

Periodos de retorno de lluvias torrenciales para el estado de Tamaulipas, México

Recibido: 15 de junio de 2010. Aceptado en versión final: 6 de mayo de 2011.

Joel Gutiérrez Lozano*

Virginia Vargas Tristán*

Moisés Romero Rodríguez*

José Manuel Plácido de la Cruz*

Manuel de Jesús Aguirre Bortoni*

Hugo Tomás Silva Espinoza*

Resumen. En esta investigación se aplicó la función Gumbel a una base de datos de lluvias torrenciales, de 140 estaciones meteorológicas del estado de Tamaulipas, México. Las estaciones climatológicas se ubicaron con un geoposicionador (GPS) de calidad submétrica, cuya información se analizó en ambiente de sistemas de información geográfica (SIG). Las variables Z correspondieron a los periodos de retorno a 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 y 100 años. Los resultados mostraron que las áreas donde se puede esperar un máximo de precipitación diaria extrema se localizan en dos porciones del sur del estado de Tamaulipas, una pegada a la Costa del

Golfo de México, en los municipios de Soto la Marina y Aldama y otra hacia la porción suroeste del estado en los municipios de Ocampo, Antiguo Morelos, Nuevo Morelos, Llera, Xicotécatl y Gómez Farías, zonas consideradas de alto riesgo, debido a que se pudieran presentar lluvias torrenciales hasta de 335.4 en el mes de septiembre y de 407.3 mm a nivel anual.

Palabras clave: Lluvias torrenciales, Función Gumbel y periodo de retorno.

Return periods of torrential rains for the state of Tamaulipas, Mexico

Abstract. A Gumbel function was applied in this research to an extreme precipitation database, of 140 weather stations from 1960–2002 periods and located in the state of Tamaulipas, México. The weather stations were positioned with a submetric precision GPS, where the information was analyzed in a geographic information systems (GIS) environment. The Z variables correspond to return period of 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 and 100 years. The results show that the areas where it can be expected a maximum diary extreme precipitation was located in two portions in the south part of the state of Tamaulipas, one near to the

coast in the Gulf of Mexico, in the municipalities of Soto La Marina and Aldama and the another one towards the Southwestern portion of the state in the municipalities of Ocampo, Antiguo Morelos, Nuevo Morelos, Llera, Xicotécatl and Gómez Farías, which are considered zones of high risk due to the presence of extreme rain up to 335.4 in September and 407.3 mm at annual level.

Key words: Extreme precipitation, Gumbel function and return period.

*Unidad Académica Multidisciplinaria Agronomía y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario, 87149, Cd. Victoria, Tamaulipas, México. E-mail: jgl09@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

La sociedad es vulnerable a los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos que se producen sean cuales fueren sus dimensiones. La evaluación del riesgo de estos fenómenos exige datos y conocimientos sobre los posibles desastres que ocasionan. En muchos lugares del mundo, la recopilación y el archivo sistemáticos de datos meteorológicos durante largos periodos, permiten cuantificar los parámetros del clima local.

En la literatura se han reportado diferentes definiciones para caracterizar un evento extremo de precipitación. Por ejemplo Charles (2000) los divide en tres tipos: un evento extremo de Tipo I ocurre cuando la suma de cinco días de precipitación total excede al 5% de la media anual. A los eventos de Tipo II y III, los define como la suma de la precipitación total durante cinco días que excede el 10 y 15 % de la media anual, respectivamente. Haylock y Nicholls (2000) examinaron tres índices de lluvia extrema: el número de eventos por encima de un extremo umbral (frecuencia extrema); la intensidad promedio de precipitaciones de eventos extremos (extrema intensidad), y la proporción de precipitación total de eventos extremos (extrema por ciento). Otros autores mencionan que para cualquier estación meteorológica dada, un evento extremo es cuando el 20% o más de la estacionalidad climática total de una localidad, cae en un día (Carvalho *et al.*, 2002). Sin embargo, en otro trabajo se señala como precipitación extrema, cuando la precipitación diaria en una estación dada está por encima del 16% del promedio de precipitación estacional total (Carvalho *et al.*, 2004).

Comúnmente, el análisis de frecuencia de precipitaciones extremas y la ejecución de inferencias, son realizados mediante la aplicación de distribuciones estadísticas de valores máximos, donde la función Gumbel conocida como distribución doble exponencial, primera asíntota de Fisher-Tippet o función de distribución biparamétrica, es la más empleada (Garrido, 1992; Koutsoyiannis, 2003). Son numerosos los trabajos en los que se ha utilizado dicha distribución y en ocasiones muy ambiciosos en cuanto a cobertura territorial y variables de eventos extremos. En este sentido,

cabe destacar que diversos autores indican que en la deducción de la función de probabilidad de Gumbel, se admite fundamentalmente que las observaciones de donde se toma el máximo, son muy numerosas e independientes y que se distribuyen de acuerdo con una distribución de tipo exponencial (Pielke *et al.*, 2000; Lazcano, 2004; Simiu *et al.*, 2001; Clarke, 2002; Kulathinal y Gasbarra, 2002; Garrido, 1992).

El *Periodo de Retorno* de cualquier evento extremo (lluvias torrenciales, temperaturas extremas, huracanes, etc.), se define como el lapso o número de años que en promedio, se cree que será igualado o excedido, es decir, es la frecuencia con la que se presenta un evento (Mélce y Reason, 2007). El grado de magnitud de un fenómeno extremo está relacionado de forma inversa con su frecuencia de ocurrencia, las precipitaciones muy intensas ocurren con una frecuencia menor que las moderadas o débiles.

En el estado de Tamaulipas, se tienen regiones con un alto grado de riesgo debido a las inundaciones ocasionadas por el fenómeno meteorológico de lluvias torrenciales o máximas en 24 horas. En el norte y centro de la entidad se tienen importantes obras hidráulicas que captan las grandes avenidas en los meses de máximas precipitaciones. Sin embargo, en el sur se carece de estas obras, lo que aunado a las condiciones biofísicas ocasionan que en etapas de eventos extremos se produzcan mermas en poblados y ciudades que van desde económicas, sociales, ambientales y hasta la pérdida de vidas humanas. Debido a lo anterior, es necesario realizar estudios enfocados a determinar la variabilidad y periodos de retorno de este evento climático extremo.

