

Intensidades máximas de lluvia para diseño hidrológico urbano en la república mexicana

Rainfall Maximum Intensities for Urban Hydrological Design in Mexican Republic

Campos-Aranda D.F.

Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

E-mail: campos_aranda@hotmail.com

(Recibido: agosto de 2008; aceptado: abril de 2009)

Resumen

Inicialmente, con base en el concepto del hidrosistema urbano y la urbanización, se establecen las dificultades y el enfoque de la estimación de las crecientes urbanas, basado en las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF). En seguida se contrasta en 10 estaciones pluviográficas ubicadas en zonas geográficas disímiles, un procedimiento para estimar curvas IDF, el cual utiliza la fórmula de Chen y la información disponible en la República Mexicana sobre isoyetas de intensidades y la lluvia máxima diaria anual. Posteriormente, habiendo verificado su capacidad y aproximación para reproducir las curvas IDF, el procedimiento utilizado se aplicó en 45 localidades importantes del país, presentándose los resultados. Por último, se formulan las conclusiones, las cuales destacan la aproximación y sencillez del procedimiento propuesto.

Descriptores: curvas Intensidad–Duración–Frecuencia, precipitación máxima diaria anual, fórmula de Chen, distribución GVE.

Abstract

Firstly, through the urban hydrosystem concept and through urbanization, the difficulties and approach of the urban flood estimation are established, based in the Intensity–Duration–Frequency curves (IDF). Next, in 10 recording gages located in very different geographic zones, a procedure is contrasted for IDF estimation curves, which utilized the Chen formula and the available information in the Mexican Republic for isohyet intensities and annual daily maximum rainfall. Late, having verified their capacity and approximation to reproduce the IDF curves, the utilized procedure was applied in 45 important locations of the country, showing the results. Lastly, the conclusions are formulated, which point out the approximation and simplicity of the proposal procedure.

Keywords: Intensity–Duration–Frequency curves, annual daily maximum precipitation, Chen formula, GEV distribution.

Introducción

Con el término *hidrosistemas* se describen conjuntamente los aspectos técnicos de la hidrología, la hidráulica y los recursos hidráulicos, incluyendo la aplicación de la economía, optimización, probabilidad y administración. Por ello, en tal designación se incluyen a los proyectos de infraestructura hidráulica que comprenden los sistemas de aprovechamiento de aguas superficiales, los de aguas subterráneas, los de distribución, los de control de crecientes y los de drenaje urbano. Éste último es el menor de los hidrosistemas citados; sin embargo, es bastante complejo, ya que incluye como componentes principales el abastecimiento de agua, la descarga de aguas residuales, el drenaje pluvial, el control de crecientes dentro de la propia zona urbana y el manejo de áreas inundables con influencia en las zonas suburbanas (Campos, 1999).

En los hidrosistemas urbanos, la *urbanización* altera la fase terrestre del ciclo hidrológico, incrementando el volumen y la velocidad del escurrimiento superficial, debido a la reducción de la infiltración en los suelos y a la mayor eficiencia hidráulica de los elementos del drenaje para conducir las aguas de tormenta. Entonces, la estimación de las crecientes en áreas y cuencas urbanas depende enormemente del estado de desarrollo que lleguen a alcanzar éstas, el cual generalmente va a diferir de sus condiciones actuales. Esto implica que el análisis probabilístico de los registros de crecientes, si los hubiera, es irrelevante, ya que éstos no corresponden a las condiciones de desarrollo futuras. Se requiere además, la consideración simultánea de las medidas de abatimiento y control de crecientes, ya que éstas modifican la respuesta hidrológica de las áreas o cuencas urbanizadas (Campos, 1999).

Por lo anterior, el enfoque más confiable y eficiente para la estimación de crecientes en zonas urbanas, las cuales sirven de base al diseño hidrológico de la infraestructura necesaria en los sistemas de drenaje menor o de aguas pluviales y mayor o de evacuación y protección contra crecientes, es la aplicación de los métodos hidrológicos que transforman lluvias de diseño en escurrimiento, al tomar en cuenta las condiciones físicas actuales y/o futuras de las áreas o cuencas urbanas. La aplicación de estos métodos comienza con el establecimiento de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), las cuales representan las características relevantes de las tormentas que ocurren en la zona.

Este trabajo tiene dos objetivos fundamentales, el primero consiste en contrastar en 10 pluviógrafos de la República Mexicana, un procedimiento propuesto

recientemente para construir curvas IDF, basado en la fórmula de Chen, el cual utiliza la información sobre isoyetas de intensidades y pluviométrica disponible en la República Mexicana. Habiendo verificado la capacidad reproductiva y la aproximación de tal enfoque para representar curvas IDF, el segundo objetivo se desarrolló aplicando tal procedimiento en más de 50 localidades del país, las capitales de los estados y algunas de sus ciudades más importantes para presentar los parámetros de la fórmula de Chen que definen en cada sitio sus curvas IDF, con duraciones que varían de 5 minutos a 24 horas y períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Desarrollo

Información pluviográfica utilizada

Procede de los Boletines Climáticos números 3, 4, 5 y 6 publicados a comienzos de la década de los años ochenta (SARH, 1980a, 1980b, 1982 y 1983). En la tabla 1 se presentan las características generales de los 10 pluviógrafos utilizados, cuya selección de cada uno de ellos obedeció a la disponibilidad por Región Hidrológica y a su mayor amplitud de registro. Toda la información sobre intensidades máximas de lluvia (i , mm/h) y precipitación máxima diaria anual (PMD , mm) resumida en el tabla 1, procede de los Boletines Climáticos citados. Se observa que las amplitudes de registro de i varían de 14 años en Tula, Tamaulipas (SARH, 1980a) a 38 años en la Presa El Palmito, Durango (SARH, 1980b); en cambio, los registros de PMD fluctúan de 19 a 59 años, en Vigas y Tampico, respectivamente.

