

Curvas de Intensidad-Duración y Frecuencia (I-D-F), de los valores extremos de la precipitación pluvial en la cuenca Cárdenas-Comalcalco, Tabasco México

Rigoberto González-Mancillas^{1*}, José Francisco Juárez-López², Eugenio Carrillo-Ávila³, José de Jesús Obrador-Olán², Joel Zavala-Cruz.

¹Colegio de Postgraduados, Campus-Montecillo. PostgradoenHidrociencias. Montecillo, Texcoco, edo. de México.

²Colegio de Postgraduados, Campus-Tabasco. Periférico Carlos A. Molina km 3, Carretera Cárdenas Huimanguillo, Tabasco.

³Colegio de Postgraduados, Campus-Campeche. Carretera Haltunchén-Edzná km 17.5, Sihochac, municipio de Champotón, Campeche, México.

*Autor responsable:rgonzalez@colpos.mx

RESUMEN

En este estudio se determinaron las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (I-D-F) de las intensidades máximas de la precipitación pluvial de 11 estaciones meteorológicas, ubicadas dentro de la cuenca Cárdenas-Comalcalco. Para cada duración se ajustaron funciones de distribución de probabilidades (FDP) de valores extremos, Normal, Log normal, Gumbel y Gamma. La función Gumbel presentó un mejor ajuste con un $\alpha=0.05$. Posteriormente, se construyeron las curvas de I-D-F con 5, 10, 20, 30, 50 y 100 años de período de retorno de cada estación. Los valores extremos de la precipitación con duraciones de 24 horas, están relacionadas con las inundaciones de 1972, 1990, 1998 y 1999. Con las curvas de I-D-F, la estación meteorológica de Comalcalco, con una lluvia de 10 horas de duración y 5 años de período de retorno se esperaría una precipitación de 140.5 mm.

Palabras Clave: Precipitación pluvial, FDP Normal, Log Normal, Gumbel, y Gamma, curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, Período de retorno, Isoyetas.

Introducción

La precipitación pluvial es el elemento meteorológico más importante en una cuenca hidrológica, este elemento junto con otros componentes como la evaporación y la infiltración, contribuyen a configurar el clima de una zona (Arnaiz, 1976). La precipitación se define como la cantidad de agua, tanto en forma líquida como sólida, que cae sobre la superficie de la tierra (Brooks *et al.*, 1991) y que da origen todas las corrientes superficiales y subterráneas (Madereyetal., 2005). La precipitación tiene una distribución muy irregular en el espacio geográfico y en el tiempo, como se manifiesta en los registros de variación anual, mensual, diaria y horaria (Chow *et al.*, 1994; Rodríguez *et al.*, 2000). La distribución espacial de la precipitación sobre los continentes es muy variada, así existen extensas áreas como los desiertos, donde las precipitaciones son extremadamente escasas menor de 5 mm año⁻¹ y otras muy húmedas donde se pueden alcanzar cantidades alrededor de los 10000 mm año⁻¹. Una elevación del terreno provoca muy frecuentemente un aumento local de las precipitaciones (Linsley *et al.*, 1988).

La variabilidad espacial y temporal de la precipitación pluvial, son eventos de lluvia de gran intensidad en la cuenca Cárdenas-Comalcalco, los cuales ocasionan frecuente inestabilidad en las actividades de la población, debido a las inundaciones provocadas por el exceso de agua. En el ámbito nacional, Tabasco presenta una precipitación promedio anual de 2,432.7 mm (CNA, 2005; Peralta *et al.*, 2009), que lo ubica como el estado de más alta precipitación. Este valor, aunado a la topografía plana de la mayor parte de su territorio, pone de manifiesto que

las inundaciones en las zonas más bajas es uno de los problemas que frecuentemente se presenten en el estado. En Tabasco se pueden diferenciar tres épocas climáticas durante todo el año: a) Temporada de “secas”, que comprende los meses de febrero a principios de junio; b) Temporada de lluvias intensas o “temporal”, que inicia en junio y finaliza en septiembre, y c) Temporada de “nortes”, cuya duración está considerada entre finales de septiembre a mediados de febrero. Siendo que en estas dos últimas épocas se concentra alrededor del 80% de la precipitación total. La temporada de lluvias que inicia en el mes de junio es ocasionada por la presencia de los vientos alisios del norte y noreste, dando lugar a lluvias de tipo torrencial que generalmente se presentan por las tardes acompañadas por tormentas eléctricas (Pereira *et al.*, 2004). Los vientos alisios al ser reforzados por ciclones tropicales, huracanes del Golfo de México, el Caribe, el Pacífico y la aparición de los frentes fríos, intensifican las precipitaciones alcanzando las precipitaciones máximas totales en los meses de septiembre y octubre (Méndez *et al.*, 2008).