Para contribuir a minimizar los impactos negativos que estos fenómenos producen, se planteó como objetivo determinar para el estado de Tamaulipas, los periodos de retorno de lluvias torrenciales a 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 y 100 años. Para tal propósito, se utilizó la función de probabilidad de Gumbel o distribución doble exponencial, por ser una de las más adecuadas para analizar frecuencias de eventos extremos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se desarrolló en el estado de Tamaulipas (Figura 1), el cual se localiza al noreste de la República Mexicana, limita al norte con los Estados Unidos de América, al sur con Veracruz y San Luis Potosí, al oeste con el estado de Nuevo León y al este con el Golfo de México. Se ubica entre los $22^{\circ} 12' 31''$ y $27^{\circ} 40' 52''$ de latitud norte y $97^{\circ} 08' 38''$ y $100^{\circ} 08' 51''$ de longitud oeste. Su extensión territorial es de 79 829.00 km², lo que representa el 4.1% de la superficie del territorio nacional, y ocupa el séptimo lugar entre las entidades federativas del país.

Densidad de estaciones meteorológicas

Las lluvias torrenciales se definen como el tipo de lluvia que presenta una intensidad mayor de 60 mm h⁻¹, sin embargo, debido a que un amplio número de las estaciones climatológicas del país no cuentan

con registro sobre la intensidad de la lluvia, para la realización de este trabajo se consideró como equivalente a Lluvias Torrenciales a la Máxima precipitación que ocurre en 24 horas.

El análisis incorporó los datos a nivel anual y mensual de 140 estaciones climatológicas, esta información fue obtenida de los archivos históricos (1960-2007) de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y digitalizada en archivos por separado. Las estaciones meteorológicas fueron ubicadas en todo el estado mediante la utilización de sistemas de posicionamiento global (GPS) con precisión submétrica. El criterio de selección de las estaciones se basó en registros no menores de 15 años y su regularidad

Función de Distribución de Gumbel

Debido a que la función de Gumbel considera de origen una fuente de observaciones numerosas, se desecharon las estaciones que presentaban menos



Figura 1. Localización del estado de Tamaulipas, México.

de 15 años de información. La función de probabilidad de Gumbel queda definida por la siguiente expresión (Ojo, 2001; Adeyemi y Ojo, 2003):

$$F(X) = P[\varepsilon \leq X] = e^{-e^{-d(x-u)}}$$

$$\text{con } -\infty \leq x \leq \infty \quad (1)$$

Donde x se calcula a su vez con la ecuación 2:

$$x = u - \frac{\ln(-\ln(F(X)))}{d} \quad (2)$$

Posteriormente se calculan los parámetros d y u para cada estación, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$u = x - 0.450047 \cdot \sigma \quad (3)$$

$$1/d = 0.779696 \cdot \sigma \quad (4)$$

donde:

x = media aritmética de la serie de datos de lluvias torrenciales,

σ = desviación estándar de la serie de datos.

Determinación de la Probabilidad

En este trabajo se consideró como periodo de retorno al intervalo de recurrencia de un determinado valor extremo o al intervalo medio (T) entre dos sucesos que igualan o superan el valor extremo considerado y se expresa en años. Normalmente se toma la precipitación máxima en 24 horas de cada año o mes en particular, lo cual asegura la independencia de los sucesos, y la serie resultante se ajusta a una distribución de probabilidad de valores máximos (Beguería y Lorente, 1999).

Probabilidad de excedencia: es la probabilidad de que un evento de una determinada magnitud sea igualado o excedido en cualquier año. La probabilidad de excedencia se define por la siguiente expresión (Beguería *et al.*, 2003):

$$P_{\text{excedencia}} = P(X) = \frac{1}{T} \quad (5)$$

La función $F(X)$ asume que la variable x (aleato-

ria) tome un valor igual o inferior a un valor dado, como se muestra en la siguiente expresión:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = P(x \leq X) = 1 - \frac{1}{T} \quad (6)$$

Lo inverso sería que x fuera mayor que el valor de X , en función de la siguiente ecuación:

$$P(x > X) = 1 - F(X) = \frac{1}{T} \quad (7)$$

Con la finalidad de verificar el ajuste estadístico de los datos de lluvias torrenciales de las estaciones meteorológicas en estudio, se utilizaron dos pruebas de bondad de ajuste como son la de Kolmogorov-Smirnov y la del Coeficiente de Determinación (R^2). A continuación se describe la metodología aplicada en cada caso:

La Prueba de Bondad de Kolmogorov-Smirnov. Utilizada para fijar el ajuste de la Distribución de Gumbel (Yue, 2000). Es válida únicamente para variables continuas, compara la función de distribución teórica (probabilidad acumulada) con la observada, y calcula un valor de diferencia, representado habitualmente como D , que corresponde a la discrepancia máxima en valor absoluto entre la distribución observada y la distribución teórica. Asimismo, proporciona un valor de probabilidad P , que corresponde, si se está verificando un ajuste a la distribución normal, a la probabilidad de obtener una distribución que discrepe tanto como la observada si verdaderamente se hubiera obtenido una muestra aleatoria, de tamaño n , de una distribución normal. Si esa probabilidad es grande no habrá por tanto razones estadísticas para suponer que los datos no proceden de una distribución normal, mientras que si es muy pequeña, no será aceptable suponer ese modelo probabilístico para los datos. El procedimiento para la aplicación de esta prueba es el siguiente:

1. Para determinar la frecuencia observada acumulada, primero se ordenaron los datos de menor a mayor y se aplica la siguiente ecuación:

$$Fn = \frac{n}{N + 1} \quad (8)$$

donde:

Fn = frecuencia observada acumulada,

n = número total de orden,

N = número total del datos.