La fórmula climática según Sistema de Köppen modificado (García, 1981) tomada de los Boletines respectivos, indica que en las estaciones pluviográficas utilizadas los climas varían del desértico en Ciudad Lerdo a los cálidos en Tancabaca y Tampico, pasado por los templados en Chicontepec y esteparios o semiáridos en el resto.

Procesamiento probabilístico de la información

Toda la información disponible (tabla 1), tanto de intensidades máximas (i) en las diez duraciones estándar de 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 80, 100 y 120 minutos, como de precipitación máxima diaria anual (PMD), fue procesada con base en series anuales de máximos (SAM), esto es, únicamente se seleccionó el valor más grande de cada año en cada una de las diez duraciones estándar para

Tabla 1. Características generales e intensidades (mm/h) mínimas y máximas observadas en los pluviógrafos indicados

No.	Pluviógrafo Pluviómetro	Edo.	Coordenadas, clima y referencia Latitud Longitud Altitud	Periodo de registro (años)	Duraciones en minutos									
					5	10	15	20	30	45	60	80	100	120
1	Tula Tula	TAM	23°00'04" 99°42'45" 1,140 BS ₀ KW'(e)g (SARH,1980a)	1965-1978 (14) 1952-1978 (27)	54.0 156.0	36.0 120.0	30.0 86.0	23.0 75.0	16.0 62.5	16.5 48.7	13.8 40.0	10.5 34.5	8.4 33.6	7.0 30.3
2	Tampico Tampico	TAM	22°14'19" 97°52'44" 12 Aw _c '(e) (SARH,1982)	1965-1979 (15) 1921-1979 (59)	114.0 240.0	93.6 165.0	76.4 127.2	63.6 117.3	51.9 97.4	40.3 88.5	32.5 72.1	25.0 62.2	20.0 52.7	16.7 45.0
3	Cazadero Cazadero	ZAC	23°42'19" 103°05'55" 1,890 BS ₀ KW(e) (SARH,1980b)	1963-1978 (16) 1958-1978 (21)	72.0 162.0	57.0 117.0	49.2 84.0	39.8 79.8	28.4 63.4	19.0 49.6	15.3 43.1	13.6 36.8	10.3 32.8	8.9 29.2
4	Tansabaca Tansabaca	SLP	21°39'50" 99°12'48" 196 Aw _w (w)(e)g (SARH,1982)	1961-1979 (18) 1958-1979 (22)	81.6 240.0	71.4 174.6	66.0 159.2	54.5 151.5	46.2 124.4	34.8 108.3	29.6 101.1	25.9 91.5	21.5 81.8	18.1 75.3
5	Chicontepec Chicontepec	VER	20°59'36" 98°09'50" 595 (A)C(fm)a(e)g (SARH,1982)	1961-1979 (18) 1923-1979 (43) ¹	108.0 228.0	79.2 151.8	70.0 132.0	60.0 123.0	47.2 118.	38.7 108.0	32.9 98.5	24.8 81.8	19.8 68.3	16.5 59.8
6	Tula Tula	HGO	20°03'22" 99°20'52" 2,060 BS ₀ KW(w)(e)g (SARH,1982)	1962-1979 (18) 1931-1979 (47) ²	49.2 186.0	34.8 120.0	30.0 92.0	25.5 81.0	19.3 65.0	14.1 55.5	12.2 43.5	9.4 33.2	7.8 27.3	6.6 23.0
7	Vigas Vigas	SLP	21°48'34" 99°51'16" 900 BS ₀ KW(w)(e)g (SARH,1982)	1961-1979 (18) 1961-1979 (19)	48.0 254.4	36.0 181.2	31.0 136.8	28.2 123.6	18.8 99.2	12.5 70.5	9.4 54.2	7.1 41.3	5.6 34.0	4.7 28.6
8	Saltillo Saltillo	COA	25°26'32" 100°59'34" 1,530 BS ₀ (h)hw'(e') (SARH,1983)	1939-1979 (21) ³ 1940-1980 (40) ⁴	36.0 198.0	23.3 147.0	19.0 122.0	14.7 104.3	10.0 84.0	6.7 63.5	5.0 49.7	3.8 38.1	3.0 30.6	2.5 25.5
9	Ciudad Lerdo Ciudad Lerdo	DGO	25°32'00" 103°31'18" 1,135 BWhw(w)(e') (SARH,1980b)	1947-1978 (32) ⁵ 1921-1978 (56) ⁵	42.0 240.0	27.0 165.0	22.0 140.0	16.8 105.0	11.6 76.9	8.1 61.5	6.3 50.9	4.9 41.0	3.9 34.9	3.3 29.9
10	Presa El Palmito Presa El Palmito	DGO	25°36'08" 105°01'21" 1,633 BS ₀ KW(e) (SARH,1980b)	1941-1978 (38) 1939-1978 (40)	64.8 246.0	36.6 139.5	26.8 108.0	21.0 111.0	15.4 104.0	11.2 76.0	10.1 57.6	9.7 43.5	8.0 34.8	6.7 29.0

¹ faltantes 1942 y 1943
² faltantes 1939 y 1945
³ faltantes: 1950-57, 1961-71 y 1977
⁴ falta 1957
⁵ faltantes 1930 y 1931

las intensidades y en cada año del registro para las precipitaciones diarias. Las SAM fueron analizadas probabilísticamente con dos técnicas disímiles para verificar la similitud de resultados en los cinco períodos de retorno adoptados de 5, 10, 25, 50 y 100 años, la primera corresponde a un enfoque de transformación de datos propuesta por Chander *et al.* (1978) y la segunda al ajuste de la distribución General de Valores Extremos (GVE), a través de los métodos de momentos, sextiles, máxima verosimilitud y momentos L (Campos, 2001), para seleccionar el que condujo al menor error estándar de ajuste (Kite, 1977).

