

Ecuaciones universales ajustadas para el cálculo de lluvias máximas de corta duración

Del Ángel González, Marcelino¹ y Ramón Domínguez Mora²

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

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

Resumen

Se hace notar la importancia de contar con herramientas útiles para el cálculo de precipitaciones pluviales e intensidades de corta duración para la región sur del Estado de Tamaulipas, enfatizando en la necesidad de utilizar registros de precipitaciones máximas en 24 hrs obtenidos en la zona conurbada de la región, así como en la realización de ajustes a las ecuaciones en la literatura. Se utilizan los coeficientes para la determinación de precipitaciones máximas en una hora para la República Mexicana y se establecen las comparaciones en los resultados de su aplicación para las estaciones climatológicas Tampico, Ciudad Madero y Altamira de la región sur de Tamaulipas, mediante las ecuaciones propuestas por Bell (1969) y Chen (1983), ajustadas a las lluvias máximas regionales.

Palabras clave: lluvias máximas, intensidades de corta duración.

Introducción

El agua, recurso esencial para la vida y elemento fundamental para el desarrollo sustentable de una región, requiere de su estudio a partir de su formación dentro del ciclo hidrológico. El análisis comienza a partir de su medición mediante pluviógrafos y pluviómetros. Los primeros registran la altura de precipitación con relación al tiempo y permiten determinar su intensidad. Los segundos, miden la altura de lluvia máxima cada 24 horas.

La importancia de su medición se fundamenta en que, para cualquier región, el agua (en forma de precipitación) es motor de desarrollo por todas aquellas actividades relacionadas tanto con el aprovechamiento de los recursos hídricos, como con el diseño de obras de protección.

La precipitación como tal, es una variable hidrológica que se puede caracterizar a través de

su intensidad, su distribución espacio-temporal y su frecuencia o probabilidad de ocurrencia. Su caracterización depende de las mediciones realizadas en pluviógrafos para deducir su patrón de comportamiento en una zona determinada y llevar a cabo un análisis a posteriori. Sin embargo, no siempre se dispone de datos de intensidades para precipitaciones máximas de corta duración, por lo que es común el uso de registros pluviométricos para determinar las intensidades por medio de ecuaciones diseñadas para tal fin.

Este estudio presenta la aplicación de las ecuaciones de precipitación propuestas tanto por Bell (1969), como por Chen (1983), mediante el coeficiente K, con el cual se relaciona la precipitación máxima de 1 hora con la de 24 horas determinado por Baeza (2007), aplicable

a la República Mexicana (Figura 1). Se realizó un análisis comparativo con estaciones climatológicas del sur de Tamaulipas ubicadas en Tampico, Ciudad Madero y Altamira, y se hicieron las observaciones y recomendaciones correspondientes.

El análisis tiene como objetivo determinar las precipitaciones máximas para duraciones cortas, de 10 a 120 minutos principalmente, y se establece un criterio para el diseño de obras protección contra inundaciones aplicable a cualquier región de México.

Son pocas las publicaciones que existen sobre estudios que se han realizado aplicando las

ecuaciones de Bell (1969) y Chen (1983) en algunas regiones de México, y en todos se utilizan tal y como fueron concebidas por sus autores, ajustando sólo los parámetros que corresponden a las precipitaciones o intensidades máximas. Caben destacar, por ejemplo, Pereyra-Díaz *et al.* (2005), quienes ajustan las ecuaciones de lluvia intensa generalizada, propuestas por Bell y Chen, a las precipitaciones máximas de la ciudad de Xalapa, Veracruz, con el propósito de usarlas en otras partes del país, especialmente en el estado de Veracruz, cuando se cuenta con precipitaciones máximas horarias y diarias y se requiere de precipitaciones máximas de corta duración para diseñar obras hidráulicas. Campos (2008), propuso un procedimiento basado en la

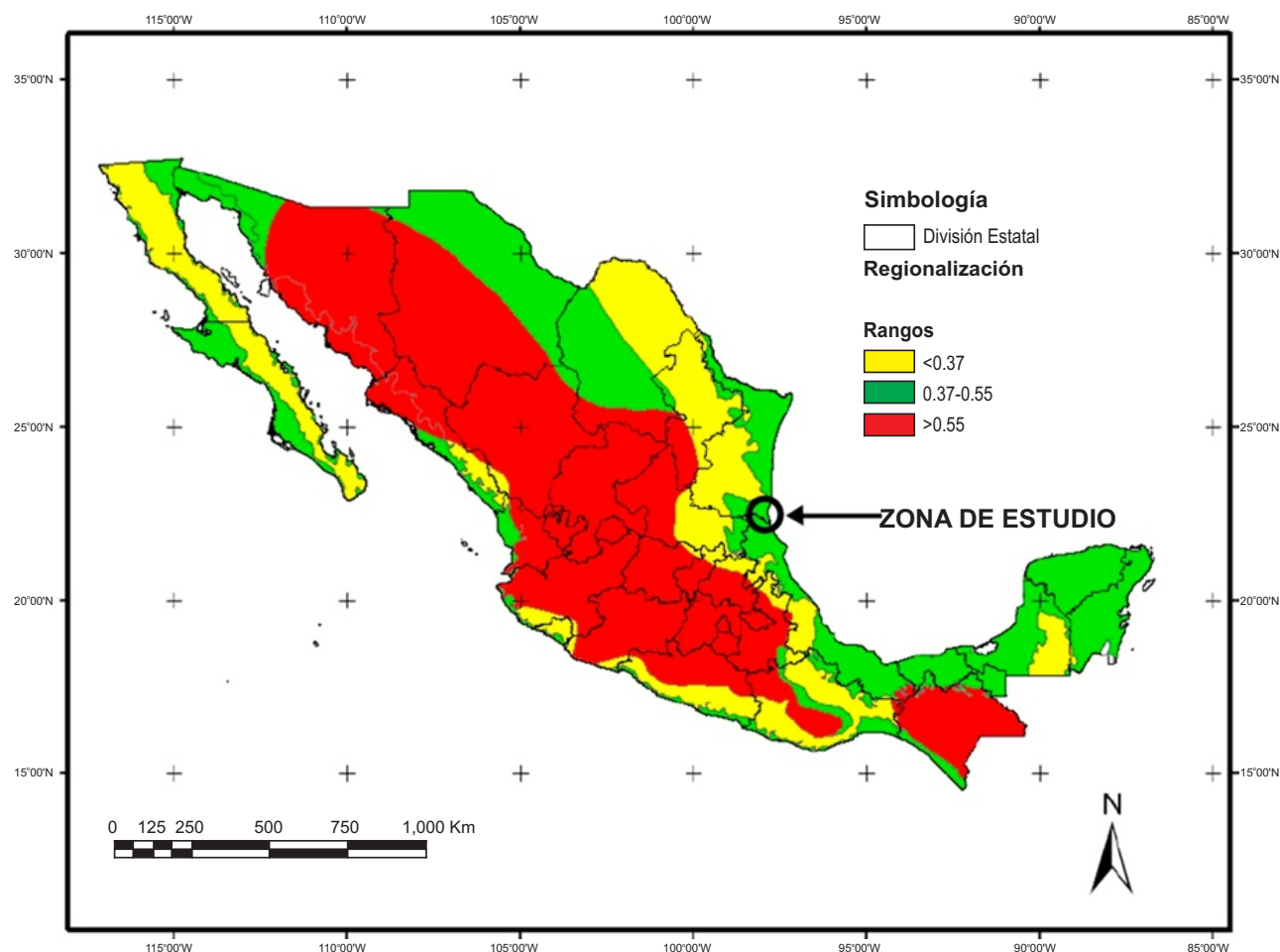


Figura 1. Valores de K para la República Mexicana propuestos por Baeza (2007). La figura se reproduce con autorización escrita del autor, 14 de agosto, 2013).

ecuación de Chen para construir las curvas IDF (intensidad-duración-frecuencia), el cual utiliza información sobre isoyetas de intensidades, así como la hidrométrica disponible en la República Mexicana y lo aplica en más de 50 localidades del país. En 2012 estimó las curvas IDF para la planicie costera de Tabasco mediante un método regional basado en la ecuación de Chen (1983).

