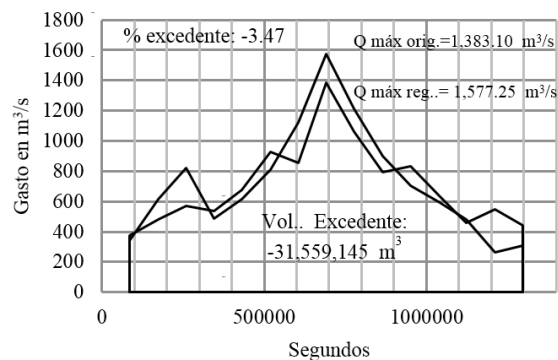


Figura 49. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 50 años en la estación Tierra Blanca.

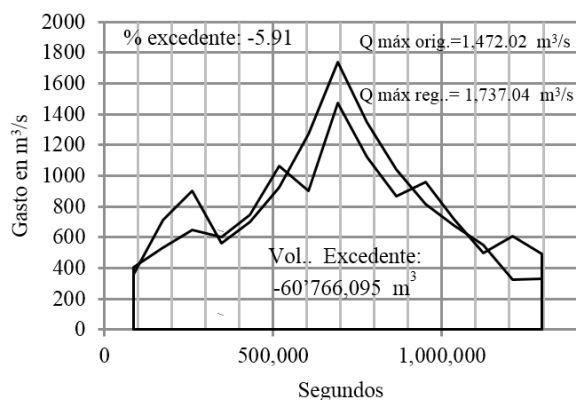


Figura 50. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 100$ años en la estación Tierra Blanca.

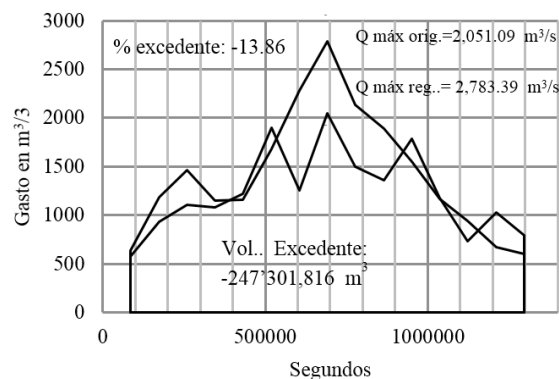


Figura 53. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T_r = 10,000$ años en la estación Tierra Blanca.

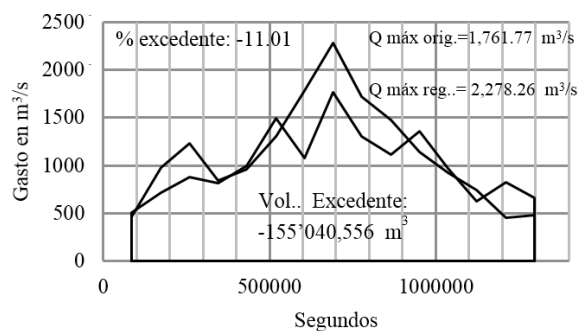


Figura 51. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 1000$ años en la estación Tierra Blanca.

Tabla 24. Volúmenes excedentes en la estación Tierra Blanca

Tierra Blanca T (años)	Volumen en m^3			%
	Original	Regional	Excedente	
50	2,195'401,968	2,514'068,480	-318,665,512	-12.68
100	2,396'923,056	2839'084,522	-442,161,466	-15.57
1000	3,049'906,176	3,889'858,302	-839,952,126	-21.59
5000	3,501'531,072	4,619'462,169	-1,117'931,097	-24.20
10,000	3,701'717,280	4,928'852,859	-1,227'135,579	-24.90

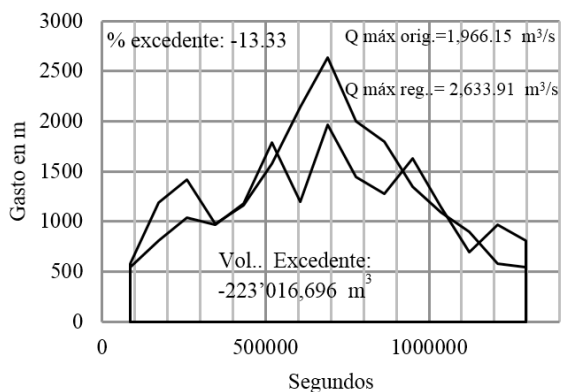


Figura 52. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 5000$ años en la estación Tierra Blanca.