La verificación de la calidad estadística de las SAM, no se realizó explícitamente, pero se verificó con base en la similitud de sus dos predicciones obtenidas con cada método probabilístico utilizado.

En la tabla 2 se han concentrado los resultados procedentes del mejor ajuste GVE, para las intensidades de únicamente 5, 20, 60 y 120 minutos de duración y períodos de retorno de 5, 25 y 100 años, designadas por i_{obs} , es decir, son las intensidades máximas observadas. Esta selección de duraciones y períodos de retorno obedece a razones de ahorro de espacio para su presentación integral.

Isoyetas de intensidad en la República Mexicana

El cuaderno de curvas isoyetas (SCT, 1990) presenta a éstas por estados para las cinco duraciones siguientes: 10, 30, 60, 120 y 240 minutos, cada una con períodos de retorno de 10, 25 y 50 años. Esta cartografía fue elaborada procesando un total de 382 pluviógrafos, los cuales variaron de un mínimo de 2 en los estados de Aguascalientes, Campeche, Morelos y Quintana Roo a un máximo de 31, 32 y 34 en los estados de Chiapas, Oaxaca y Estado de México, respectivamente.

Tabla 2. Contraste y error relativo (E.R.) entre intensidades (i , mm/h) observadas y estimadas en los períodos de retorno (Tr) y las estaciones pluviográficas indicadas

Tr (años)	Duraciones (minutos)				Tr (años)	Duraciones (minutos)			
	5	20	60	120		5	20	60	120
1. Tula (Tamaulipas)					6. Tula (Hidalgo)				
i_{obser}	5	115.5	66.0	31.6	20.1	i_{obser}	5	139.9	69.4
i_{estim}	5	102.7	58.6	29.6	17.5	i_{estim}	5	111.7	31.6
E.R.	5	-11.1	-11.2	-6.3	-12.9	E.R.	5	-20.2	-8.1
i_{obser}	25	173.6	78.9	42.0	29.9	i_{obser}	25	176.0	83.8
i_{estim}	25	177.2	101.1	50.4	30.2	i_{estim}	25	139.7	79.9
E.R.	25	2.1	28.1	20.0	1.0	E.R.	25	-20.6	-4.7
i_{obser}	100	231.2	84.7	49.5	38.8	i_{obser}	100	198.2	90.8
i_{estim}	100	241.4	137.7	68.7	41.2	i_{estim}	100	163.9	93.7
E.R.	100	4.4	62.6	38.8	6.2	E.R.	100	-17.3	3.2
2. Tampico (Tamaulipas)					7. Vigas (San Luis Potosí)				
i_{obser}	5	222.5	101.6	56.0	36.2	i_{obser}	5	129.7	38.7
i_{estim}	5	213.8	117.7	61.8	39.5	i_{estim}	5	123.8	35.3
E.R.	5	-3.9	15.8	10.4	9.1	E.R.	5	-4.5	-8.8
i_{obser}	25	253.3	125.9	69.3	47.7	i_{obser}	25	198.1	50.1
i_{estim}	25	328.0	180.6	94.8	60.6	i_{estim}	25	207.7	59.3
E.R.	25	29.5	43.4	36.8	27.0	E.R.	25	4.8	18.4
i_{obser}	100	267.8	144.6	78.4	56.1	i_{obser}	100	273.4	57.0
i_{estim}	100	426.3	234.8	123.2	78.8	i_{estim}	100	279.9	79.9
E.R.	100	59.2	62.4	57.1	40.5	E.R.	100	2.4	40.2
3. Cazadero (Zacatecas)					8. Saltillo (Coahuila)				
i_{obser}	5	126.0	66.7	33.2	18.0	i_{obser}	5	133.1	33.5
i_{estim}	5	138.4	79.2	38.4	22.3	i_{estim}	5	113.6	32.0
E.R.	5	9.8	18.7	15.7	23.9	E.R.	5	-14.7	-4.5
i_{obser}	25	165.5	83.1	44.6	28.0	i_{obser}	25	187.3	53.8
i_{estim}	25	215.8	123.4	59.9	34.8	i_{estim}	25	161.0	45.3
E.R.	25	30.4	48.5	34.3	24.3	E.R.	25	-14.0	-15.8
i_{obser}	100	199.5	96.4	54.2	40.6	i_{obser}	100	227.1	67.5
i_{estim}	100	282.5	161.6	78.4	45.6	i_{estim}	100	201.8	56.8
E.R.	100	41.6	67.6	44.6	12.3	E.R.	100	-11.1	-15.9
4. Tancabaca (San Luis Potosí)					9. Ciudad Lerdo (Durango)				
i_{obser}	5	182.3	106.5	65.6	45.7	i_{obser}	5	134.8	30.4
i_{estim}	5	283.4	154.3	82.4	53.7	i_{estim}	5	132.3	36.7
E.R.	5	55.5	44.9	25.6	17.5	E.R.	5	-1.9	20.7
i_{obser}	25	236.3	146.2	101.6	73.3	i_{obser}	25	188.1	44.6
i_{estim}	25	419.1	228.1	121.8	79.4	i_{estim}	25	180.9	50.2
E.R.	25	77.4	56.0	19.9	8.3	E.R.	25	-3.8	12.6
i_{obser}	100	278.8	183.1	140.9	103.4	i_{obser}	100	230.0	56.8
i_{estim}	100	536.0	291.8	155.8	101.5	i_{estim}	100	222.7	61.9
E.R.	100	92.3	59.4	10.6	-1.8	E.R.	100	-3.2	9.0
5. Chicontepec (Veracruz)					10. Presa El Palmito (Durango)				
i_{obser}	5	178.3	107.7	63.9	39.5	i_{obser}	5	147.8	33.6
i_{estim}	5	160.8	85.3	48.3	33.3	i_{estim}	5	117.8	33.0
E.R.	5	-10.1	-20.8	-24.4	-15.7	E.R.	5	-20.3	-1.8
i_{obser}	25	225.2	130.0	106.6	56.6	i_{obser}	25	201.8	50.9
i_{estim}	25	281.2	149.6	84.7	58.4	i_{estim}	25	178.3	49.9
E.R.	25	24.9	15.1	-20.5	3.2	E.R.	25	-11.6	-2.0
i_{obser}	100	266.2	143.8	166.3	72.4	i_{obser}	100	250.7	67.7
i_{estim}	100	385.4	205.0	116.1	80.1	i_{estim}	100	230.8	64.4
E.R.	100	44.8	42.6	-30.2	10.6	E.R.	100	-8.1	-4.9