Por consiguiente, el estudio de las precipitaciones y de su distribución temporal puede ser útil para diversos fines meteorológicos, edafológicos e hidrológicos, pues en este último caso se podrían establecer índices para realizar estudios de crecidas en cauces naturales y para alimentar modelos de precipitación, incluyendo aquellos en los que se realiza el cálculo de curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), que a su vez sirven para un adecuado diseño y dimensionamiento de las obras hidráulicas. Para el cálculo de estas curvas de IDF es necesario conocer la intensidad de diferentes eventos de precipitación para diferentes duraciones de lluvia y distintos períodos de retorno. El objetivo de este trabajo consistió en realizar un análisis de la distribución probabilística de los valores extremos de precipitación pluvial con datos históricos de la cuenca Cárdenas-Comalcalco, elaborar las curvas de Intensidad Duración y Frecuencia (IDF) y la distribución espacial de la precipitación, asumiendo la hipótesis de que la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos de lluvia pueden ser modelados mediante el uso de funciones de distribución de probabilidades, y con ello es posible construir las Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La zona de estudio corresponde a la cuenca Cárdenas-Comalcalco, debido a su desarrollo urbano, petrolero y agropecuario, es considerada de suma importancia para el estado de Tabasco. Presenta una extensión de 274,255.3 ha, comprende casi todo el municipio de Cárdenas y parte de los municipios de Huimanguillo, Paraíso y Comalcalco. La Cuenca se ubica en la provincia llanura costera del Golfo de México (Lugo y Córdova, 1992), la pendiente es menor a 1% y su altura sobre el nivel del mar varía entre 0 y 30 m. Dispone de grandes cuerpos de agua como son las lagunas el Carmen y la Machona, ésta última es alimentada por los ríos Naranjeño, Santana y San Felipe Figura 1. Para nuestro estudio se recopiló información pluviométrica y pluviográfica de 11 estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca Cárdenas-Comalcalco, (Figura 1). La información recopilada consistió en datos de registros pluviométricos diarios por estación meteorológica, con excepción de las estaciones del Km 21" del Colegio de Postgraduados Campus Tabasco que cuenta con registros de pluviógrafos las 24 horas, y de la estación automatizada “Cangrejera” que dispuso de información pluviográfica registrada cada 10 minutos.

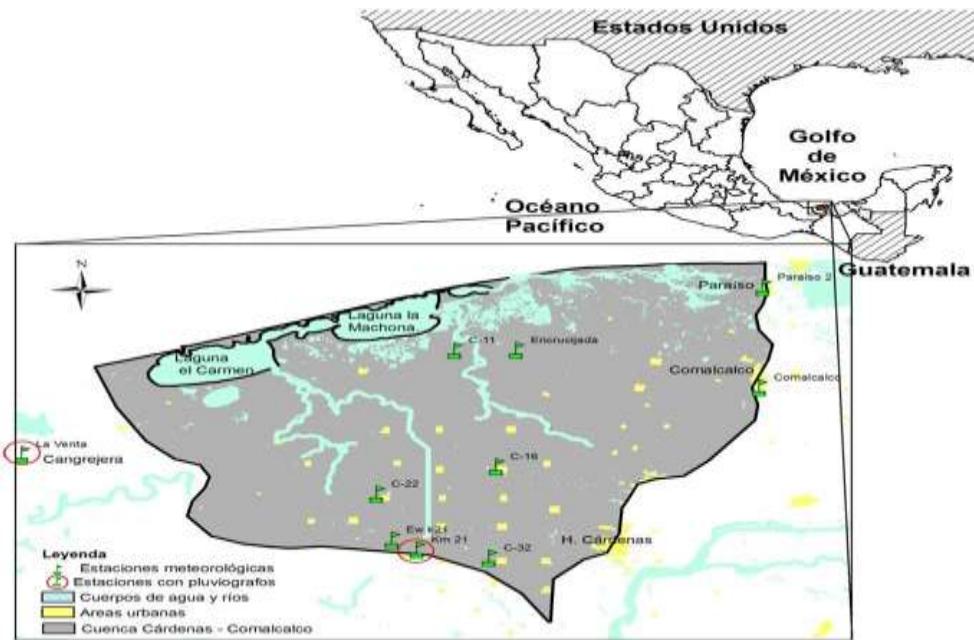


Figura 1. Ubicación geográfica y estaciones meteorológicas de la cuenca Cárdenas-Comalcalco.

Análisis de la información pluviométrica y pluviográfica

Recopilada la información pluviométrica y pluviográfica de las 11 estaciones meteorológicas de la Cuenca Cárdenas-Comalcalco, se procedió a la captura de los datos y a su análisis, que consistió en el ordenamiento de datos de lluvia y en el cálculo de magnitudes e intensidades de lluvia para diferentes duraciones según los registros de cada estación. Para este cálculo se consideró que las estaciones meteorológicas en las que únicamente se disponía de los valores de lluvia diarios las duraciones analizadas fueron de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 14, 21 y 28 días; mientras que en las dos estaciones (Cangrejera y Km 21), donde también se disponía de datos de precipitación en intervalos de una hora o menos, se seleccionaron las duraciones de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, y 12 horas y de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 14, 21 y 28 días.

Cálculo de la probabilidad empírica

Estimación de los valores de intensidad máxima de lluvia para las diferentes duraciones de 1 a 12 horas, 24 horas, 48 horas y de 3 a 28 días, para cada estación meteorológica y para cada año, se realizó la estimación de su probabilidad de ocurrencia empírica.