2. Posteriormente se estima la frecuencia teórica acumulada, mediante la función de Gumbel (ecuación 1).
3. Se obtiene la máxima diferencia entre la frecuencia observada acumulada y la frecuencia teórica acumulada, es decir, el valor superior de esta diferencia, en la i -ésima posición de orden, denominado D .

$$D = \text{Sup } |Fn(x)_i - F(x)_i| \quad (9)$$

4. Mediante el número de datos se entra a la tabla de valores de Kolmogorov-Smirnov y se buscan los valores críticos de D en la prueba de bondad; se tomaron en consideración las siguientes condicionantes para aceptar o rechazar la prueba:

Si el valor $D < Dt$. Entonces, se acepta H_0 (H_0 : el ajuste es adecuado).

Si el valor $D > Dt$. Entonces, se rechaza H_0 (H_a : el ajuste no es adecuado).

Coefficiente de Determinación. Adicionalmente se realizó esta prueba de bondad de ajuste basado en el Coeficiente de Determinación (R^2), que representa el porcentaje de variación de los datos reales, los cuales fueron generados por la función de distribución de Gumbel. Para tal propósito se aplica la siguiente ecuación:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (F_n(x)_i - F(x)_i)^2}{\sum_{i=1}^n (F_n(x)_i - \overline{F_n(x)})^2} \quad (10)$$

donde:

R^2 = coeficiente de determinación $0 \leq R^2 \leq 1$,
 $F_n(x)_i$ = media de las frecuencias observadas acumuladas,

$F_n(x)_i$ = frecuencia observada acumulada,
 $F(x)_i$ = frecuencia teórica acumulada.

Modelamiento de datos geográficos

Para el manejo de la base de datos, se crearon archivos de datos en formato ASCII con dos columnas: una con el identificador de cada estación meteorológica y otra con el valor Z , que contenía la información de las lluvias torrenciales a los periodos de retorno encontrados al aplicar la función de Gumbel.

Para la transformación y análisis de datos geográficos se creó una imagen grid (raster) con un área específica por píxel (1 km), basada en la cobertura de las estaciones climatológicas y área en estudio total del proyecto. En la creación de la cartografía temática, se utilizó el método de interpolación espacial *Kriging Universal*, incluido en el Arc-Map 9.2. Esta información se generó para el mes de septiembre (mes más lluvioso) y a nivel anual. En el caso de los periodos de retorno, la cartografía únicamente se realizó para el periodo de diez años para septiembre y a nivel anual, sin embargo, en forma tabular se tienen los periodos de retorno de 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 y 100 años.

La interpolación espacial es el proceso por medio del cual se utilizan puntos de valor conocido para estimar los valores de otros puntos (Gamma, 1998). Estos métodos se agrupan en globales y locales, la diferencia entre estos grupos radica en la utilización de los puntos de valor conocido (llamados también puntos de control) en la estimación de valores desconocidos. En el caso de los métodos globales, se utilizan todos los puntos disponibles para estimar un valor desconocido, mientras que en los métodos locales sólo se utiliza una muestra de los puntos para realizar dichas estimaciones. En las aplicaciones de los sistemas de información geográfica (SIG), la interpolación espacial correspondió a un método global, ya que es típicamente aplicado a una malla o grid y las estimaciones se realizan a todas las celdas de la malla. El método geostatístico de interpolación espacial de *Kriging Universal*, asume que la variación espacial de un atributo no es totalmente al azar ni determinada; esta variación espacial consta de un componente espacial de correlación, una tendencia o estructura

y un error (Burrough, 1998). Además este modelo plantea la hipótesis de que la variación espacial de la variable a representar puede ser explicada mediante funciones de correlación, es decir, la variación espacial de los valores Z pueden deducirse de los valores circundantes de acuerdo con funciones homogéneas en toda el área. Kriging es un método que se asocia al término de Mejor Predictor Lineal Insesgado (MPLI), además, es el mejor en el sentido de que minimiza la varianza del error en la predicción (Burrough, 1998). La estimación de la semivarianza se basa principalmente en la siguiente ecuación:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \{z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad (11)$$

donde:

n = es el número de pares de observaciones separados por distancia h ,

(h) = es la semivarianza,

h = distancia,

$Z(x_i)$ = Variable a interpolar (periodo de retorno a diez años, para septiembre y a nivel anual).

La gráfica de la semivarianza $g(h)$ contra la distancia h es el semivariograma, parámetro principal del método de interpolación Kriging.

La presentación de resultados es la etapa final del sistema, donde los mapas digitales fueron impresos de acuerdo con los objetivos planteados en este estudio. La salida de los datos es en forma de mapas temáticos; además, el sistema está disponible en formato digital y se pueden realizar consultas en pantalla.

RESULTADOS

La importancia que tiene la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas con respecto a la tecnología aplicada, se basa principalmente en la cartografía que se genera con coordenadas UTM a precisión submétrica, además se forma una base de datos depurada y actualizada, que proporciona referencias más acordes a la realidad del espacio

ambiente estudiado y resulta eficiente en la caracterización espacial de las lluvias torrenciales generada. La información espacial de las estaciones meteorológicas se incorporó al SIG ArcMap 9.2, con la finalidad de analizar la distribución espacial y la densidad de estaciones por municipios en el estado. Se visualizaron los puntos en el SIG y se creó una imagen en formato raster, la cual se relacionó con el perímetro del estado de Tamaulipas y con las características mencionadas anteriormente. Una vez determinada la georreferencia espacial de las estaciones climatológicas, se dispuso de la base de datos para poder ser relacionada con la variable en estudio.

Originalmente el estudio consideró 142 estaciones meteorológicas, sin embargo, se eliminaron dos estaciones ubicadas en los municipios de Nuevo Laredo y Mier por contar con registros por debajo de los 15 años. La densidad de estaciones en la zona norte del estado de Tamaulipas presenta una gran deficiencia, debido a que únicamente se tienen 20 estaciones que corresponden al 14.3% del total. Las estaciones utilizadas se localizan principalmente en los Distritos de Riego 025 Bajo Río Bravo y 026 Bajo Río San Juan. Cabe señalar que antes de los años noventa, la red de estaciones en estos distritos ascendía a un total de 41, actualmente en esta zona se tienen ocho en el primer distrito y dos en el segundo. En los municipios contiguos a la costa del Golfo de México, también se aprecian carencias en la red, encontrándose sólo siete estaciones que corresponden al 5.0% del total. Otro punto importante con insuficiente información corresponde al antiguo 4º Distrito (zona suroeste), donde se localizan 17 estaciones que corresponden al 12.1% del total de la red climatológica del estado considerada en el estudio.