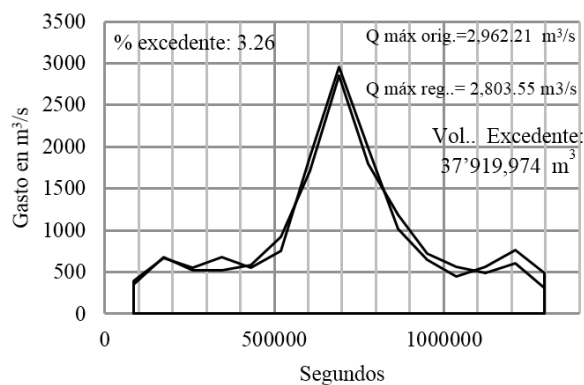


Figura 54. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 50$ años en la estación Temamatla.

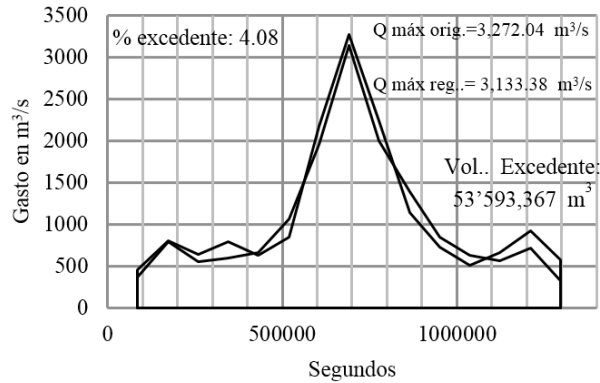


Figura 55. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 100 años en la estación Temamatla.

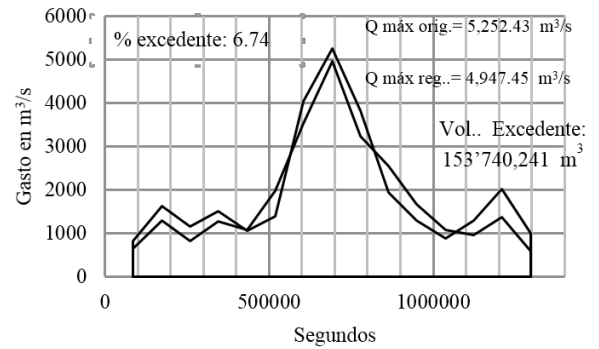


Figura 58. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 10,000 años en la estación Temamatla.

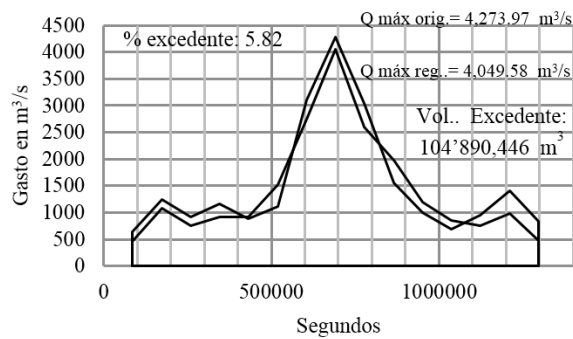


Figura 56. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 1000 años en la estación Temamatla.

Tabla 25. Volúmenes excedentes en la estación Temamatla

Tema- matla T (años)	Volumen en m³			%
	Original	Regional	Excedente	
50	1,202'125,536	1,164'205,562	37'919,974	3.26
100	1,368'298,224	1,314'704,857	53'593,367	4.08
1000	1,906'180,560	1,801'290,114	104'890,446	5.82
5000	2,279'826,864	2,139'150,706	140'676,158	6.58
10,000	2,436'167,232	2,282'426,991	153'740,241	6.74

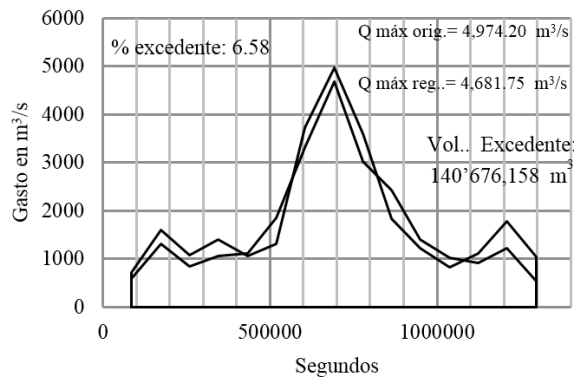


Figura 57. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 5000 años en la estación Temamatla.