Para ello, los valores anuales de intensidad máxima de lluvia (en mm h^{-1}) de cada duración y estación meteorológica se ordenaron de menor a mayor, a estos valores se les asociaron valores de probabilidad de ocurrencia empírica, según la expresión propuesta por Hazen, (1914):

$$Pe = \frac{2k - 1}{2n} \quad (1)$$

donde: Pe = Probabilidad empírica acumulada; n = Número total de datos de intensidad de lluvia, y k = Número de orden de los valores ordenados en forma creciente

Ajuste de los datos de intensidad máxima de lluvia a funciones de distribución de probabilidades de valores extremos (FDP)

Una vez calculada la probabilidad empírica, se obtuvieron series de pares de valores de probabilidad empírica acumulada-intensidad de lluvia máxima, para todas las duraciones de

lluvia analizadas en cada una de las estaciones meteorológicas. A las series de pares de valores se les evaluó de forma analítica las funciones de distribución probabilística Normal, Log normal, Gumbel y Gama; funciones que se describen a continuación:

Función de distribución de probabilidad normal (Chowet al., 1994):

$$f(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{u-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{Para } -\infty \leq u \leq \infty \quad (2)$$

donde: u = variable aleatoria; μ = media y σ = desviación estándar.

Función de distribución de probabilidad Log normal (Kite, 1977; Chowet al., 1994):

$$f(u) = \frac{1}{\beta u \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(u)-\alpha}{\beta}\right)^2} \quad \text{con } u > 0 \quad (3)$$

donde: α = media β = desviación estándar de la distribución.

Función de distribución de probabilidad Gumbel

La función Gumbel está definida por la ecuación (Gumbel, 1958 y utilizado por Koutsoyiannis y Baloutsos, 2000; Koutsoyiannis, 2004):

$$f(u) = \frac{1}{\beta} e^{-\left(\frac{u-\alpha}{\beta}\right)} - e^{-\left(\frac{u-\alpha}{\beta}\right)} \quad \text{para } -\infty \leq u \leq \infty \quad (4)$$

Función de distribución de probabilidad Gamma (Chowet al., 1994):

$$g(u) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-\frac{u}{\beta}} u^{(\alpha-1)} \quad \text{para } 0 \leq u \leq \infty \quad (5)$$

donde: Γ = Función Gamma

Los parámetros α y β de las ecuaciones 4 y 5 se pueden determinar por el método de los momentos (Infante y Zarate, 1990), y para verificar el modelado y ajustes de los datos a alguna de las funciones evaluadas, se realizó la prueba propuesta por Kolmogorov-Smirnov (Massey, 1951) con un $\alpha=0.05$.

Determinación de las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para distintos períodos de retorno

Una vez determinada la FDP con mejor ajuste y conocidos sus parámetros para cada serie de datos de intensidad de lluvia (tanto para las diferentes duraciones de eventos de lluvia y como para todas las estaciones meteorológicas analizadas), se realizó el cálculo de intensidades de lluvia considerando 5, 10, 20, 30, 50 y 100 años de período de retorno. Se sabe que la probabilidad está asociada a la ocurrencia de una lluvia y está inversamente relacionada con su período de retorno, según se indica en la ecuación 6:

$$P = \frac{1}{T} \quad 6. \text{ donde: } P = \text{Probabilidad de ocurrencia de una lluvia (adimensional)} \text{ y } T =$$

Período de retorno (años). Así, la probabilidad de ocurrencia de una lluvia con un período de retorno de 100 años es de 0.01.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Valores extremos de la intensidad de la precipitación pluvial

En la Figura 2 se ejemplifican gráficamente los valores extremos de intensidad de lluvia de 24 horas de duración, utilizando cuatro estaciones meteorológicas (Comalcalco, C-16, Paraíso 2 y C-22) de las 11 seleccionadas en la Cuenca Cárdenas-Comalcalco.