Parámetros estadísticos de la Función de Gumbel

Algunas de las series de precipitación máxima disponibles para este estudio presentaron longitudes relativamente cortas (15 a 20 años) y en ciertos casos se observaron estaciones con series de 10 a 15 años. Por esta razón, al aplicar el método de Gumbel se asignaron a sus valores de lluvias torrenciales, periodos de retorno de 10 a 100 años,

con intervalos de 5 hasta los 50 años y finalmente de 100.

Los resultados de la variabilidad y el ajuste de los periodos de retorno estimados con la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, indican que en todos los casos los valores de la D calculada fueron superados por el valor crítico de la D de tablas (al 0.5), lo que significa un buen ajuste a la función de Gumbel. Con la finalidad de corroborar el ajuste de esta función se calculó el Coeficiente de Determinación (R^2). En la Tabla 1 se presentan los intervalos de los coeficientes obtenidos, el número de estaciones y el porcentaje que representan del total, tanto para el mes de septiembre como a nivel anual.

Los resultados indican que septiembre, en el intervalo del Coeficiente de Determinación (R^2) de 0.7 a 0.79, se ubicó una estación meteorológica (Santa Isabel-ID 404) localizada en el municipio de Soto la Marina, en la zona centro del estado. En el intervalo de 0.8 a 0.89 se situó un total de 21 estaciones, correspondiente al 15.00% del total, las cuales se localizan en su mayoría en la zona centro de la entidad, con excepción de las estaciones González (Guadalupe-ID-35), ubicada al sur y las estaciones Nuevo Laredo (ID-65) y B.R.B.-01-01 Control (ID-415), que se localizan en la porción norte del estado. El 84.3% (118) del total de las estaciones meteorológicas corresponden al intervalo mayor de 0.9. En general, los Coeficientes de Determinación resultantes se considera que cuentan con un ajuste estadístico confiable.

Con respecto a los Coeficientes de Determinación (R^2) resultantes en la prueba de Gumbel a nivel anual, se encontró que el 88.6% de las estaciones meteorológicas (124) presentaron valores de este coeficiente, mayores a 0.9, lo cual indica un

ajuste estadísticamente confiable para esta prueba. En el intervalo de 0.8 a 0.89 se ubicaron diez estaciones (7.1%) situadas principalmente en la zona centro del estado, con excepción de la estación Nuevo Laredo (ID-65). En los coeficientes más bajos, pero ubicados dentro del intervalo de aceptación estadística para su aplicación, se ubicaron seis estaciones (4.3%) que corresponden a la región centro del estado.

Conforme a los resultados de los estadísticos de la Prueba de Bondad de Ajuste de Kolmogorov-Smirnov y los Coeficientes de Determinación (R^2), se considera que para las estaciones meteorológicas del estado de Tamaulipas incorporadas en el estudio, la Función de Gumbel se ajusta satisfactoriamente, lo cual resulta consistente con lo señalado por Garrido (1992) y Koutsoyiannis (2003), quienes citan que para valores extremos, esta función es una de las más adecuadas.

Periodos de retorno para lluvias torrenciales en el estado de Tamaulipas

Una vez realizado el ajuste a la función de Gumbel para el mes de septiembre y a nivel anual, se calcularon los valores de lluvias torrenciales máximas en 24 horas, con periodos de retorno a 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 y 100 años. Con esta información se desarrolló la cartografía de los periodos de retorno a diez años para el mes de septiembre (mes más lluvioso) y a nivel anual.

Periodos de retorno para lluvias torrenciales para el mes de septiembre. En la Tabla 2 se presentan en forma resumida los periodos de retorno e intervalos de lluvia torrenciales para el mes de septiembre.

En la Figura 2 se presenta el número de estaciones conforme a cada intervalo de lluvias

Tabla 1. Intervalos del Coeficiente de Determinación (R^2), número de estaciones y porcentaje

Intervalos	septiembre		anual	
	Núm. de Estaciones	Porcentaje	Núm. de Estaciones	Porcentaje
0.7 - 0.79	1	0.7	6	4.3
0.8 - 0.89	21	15.0	10	7.1
0.9 y Mayores	118	84.3	124	88.6
Total	140	100.0	140	100.00

Tabla 2. Periodos de retorno de lluvias torrenciales y número de estaciones meteorológicas por intervalo para el mes de septiembre

Intervalo Lluvia torrencial (mm)	Periodos de Retorno (años)									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	100
0-40	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1
41-80	19	13	12	12	10	10	9	10	8	5
81-120	71	53	42	32	27	21	18	16	16	10
121-160	40	54	54	57	58	57	56	51	44	31
161-200	7	13	23	28	33	36	37	40	45	48
201-240		3	6	6	5	8	12	15	19	27
241-280		1		2	4	5	4	4	4	11
281-320			1	1	1		1	2	2	4
321-360						1	1	1	1	2
361-400										
401-440										1

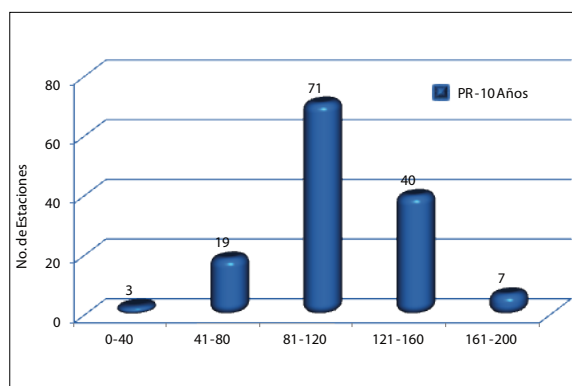


Figura 2. Lluvias torrenciales para septiembre, a diez años de periodo de retorno.