En 1975 se publicó el Flood Studies Report (NERC, 1975), que es el resultado de más de cuatro años de estudios realizados por un grupo de especialistas de la Gran Bretaña, pertenecientes a cuatro centros de investigación. En el volumen relativo a la meteorología, se obtuvieron mapas con la precipitación asociada a un periodo de retorno de 5 años para distintas duraciones. Para obtener precipitaciones asociadas a duraciones menores de 2 días, primero se obtuvo la relación r entre la precipitación en 60 minutos y la precipitación en 2 días. A continuación, para cada valor de r se obtuvieron las relaciones que permiten pasar de la precipitación en 60 minutos a la correspondiente a cualquier duración entre 10 minutos y 2 días. Para España, Temes (1978) propuso tomar como base la relación α entre las intensidades de precipitación de 1h y de 1día, y elevarla a la potencia $h = (28^{0.1} - t^{0.1})/0.40$, donde t es la duración en horas.

En los resultados obtenidos por Baeza (2007) se consideran también algunos estudios previos, dentro de los que destaca el de Campos (1990).

En este trabajo, para su aplicación al sur de Tamaulipas, se hace inicialmente la presentación de las ecuaciones conforme fueron concebidas por sus autores y se propone su utilización mediante su ajuste a funciones de distribución de los datos de precipitaciones máximas en 24 horas de las tres estaciones climatológicas de la región. Con el fin de establecer un criterio que sea de utilidad para el diseño de obras hidráulicas urbanas se hacen las comparaciones de sus resultados.

Área de estudio

La zona conurbada del sur de Tamaulipas está formada por los municipios de Tampico, Ciudad Madero y Altamira, ubicados en la margen izquierda de la desembocadura del río Pánuco en el Golfo de México, y las lagunas del Chairel y de Champayán, las cuales reciben las aguas del río Tamesí, afluente del río Pánuco cerca de su desembocadura. En la Figura 2, se muestra la localización de los municipios en el estado de Tamaulipas, con su superficie y elevaciones medias.

Clima

De acuerdo con la clasificación climática de Köpen, el clima predominante en la región es del tipo Sabana Aw. Se caracteriza por ser cálido subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura promedio anual es de 24.6° C, alcanzando los 36.8°C en promedio con mínimas 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 la población. La precipitación anual varía de 789 a 1,044 mm y el mes más lluvioso es julio con valores por arriba de los 1,000 mm.

Esta es una región que se caracteriza por estar rodeada de agua. Al poniente por las los sistemas de lagunas que forma el río Tamesí, la desembocadura del río Pánuco al sur, y el Golfo de México al oriente. Durante las lluvias de verano, las características anteriores hacen que la zona se vea afectada por fuertes inundaciones, que producen encharcamientos en sus avenidas y calles, a tal grado que pueden llegar a inundar amplias zonas habitacionales y comerciales. El desalojo de las aguas pluviales es un problema grave.

MUNICIPIO	SUPERFICIE (km ²)	ELEVACION MEDIA *(m.s.n.m.)
Tampico	68.1	10
Madero	62.86	10
Altamira	1,361.7	28

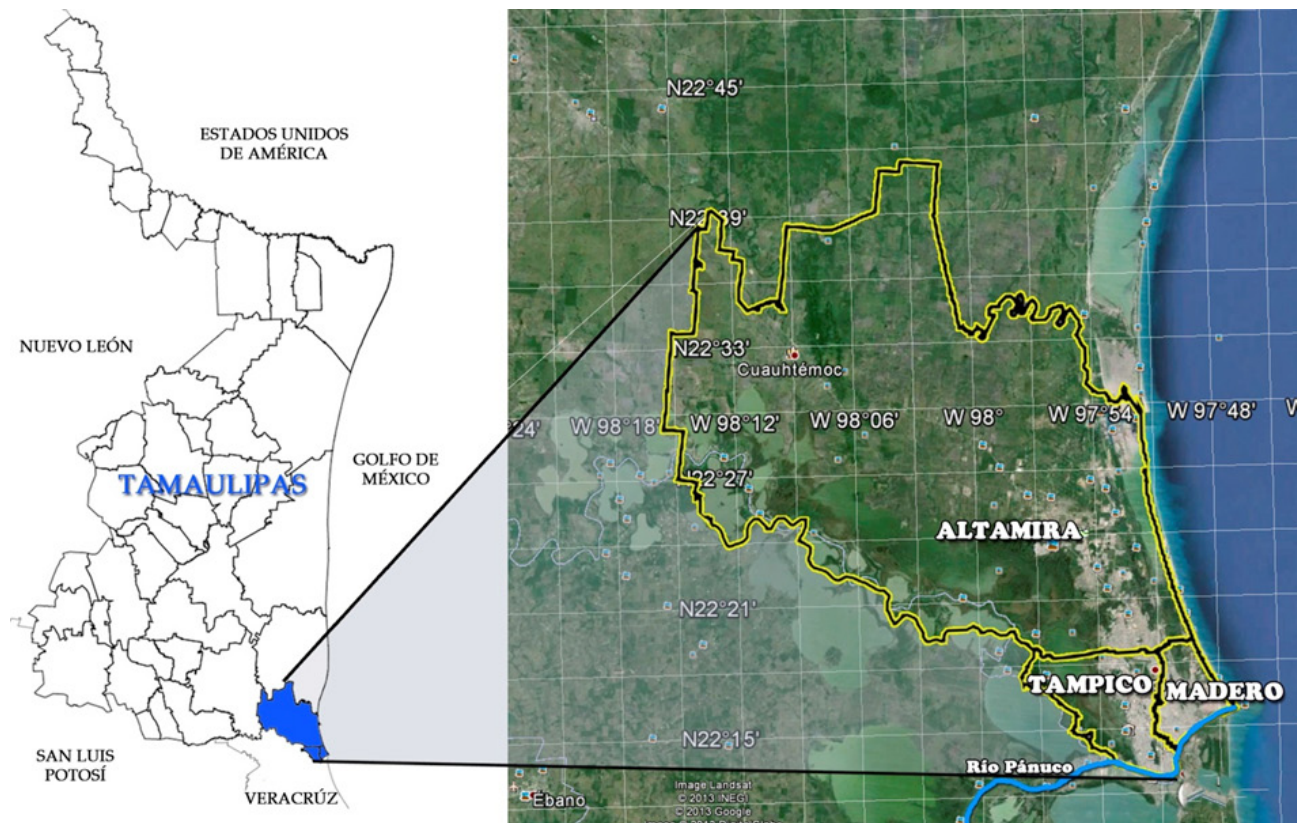


Figura 2. Localización de los Municipios de Tampico-Madero-Altamira.