Procedimiento utilizado para construir las curvas IDF

Orientado a utilizar la información pluviográfica citada, permite complementar sus duraciones desde 5 minutos hasta 24 horas y ampliar sus períodos de retorno de 5 a 100 años; lo anterior, a través de utilizar la fórmula de Cheng-lung Chen, la cual ya ha sido probada en otros países y en México (Genovez y Fugagnoli, 2001; Chin, 2006 y Campos *et al.*, 2007). Tal procedimiento emplea además la información pluviométrica disponible en la forma de *PMD*, también conocida en la Comisión Nacional del Agua como precipitación máxima en 24 horas (P_{24}).

El procedimiento a utilizar fue sugerido recientemente por Campos (2007), se puede consultar en Campos (2008) y consiste en combinar la información de isoyetas de intensidad (SCT, 1990) con la disponible de *PMD*, para estimar los cocientes lluvia–duración (R) y lluvia–frecuencia (F) necesarios para aplicar la fórmula de Chen (Chen, 1983), que es la siguiente:

$$i_t^{Tr} = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-F} Tr^{F-1})}{(t+b)^c} = \frac{\alpha_{Tr}}{(t+b)^c} \quad (1)$$

donde a , b y c son parámetros función de R , i_t^{Tr} está mm/h, P_1^{10} en mm, t en minutos ($5 \leq t \leq 1,440$) y Tr ($5 \leq Tr \leq 100$) en años. Los valores calculados de i_t^{Tr} permiten dibujar las curvas IDF. Los valores de los cocientes R y F definen, respectivamente, la forma de las curvas IDF

Tabla 3. Datos y resultados del procedimiento propuesto para encontrar la fórmula de Chen en los diez pluviógrafos indicados

Núm.	Pluviógrafo	Intensidades (mm/h)			Precipitaciones máximas (mm)				Parámetros de la ec. 1			
		i_1^{10}	i_1^{25}	i_1^{50}	P_{24}^{10}	P_{24}^{25}	P_{24}^{50}	P_{24}^{100}	R_{prom}	a	b	c
1	Tula (Tam.)	41.0	50.5	58.0	79.6	101.5	120.7	142.6	0.498	32.117	10.538	0.834
2	Tampico (Tam.)	74.0	86.0	97.0	199.1	246.0	283.4	322.8	0.355	18.566	5.941	0.691
3	Cazadero (Zac.)	46.0	58.0	66.0	66.2	81.4	94.4	108.9	0.702	48.910	12.433	0.900
4	Tansabaca (S.L.P.)	96.0	118.0	135.0	301.8	370.0	421.4	473.2	0.319	15.724	4.739	0.652
5	Chicontepec (Ver.)	60.0	65.0	70.0	227.2	290.4	346.7	412.2	0.230	10.235	1.937	0.548
6	Tula (Hgo.)	38.0	43.0	48.0	73.1	83.1	90.1	96.8	0.523	34.440	11.093	0.849
7	Vigas (S.L.P.)	48.0	59.0	66.0	97.0	123.1	145.2	168.8	0.476	29.981	9.945	0.812
8	Saltillo (Coa.)	41.0	48.0	53.0	72.2	86.9	97.7	108.7	0.554	37.048	11.514	0.865
9	Ciudad Lerdo (Dgo)	44.0	53.5	60.0	73.6	87.5	97.4	107.0	0.608	40.605	11.552	0.875
10	Presa El Palmito (Dgo)	42.6	50.0	57.0	70.7	86.3	99.2	113.2	0.586	39.253	11.630	0.873

y su separación entre ellas; en cambio, la lluvia P_1^{10} establece el escalamiento. Por ello, cuando se disponga de información pluviográfica se deberá de intentar estimar su valor, en lugar de leerlo en las cartas isoyetas.

En la tabla 3 se han concentrado los datos y parámetros obtenidos con el procedimiento empleado para los diez pluviógrafos de contraste de la tabla 1.

Los resultados que aporta la ecuación 1 en cada uno de tales pluviógrafos se han vaciado en la tabla 2, como valores i_{estim}^{Tr} , es decir, son las intensidades máximas estimadas.