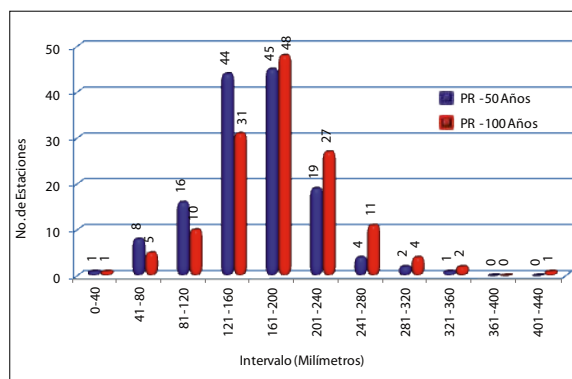


Figura 3. Lluvias torrenciales para septiembre, a 100 y 50 años de periodo de retorno. Tamaulipas, México.

torrenciales para el mes de septiembre en el estado de Tamaulipas. Es evidente que el mayor número de estaciones (71) se ubica en el intervalo de 81 a 120 mm para el periodo de retorno de diez años. Siendo el mínimo de 0 a 40 mm y el máximo de 161 a 200 mm de lluvia máxima en 24 horas.

En la Figura 3 se reporta la cantidad de lluvia máxima en 24 horas para los periodos de retorno de 50 y 100 años en el mes de septiembre, para las 140 estaciones en estudio. La máxima cantidad de estaciones (44 y 45) para el periodo de retorno de 50 años, se localizan en los intervalos de 121 a 160 y de 161 a 200 mm, respectivamente. El intervalo más alto corresponde a lluvias torrenciales del orden de 321 a 360 mm. Con respecto al periodo de retorno de 100 años, se observa que un total de 48 estaciones meteorológicas se presentan en el intervalo de 161 a 200 mm. En este periodo de retorno se alcanza una lluvia máxima de 401 a 440 mm, para el mes de septiembre.

Periodos de retorno para lluvias torrenciales a nivel anual. En la Tabla 3 se reporta la información de los periodos de retorno de las lluvias torrenciales a nivel anual y el número de estaciones que se ubicaron en cada intervalo de esta variable. Como se puede observar en los periodos de retorno estudiados, la mayor cantidad de estaciones se ubica en el in-

Tabla 3. Periodos de retorno de lluvias torrenciales y número de estaciones meteorológicas por intervalo a nivel anual

Intervalo	Periodos de Retorno (años)									
Lluvia torrencial (mm)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	100
0-50	4	4	4	4	3	2	2	2	2	2
51-100	9	8	7	7	8	9	9	9	8	6
101-150	57	42	28	25	21	15	12	9	10	6
151-200	50	55	61	56	51	52	51	49	45	35
201-250	17	25	30	33	38	38	37	40	42	41
251-300	3	5	8	12	14	18	22	22	23	27
301-350		1	2	2	4	4	5	7	8	16
351-400				1	1	2	2	2	1	5
401-450									1	1
451-500										1

tervalo de 101 a 200 mm. El evento torrencial más extremo lo representa el intervalo de 451 a 500 mm de precipitación máxima en 24 horas con un periodo de retorno de 100 años y le corresponde a la estación meteorológica Gómez Farías (ID-136), ubicada al sur del estado.

Con respecto al periodo de retorno de diez años a nivel anual, en la Figura 4 se observa un total de 57 estaciones ubicadas en el intervalo de 101 a 150 mm, le sigue el intervalo de 151 a 200 mm, con 50 estaciones. El máximo oscila entre los 251 a 300 mm de precipitación máxima en 24 horas y únicamente se presenta en tres estaciones meteorológicas.

En la Figura 5 se reporta la cantidad de lluvia máxima en 24 horas para los periodos de retorno de 50 y 100 años a nivel anual, para las 140 estaciones en estudio.

La máxima cantidad de estaciones (42 y 45) para el periodo de retorno de 50 años, se localizan en los intervalos de 151 a 200 y de 201 a 250 mm. Siendo el intervalo más alto de 401 a 450 mm de lluvia torrencial. Con respecto al periodo de retorno de 100 años, se observa que un total de 41 estaciones meteorológicas se presentan en el intervalo de 201 a 250 mm. En este periodo de retorno se tiene una estación meteorológica en el intervalo de lluvia máxima de 451 a 500 mm, a nivel anual.

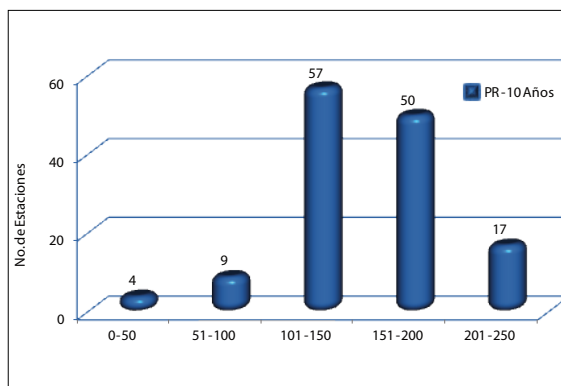


Figura 4. Lluvias torrenciales a diez años de periodo de retorno a nivel anual. Tamaulipas, México.

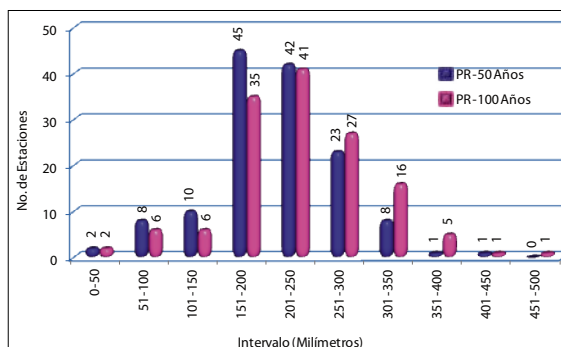


Figura 5. Lluvias torrenciales a nivel anual, a 100 y 50 años de periodo de retorno.