En la región existen tres estaciones climatológicas para la medición de las precipitaciones pluviales; la estación Tampico, que se ubica en la bocatoma que abastece de agua a un amplio sector de las ciudades de Tampico y Ciudad Madero; la estación Tancol en la VIII Zona Militar de Tampico, y la estación Altamira en el municipio del mismo nombre. La estación Tampico es la que cuenta con una serie de tiempo de datos de precipitación pluvial mayor (50 años) y las restantes alrededor de 30 años. Las coordenadas geográficas de las estaciones son: Tampico: 22°14'19"N/97°52'44"O; Altamira: 22°25'30"N/97°56'42"O; Tancol: 22°17'39"N/97°53'10"O.

El objetivo de este estudio es ajustar las ecuaciones de lluvia generalizadas propuestas por Chen (1983) y por Bell (1969), a las precipitaciones máximas ocurridas en la zona, por ser de gran utilidad para el diseño de drenaje pluvial urbano, entre otras cosas.

Los registros de precipitaciones máximas en 24 horas de cada una de las estaciones climatológicas fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Golfo Norte, con oficinas ubicadas en Altamira, Tamaulipas. Las estaciones no cuentan con mediciones de precipitaciones máximas en una hora, por lo

que se determinaron conforme a los estudios realizados por Baeza (2007), en donde se estimó el coeficiente K que relaciona la precipitación máxima de una hora con la correspondiente a 24 horas, para la República Mexicana y para el Valle de México (Fig. 1).

Ecuación de Bell

Bell (1969) propuso una fórmula para determinar las curvas Intensidad-Duración-Periodo de retorno, a partir de las lluvias con duraciones hasta de 120 minutos. Esta fórmula permite estimar la altura de lluvia para una cierta duración entre 5 y 120 minutos y periodo de retorno entre 2 y 100 años, si se conoce la altura de lluvia con duración de una hora.

La ecuación es la siguiente:

$$P_T^t = (0.35 \ln T + 0.76) (0.54 t^{0.25} - 0.50) P_2^{60} \quad (\text{Ec. 1})$$

La ecuación es válida para

2 años $\leq T \leq$ 100 años y 5 minutos $\leq t \leq$ 120 minutos

Donde

P_T^t es la precipitación en mm para una duración de t minutos y periodo de retorno de T años;

P_2^{60} es la precipitación en mm para una duración de 60 minutos y periodo de retorno de 2 años;

t es la duración de la lluvia entre 5 y 120 minutos, en minutos;

T es el periodo de retorno en años.

Ecuación de Chen

Chen (1983) propuso una fórmula general para representar la relación intensidad-duración-periodo de retorno, siendo necesario para su aplicación conocer las siguientes relaciones:

o Lámina de lluvia- Duración

$$R = \frac{R_1^T}{R_{24}^T}$$

En donde R_1^T es la precipitación acumulada en una hora y periodo de retorno T y R_{24}^T es la precipitación acumulada en 24 horas y periodo de retorno T.

o Lámina de lluvia-Periodo de retorno

$$X = \frac{R_t^{100}}{R_t^{10}}$$

En donde R_t^{100} es la precipitación en el tiempo t (minutos) y periodo de retorno de 100 años y R_t^{10} es la precipitación en el tiempo t (minutos) y periodo de retorno de 10 años.

La fórmula propuesta por Chen es la siguiente:

$$R_t^T = \frac{a R_1^{10} \log (10^{(2-X)} T^{(X-1)})}{(t+b)^c} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde

R_1^T es la intensidad de lluvia en mm/hr para un periodo de retorno de T años y una lluvia de t minutos de duración.

a, b, y c, son parámetros que dependen del lugar

y de la relación $\frac{R_1^{10}}{R_{24}^{10}}$, los cuales se determinan por medio del nomograma propuesto por Chen (1983)(Figura 3), o mediante las ecuaciones 3, 4, y 5, o con la Tabla 4 elaborada y propuesta por Domínguez y Franco (2002).

R_1^{10} es la lluvia asociada a 10 años de periodo de retorno y una duración de una hora, en milímetros;

R_{24}^{10} es la lluvia asociada a 10 años de periodo de retorno y 24 horas de duración, en milímetros.

En este trabajo se utilizó el valor de $K = 0.35$ de la Tabla 4, en las ecuaciones 3, 4 y 5 para determinar los valores de a , b y c .

$$a = -2.297536 + 100.0389(R) - 432.5438(R)^2 - 1028.902(R)^4 \quad (Ec.3)$$

$$b = -9.845761 + 96.94864(R) - 341.4349(R)^2 - 598.7461(R)^4 \quad (Ec.4)$$

$$c = -0.06498345 + 5.069294(R) - 16.08111(R)^2 - 20.06288(R)^4 \quad (Ec.5)$$

La ecuación de Chen (1983) es válida para $T > 1$ año y $5 \text{ min} \leq t \leq 24$ horas.

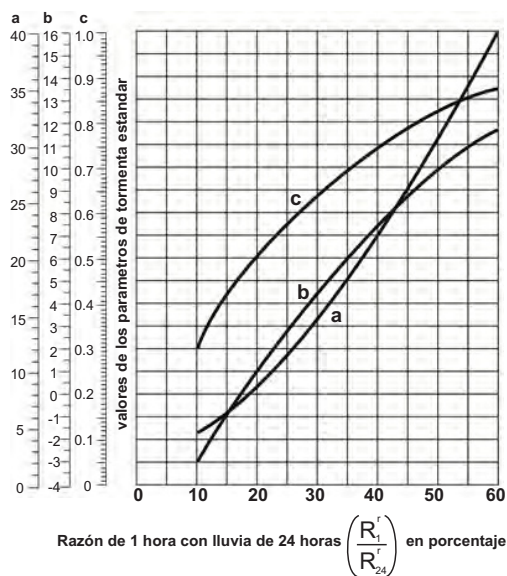


Figura 3. Nomograma de Chen (1983)

Las ecuaciones de Chen (1983) y las ecuaciones de Bell (1969) se pueden separar en factores que tomen en cuenta la duración y el periodo de retorno, como se muestra más adelante.

Aplicaciones

En la Tabla 1, se muestran los registros de lluvia de las estaciones climatológicas de Tampico, Altamira y Tancol, de la Zona Sur del Estado de Tamaulipas.

Tabla 1. Precipitaciones máximas anuales (mm) en 24 horas

Reg.Hidro.26/R.Guayalejo	Tampico	Altamira	Tancol
1960	61.0	-	-
1961	80.0	-	-
1962	184.0	-	-
1963	151.3	-	-
1964	52.3	-	-
1965	59.0	-	-
1966	104.8	-	-
1967	151.4	-	-
1968	54.0	-	-
1969	115.3	-	-
1970	147.8	-	-
1971	78.6	-	-
1972	142.5	-	-
1973	248.2	-	-
1974	167.5	-	-
1975	105.6	-	-
1976	122.0	-	-
1977	243.0	-	-
1978	84.5	-	-
1979	102.7	88.0	90.0
1980	60.5	79.0	76.0
1981	165.9	128.0	293.0
1982	75.5	70.2	76.0
1983	88.5	74.6	79.5
1984	180.0	180.6	230.5
1985	102.9	76.8	83.0
1986	50.1	90.3	52.0
1987	63.8	64.7	100.0
1988	143.5	40.5	94.0
1989	148.5	-	-
1990	193.2	226.0	125.0
1991	150.0	52.2	196.0
1992	141.4	67.5	89.0
1993	118.0	117.6	114.0
1994	105.0	147.7	98.0
1995	69.5	77.2	127.0
1996	98.0	84.9	119.0
1997	151.0	100.3	110.0
1998	93.0	77.0	106.0
1999	105.5	121.0	78.0