Contraste y análisis de resultados

Para tener una medida numérica de las discrepancias entre las intensidades observadas y las estimadas con la fórmula de Chen según el procedimiento empleado, se utilizó el error relativo (E.R.), con la expresión siguiente:

$$E.R. = \frac{i_{est}^{Tr} - i_{obs}^{Tr}}{i_{obs}^{Tr}} 100 \quad (2)$$

en donde el error relativo se expresa en porcentaje y presenta un valor negativo cuando la intensidad estimada (i_{est}^{Tr}) resultó menor que la intensidad observada (i_{obs}^{Tr}); en cambio, cuando conduzca a un valor positivo indica que la intensidad estimada resultó superior a la observada. En la tabla 2 se han concentrado los E.R. calculados para cada una de las cuatro duraciones contrastadas, en los tres períodos de retorno indicados.

El análisis acucioso de los resultados numéricos del E.R. (tabla 2), indica que las diferencias máximas por defecto no rebasan el 30%, y en algunos casos, son menores del 10% como en los pluviógrafos de Ciudad Lerdo, Tampico y Vigas. Las discrepancias por defecto se consideran más peligrosas, pues conducirían a diseños hidrológicos insuficientes. Las diferencias máximas por exceso son del orden el 60%, en los pluviógrafos de Tula (Tamaulipas), Tampico y Cazadero, con máximo de 92.3% en Tansabaca y mínimo de 1.1% en Saltillo.

Se concluye que el procedimiento utilizado estima con bastante aproximación las curvas IDF, según se observa en la tabla 2 de manera general, y en particular, en Vigas y Ciudad Lerdo. Las mayores discrepancias ocurren por exceso en Cazadero y Tansabaca, en ambos casos pueden estar ligadas a una escasez de ocurrencia y registro de valores máximos, pues como se puede observar en la tabla 1, Cazadero presenta, en las duraciones menores, los valores máximos más bajos en comparación con estaciones de condiciones climáticas similares, por ejemplo Tula (Hidalgo) y Saltillo.

Aplicación en 45 localidades de la República Mexicana

Habiendo verificado que el procedimiento empleado tiene una capacidad reproductiva aceptable para construir curvas IDF, se realizó una aplicación extensiva buscando incluir a las capitales de los estados y sus ciudades más importantes, las cuales contarán en el sistema ERIC II (IMTA, 2000) con una estación pluviométrica cuyo registro fuera mayor de 20 años. Con tal

restricción se seleccionaron inicialmente 50 localidades, pero existen 341 sitios (Araiza y Campos, 2000). Como el procedimiento utilizado está limitado a valores menores de 0.70 del cociente R , se tuvieron que eliminar las estaciones de Tapachula (Chiapas), Celaya (Guanajuato), Toluca (Edo. de México), Hermosillo (Sonora) y Fresnillo (Zacatecas), por conducir a valores que fluctuaron de 0.725 a 0.923.

En las primeras ocho columnas de la tabla 4 se presentan las características generales y estadísticas de los 45 pluviómetros procesados, en el resto de las columnas se presentan los resultados del procedimiento propuesto, es decir, los parámetros de la fórmula de Chen (ecuación 1). Para mostrar en la tabla 4 los valores característicos de la precipitación máxima diaria (PMD) y sus predicciones extremas, se eliminó la presentación de las curvas IDF en cada localidad, a través del parámetro α_{Tr} , el cual toma un valor para cada uno de los cinco períodos de retorno procesados. Por ejemplo, para la estación Aguascalientes sus valores son:

$$\alpha_5 = 1,091.593, \quad \alpha_{10} = 1,228.012, \quad \alpha_{25} = 1,408.347, \\ \alpha_{50} = 1,544.766 \text{ y } \alpha_{100} = 1,681.185.$$

Por otra parte, en las figuras 1 y 2 se presentan las curvas IDF de las estaciones Acapulco y Tacubaya, por presentar éstas condiciones disímiles en cuanto a forma y magnitud, según se observa en sus parámetros R y P_1^{10} . La similitud numérica entre las intensidades de la figura 2 y las obtenidas por Cervantes *et al.* (2004), al procesar el registro de 74 años (1930–2003) del observatorio de Tacubaya, es bastante aproximada.

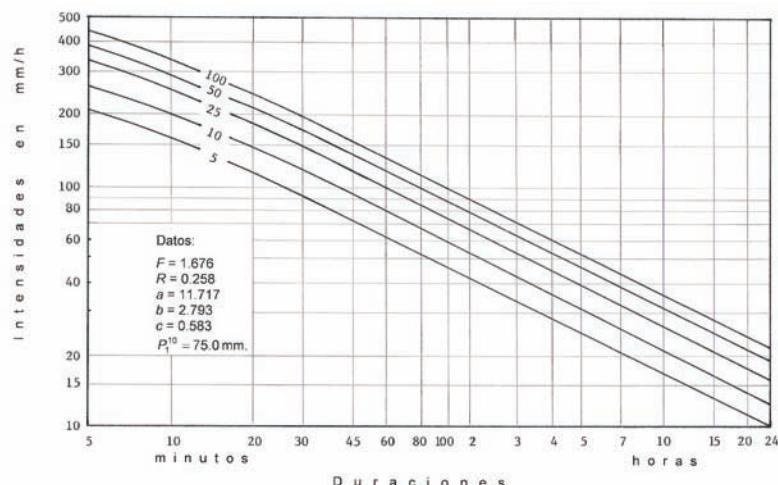


Figura 1. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia estimadas con la fórmula de Chen en la estación pluviométrica Acapulco, Gro