Distribución espacial de los periodos de retorno de lluvias torrenciales para el estado de Tamaulipas

En la Figura 6 se presenta la cartografía de las lluvias torrenciales (máximas en 24 horas) para el estado de Tamaulipas con un periodo de retorno de diez años, para el mes de septiembre, considerado como el más lluvioso.

La distribución espacial de las lluvias torrenciales, con un periodo de retorno de diez años, para el mes de septiembre, se ubica en intervalos que oscilan de un mínimo de 10.0 a un máximo de 335.4 mm. La distribución de las lluvias torrenciales observadas, es influenciada de forma importante

por tres elementos: la gran superficie territorial de la entidad, la colindancia con el Golfo de México y la presencia orográfica de la Sierra Madre Oriental.

En la porción suroeste compuesta por municipios como Miquihuana, Jaumave, Bustamante, Palmillas y Tula, se tienen los más bajos valores que oscilan de 10.0 a 71.3 mm. Debido a que estos municipios se ubican en el altiplano semiárido del estado, este tipo de eventos pluviales pueden ser de mucha utilidad, si se realizaran obras de captación de humedad, para utilizarla en los periodos de sequía, que son característicos de esta región.

En orden ascendente, en el intervalo de 71.3 a 99.2 mm, se ubican los municipios de la parte

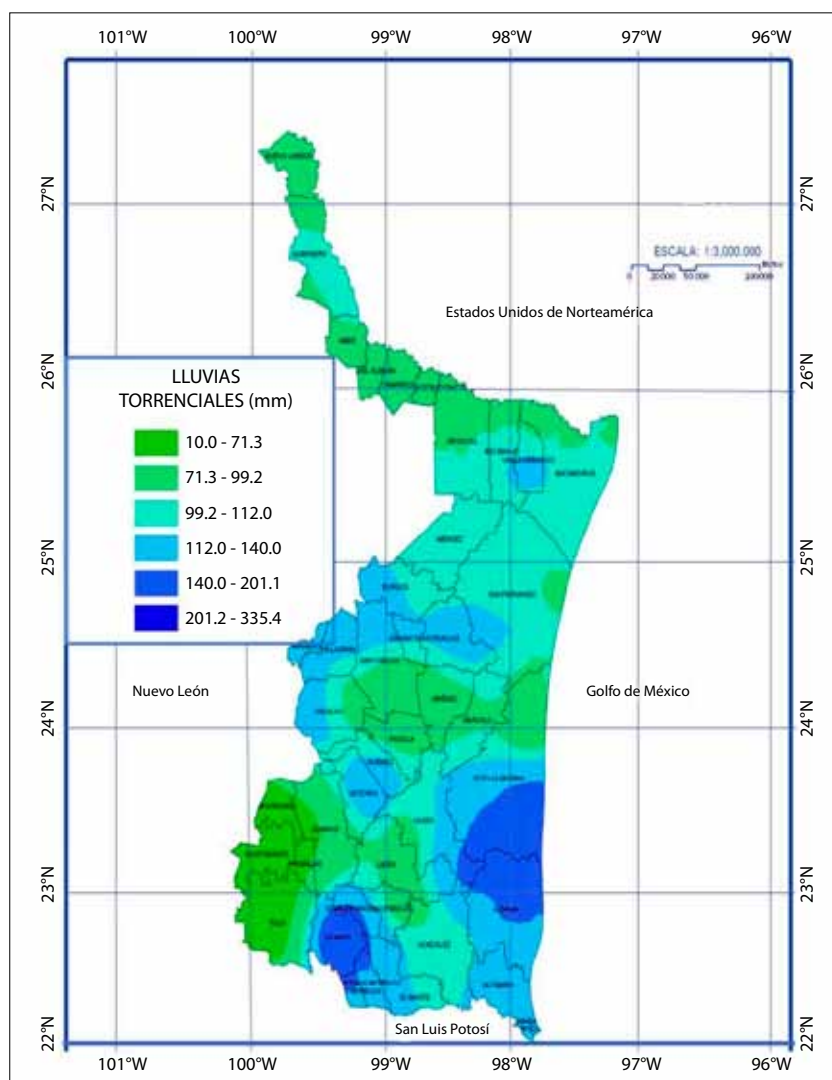


Figura 6. Periodo de retorno de lluvias torrenciales a diez años para el mes de septiembre. Tamaulipas, México.

norte del estado: Nuevo Laredo, Guerrero, Mier, Miguel Alemán, Gustavo Díaz Ordaz y parte alta de Reynosa, Río Bravo y Matamoros. En este mismo intervalo se aprecia en una pequeña porción del municipio de San Fernando y en una región paralela a los municipios de Abasolo, Jiménez, Padilla e Hidalgo, así como una porción de los municipios de Llera, Jaumave, Palmillas y Tula.

Las lluvias torrenciales, en el intervalo de 140 a 335.4 mm, se localizan en dos municipios que colindan con el Golfo de México: Soto la Marina y Aldama. Además los situados en la porción sur como son Ocampo, Xicoténcatl, Antiguo Morelos, Nuevo Morelos y Gómez Farías. Estas dos zonas

son las que más impactos han tenido a causa de este fenómeno meteorológico en el mes de septiembre, a pesar de que en agosto se han presentado perturbaciones de tipo ciclónico.