Tabla 1. (continuación)

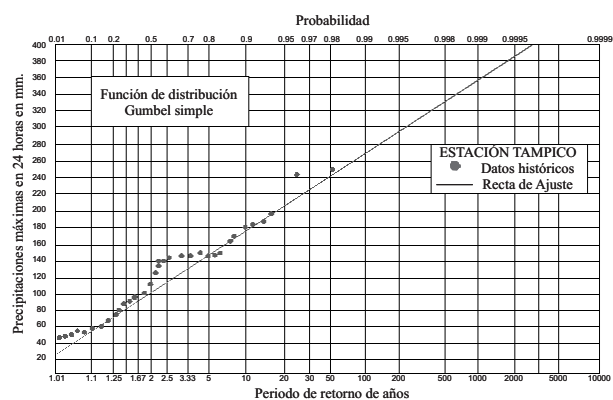
Reg.Hidro.26/R.Guayalejo	Tampico	Altamira	Tancol
2000	140.0	83.0	62.5
2001	150.3	81.8	42.8
2002	89.1	0.0	0.0
2003	108.2	3.0	0.0
2004	133.7	95.0	0.0
2005	94.0	111.5	62.0
2006	83.0	75.5	87.0
2007	140.0	149.2	61.5
2008	194.5	198.7	153.6
2009	68.0	85.1	102.6

Se realizó un ajuste de funciones de distribución de probabilidad para cada una de las estaciones climatológicas. Se encontró que la función de distribución que mejor se ajusta a cada una de las estaciones es Gumbel Simple para las estaciones Tampico y Altamira, Gumbel Doble para la estación Tancol.

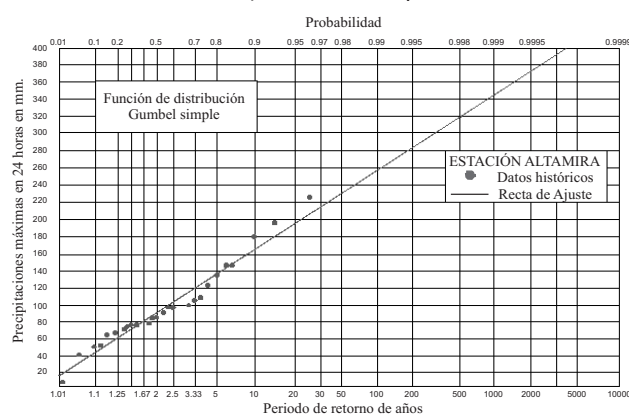
En la Tabla 2, se presentan las precipitaciones máximas en 24 horas, ajustadas para las estaciones en estudio para diferentes periodos de retorno. Las funciones de ajuste se muestran en la Figura 4.

Tabla 2. Precipitaciones máximas anuales en 24 horas ajustadas a funciones de distribución

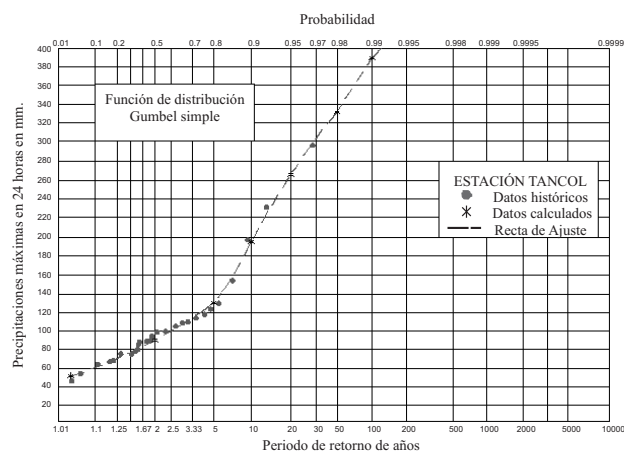
Periodo de retorno	Estación Tampico	Estación Altamira	Estación Tancol
Tr (AÑOS)	F. DISTRIBUCION GUMBEL (24 hrs)	F. DISTRIBUCION GUMBEL(24 hrs)	F. DISTRIBUCION DOBLE GUMBEL(24 hrs)
2	111.400	91.46	90.70
5	154.300	135.64	130.25
10	182.710	164.89	195.51
20	209.970	192.95	262.04
50	245.240	229.27	335.69
100	271.670	256.49	387.68
200	298.010	283.60	438.40
500	332.750	319.38	504.43



a) estación Tampico



b) estación Altamira



c) estación Tancol

Figura 4.- Ajuste de datos de precipitaciones máximas en 24 horas a funciones de distribución Gumbel y Doble Gumbel. a) y b) representan el ajuste de los datos históricos de precipitaciones máximas en 24 horas de las estaciones climatológicas Tampico y Altamira a una función de distribución de una sola población (Gumbel Simple); c) ajuste de los datos históricos de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación climatológica Tancol a una función de distribución de dos poblaciones (Gumbel doble).

Análisis para la duración de 24 horas

De acuerdo con la ecuación de Chen, los valores de la precipitación asociados a cualquier periodo de retorno pueden estimarse multiplicando los valores correspondientes a 10 años de periodo de retorno por el factor : $\log (10^{(2-X)} T^{(X-1)})$

En el caso de la estación Tancol, el valor de X es:
 $387.68/195.51 = 1.9829$

De forma que :

$$\log (10^{(2-X)} T^{(X-1)}) = \log(10^{0.0171} T^{0.9829}) = \log (1.04016 T^{0.9829})$$

Para T=2 años, $\log (1.04016 * 1.9764343) = 0.32555$; al multiplicar por el valor de 195.51 correspondiente a $T_r=10$ años (Tabla 2) se obtiene: $0.31298 * 195.51 = 61.19$, que resulta ser mucho menor que el de 90.7 obtenido del ajuste directo con los datos medidos que se muestran en la Tabla 2.

En la Tabla 3 se muestran los valores obtenidos con la ecuación de Chen (1983) y se presenta una comparación con los valores generados mediante el ajuste a funciones de distribución.

Tabla 3.- Precipitaciones máximas anuales en 24 horas en la estación Tancol obtenidas mediante la ecuación de Chen (1983).

Periodo de retorno (años)	Obtenidos con ajuste directo	Obtenidos con la fórmula de chen (1983)
2	90.70	61.1912147
5	130.25	137.662064
10	195.51	195.510029
20	262.04	253.357994
50	335.69	329.828843
100	387.68	387.676808
200	438.40	445.524773
500	504.43	521.995622

En el caso del análisis para la duración de 24 horas, se observa que para los periodos de retorno de 2, 20 y 50 años la fórmula de Chen subestima y para periodos de retorno de 5, 200 y 500 años sobrestima. Esto se debe a que Chen supone un tipo de función de distribución que no en todos los casos corresponde con la realidad, como es el caso de la estación Tancol, cuya función de distribución es una Doble Gumbel.

Se recomienda entonces que para la duración de 24 horas no se utilice la ecuación de Chen, sino que se trabaje con el ajuste directo de la función de distribución más adecuada a cada caso particular.

Análisis para duraciones menores que 24 horas

En la Tabla 4, se presenta la relación de precipitaciones para un periodo de retorno y una duración d, y la precipitación para un periodo de retorno y una lluvia de duración de 60 minutos, para distintos valores del coeficiente K, elaborada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Domínguez y Franco, 2002).