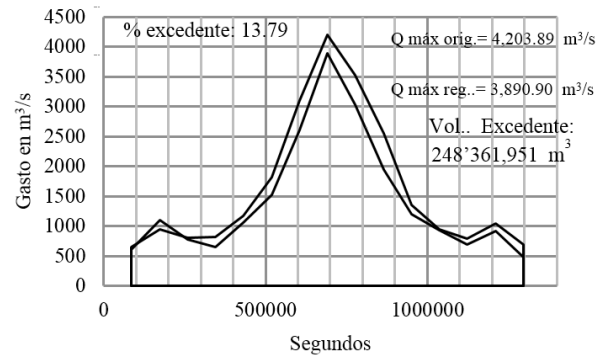


Figura 59. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 50 años en la estación Magiscatzin.

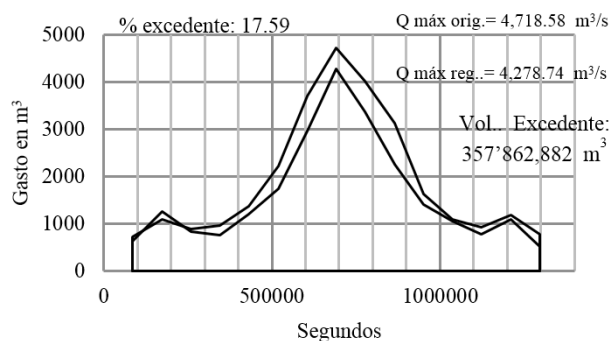


Figura 60. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 100 años en la estación Magiscatzin.

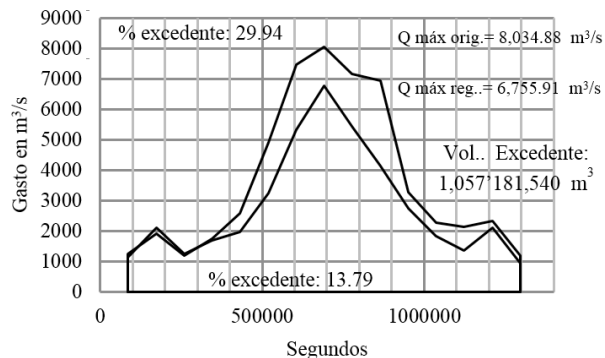


Figura 63. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 10,000 años en la estación Magiscatzin.

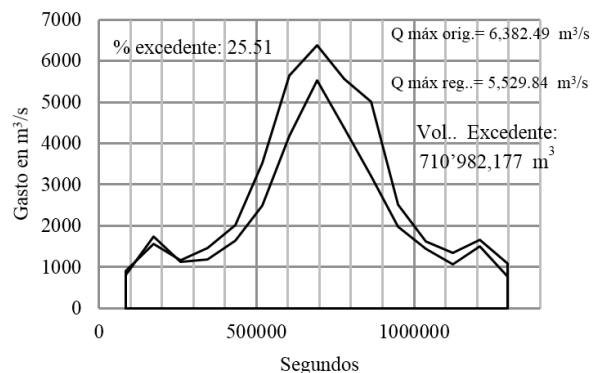


Figura 61. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 1000 años en la estación Magiscatzin.

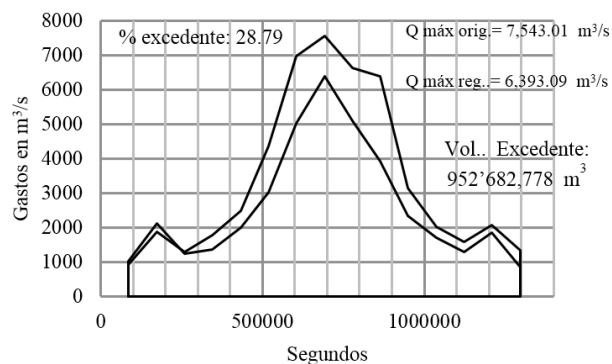


Figura 62. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 5000 años en la estación Magiscatzin.

Tabla 25. Volúmenes excedentes en la estación Magiscatzin

Magiscatzin T (años)	Volumen en m³			% Exc
	Original	Regional	Excedente	
50	2,049'439,968	1,801'078,017	248'361,951	13.79
100	2,391'763,680	2,033'900,798	357'862,882	17.59
1000	3,497'649,552	2,786'667,375	710'982,177	25.51
5000	4,262'034,240	3,309'351,462	952'682,778	28.79
10,000	4,588'191,648	3,531'010,108	1,057'181,540	29.94

Discusión y conclusiones

De acuerdo con los anteriores resultados se puede ver que, con algunas excepciones, los valores obtenidos con las técnicas regionales son menores que los obtenidos con el registro original, además de conformarse un hidrograma menos inestable, lo que permite obtener un resultado más confiable para el análisis de avenidas en un río. En la mayoría de los casos, la falta de registros históricos de longitud más bien grande, conduce a resultados poco confiables, frecuentemente

excesivos. Por esa razón, aquí se comparan los eventos resultantes del procedimiento regional contra los obtenidos con la muestra original, es decir, analizando individualmente la muestra correspondiente a cada estación.