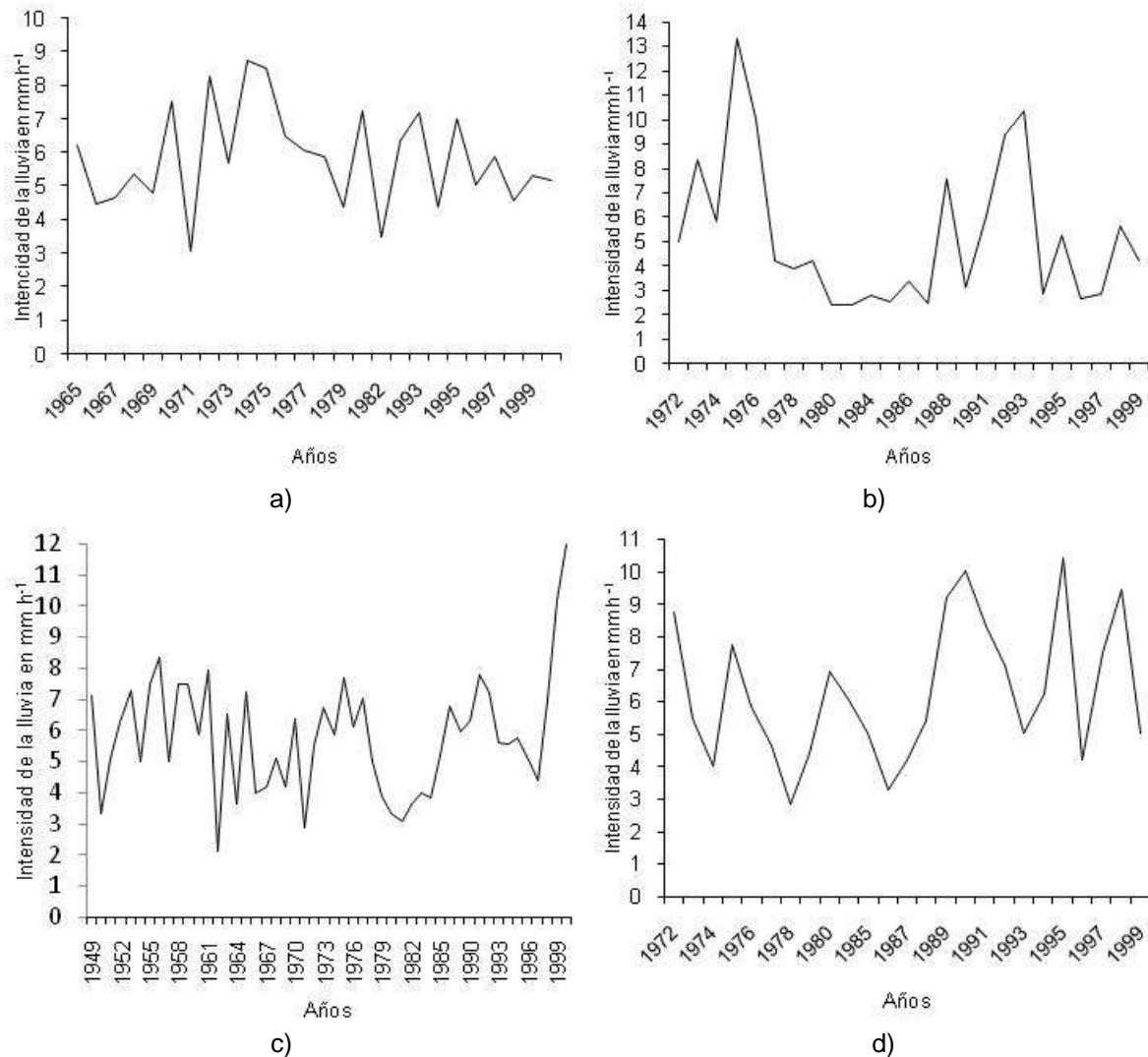


Figura 2. Valores extremos de la precipitación pluvial en cuatro estaciones meteorológicas seleccionadas a) Comalcalco b) C-16 c) Paraíso 2 d) C-22

Se puede observar que la estación de Comalcalco registró intensidades de lluvia máximas con 24 horas de duración en los años de 1974 (con precipitaciones máximas de 8.7 mm h^{-1}), 1975 (8.5 mm h^{-1}) y 1972 (8.12 mm h^{-1}); mientras que en la estación meteorológica C-16 se manifestaron precipitaciones máximas de 13.3 mm h^{-1} en el año 1975, de 10.3 mm h^{-1} en 1993 y de 10 mm h^{-1} en 1976. En el caso de la estación

meteorológica de Paraíso 2 se registraron intensidades máximas de lluvia en los años 1956, 1999 y 2000, cuyos valores corresponden a 8.3 mm h^{-1} ; 10.1 mm h^{-1} y 11.9 mm h^{-1} respectivamente. Finalmente, en la estación C-22, las precipitaciones máximas observadas fueron de 20 mm h^{-1} en 1990, 9.4 mm h^{-1} en 1998 y 10 mm h^{-1} en 1999. Estos valores confirman la variabilidad espacial y temporal existente en la Cuenca.

Las precipitaciones máximas históricas observadas en estas cuatro estaciones tienen gran relación con las inundaciones, registradas en los años 1995 y 1999 (Velázquez 2001; Salas y Jiménez, 2007). En la cuenca Cárdenas-Comalcalco, las precipitaciones observadas con mayor intensidad fueron durante los meses de septiembre, octubre y principios de noviembre, resultado que es similar al obtenido por Pereyra *et al.* (2004). Estos valores pueden ser debido a la presencia de las tormentas tropicales, ciclones y huracanes que pasan por el Golfo de México (García, 2003) y que contribuyen al aumento de la precipitación. Velázquez (2001) menciona que algunos de los huracanes que han provocado inundaciones en el estado de Tabasco, corresponden a Brenda registrado el 22 de agosto 1973, Roxane manifestado entre 15 y 18 de octubre de 1995, Isidoro que se presentó 22 al 24 septiembre del 2002 y el huracán Stan documentado entre los días 3,4 y 5 de octubre del 2003.

Ajuste de las funciones de distribución de probabilidades (FDP)

En la Tabla 1 se indican los valores del ajuste de las funciones de distribución de probabilidades estudiadas en la estación meteorológica C-11. En donde m es el número del orden del dato, x_m son las intensidades máximas de la precipitación con una duración de 24 h y que han sido ordenadas de menor a mayor intensidad, F_o es la probabilidad empírica y F_c es la probabilidad calculada. Las funciones de distribución Normal, Log normal, Gumbel y Gama fueron calculadas utilizando las ecuaciones 2, 3, 4 y 5 respectivamente. La prueba de Kolmogorov-Smirnov (ks) efectuada en este estudio fue con la finalidad de comparar el máximo valor absoluto de la diferencia de la probabilidad empírica y la probabilidad calculada ($|F_o(x_m) - F_c(x_m)|$).