Tabla 4.- Relación $\frac{P_T^d}{P_T^{60}}$ para diferentes valores de K

No	d (min.)	d (hrs)	K = 0.15	K = 0.20	K = 0.30	K = 0.35	K = 0.40	K = 0.60	K = 0.70
1	5	0.083	0.25	0.27	0.29	0.29	0.29	0.3	0.3
2	10	0.167	0.36	0.4	0.43	0.44	0.45	0.47	0.48
3	15	0.25	0.46	0.49	0.54	0.55	0.56	0.59	0.6
4	30	0.5	0.67	0.7	0.74	0.755	0.77	0.8	0.81
5	60	1	1	1	1	1	1	1	1
6	120	2	1.49	1.41	1.32	1.285	1.25	1.18	1.16
7	240	4	2.23	1.99	1.72	1.625	1.53	1.34	1.3
8	360	6	2.81	2.44	2	1.86	1.72	1.43	1.38
9	480	8	3.32	2.81	2.23	2.045	1.86	1.49	1.43

Los valores de precipitaciones pueden ser generados directamente mediante la relación de $\frac{P_T^d}{P_T^{60}}$ dada en la Tabla 4, con el coeficiente k, sin embargo, también se pueden calcular haciendo uso de las ecuaciones 1 y 2, como se muestra enseguida.

Mediante la ecuación 1, los resultados de su aplicación dependen totalmente de la precipitación en 60 minutos (1 hora) y un periodo de retorno de 2 años y no toman en cuenta las variaciones con relación al periodo de retorno que, como ya se comentó, deben obtenerse de un ajuste directo como el mostrado en la Tabla 2 y en las estaciones de la Figura 4. Entonces, otra forma de usar esta ecuación y que permite incorporar lo obtenido para las precipitaciones máximas en 24 horas, es usar sólo el segundo término entre paréntesis (que depende de la duración) y multiplicarlo por la precipitación de 60 minutos para cada periodo de retorno.

De esta ecuación de Bell se convierte en la siguiente expresión:

$$P_T^t = (0.54 t^{0.25} - 0.50) P_T^{60} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde

P_T^t es la precipitación en mm para una duración de t minutos y periodo de retorno de T años;

P_2^{60} es la precipitación en mm para una duración de 60 minutos y periodo de retorno de T años;

t es la duración de la lluvia entre 5 y 120 minutos, en minutos, y

T es el periodo de retorno en años.

Ecuación de Chen

Ajustando la ecuación 2 de Chen, conforme a lo obtenido con la función de distribución ajustada para cada estación se tiene:

$$R_t^T = \frac{18.15 P_{24}^T (0.35)}{(t + 5.77)^{0.69}} \left(\frac{t}{60} \right) \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde

R_t^T es la precipitación en mm para un periodo de retorno de T años y t minutos de duración.

P_{24}^T es la lluvia asociada a un periodo de retorno T años y 24 horas de duración, en milímetros (Tabla 4).

Los valores de los parámetros a , b y c , se determinan mediante la Figura 3, o las ecuaciones

3, 4 y 5, con la relación $\frac{R_1^{10}}{R_{24}^{10}}$ que en este caso se tomó como 0.35, de acuerdo con los rangos establecidos en la Figura 1.

Ecuación de Bell

Al igual que en el caso de la ecuación 7 de Chen, se puede hacer un ajuste considerando solo las variaciones por la duración y no por el periodo de retorno; es decir, usando el factor:

$$(0.54 t^{0.25} - 0.50) P_T^{60}$$

En donde, como no existen datos para 60 minutos, se usarán los obtenidos con la ecuación 7 de Chen. En la Tabla 5, se presentan los valores de precipitaciones máximas con los obtenidos para 60 minutos mediante la ecuación 7 de Chen para los datos de la estación Tancol.

Una vez obtenidos los valores de precipitaciones para 60 minutos mediante la ecuación 7 de Chen, se usarán estos para el cálculo de precipitaciones para duraciones menores a 24 horas mediante la ecuación 6 de Bell

En el caso del análisis para duraciones menores a 24 horas, se observa que para todos los periodos de retorno, la ecuación de Chen proporciona resultados menores (Tabla 5) que los obtenidos con Bell (Tabla 6). Lo anterior se debe a que no se cuenta con información de registros de precipitaciones para duraciones de 60 minutos y al usar los valores de precipitaciones generados mediante la ecuación 7 de Chen (Tabla 6, segunda columna), los valores resultantes de precipitaciones son menores.

Tabla 5.- Precipitaciones máximas para duraciones hasta de 240 min. obtenidas mediante la Ecuación de Chen en la estación Tancol.

T _R	F. Distribución D. Gumbel (24 Hrs)	Duración en minutos						
		5	10	15	30	60	120	240
2	90.7	9.31	14.32	17.76	24.41	32.07	41.01	51.66
5	130.25	13.38	20.56	25.51	35.06	46.06	58.89	74.19
10	195.51	20.08	30.86	38.28	52.62	69.13	88.40	111.36
20	262.04	26.91	41.37	51.31	70.53	92.66	118.48	149.25
50	335.69	34.47	52.99	65.73	90.35	118.70	151.78	191.20
100	387.68	39.81	61.20	75.92	104.34	137.08	175.28	220.81
200	438.4	45.02	69.21	85.85	117.99	155.02	198.22	249.70
500	504.43	51.80	79.63	98.78	135.77	178.36	228.07	287.30

Tabla 6.- Precipitaciones máximas para duraciones hasta de 240 min. obtenidas mediante la ecuación de 6 de Bell, usando las precipitaciones máximas en 60 minutos obtenidas mediante la ecuación 7 de Chen en la estación Tancol.

T _R	Precipitación Chen 60 min	Duración en minutos						
		5	10	15	30	60	120	240
2	32.07	9.86	14.76	18.05	24.50	32.16	41.28	52.13
5	46.06	14.16	21.20	25.92	35.18	46.19	59.29	74.86
10	69.13	21.26	31.82	38.90	52.80	69.33	88.99	112.37
20	92.66	28.49	42.65	52.14	70.77	92.93	119.27	150.61
50	118.70	36.50	54.63	66.79	90.66	119.04	152.80	192.94
100	137.08	42.15	63.10	77.14	104.70	137.48	176.46	222.82
200	155.02	47.67	71.35	87.23	118.40	155.47	199.55	251.97
500	178.36	54.85	82.10	100.37	136.23	178.88	229.60	289.92

Por lo anterior, bajo el mismo procedimiento, resulta indiferente, para el cálculo de las precipitaciones, el uso de las ecuaciones de Chen o Bell, ya que las diferencias son mínimas, aun tratándose de una función Doble Gumbel como es el caso de la estación Tancol.

Debido a que los valores de precipitaciones en la estación Tampico se ajustan a una función de distribución Gumbel, se hará una comparación de valores determinados con la ecuación de Chen para diferentes duraciones y los calculados con el coeficiente K (calculado y proporcionado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM), para duraciones hasta de 480 minutos, tomando como representativa dicha estación.

Ecuación 7 de Chen

Mediante la ecuación 7, se determinaron las alturas de lluvia para diferentes duraciones y con los resultados se hizo la comparación de los valores de precipitaciones máximas obtenidos mediante el uso del coeficiente K y los de la ecuación 7 de Chen para las tres estaciones. En la Tabla 7, se presentan los resultados para la estación Tampico.