En la Figura 7 se presenta la distribución espacial de las lluvias torrenciales a nivel anual, en Tamaulipas, para el periodo de retorno de diez años. Este mapa temático presenta consistencia con el anterior, con respecto a las zonas de más alta y más baja presencia de lluvias torrenciales. Cabe destacar que en la Región sureste se aprecian regiones con intervalos superiores que oscilan desde los 153.7 hasta los 407.3 mm de lluvias torrenciales. En lo que se refiere a las precipitaciones menores, éstas se

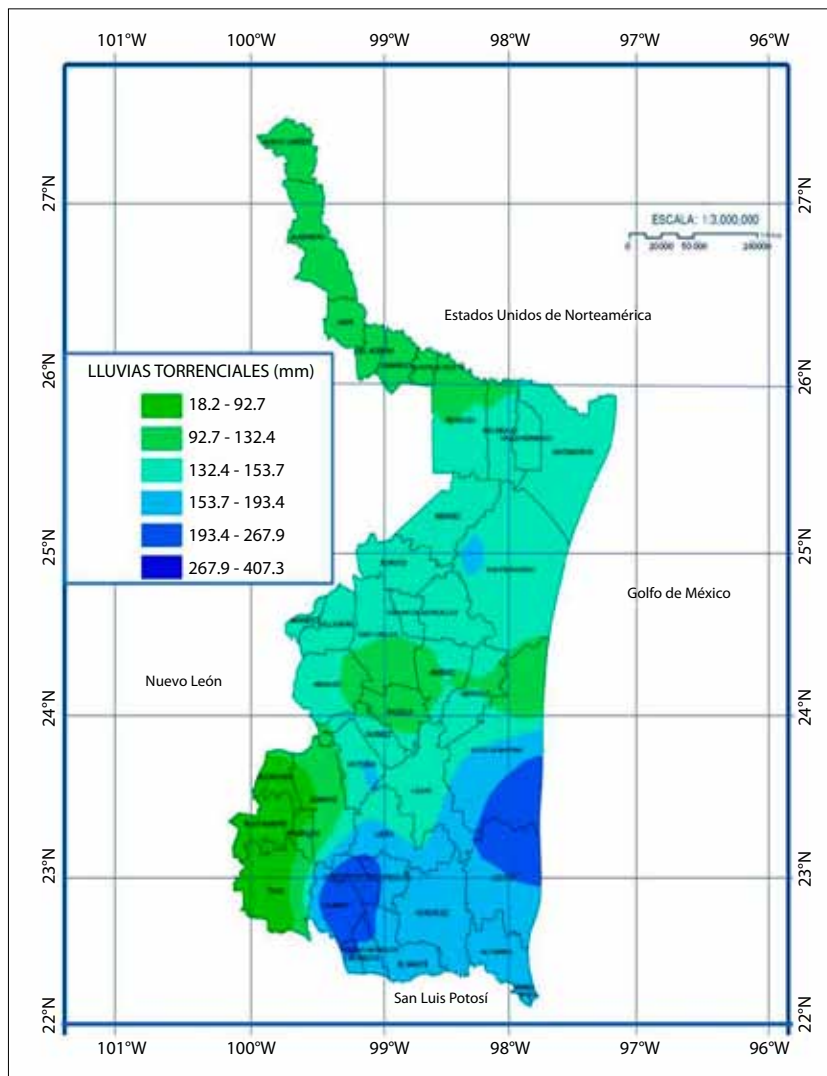


Figura 7. Periodo de retorno de lluvias torrenciales a diez años a nivel anual. Tamaulipas, México.

siguen ubicando al norte y suroeste de la entidad con valores que fluctúan de 18.2 a 92.7 mm, a nivel anual. La presencia de estas bajas cantidades de precipitación se debe a que la Sierra Madre Oriental se comporta como una barrera orográfica, donde grandes cantidades de nubosidad se ven obligadas a ascender y se precipitan en los valles y hondonadas de los municipios de Gómez Farías, Ocampo, Llera y Antiguo Morelos.

El rango de 153.7 a 407.3 mm de lluvias torrenciales, es provocado por el efecto de altas evaporaciones y humedades relativas generadas en el Golfo de México, dando origen a la formación de precipitaciones que penetran por los municipios de Soto la Marina, Aldama, Altamira, Tampico y Cd. Madero, donde se presenta la mayor recurrencia de este fenómeno meteorológico. Los ciclones tropicales del Golfo de México parecen tener una gran influencia en los máximos de precipitación de los lugares situados en sus vertientes, pues los máximos coinciden con la época de mayor frecuencia de dichas perturbaciones ciclónicas (García, 2003).

CONCLUSIONES

En las zonas montañosas de la Sierra Madre Oriental, donde la densidad de estaciones no es suficiente para representar adecuadamente las grandes variaciones asociadas a la irregularidad del terreno, el método de interpolación espacial *Kriging Universal*, considerado como el mejor para predecir datos lineales insesgados (Burrough, 1998), permitió analizar la distribución de las lluvias torrenciales y obtener el modelamiento de datos geográficos para todo el estado de Tamaulipas, con una resolución espacial aceptable (1 km²).

Huntingford *et al.* (2003) señala que los algoritmos de interpolación de datos observados proporcionan estimación de periodo de retorno probables para las distribuciones de valores extremos de precipitación. Los resultados de este estudio ponen de manifiesto que a mayores periodos de retorno (de 10 a 100 años) es más alta la probabilidad de ocurrencia de lluvias torrenciales, y que los máximos y mínimos de precipitación pluvial son mayores a medida que aumenta el periodo de retorno.

En los diez periodos de retorno estudiados, se identificó que las áreas propensas a registrar un máximo de precipitación diaria extrema, se localizan en dos porciones del sur del estado de Tamaulipas, una colindante con la Costa del Golfo de México, en los municipios de Soto la Marina y Aldama y otra en la porción suroeste del estado en los municipios de Ocampo, Antiguo Morelos, Nuevo Morelos, Llera, Xicoténcatl y Gómez Farías, por lo que habrán de considerarse como zonas de alto riesgo, ya que se pueden presentar lluvias torrenciales (máximas en 24 horas) del orden de 335.4 mm en el mes de septiembre y a nivel anual del orden de 407.3 mm. Al respecto se revela que los modelos climáticos sugieren un aumento en la intensidad de las precipitaciones en el hemisferio norte y que grandes inundaciones han centrado la atención sobre los efectos dramáticos que estos cambios pueden tener sobre muchos sectores de la sociedad (Ekströma *et al.*, 2005).

La zona norte del estado de Tamaulipas presenta áreas donde se pueden esperar las lluvias torrenciales con los valores más bajos para el mes de septiembre y a nivel anual, con cifras que van desde 10.0 a 71.3 mm y de 18.2 a 92.7 mm, respectivamente. Esta baja incidencia se debe a que durante la mitad fría del año la zona subtropical de alta presión se encuentra desplazada hacia el sur y con ella la faja de los alisios; esto se traduce en una disminución de la precipitación en esta época (García, 2003).