Una vez obtenidos los hidrogramas para ambos casos (registros original y regional), se obtiene la diferencia entre las áreas bajo las curvas. Dicha área representa la diferencia entre los volúmenes escurridos.

El análisis regional es recomendable en los casos en que no se dispone de información hidrométrica suficiente para llevar a cabo un estudio hidrológico para el diseño de avenidas, por lo que el generar más información con mayor confiabilidad, permite un diseño apropiado de los hidrogramas y de las obras hidráulicas para mitigación de daños.

Las técnicas de regionalización son herramientas útiles sobre todo en sitios en donde las mediciones son escasas, siendo posible establecer comparativos mediante herramientas estadísticas de sitios con similitud en sus características de escurrimiento, como el caso que se muestra en la Figura 2, en donde se puede determinar mediante los coeficientes de variación la similitud entre escurrimientos de cada estación hidrométrica para conformar regiones, según se muestra en las tablas 7,8 y 9.

En el caso de la cuenca del bajo Pánuco, la regionalización de avenidas ha permitido obtener avenidas de diseño más confiables, en esta cuenca en particular, cuyos registros pluviométricos cuentan con un buen número de datos en períodos de hasta 56 años de información, por lo que se tienen muestras regionales con un mayor número de información para la generación de avenidas al aplicar el procedimiento.

Es por lo anterior que estas técnicas son ampliamente recomendables en el diseño de avenidas, sobre todo porque en México frecuentemente se carece de información pluviométrica suficiente para hacer diseños apropiados y confiables.

Agradecimientos

A la Lic. Concepción E. Tamayo Rubio de la Asociación Mexicana de Hidráulica del Sur de Tamaulipas, por su colaboración y comentarios en la elaboración de este trabajo.

A la Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, por haber proporcionado la información de las Estaciones Hidrométricas motivo de este estudio.

Al Dr. Luis A. Delgado Argote, Editor principal de la revista GEOS y a todo su equipo de trabajo por el tiempo dedicado en la revisión, comentarios y edición de este trabajo.

Al Dr. Jesús Gracia Sánchez, por su interés y tiempo dedicado en la revisión crítica en el arbitraje de este trabajo.

A todos ellos nuestro más sincero respeto, agradecimiento y admiración.

Referencias

- Comisión Nacional del Agua, 2013. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Subdirección General Técnica (SGT). Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR). Base de datos hidrométricos.
- Campos, A., 2014, Análisis regional de frecuencia de crecientes en la región hidrológica no. 10 (Sinaloa), México.1: índices de estacionalidad y regiones de influencia. Agrociencia, v.48: 255-270.

- Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2001, Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-1999, México (www.cenapred.unam.mx).
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2001, Inundaciones, Serie de Fascículos (www.cenapred.unam.mx).
- Del Ángel González, M. y Domínguez Mora, R., 2014, Cuenca baja del río Pánuco- Estimación de avenidas de diseño. Método de regionalización. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. Puerto Vallarta, Jalisco, México, 8 p.
- Domínguez Mora, R., Arganis, M.L., Capella, A., Luna, J.A., Fuentes, O.A., Carrizosa, E., Peña, F., Carabela J.L., y Reyes, H., 2014, Manual; de obras civiles de la Comisión Federal de Electricidad, Tema 1, Hidrología, Capítulo 6, Análisis Estadístico, 175 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía y Estadística, 2005a, Veracruz de Ignacio de la Llave. Mapa de climas (www.inegi.org.mx).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía y Estadística, 2005b, Veracruz de Ignacio de la Llave. Mapa de temperatura media anual (www.inegi.org.mx).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía y Estadística, 2005c, Veracruz de Ignacio de la Llave. Mapa de precipitación promedio anual (www.inegi.org.mx).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía y Estadística, 2005d, Veracruz de Ignacio de la Llave. Mapa de agricultura y vegetación (www.inegi.org.mx).
- Mandujano, G.K.P., 2011, Bajo Pánuco, Avenidas de diseño. Tesis de Maestría. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Aprovechamientos Hidráulicos. Instituto de Ingeniería, UNAM, 279 p.
- Ramachandra, R. and Hamed, K.H., 2000, Flood frequency analysis. Boca Raton, FL, USA, CRC Press, 350 p.
- Viessman, W. Jr. and Lewis, G.L., 2003, Introduction to Hydrology, 5th Edition, Englewood Cliffs, USA: Prentice Hall, 612 p.

Recibido: 11 de junio de 2015

Corregido por el autor: 9 de octubre de 2015

Aceptación: 22 octubre de 2015