Para cada función de distribuciones probadas se muestran los valores absolutos encerrados en un recuadro sombreado (ver Tabla 1)

Tabla 1. Función de distribución de probabilidades en la estación meteorológica del C-11.

m	x_m (mmh^{-1})	$F_o(x_m)$ (empírica)	$F_c(x_m)$ Normal	$ F_o(x_m) - F_c(x_m) $	F_c Log normal	$ F_o(x_m) - F_c(x_m) $	F_c Gamma	$ F_o(x_m) - F_c(x_m) $	F_c Gamma	$ F_o(x_m) - F_c(x_m) $	F_c Gumbel	$ F_o(x_m) - F_c(x_m) $
1	3.383	0.0556	0.1414	0.0858	0.1033	0.0477	0.0071	0.0484	0.1076	0.0521		
2	3.438	0.1667	0.1476	0.0190	0.1118	0.0548	0.0077	0.1590	0.1163	0.0504		
3	4.375	0.2778	0.2841	0.0064	0.3043	0.0265	0.0203	0.2574	0.3110	0.0332		
4	4.529	0.3889	0.3113	0.0776	0.3406	0.0483	0.0231	0.3658	0.3477	0.0412		
5	4.738	0.5000	0.3496	0.1504	0.3899	0.1101	0.0271	0.4729	0.3976	0.1024		
6	5.979	0.6111	0.5964	0.0147	0.6557	0.0446	0.0549	0.5563	0.6632	0.0521		
7	6.558	0.7222	0.7048	0.0175	0.7488	0.0266	0.0683	0.6539	0.7546	0.0324		
8	7.000	0.8333	0.7771	0.0562	0.8055	0.0279	0.0779	0.7554	0.8097	0.0236		
9	9.488	0.9444	0.9786	0.0342	0.9599	0.0155	0.1065	0.8379	0.9591	0.0147		

Para la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov se utilizó la tabla de teoría de los valores críticos D, Con un $\alpha=0.05$. Esta prueba presentó un valor de tabla de 0.432. Con ésta prueba se pueden aceptar las funciones, normal, Log normal y Gumbel. Sin embargo, la función que manifestó un mejor ajuste y modelado de datos con el coeficiente de determinación más alto fue la función Gumbel.

Construcción de las curvas de intensidad duración y frecuencia

Para conocer las intensidades máximas de lluvias asociado a un periodo de retorno se utilizó una forma alternativa a partir de la ecuación 4 dado que el valor del límite inferior de la integral corresponde a la probabilidad de ocurrencia:

$$P = \frac{1}{T} = \frac{1}{\beta} \int_i^{\infty} e^{-\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)} dx \quad (9)$$

Además dado que la función Gumbel es integrable analíticamente, una forma de determinar el valor de la intensidad de la lluvia asociada a un período de retorno T es:

$$e^{-e^{-\left(\frac{i-\alpha}{\beta}\right)}} = 1 - P = 1 - \frac{1}{T} \quad (10)$$

En este caso, la aplicación de las propiedades de los logaritmos permite obtener el valor de la intensidad de la lluvia buscada, correspondiente al parámetro i .

$$i = \alpha - \beta \ln[-\ln(1-P)] = \alpha - \beta \ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (11)$$

Puesto que P varía entre el intervalo numérico de cero y uno, el valor de $(1-P)$ en la ecuación 11 también varía entre cero y uno, se puede asumir que su logaritmo natural es negativo, esto implicaría que el argumento entre corchetes es positivo, y consecuentemente la función del logaritmo natural aplicada al valor dentro del corchete está definida, lo que a su vez permite calcular el valor de la intensidad buscada.

En la Tabla 1 se pueden observar los parámetros α y β para distintas duraciones de la función de distribución Gumbel, las cuales fueron calculados por el método de los momentos utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \bar{u} - \beta \gamma \quad (12)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{6}}{\pi} s_u \quad (13)$$