Las precipitaciones extremas se encuentran entre los fenómenos atmosféricos más perturbadores. Estos eventos afectan negativamente a las poblaciones urbanas y a su infraestructura, la cual a menudo es insuficiente para dar cabida a las inundaciones que ocasionan (Liebmann *et al.*, 2001). Las inundaciones se convierten en peligro cuando los espacios ocupados por las poblaciones abarcan llanuras de inundación naturales de un río y, por consecuencia, son afectadas por la acumulación de agua (Garnica y Alcántara, 2004).

AGRADECIMIENTOS

Al Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONACYT-Gobierno del

Estado de Tamaulipas, por el apoyo otorgado para la realización del presente estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Adeyemi, S. and M. O. Ojo (2003), "A generalization of the Gumbel Distribution", *Kragujevac J. Math.*, no. 25, pp. 19-29.
- Beguería, S. y B. Lorente (1999), "Distribución espacial del riesgo de precipitaciones extremas en el Pirineo Aragonés Occidental", *Geographicalia*, núm. 37, pp. 1-15.
- Beguería, S., M. J. L. López, A. S. M. Lorente and R. J. M. García (2003), "Assessing the effect of climate oscillation and land use changes on stream flow in the Central Spanish Pyreneces", *Ambio*, vol. 32, no. 4, pp. 283-286.
- Burrough, P. (1998), *Principles of Geographical Information System for Land Resource Assessment*, Oxford Press, London.
- Burrough, McDonnell (1998), Spatial Interpolation. Geography 475, Lecture 5 [<http://geolibrary.mines.uidaho.edu/courses/Geog475/Lectures/5/>].
- Carvalho, L. M. V., Ch. Jones and B. Liebmann (2002), "Extreme precipitation events in Southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic Convergence Zone", *Journal of Climate*, no. 15, pp. 2377-2394.
- Carvalho, L. M. V., Ch. Jones and B. Liebmann (2004), "The South Atlantic Convergence Zone: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall", *Journal of Climate*, no. 17, pp. 88-108.
- Charles, J. (2000), "Occurrence of extreme precipitation events in California and relationships with the Madden-Julian Oscillation", *Journal of Climate*, no. 15, pp. 3576-3587.
- Clarke, R. T. (2002), "Fitting and testing the significance of linear trends in Gumbel distributed data", *Fitting and testing Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 17-24.
- Ekströma, M., H. J. Fowlerb, C. G. Kilsbyb and P. D. Jonesa (2005), "New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations", *Journal of Hydrology*, vol. 300, no. 1-4, pp. 234-251.
- Gamma, J. (1998), *Interpolation-Kriging-and inverse distance weighting. Gamma desing software-Professional Geostatistics for the Environmental Sciences* [<http://www.geostatistics.com/GSWin/GSWINInterpolation.html> (2010, 25 de mayo)].
- García, A. E. (2003), "Distribución de la precipitación en la República Mexicana", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 50, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 67-76.
- Garnica, P. R. J. e I. Alcántara Ayala (2004), "Riesgo por inundación asociados a eventos de precipitación extraordinaria en el curso del río Tecolutla, Veracruz", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 55, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 23-45.
- Garrido, A. R. (1992), *Limitaciones de la Distribución de Gumbel en la valoración del riesgo de lluvias fuertes: caso de un observatorio del litoral Mediterráneo*.
- Haylock, M. and N. Nicholls (2000), "Trends in extreme rainfall indices for an updated high quality data set for Australia, 1910-1998", *International Journal of Climatology*, no. 20, pp. 1533-1541 [http://www.vsamp.com/resume/publications/Haylock_Nicholls.pdf (2010, 15 de junio)].
- Huntingford, R. G. J., C. Prudhomme, R. Lamb, J. H. C. Gash and D. A. Jones (2003), "Regional climate-model predictions of extreme rainfall for a changing climate", *C. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, no. 129, pp. 1607-1621.
- Koutsoyiannis, D. (2003), "On the appropriateness of the Gumbel Distribution in modeling extreme rainfall", *Proceedings of the ESF LESC Exploratory Workshop held at Bologna, Italy, October 24-25*, pp. 303-319.
- Kulathinal, S. B. and D. Gasbarra (2002), "Testing equality of cause-specific hazard rates corresponding to m competing risks among K groups", *Lifetime Data Analysis*, no. 8, pp. 147- 161.
- Lazcano M., M. F. (2004), "Estudio de las precipitaciones máximas en 24 horas, del período 1961-1996, en puntos de gris sobre la Península Ibérica e Islas Baleares: dos ajustes a la función de Distribución de Gumbel", *XXVIII Jornadas Científicas de la Asociación de Meteorología Española*, Badajoz, España.
- Liebmann, B., Ch. Jones and L. M. V. de Carvalho (2001), "Interannual variability of daily extreme precipitation events in the State of São Paulo, Brazil", *Journal of Climate*, no. 14, pp. 208-218.
- Mélice, J. L. and C. J. C. Reason (2007), "Return period of extreme rainfall at George, South Africa", *South African Journal of Science*, vol. 103, nos. 11-12, pp. 499-501.
- Ojo, M. O. (2001), "Some relationships between the generalized Gumbel and other distributions", *Kragujevac J. of Maths*, no. 23, pp. 101-106.
- Pielke, R. A., T. Stohlgren, W. Parton, N. Doesken, J. Moeny, L. Shell and K. Redmon (2000), "Spatial representativeness of temperature measurements from a single site", *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 81, no. 4, pp. 826-830.

- Simiua, E., N. A. Heckert, J. J. Filliben and S. K. Johnson (2001), "Extreme wind load estimates based on the Gumbel distribution of dynamic pressures: an assessment", *Structural Safety*, no. 23, pp. 221-229.
- Yue, S. (2000), "The Gumbel mixed model applied to storm frequency analysis water", *Resources Management*, no. 14, pp. 377-389.