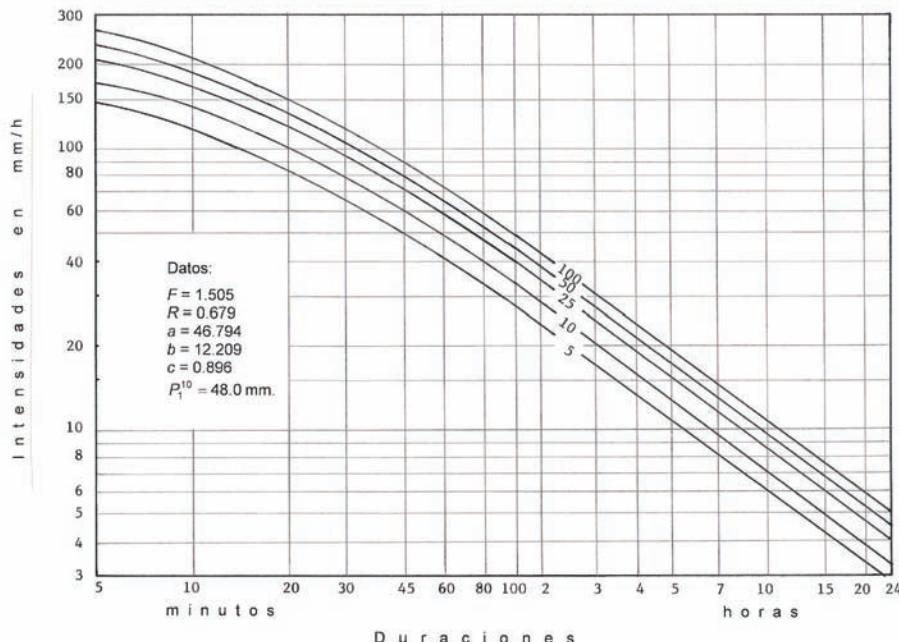


Figura 2. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia estimadas con la fórmula de Chen en la estación pluviométrica Tacubaya, DF

Conclusiones

El procedimiento utilizado emplea la información de isoyetas de intensidades, disponible en la República Mexicana (SCT, 1990), haciendo uso de los registros pluviométricos para estimar las predicciones necesarias de precipitación máxima en 24 horas. Por lo tanto, puede ser aplicado en cualquier sitio o localidad de la República Mexicana que cuente con una estación pluviométrica, la cual permita obtener con cierta confiabilidad los valores citados.

Aunque los períodos de registro de la información pluviográfica y pluviométrica utilizada en el contraste (tabla 1), no son simultáneos, sus resultados son bastante aproximados, con diferencias por defecto no superiores al 30 % entre las intensidades observadas y las estimadas, medidas a través del error relativo. Las diferencias máximas por exceso se presentan en las duraciones menores y tiene un error relativo máximo del orden del 60% (tabla 2).

Los resultados numéricos concentrados en la tabla 2, destacan la aproximación del procedimiento empleado para estimar curvas IDF. Conviene destacar que las 10 estaciones pluviográficas utilizadas en el contraste, están localizadas en condiciones geográficas muy diferentes y abarcan desde los climas cálidos hasta los desérticos, pasando por los templados y los semiáridos.

Una contribución práctica importante de este trabajo la constituye la presentación condensada de las curvas IDF en 45 ciudades importantes de la República Mexicana, según resultados expuestos en la tabla 4.

Tomando en cuenta que el procedimiento propuesto es únicamente una aproximación, cuyo error por defecto o exceso es aún significativo, se recomienda continuar con su contraste, principalmente utilizando información pluviográfica actualizada.

Además, se sugiere verificar sus resultados con la información histórica disponible sobre tormentas máximas ocurridas en la zona, antes de proceder a su aplicación en los diseños hidrológicos urbanos.

Agradecimientos

Al M. en I. Juan Antonio Araiza Rodríguez (jaraiza@uaslp.mx), profesor del Área de Computación Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UASLP, se agradece el haber proporcionado la información pluviométrica procesada de precipitación máxima diaria anual.

A los tres revisores anónimos de este trabajo se agradecen sus observaciones críticas y recomendaciones, las cuales permitieron mejorar sustancialmente su descripción y alcances.

Tabla 4. Características generales, predicciones extremas y parámetros de la fórmula de Chen (a , b , c) estimados con el procedimiento propuesto en las 45 localidades indicadas de la República Mexicana