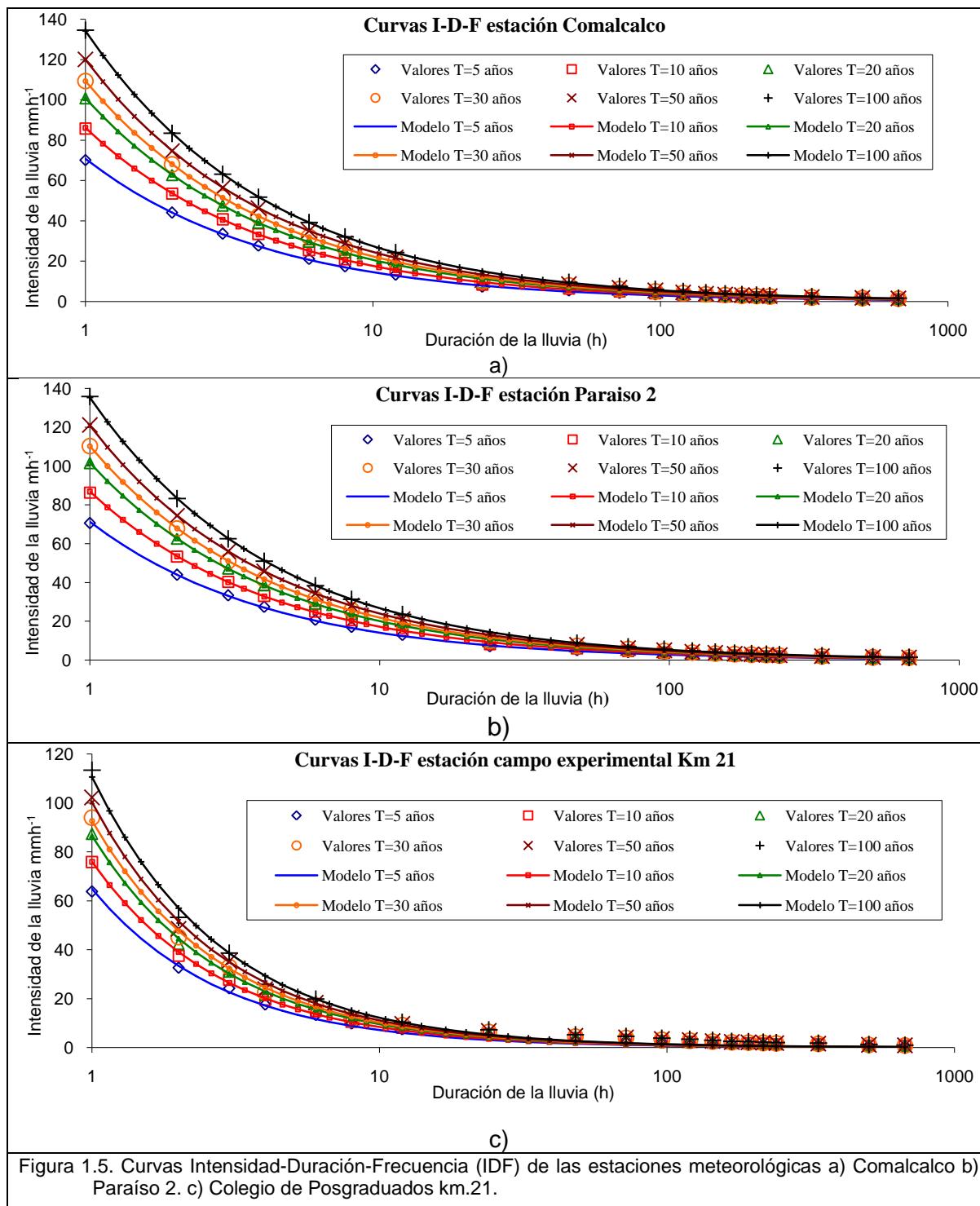
donde \bar{u} es la media aritmética, s_u la desviación estándar de la variable u sobre la que se ajusta la distribución Gumbel. y $\gamma =$ Constante de Euler equivalente a 0.5772156649

Tabla 1. Parámetros α y β de la función de distribución de probabilidades Gumbel, para las duraciones de lluvia analizadas en las 11 estaciones meteorológicas de la cuenca Cárdenas-Comalcalco.