Basándose en esta comparación, se puede ver que los valores de 10 hasta 240 minutos son muy similares, siendo ligeramente mayores los calculados con la ecuación 7 de Chen, lo que incluye los obtenidos para una duración de 1 hora. Mediante esta comparación se ve que los valores obtenidos con el coeficiente K (Tabla 4) con las precipitaciones en 24 horas son ligeramente menores, por lo que los obtenidos mediante la ecuación ajustada de Chen también representan una aproximación. En el caso de los valores de precipitaciones para 360 y 480 minutos, las diferencias se vuelven menores, debido a que la ecuación de Chen fue establecida para precipitaciones hasta de 2 horas. En el caso de las estaciones Altamira y Tancol, las diferencias obtenidas para cada una de las duraciones fueron muy similares.

Ecuación 6 de Bell

Aplicando la ecuación 6 de Bell, se también se hizo una comparación con los valores de precipitaciones máximas obtenidos mediante el uso del coeficiente K para las tres estaciones. En la Tabla 8 se presentan los resultados para la estación Tampico.

A partir de esta tabla comparativa se desprende que los valores de 10 hasta 240 minutos son muy similares y sus diferencias son debidas al ajuste de las funciones de distribución realizado en la Tabla 2. Sin embargo, para una duración de una hora, los resultados obtenidos mediante el coeficiente K con las precipitaciones en 24 horas, son prácticamente iguales, de aquí que los obtenidos con la ecuación 6 de Bell también representan aproximaciones. En el caso de los valores de precipitaciones para 360 y 480 minutos, las diferencias se vuelven menores a la unidad debido a que la ecuación 6 de Bell fue establecida para precipitaciones hasta de 2 horas. En el caso de las estaciones Altamira y Tancol, las diferencias obtenidas fueron muy similares para cada una de las duraciones.

Una vez determinados los valores de las precipitaciones de la Tabla 8, se procedió a determinar las precipitaciones mediante las ecuaciones 6 y 7, para cada una de las estaciones en estudio.

En las tablas 9 y 10, se puede ver que la ecuación 6 de Bell proporciona resultados con valores mayores de precipitaciones para duraciones cortas, hasta de 15 minutos (para todos los periodos de retorno en estudio), y con la ecuación 7 de Chen se obtienen resultados mayores para duraciones de 30 a 480 minutos. Sin embargo, como se mencionó en el análisis para duraciones de 24 hrs, se recomienda que los cálculos de precipitaciones para diferentes periodos de retorno, se realicen mediante cualquier ecuación. Con valores de K de 0.35, los resultados son muy similares. Los casos contrarios ocurren en las zonas altas donde se podrían tener valores de K de 0.60, como en la Ciudad de México.

Tabla 7.- Comparación de las precipitaciones máximas en mm para diferentes duraciones y periodos de retorno en la estación Tampico.

Tr en años	Duración en minutos								
	10(1)	10(2)	(2)/(1)	15(1)	15(2)	(2)/(1)	30(1)	30(2)	(2)/(1)
2	17.16	17.59	1.025	21.44	21.81	1.017	29.44	29.98	1.018
5	23.76	24.36	1.025	29.70	30.22	1.017	40.77	41.53	1.018
10	28.14	28.84	1.025	35.17	35.78	1.017	48.28	49.18	1.018
20	32.34	33.15	1.025	40.42	41.12	1.017	55.48	56.51	1.018
50	37.77	38.72	1.025	47.21	48.02	1.017	64.80	66.01	1.018
100	41.84	42.89	1.025	52.30	53.20	1.017	71.79	73.12	1.018
200	45.89	47.05	1.025	57.37	58.36	1.017	78.75	80.21	1.018
500	51.24	52.53	1.025	64.05	65.16	1.017	87.93	89.56	1.018

Tr en años	Duración en minutos								
	60(1)	60(2)	(2)/(1)	120(1)	120(2)	(2)/(1)	240(1)	240(2)	(2)/(1)
2	38.99	39.39	1.010	50.10	50.19	1.002	63.36	63.45	1.002
5	54.01	54.56	1.010	69.40	69.52	1.002	87.76	87.88	1.002
10	63.95	64.61	1.010	82.17	82.32	1.002	103.92	104.06	1.002
20	73.49	74.24	1.010	94.43	94.60	1.002	119.42	119.59	1.002
50	85.83	86.72	1.010	110.30	110.49	1.002	139.48	139.68	1.002
100	95.08	96.06	1.010	122.18	122.40	1.002	154.51	154.73	1.002
200	104.30	105.38	1.010	134.03	134.27	1.002	169.49	169.74	1.002
500	116.46	117.66	1.010	149.65	149.92	1.002	189.25	189.52	1.002

Tr en años	Duración en minutos					
	360(1)	360(2)	(2)/(1)	480(1)	480(2)	(2)/(1)
2	72.52	72.34	0.997	79.73	79.30	0.995
5	100.45	100.20	0.997	110.44	109.84	0.995
10	118.94	118.64	0.997	130.77	130.07	0.995
20	136.69	136.35	0.997	150.29	149.47	0.995
50	159.65	159.25	0.997	175.53	174.58	0.995
100	176.86	176.41	0.997	194.45	193.39	0.995
200	194.00	193.51	0.997	213.30	212.14	0.995
500	216.62	216.07	0.997	238.17	236.87	0.995

(1) Valores obtenidos con el coeficiente K=0.35.

(2) Valores obtenidos mediante la ecuación de Chen.

Tabla 8.- Comparación de las precipitaciones máximas en mm para diferentes duraciones y periodos de retorno en la estación Tampico

Tr en años	Duración en minutos								
	10(1)	10(2)	(2)/(1)	15(1)	15(2)	(2)/(1)	30(1)	30(2)	(2)/(1)
2	17.16	17.95	1.05	21.44	21.94	1.02	29.44	29.78	1.01
5	23.76	24.86	1.05	29.70	30.39	1.02	40.77	41.25	1.01
10	28.14	29.43	1.05	35.17	35.99	1.02	48.28	48.84	1.01
20	32.34	33.83	1.05	40.42	41.35	1.02	55.48	56.13	1.01
50	37.77	39.51	1.05	47.21	48.30	1.02	64.80	65.56	1.01
100	41.84	43.77	1.05	52.30	53.51	1.02	71.79	72.62	1.01
200	45.89	48.01	1.05	57.37	58.69	1.02	78.75	79.67	1.01
500	51.24	53.60	1.05	64.05	65.54	1.02	87.93	88.95	1.01

Tr en años	Duración en minutos								
	60(1)	60(2)	(2)/(1)	120(1)	120(2)	(2)/(1)	240(1)	240(2)	(2)/(1)
2	38.99	39.10	1.00	50.10	50.19	1.00	63.36	63.38	1.00
5	54.01	54.16	1.00	69.40	69.52	1.00	87.76	87.78	1.00
10	63.95	64.13	1.00	82.17	82.32	1.00	103.92	103.94	1.00
20	73.49	73.70	1.00	94.43	94.60	1.00	119.42	119.45	1.00
50	85.83	86.08	1.00	110.30	110.49	1.00	139.48	139.52	1.00
100	95.08	95.36	1.00	122.18	122.40	1.00	154.51	154.55	1.00
200	104.30	104.61	1.00	134.03	134.27	1.00	169.49	169.54	1.00
500	116.46	116.80	1.00	149.65	149.92	1.00	189.25	189.30	1.00

Tr en años	Duración en minutos					
	360(1)	360(2)	(2)/(1)	480(1)	480(2)	(2)/(1)
2	72.52	72.22	0.9958	72.52	79.73	0.9915
5	100.45	100.03	0.9958	100.45	110.44	0.9915
10	118.94	118.44	0.9958	118.94	130.77	0.9915
20	136.69	136.12	0.9958	136.69	150.29	0.9915
50	159.65	158.98	0.9958	159.65	175.53	0.9915
100	176.86	176.11	0.9958	176.86	194.45	0.9915
200	194.00	193.19	0.9958	194.00	213.30	0.9915
500	216.62	215.71	0.9958	216.62	238.17	0.9915

(1) Valores obtenidos con el coeficiente K=0.35.