Núm.	Localidad o pluviómetro	Clave (ERIC II)	Período de registro (Número de años real)	PMD_{min} (mm)	$PMD_{máx}$ (mm)	PMD_{10} (mm)	PMD_{90} (mm)	R_{prom} (mm)	i_1^{10} (mm/h)	a	b	c
1	Aguascalientes (Ags.)	01050	1947-1998 (51)	20.0	91.3	69.1	94.6	0.050	38.0	32.316	10.590	0.883
2	Méjico (B.C.N.)	02058	1948-1985 (32)	5.5	78.0	54.4	95.4	0.405	27.0	23.062	7.662	0.744
3	Tijuana (B.C.N.)	02068	1949-1984 (36)	16.1	80.0	52.6	81.7	0.441	27.0	26.526	8.864	0.780
4	La Paz (B.C.S.)	03074	1961-1997 (37)	13.0	137.0	75.3	193.1	0.350	37.0	18.174	5.781	0.686
5	San José del Cabo (B.C.S.)	03056	1933-1997 (60)	2.1	316.0	143.8	371.5	0.232	43.0	10.812	1.983	0.550
6	Campeche (Cam.)	04088	1954-1997 (38)	32.0	254.3	125.6	245.4	0.455	70.0	27.912	9.313	0.793
7	Saltillo (Coa.)	05048	1947-1998 (43)	16.5	160.0	64.2	135.1	0.495	41.0	31.809	10.457	0.828
8	Monclova (Coa.)	05047	1951-1985 (22)	22.7	119.0	95.2	170.9	0.401	46.0	22.668	7.519	0.739
9	Colima (Col.)	06040	1951-1997 (37)	33.4	255.0	129.6	246.4	0.432	72.0	25.555	8.572	0.771
10	Manzanillo (Col.)	06036	1969-1997 (22)	44.0	273.0	160.5	438.5	0.323	68.0	16.056	4.386	0.657
11	Tuxtla Gutiérrez (Chi.)	07202	1951-1997 (46)	24.5	148.1	89.4	138.9	0.634	65.0	42.834	11.804	0.884
12	Chihuhuia (Chih.)	08109	1965-1987 (21)	27.5	89.0	78.9	99.7	0.396	31.0	22.157	7.331	0.734
13	Tacubaya (DF)	09039	1954-1987 (34)	27.2	79.1	62.4	93.9	0.679	48.0	46.794	12.209	0.896
14	Durango (Dgo.)	10017-092	1941-1998 (37)	24.5	108.5	96.8	122.6	0.370	38.0	19.814	6.438	0.707
15	Guanajuato (Gto.)	11094	1969-1997 (25)	36.0	97.0	88.6	126.1	0.350	33.0	18.169	5.779	0.686
16	Irapiato (Gto.)	11028	1922-1998 (70)	12.5	137.8	76.7	103.8	0.557	46.0	37.708	11.571	0.867
17	León (Gto.)	11095	1947-1997 (45)	26.5	97.8	74.1	101.9	0.651	52.0	44.310	11.957	0.889
18	Chilpancingo (Gro.)	12134	1954-1997 (36)	36.5	212.5	122.4	275.3	0.232	40.0	10.330	1.994	0.551
19	Acapulco (Gro.)	12142	1972-1998 (27)	55.0	360.0	248.5	416.6	0.258	75.0	11.717	2.793	0.583
20	Pachuca (Hgo.)	13056	1972-1988 (17)	14.1	114.0	63.2	144.2	0.468	35.0	29.159	9.700	0.805
21	Guadalajara (Jal.)	14066	1961-1991 (27)	35.2	114.8	91.2	123.4	0.637	64.0	43.093	11.831	0.885
22	Lagos de Moreno (Jal.)	14084	1961-1991 (28)	28.2	91.0	69.0	101.5	0.502	39.0	32.462	10.627	0.834
23	Morelia (Mich.)	16081	1947-1986 (35)	21.2	85.3	61.7	83.4	0.435	31.0	25.937	8.668	0.774
24	Cuernavaca (Mor.)	17004	1955-1998 (42)	46.0	129.0	92.4	159.2	0.562	63.0	37.673	11.605	0.868
25	Tepic (Nay.)	18088	1950-1990 (37)	38.0	146.5	116.3	158.0	0.555	68.0	37.149	11.558	0.866
26	Monterrey (N.L.)	19049	1929-1986 (46)	27.0	180.0	132.4	205.2	0.390	58.0	21.653	7.143	0.728
27	Linares (N.L.)	19035	1948-1986 (39)	42.5	190.0	141.4	212.3	0.565	88.0	37.842	11.618	0.869
28	Oaxaca (Oax.)	20035	1953-1998 (34)	35.7	91.3	79.8	101.4	0.516	44.0	33.948	10.968	0.845
29	Puebla (Pue.)	21035	1953-1997 (45)	39.4	87.6	72.5	94.1	0.653	51.0	44.485	11.975	0.889
30	Querétaro (Qro.)	22006	1961-1995 (31)	29.3	84.0	71.3	92.7	0.372	31.0	19.997	6.509	0.709
31	San Juan del Río (Qro.)	22015	1922-1974 (26)	33.2	86.5	69.8	106.2	0.691	54.0	47.887	12.323	0.898
32	Chetumal (Q.R.)	23082	1952-1995 (39)	55.9	360.0	204.0	524.2	0.290	77.0	13.666	3.789	0.620
33	San Luis Potosí (S.L.P.)	24069	1950-1997 (48)	20.6	66.5	59.8	79.0	0.659	42.0	45.012	12.029	0.891
34	Matamoros (S.L.P.)	24040	1925-1997 (68)	17.5	122.0	83.6	139.2	0.448	44.0	27.198	9.084	0.786
35	Río Verde (S.L.P.)	24114	1961-1997 (37)	27.0	117.5	87.9	138.2	0.605	60.0	40.348	11.521	0.874
36	Culiacán (Sinaloa)	25015	1961-1997 (35)	47.0	175.1	131.1	211.0	0.501	80.0	32.403	10.612	0.883
37	Guasave (Sinaloa)	25088	1969-1996 (23)	34.0	229.8	142.3	255.1	0.382	72.0	20.888	6.854	0.719
38	Los Mochis (Sinaloa)	25116	1961-1985 (23)	20.0	133.3	115.6	188.1	0.505	76.0	32.758	10.702	0.836
39	Villahermosa (Tab.)	27054	1973-1985 (24)	63.9	340.0	196.6	400.1	0.313	81.0	15.503	4.552	0.646
40	Ciudad Victoria (Tamaul.)	281116	1962-1998 (34)	57.9	288.5	206.0	354.2	0.313	77.0	15.315	4.557	0.646
41	Nuevo Laredo (Tamaul.)	28065	1961-1988 (27)	35.0	227.0	150.4	276.2	0.381	64.0	20.861	6.843	0.719
42	Texcoco (Tlax.)	29030	1961-1990 (26)	26.6	74.0	64.4	81.3	0.653	42.0	44.485	11.975	0.889
43	Pozos (Ver.)	30132	1961-1996 (35)	41.2	278.7	176.5	286.2	0.337	70.0	17.107	5.337	0.672
44	Mérida (Yuc.)	31044	1961-1985 (25)	50.0	153.5	122.7	162.9	0.653	85.0	42.748	11.795	0.884
45	Zacatecas (Zac.)	32086	1961-1998 (35)	16.3	125.5	73.0	111.9	0.482	35.0	30.581	10.118	0.818

Simbología de la Tabla4:

PMD_{min}	valor mínimo observado de la precipitación máxima diaria.
PMD_{max}	valor máximo observado de la precipitación máxima diaria.
PMD_{10}	precipitación máxima diaria de periodo de retorno 10 años.
PMD_{100}	precipitación máxima diaria de periodo de retorno 100 años.
R_{prom}	cociente lluvia–duración promedio.
t_1^{10}	intensidad de duración una hora y periodo de retorno 10 años.