Duración de la lluvia	Estación meteorológica																					
	Cangrejera		Km 21		C-11		C-32		EW Km 21		Comalcalco		Encrucijada		La Venta		Paraíso dos		C-16		C-22	
	alfa	beta	alfa	beta	alfa	beta	alfa	beta	alfa	beta	alfa	beta	alfa	beta	alfa	beta	alfa	beta	alfa	beta	alfa	beta
1 hr	54.790	15.457	39.755	16.017	33.227	26.369	26.2560	10.364	31.477	16.471	38.948	20.804	33.354	16.714	20.615	18.816	39.025	21.056	26.868	23.980	41.084	12.011
2 hrs	36.648	16.047	22.634	6.645	21.455	14.095	16.803	6.816	20.544	10.590	24.984	12.711	21.673	9.889	14.683	10.428	24.963	12.674	17.884	14.352	26.189	8.019
3 hrs	32.483	12.275	17.273	4.632	16.612	9.771	12.942	5.335	16.006	8.178	19.270	9.528	16.842	7.275	12.039	7.384	19.222	9.417	14.095	10.630	20.124	6.331
4 hrs	25.360	10.686	13.636	2.641	13.854	7.534	10.753	4.483	13.408	6.808	16.027	7.766	14.082	5.851	10.457	5.780	15.968	7.628	11.904	8.590	16.694	5.354
6 hrs	23.133	9.391	10.153	2.103	10.726	5.223	8.282	3.509	10.447	5.258	12.361	5.822	10.943	4.304	8.574	4.093	12.295	5.668	9.382	6.362	12.828	4.227
8 hrs	17.716	8.672	8.304	0.999	8.946	4.027	6.882	2.949	8.751	4.377	10.281	4.745	9.150	3.462	7.448	3.203	10.214	4.591	7.923	5.141	10.642	3.575
12 hrs	14.800	6.713	6.006	0.939	6.926	2.792	5.300	2.308	6.818	3.381	7.929	3.557	7.111	2.547	6.107	2.268	7.865	3.412	6.245	3.808	8.177	2.822
24 hrs	8.262	4.255	3.958	0.723	4.612	1.535	3.485	1.524	4.588	1.880	5.161	1.404	4.876	1.535	4.301	1.024	4.961	1.464	4.102	2.350	5.315	1.684
48 hrs	5.942	3.178	2.432	0.600	2.980	0.868	2.252	0.954	2.967	1.473	3.432	1.330	3.006	0.879	3.048	0.674	3.421	1.159	2.867	1.319	3.324	1.145
3 días	4.318	2.353	1.868	0.598	2.235	0.535	1.689	0.793	2.377	1.167	2.596	1.069	2.344	0.717	2.581	0.507	2.585	0.941	2.259	0.984	2.576	0.981
4 días	3.424	1.760	1.562	0.498	1.892	0.386	1.366	0.667	1.895	0.962	2.077	0.869	1.907	0.543	2.255	0.390	2.069	0.775	1.874	0.831	2.195	0.897
5 días	2.909	1.324	1.337	0.443	1.590	0.331	1.176	0.580	1.582	0.816	1.787	0.701	1.657	0.436	2.001	0.354	1.748	0.657	1.617	0.715	1.873	0.849
6 días	2.524	1.075	1.140	0.392	1.428	0.283	1.066	0.535	1.432	0.715	1.577	0.591	1.513	0.366	1.819	0.316	1.536	0.566	1.439	0.610	1.638	0.733
7 días	2.274	0.943	1.020	0.331	1.283	0.246	0.961	0.475	1.310	0.616	1.425	0.518	1.373	0.322	1.679	0.291	1.382	0.494	1.290	0.525	1.459	0.638
8 días	2.058	0.853	0.944	0.316	1.176	0.226	0.861	0.438	1.199	0.563	1.299	0.467	1.248	0.293	1.582	0.217	1.292	0.442	1.185	0.473	1.294	0.582
9 días	1.890	0.758	0.870	0.299	1.068	0.212	0.793	0.394	1.120	0.526	1.199	0.430	1.142	0.268	1.480	0.192	1.189	0.408	1.096	0.436	1.177	0.546
10 días	1.780	0.724	0.804	0.265	0.982	0.213	0.742	0.369	1.033	0.516	1.120	0.404	1.065	0.263	1.407	0.182	1.111	0.365	1.045	0.418	1.098	0.504
14 días	1.503	0.567	0.693	0.239	0.858	0.293	0.616	0.293	0.867	0.390	0.902	0.317	0.878	0.234	1.128	0.160	0.903	0.295	0.883	0.341	0.930	0.383
21 días	1.168	0.425	0.533	0.157	0.655	0.217	0.489	0.247	0.708	0.297	0.755	0.265	0.708	0.152	1.004	0.059	0.724	0.219	0.707	0.239	0.725	0.292
28 días	1.036	0.319	0.444	0.120	0.598	0.162	0.425	0.202	0.616	0.257	0.653	0.220	0.627	0.122	0.851	0.075	0.622	0.181	0.615	0.192	0.652	0.245

Curvas de Intensidad Duración y Frecuencia (I-D-F) de la precipitación pluvial en la cuenca Cárdenas-Comalcalco

En la Figura 2 se ilustran las curvas I-D-F generadas para tres estaciones meteorológicas, de las cuales fueron calculadas usando la ecuación (8) en las que se incluyen los valores puntuales determinados mediante la función Gumbel.



El uso de las curvas de IDF obtenidas permite pronosticar la intensidad de lluvia para un determinado número de años de período de retorno y de duración de lluvia en las estaciones meteorológicas de la cuenca Cárdenas-Comalcalco o bien en sitios muy próximos a ellas. De tal forma que, en la estación km 21, con cinco años de período de retorno y con una duración de la lluvia de 10 horas se esperaría una intensidad de lluvia de 7 mm h^{-1} y una acumulación de 70 mm durante el evento de lluvia, alcanzando por lo tanto una lámina de 7 cm. En contraste con la estación de Comalcalco que para el mismo período de retorno y la misma duración de lluvia, se esperaría una lámina de agua de 14.5 cm. De igual forma, en el resto de estaciones meteorológicas se podría calcular la cantidad de láminas de agua esperadas para diferentes períodos de retorno y diferentes duraciones de eventos de lluvia.

Ulloa y Oropeza (1994), en un estudio realizado sobre las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia en la cuenca del río Tonalá y parte de la cuenca Cárdenas-Comalcalco, reportando valores inferiores en algunas estaciones meteorológicas de 144 mm, 200 mm, 199 mm etc., de las precipitaciones máximas para una lluvia de 24 h de duración y con 5, 10, 20, 30, 50 y 100 años de período de retorno, siendo inferiores respecto a los obtenidos en el presente estudio. Lo anterior se debe a que en los años de 1995 y 1999 se tuvieron precipitaciones máximas en la cuenca Cárdenas-Comalcalco provocando serios problemas de inundación.

Las curvas IDF obtenidas en el presente estudio son herramientas que tienen una amplia aplicación en obras de ingeniería. Koutsoyianniset al. (1998) sugieren su uso para la planeación, diseño y operación de proyectos hidráulicos, así como para la protección de obras de ingeniería contra avenidas máximas. Campos (2005), refiere su uso en el diseño de obras que controlan los escurrimientos generados por las tormentas, incluyendo sistemas de alcantarillado municipales, vertedores, puentes y sistemas de drenaje agrícola. Willems (2000) menciona que la relación IDF de precipitaciones extremas se utiliza para estimar las avenidas de diseño en los sitios donde se construirán obras hidráulicas. Quej (2007) utilizó las curvas de IDF para estimar las necesidades generales de drenaje superficial en el estado de Campeche.