(2) Valores obtenidos mediante la ecuación de Bell.

Tabla 9.- Precipitaciones máximas en mm para duraciones de 10 a 120 min

Tr en años	Duración en minutos									
	10(1)	10(2)	15(1)	15(2)	30(1)	30(2)	60(1)	60(2)	120(1)	120(2)
estación Tampico										
2	17.59	17.95	21.81	21.94	29.98	29.78	39.39	39.10	50.37	50.19
5	24.36	24.86	30.22	30.39	41.53	41.25	54.56	54.16	69.76	69.52
10	28.84	29.43	35.78	35.99	49.18	48.84	64.61	64.13	82.61	82.32
20	33.15	33.83	41.12	41.35	56.51	56.13	74.24	73.70	94.93	94.60
50	38.72	39.51	48.02	48.30	66.01	65.56	86.72	86.08	110.88	110.49
100	42.89	43.77	53.20	53.51	73.12	72.62	96.06	95.36	122.83	122.40
200	47.05	48.01	58.36	58.69	80.21	79.67	105.38	104.61	134.74	134.27
500	52.53	53.60	65.16	65.54	89.56	88.95	117.66	116.80	150.45	149.92

Tr en años	Duración en minutos									
	10(1)	10(2)	15(1)	15(2)	30(1)	30(2)	60(1)	60(2)	120(1)	120(2)
estación Altamira										
2	14.44	14.73	17.91	18.01	24.62	24.45	32.34	32.10	41.35	41.21
5	21.41	21.85	26.56	26.71	36.51	36.26	47.96	47.61	61.33	61.11
10	26.03	26.56	32.29	32.48	44.38	44.08	58.30	57.88	74.55	74.29
20	30.46	31.08	37.78	38.00	51.93	51.58	68.23	67.73	87.24	86.93
50	36.19	36.93	44.90	45.16	61.71	61.29	81.07	80.48	103.66	103.30
100	40.49	41.32	50.23	50.52	69.03	68.57	90.69	90.03	115.97	115.56
200	44.77	45.69	55.53	55.86	76.33	75.81	100.28	99.55	128.23	127.77
500	50.42	51.45	62.54	62.90	85.96	85.38	112.93	112.11	144.40	143.89

Tr en años	Duración en minutos									
	10(1)	10(2)	15(1)	15(2)	30(1)	30(2)	60(1)	60(2)	120(1)	120(2)
estación Tancol										
2	14.32	14.61	17.76	17.86	24.41	24.25	32.07	31.84	41.01	40.86
5	20.56	20.98	25.51	25.65	35.06	34.82	46.06	45.72	58.89	58.68
10	30.86	31.50	38.28	38.51	52.62	52.27	69.13	68.63	88.40	88.09
20	41.37	42.21	51.31	51.61	70.53	70.05	92.66	91.98	118.48	118.06
50	52.99	54.08	65.73	66.11	90.35	89.74	118.70	117.83	151.78	151.24
100	61.20	62.45	75.92	76.35	104.34	103.64	137.08	136.08	175.28	174.67
200	69.21	70.62	85.85	86.34	117.99	117.20	155.02	153.89	198.22	197.52
500	79.63	81.26	98.78	99.35	135.77	134.85	178.36	177.06	228.07	227.27

Ecuaciones de chen (1) y Bell (2)

Tabla 10.-Tabla comparativa de las precipitaciones máximas en mm para duraciones de 240 a 480 min

Tr en años	Duración en minutos					
	240(1)	240 (2)	360(1)	360(2)	480(1)	480(2)
estación Tampico						
2	63.45	63.38	72.34	72.22	79.30	79.06
5	87.88	87.78	100.20	100.03	109.84	109.50
10	104.06	103.94	118.64	118.44	130.07	129.66
20	119.59	119.45	136.35	136.12	149.47	149.01
50	139.68	139.52	159.25	158.98	174.58	174.04
100	154.73	154.55	176.41	176.11	193.39	192.79
200	169.74	169.54	193.51	193.19	212.14	211.48
500	189.52	189.30	216.07	215.71	236.87	236.14

Tr en años	Duración en minutos					
	240(1)	240 (2)	360(1)	360(2)	480(1)	480(2)
estación Altamira						
2	52.09	52.03	59.29	59.39	65.11	64.91
5	77.26	77.17	87.93	88.08	96.56	96.26
10	93.92	93.81	106.89	107.07	117.38	117.01
20	109.90	109.77	125.08	125.29	137.35	136.93
50	130.58	130.43	148.63	148.88	163.21	162.70
100	146.09	145.92	166.27	166.55	182.59	182.02
200	161.53	161.34	183.85	184.16	201.89	201.26
500	181.91	181.70	207.04	207.39	227.36	226.65

Tr en años	Duración en minutos					
	240(1)	240 (2)	360(1)	360(2)	480(1)	480(2)
estación Tancol						
2	51.66	51.60	58.90	58.80	65.11	64.37
5	74.19	74.10	84.58	84.44	96.56	92.43
10	111.36	111.23	126.96	126.74	117.38	138.74
20	149.25	149.08	170.16	169.87	137.35	185.96
50	191.20	190.97	217.98	217.62	163.21	238.22
100	220.81	220.55	251.74	251.32	182.59	275.12
200	249.70	249.41	284.68	284.20	201.89	311.11
500	287.30	286.97	327.55	327.00	227.36	357.97

Ecuaciones de chen ajustada (1) y Bell (2)

Discusión y conclusiones

En este artículo se usaron tanto las ecuaciones de Chen como las de Bell, ajustándolas para las lluvias máximas regionales en la zona conurbada del sur del Estado de Tamaulipas y se muestran los resultados aplicados para diferentes duraciones. El problema principal en la utilización de las ecuaciones como fueron concebidas por sus autores, consiste en la obtención de las precipitaciones máximas para una hora de duración. Dado que actualmente es cada vez más difícil obtener registros de pluviogramas para tormentas representativas en diferentes regiones de la República Mexicana, también es más frecuente el uso de registros de pluviómetros con los cuales se obtienen precipitaciones máximas en 24 horas. Sin embargo, no existen suficientes modelos numéricos que permitan, a partir de precipitaciones máximas, obtener intensidades para el diseño de las obras pluviales, como es el caso de las ecuaciones presentadas en este trabajo.

Para obtener las precipitaciones para una hora de duración, Domínguez y Franco (2002), propusieron un coeficiente K mediante un análisis regional para obtener precipitaciones asociadas a duraciones menores a 2 horas que permite, a partir de precipitaciones máximas en 24 horas, obtener las precipitaciones representativas para una hora de duración (Figura 1).

Por otro lado, aplicar tanto las ecuaciones de Bell como las de Chen tal y como fueron concebidas, conlleva a errores de apreciación y de valoración, debido a que no toman en cuenta las variaciones de los datos con relación al periodo de retorno, las cuales pueden medirse al ajustar estas ecuaciones a funciones de distribución. En la Tabla 2 se presentan los resultados del ajuste para las tres estaciones climatológicas en estudio.