Referencias

- Araiza-Rodríguez J.A. y Campos-Aranda D.F. Evaluación de los cocientes lluvia duración (R) y lluvia-frecuencia (F) en 341 sitios de la República Mexicana. XVI Congreso Nacional de Hidráulica, Morelia, Michoacán, 2000, pp. 743–748.
- Campos-Aranda D.F. Hidrosistemas Urbanos. Conceptos básicos, crecientes y planicies de inundación. *Ciencia y Desarrollo*, (145):49–57. 1999.
- Campos-Aranda D.F. Contraste de cinco métodos de ajuste de la distribución GVE en 31 registros históricos de eventos máximos anuales. *Ingeniería Hidráulica en México*, XVI(2):77–92. 2001.
- Campos-Aranda D.F. *Estimación y Aprovechamiento del Escurrimiento*. Anexo 6: Aspectos de seguridad hidrológica en embalses. Edición del autor. San Luis Potosí, S.L.P. 2007. Pp. 411–429.
- Campos-Aranda D.F. Calibración del método racional en ocho cuencas rurales menores de 1,650 km² de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), México. *Agrociencia*, 42(6):615–627. 2008.
- Campos-Campos E., Quiroga L.A. y Hernández-Vargas J. Contraste y análisis espacial de parámetros de un modelo intensidad–duración–frecuencia. *Ingeniería Hidráulica en México*, XXII(3):149–154, 2007.
- Cervantes-Sánchez O. y Landeros-Ortiz J.J. Curvas intensidad–duración–periodo de retorno de las tormentas máximas registradas en Tacubaya, DF. XVIII Congreso Nacional de Hidráulica, San Luis Potosí, SLP, 2004, pp. 479–486.
- Chander S., Spolia S.K., Kumar A. Flood Frequency Analysis by Power Transformation. *Journal of the Hydraulics Division*, 104(HY11):1495–1504, 1978.
- Chen C-I. Rainfall Intensity–Duration–Frequency formulas. *Journal of the Hydraulics Engineering*, 109(12):1603–1621, 1983.
- Chin D.A. *Water-Resources Engineering*. Chapter 5: Surface-Water Hydrology. New Jersey, USA. Pearson Prentice Hall. 2006. Pp. 334–606.
- ERIC II: Extractor Rápido de *Información Climatológica 1920–1998*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua SEMARNAT–CNA. Jiutepec, Morelos. 2000.
- ERIC II: Extractor Rápido de *Información Climatológica 1920–1998*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua SEMARNAT–CNA. Jiutepec, Morelos. 2000.
- García E. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía de la UNAM. Ciudad Universitaria, México, DF. 3^a. Edición. 1981. 252 páginas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Genovez A.M. y Fugagnolli R. de C.. Análisis y evaluación de las ecuaciones de lluvias intensas generalizadas. *Ingeniería Hidráulica en México*, XVI(3):15–23, 2001.
- Kite G.W. *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*. Chapter 12: Comparison of frequency distributions. Colorado, USA. Water Resources Publications. Fort Collins. 1977. Pp. 156–168.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Isoyetas de Intensidad–Duración Frecuencia. República Mexicana. Subsecretaría de Infraestructura. México, DF. 1990. 495 p.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Boletín Climatológico No. 3*. Región Hidrológica No. 37. El Salado, Subsecretaría de Planeación. México, DF. 1980a.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Boletín Climatológico No. 4*. Región Hidrológica No. 36. Nazas–Aguanaval, Subsecretaría de Planeación. México, DF. 1980b.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Boletín Climatológico No. 5*. Región Hidrológica No. 26. Pánuco, Tomos I y II, Subsecretaría de Planeación. México, DF. 1982.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Boletín Climatológico No. 6*. Regiones Hidrológicas No. 24 Oriente (Bajo Río Bravo) y No. 25 Golfo Norte (San Fernando–Soto La Marina), Subsecretaría de Planeación. México, DF. 1983.

Semblanza del autor

Daniel Francisco Campos-Aranda. Obtuvo el título de ingeniero civil en diciembre de 1972, en la entonces Escuela de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP). Durante el primer semestre de 1977, realizó en Madrid, España un diplomado en hidrología general y aplicada. Posteriormente, durante 1980–1981 llevó a cabo estudios de maestría en ingeniería con la especialidad de hidráulica en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. En la misma institución, inició (1984) y concluyó (1987) el doctorado en ingeniería con especialidad en aprovechamientos hidráulicos. Ha publicado artículos principalmente en revistas mexicanas de excelencia: 33 en *Ingeniería Hidráulica en México*, 10 en *Agrociencia* y 4 en *Ingeniería. Investigación y Tecnología*. Fue investigador nacional (nivel I: expediente 7273) del 1º de julio de 1991 hasta el 31 de diciembre del 2007. Actualmente es profesor jubilado de la UASLP, desde el 1º de febrero del 2003. En 2008 la AMH le otorgó el Premio Nacional "Francisco Torres H", a la práctica profesional de la hidráulica.