CONCLUSIÓN

Las funciones de distribución de probabilidades, Normal, Log normal, Gamma y Gumbel evaluadas en esta investigación, así como el empleo de la prueba de bondad de ajuste con el test Kolmogorov-Smirnov con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, permitió demostrar que los datos de las 11 estaciones meteorológicas pertenecientes a la cuenca Cárdenas-Comalcalco, la función de distribución Gumbel, fue la que presentó el mejor ajuste. Los valores extremos de la precipitación pluvial con duraciones de 24 horas, están relacionadas con las inundaciones de 1972, 1975, 1990, 1998 y 1999. Con las curvas de Intensidad Duración y Frecuencia I-D-F se deduce que la estación meteorológica de Comalcalco, con una lluvia de 10 horas de duración y 5 años de período de retorno se esperaría una precipitación de 140.5 mm, alcanzando una lámina de agua de 14.5 cm.

Bibliografía

- Arnáiz M., 1976. Componentes primarios del ciclo hidrológico. En Custodio, E. y Llamas, M.R. (ed.). Hidrología subterránea. Editorial Omega. Barcelona. 283-350.
- Brooks N. K., F. P. Folliott, M. H. Gregersen y L. J. Thames, 1991. Iowa State University. Hidrology and the Management of Watersheds. 392 pp.

- Campos A. D., 2005. Agroclimatología cuantitativa de cultivos. Ed. Trillas. México D.F. 320 pp.
- Chow T., D. Maidment y L. Mays, 1994. Hidrología Aplicada. Ed. Mc Graw-Hill. 584 pp.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 2005. Productos climatológicos. Servicio Meteorológico Nacional. <http://smn.cna.gob.mx/>. Consultado diciembre 2008.
- García E., 2003. Distribución de la precipitación en la república mexicana. Investigaciones geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 50, 67-76.
- Gumbel E. J., 1958. Statistics of Extremes. Columbia University Press, New York, USA.
- Hazen A., 1914. Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply. Transactions of the American Society of Civil Engineers. 77, 1539 -1669 pp.
- Infante G. S. y G. L. Zárate, 1990. Métodos Estadísticos: Un enfoque Interdisciplinario. Editorial Trillas. México, D.F. 610 pp.
- Koutsoyiannis D., 2004. Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall, 1: Theoretical investigation. *Hydrol. Sci. J.* 49(4), 575-590.
- Koutsoyiannis D. and G. Baloutsos, 2000. Analysis of a Long Record of Annual Maximum Rainfall in Athens, Greece, and Design Rainfall Inferences. *Natural Hazards*, 29, 29-48.
- Koutsoyiannis D., D. Kozonis and A. Manetas, 1998. A Mathematical Framework for Studying Rainfall Intensity-Duration-Frequency Relationships. *J. Hydrology*, 206, 118-135.
- Linsley R., M. Kohler y J. Paulhus, 1988. Hidrología para Ingenieros. Segunda Edición. Mc Graw-Hill. Latinoamericana. D.F. México. 386 pp.
- Lugo H. J. y C. Córdova, 1992. Regionalización geomorfológica de la República Mexicana. Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 25, 25-63.
- Maderey R. L. y A. Jiménez, 2005. Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. Instituto de Geografía. UNAM, 1, 100 pp.
- Massey F. J., 1951. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *J. Amer. Statist Ass.* 46, 70 pp.
- Méndez G. J.; C. J. Navarro y O. V. González, 2008. Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 65, 38-55.
- Peralta H. A.R., R. C. Balling y L. R. Barba, 2009. Comparative analysis of indices of extreme rainfall events: Variations and trends from southern México. *Atmósfera*. 22(2), 219-228.
- Pereyra D.D.; S.J. A. Pérez y R. L. Gómez, 2004a. Ecuaciones que estiman las curvas intensidad-duración-período de retorno de la lluvia. *GEOS*, 24 (1), 46-56.
- Pereyra D.D., M. Ubando y B. Natividad, 2004b. Influencia de la Niña y el Niño sobre la Precipitación en el la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, México. *Universidad y Ciencias*, 20 (39), 33-38 pp.
- Quej C.V., 2007. Análisis pluviométrico y determinación de las necesidades generales de drenaje superficial en el estado de Campeche. Tesis de Maestría en Ciencias en Agricultura Tropical. Campus Campeche del Colegio de Postgraduados. San Francisco de Campeche, Campeche, México. 76 pp.
- Rodríguez, C. A. H. M. D. Encinas, D. Frías y S. Nieto, 2000. Impacto de índices climáticos en las variaciones de precipitación acumulada en los meses febrero, marzo y abril.
- Salas M. A. y E.M. Jiménez, 2007. Inundaciones, serie fascículos s/n. CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastre). 53 pp.
- Ulloa R.N. J y M. J. L. Oropeza, 1994. Estudio hidrológico de la cuenca del río Tonalá. Caracterización física y análisis estadístico de las precipitaciones máximas. Serie ingeniería agrícola, 1, 15-18.

Velázquez V. G., 2001. Las inundaciones en Tabasco. Ensayo monográfico. Universidad Popular de la Chontalpa. H. Cárdenas, Tabasco, México. 188 pp.

Willems P., 2000. Compound intensity/duration/frequency-relationships of extreme precipitation for two season and two storm types. J. of Hydrology. 233, 189-205.