Para valorar las diferencias existentes al calcular las precipitaciones con el coeficiente K y las ecuaciones ajustadas, se determinó

primeramente con un análisis para 24 horas de duración en la estación Tancol, pues en esta estación se tiene una función de distribución Doble Gumbel.

Los valores de precipitaciones para diferentes periodos de retorno se muestran en Tabla 2, en donde se observa que para periodos de retorno pequeños, la ecuación de Chen subestima y para periodos grandes sobrestima, como es el caso de la estación Tancol cuya función de distribución es Doble Gumbel.

Para duraciones menores a 24 horas, en el caso de la ecuación de Bell, se determinaron las precipitaciones pero, como no se cuenta con información de lluvias para una hora de duración, se utilizaron las calculadas mediante la ecuación 7 de Chen (Tabla 5). En el caso del análisis para duraciones menores a 24 horas, (Tabla 6) se observa que para todos los periodos de retorno, la ecuación 7 de Chen proporciona resultados menores que los obtenidos con la ecuación 6 de Bell. Lo anterior se debe a que no se cuenta con información para duraciones de 60 minutos y al usar la ecuación 7 de Chen, los valores resultantes de precipitaciones son muy similares.

También se efectuó el cálculo de las precipitaciones mediante las ecuaciones 3 y 4 con el coeficiente K para diferentes duraciones, con sus correspondientes variaciones para cada una de las duraciones establecidas de 10 a 480 minutos. En las tablas 7 y 8 se presentan, para la estación Tampico, los resultados obtenidos para esta condición utilizando la ecuación 7 de Chen (Tabla 7) y la 6 de Bell (Tabla 8).

De estos resultados se concluye que con ambas ecuaciones se obtienen valores muy similares para duraciones de 10 a 240 minutos, siendo sus diferencias debidas al ajuste a funciones de distribución de la Tabla 2. Para una hora de duración los resultados obtenidos con el coeficiente K son ligeramente más bajos, por lo

que se concluye que los valores obtenidos con las ecuaciones de Chen y de Bell también representan aproximaciones. En el caso de duraciones de 360 y 480 minutos las diferencias disminuyen, lo cual se debe a que ambas ecuaciones fueron establecidas para duraciones hasta de dos horas. Con los resultados obtenidos por medio de ambas ecuaciones, se calcularon las precipitaciones para las tres estaciones, Tampico, Altamira y Tancol (tablas 9 y 10). Estos resultados muestran que la ecuación 6 de Bell proporciona valores mayores de precipitaciones para duraciones cortas, hasta de 15 minutos (para todos los periodos de retorno en estudio), mientras que la ecuación 7 de Chen lo hace para duraciones de 30 a 480 minutos.

En el análisis para duraciones de 24 hrs, se recomienda que los cálculos de precipitaciones para diferentes periodos de retorno, se realicen mediante la función de distribución que mejor se ajuste a los datos del registro, ya que si no se cuenta con registros para una hora de duración, es necesario recurrir a resultados regionales, como los mostrados en la Figura 1 de Baeza (2007). Hay, además, diferencias entre lo que se obtiene con la ecuación 7 de Chen y con la 6 de Bell que, en este caso en particular, son pequeñas debido a que el valor de K es de 0.35. Sin embargo, estas podrían ser mayores para valores de K pequeños (0.25), o muy grandes (0.60).

Como se ha mostrado, la base para la aplicación de las ecuaciones de Bell y de Chen, consiste en la determinación de las precipitaciones para una hora de duración. Para obtenerla, se requiere de pluviogramas para elaborar las curvas para el cálculo de precipitaciones e intensidades de corta duración. En caso de no contar con ellos, el método propuesto por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, a partir de lluvias máximas en 24 hrs, constituye una herramienta útil, sencilla y confiable.

Se recomienda que para el estudio de cualquier región de la República Mexicana se examinen las

precipitaciones con duración de 24 hrs cuando no haya registros con duración de una hora. Es conveniente determinar si ambas ecuaciones se ajustan a los datos del registro de precipitaciones; de no ser así, conviene realizar el ajuste a funciones de distribución y utilizar la que mejor se ajuste.

Al hacer la comparación entre la ecuación 6 de Bell y la 7 de Chen, se observa que son muy similares, por lo que se puede utilizar cualquiera para el cálculo de precipitaciones e intensidades en esta región de México, aunque sean un poco mayores usando la ecuación 6 de Bell. En otras regiones de la República Mexicana los resultados no siempre son los mismos, por lo que no se deben extrapolar, sino hacer el análisis para cada caso en particular.

Una recomendación final es la de analizar en la cuenca que se esté estudiando, las duraciones con base en los periodos de retorno y tiempos de concentración y, con base en ello, aplicar una u otra ecuación. Alternativamente, para el diseño de las obras de infraestructura pluvial, se puede utilizar la función de distribución que mejor se ajuste, de forma que las precipitaciones e intensidades resultantes permitan obtener un volumen de escurrimiento mayor mediante cualquiera de las ecuaciones que involucran la relación lluvia-escurrimiento.

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 M.I. Gabriela Esquivel Garduño por la revisión crítica de este trabajo.

A la Comisión Nacional del Agua, Dirección General, Organismo de Cuenca Golfo Norte,

por haber proporcionado la información sobre precipitaciones máximas en 24 horas de las estaciones climatológicas que se citan en este estudio.

Al Dr. Rafael Hernández Walls, por sus sugerencias y comentarios en la revisión de este artículo.

Al Dr. Luis A. Delgado Argote, editor de la revista GEOS, por sus observaciones y sugerencias en la revisión de este artículo.

Referencias

- Baeza, R. C. (2007). Estimación regional de factores de convectividad para el cálculo de relaciones intensidad-duración-frecuencia. Tesis de Maestría. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM. 37 pp.
- Bell, F. C. (1969). Generalized rainfall duration-frequency relationships. Journal of the Hydraulics Division. Proc. papers 6357, 95(HY1), 311-327.
- Campos, A.D. (1990). Procedimiento para obtener curvas I-D-T a partir de registros pluviométricos. Ingeniería Hidráulica en México, 5(2), 39-52.
- Chen, C.I. (1983). Rainfall intensity-duration-frequency formulas. Journal of the Hydraulics Division, 109(12), 1603-1621.
- Domínguez, R. y Franco C. (2002). Análisis regional para la obtención de precipitaciones de diseño asociadas a duraciones menores de 2 h. Memorias del XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Ciudad de la Habana, Cuba, pp.234-241.
- Pereyra-Díaz, D, Ochoa-Martínez, C.A. Y Pérez-Sesma, J.A.A. (2005). Ecuaciones de lluvia intensa generalizada para obtener precipitaciones máximas de corta duración. GEOS, 25(2), 340-351.
- Campos, A.D. (2008). Intensidades máximas de lluvia para diseño hidrológico urbano en la república mexicana. Ingeniería, Investigación y Tecnología 11(002), 179-188.
- Campos, A.D. (2012) . Contraste de un método regional de estimación de curvas IDF en la planicie costera de Tabasco, México. Agrociencia, 46, 637-649.
- Natural Environment Research Council. (1975). Flood Studies Report. 5 v. London.
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo de España. Dirección General de Carreteras. (1990). Instrucción 5.2-IC de drenaje superficial. Recuperado de: <http://www.fomento.es/NR/rdonlyres/2482CE5B-4577-4E8D-81CF-C5E18DA53679/55854/0610100.pdf>

Recibido: 13 noviembre de 2012

Recibido corregido por el autor: 27 de agosto de 2013

Aceptación: 4 de septiembre de 2013