

CURVAS INTENSIDAD–DURACIÓN-FRECUENCIA DE TORMENTAS DE CORTA DURACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO SEGURA, ESPAÑA

INTENSITY-DURATION-FREQUENCY CURVES OF SHORT-DURATION STORMS IN THE SEGURA RIVER BASIN, SPAIN

Julio Pérez-Sánchez*, Javier Senent-Aparicio

Departamento de Ciencias Politécnicas, Escuela Universitaria Politécnica, UCAM Universidad Católica San Antonio de Murcia, Campus de los Jerónimos, no. 135, 30107 Murcia, España (jperez058@ucam.edu)

RESUMEN

Las intensidades de tormentas de duración corta (inferiores a 60 min) en los climas semiáridos son importantes para el diseño y cálculo de obras de ingeniería y la planificación hidrológica porque suelen provocar las mayores crecientes en estas zonas. El objetivo de este estudio fue obtener curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia de tormentas para la cuenca del río Segura, situada en el sureste de España, y determinar cuáles de las funciones de distribución de probabilidad (FDP) se ajustan mejor a los datos de las 60 estaciones pluviográficas en la cuenca. Para cada una de las estaciones se obtuvieron las intensidades máximas anuales de tormenta en los intervalos de tiempo de 15, 30 y 60 min para un período común de 21 años. Las FDP estudiadas fueron Gumbel, TERC, Log Pearson tipo III y GEV. La comparación de los resultados se realizó con la desviación absoluta media (DAM) y el error estándar medio (EEM). El mejor ajuste se obtuvo con la función de Gumbel para 45 % de las estaciones, seguida de la GEV para 32 %. Las expresiones analíticas de las curvas Intensidad-duración-Frecuencia obtenidas para cada estación permitirán obtener, para un período de retorno y una duración dados, las intensidades de lluvia en cualquier punto de la cuenca mediante relaciones inversas del cuadrado.

Palabras clave: eventos extremos, análisis probabilístico, curvas IDF.

INTRODUCCIÓN

La precipitación, como variable hidrológica de estado, se puede caracterizar a través de la intensidad, su distribución en el espacio, en el

ABSTRACT

In semi-arid climates, the intensities of short-duration storms (less than 60 min) usually cause the largest floods and, therefore, they are important to design and calculate engineering works and hydrological planning. The objective of this study was to obtain Intensity-Duration-Frequency curves of storms in the Segura River Basin —located in southeastern Spain—, and to determine which probability distribution functions (FDP) best fit the data of the 60 precipitation stations in the basin. For each station, the annual maximum storm intensities were obtained in 15, 30, and 60 min intervals for a common period of 21 years. The FDP studied were Gumbel, TERC, Log Pearson Type III and GEV. The results were compared using the mean absolute deviation (DAM) and the standard error of the mean (EEM). The best fit was obtained with the Gumbel function (45 % of the stations), followed by the GEV (32 %). The analytical expressions of the Intensity-Duration-Frequency curves obtained for each station will provide —for a given return period and duration— the rain intensities at any point in the basin, through an inverse square relationship.

Keywords: extreme events, probabilistic analysis, IDF curves.

INTRODUCTION

Precipitation —as a hydrological state variable— can be characterized by its intensity, distribution in space and time, and occurrence frequency or probability. In order to achieve this, numerous observations extracted from pluviographic series are necessary, defining the behavior pattern in a given area and allowing a later analysis or use. The most frequently used methodology is related to the Intensity-Duration-Frequency curves (IDF) that are used in hydrological engineering for the proposal,

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: octubre, 2016. Aprobado: abril, 2017.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 51: 607-616. 2017.

tiempo y su frecuencia o probabilidad de ocurrencia. Para ello es necesario tener numerosas observaciones extraídas de series pluviográficas, con el objetivo de definir el patrón de comportamiento en una zona determinada y permitir un análisis o uso posterior. La metodología más usada se relaciona con Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) que se usan en ingeniería hidrológica para planteamiento, diseño y operación de los proyectos hidráulicos y obras de ingeniería para la protección contra avenidas máximas (Koutsoyiannis *et al.*, 1998).

Sherman (1931) y Bernard (1932) plantearon las primeras relaciones matemáticas al inicio de la década de 1930. Svensson *et al.* (2007) en Escocia, Antigha y Ogarekpe (2013) en Nigeria y Elsebaie (2012) en Arabia Saudí desarrollaron y particularizaron expresiones matemáticas en los países citados. La representación gráfica de los resultados se realiza mediante mapas que permiten conocer la intensidad de lluvia para diferentes periodos de retorno y duración (Pereyra *et al.*, 2004). Las curvas IDF, además, son una de las herramientas más utilizadas en la estimación de las tormentas de diseño en sitios con falta de información de caudales y aforos (Vélez *et al.*, 2002).

Para realizar de las curvas IDF es necesario ajustar los valores de intensidad máxima a una FDP, la cual varía de acuerdo con la zona que se modela. En Holanda, Overeem *et al.* (2008) usan la función GEV ya que para periodos de retorno elevados presenta valores más conservadores que la distribución de Gumbel. En Arabia Saudí, Al-anazi y El-Sebaie (2013) probaron las distribuciones Gumbel, Log Pearson tipo III y Log Normal, con buenos resultados en los test de bondad de ajuste para todas. Svensson y Jones (2010) estudiaron las funciones de distribución utilizadas en el mundo y señalaron que la función de distribución más usada era la GEV. En España, la función de Gumbel se usó con frecuencia hasta hace 20 años. Ahora, la más recomendada y usada en las publicaciones oficiales (Ministerio de Fomento, 1999) es la distribución SQRT-ET max, conocida en México como TERC (tipo exponencial de raíz cuadrada). Salas y Fernández (2007) recomiendan el uso de la TERC frente a Gumbel, GEV, Log Pearson tipo III y la Two-component extreme value distribution (TCEV) (Rossi *et al.*, 1984) para precipitaciones máximas.

En el caso del área estudiada, las condiciones climáticas de la cuenca del río Segura propician que,

design, and operation of hydraulic projects, and engineering works for protection against maximum flash floods (Koutsoyiannis *et al.*, 1998).

In the early 1930s, Sherman (1931) and Bernard (1932) set out the first mathematical relationships. Svensson *et al.* (2007), Antigha and Ogarekpe (2013), and Elsebaie (2012) developed and specified mathematical expressions in Scotland, Nigeria, and Saudi Arabia, respectively. The results are graphically represented through maps of the rain intensity for different duration and return periods (Pereyra *et al.*, 2004). The IDF curves are also one of the most frequently used tools to estimate design storms in sites where there is not enough information about flow rates and discharge flows (Vélez *et al.*, 2002).

In order to develop the IDF curves, the maximum intensity values must be fitted to one FDP, which varies according to the zone modeled. In the Netherlands, Overeem *et al.* (2008) used the GEV function, because it has more conservative values for high return periods than the Gumbel distribution. In Saudi Arabia, Al-Anazi and El-Sebaie (2013) tested Gumbel, Log Pearson Type III, and Log Normal distributions, and they obtained good results in goodness-of-fit tests for all of them. Svensson and Jones (2010) studied the distribution functions used in the world and indicated that the most frequently used distribution function was the GEV. In Spain, the Gumbel function was frequently used until 20 years ago. Currently, the most recommended function used in official publications (Ministerio de Fomento, 1999) is the SQRT-ET max distribution, known in Mexico as TERC (square-root exponential type). For maximum precipitations, Salas and Fernández (2007) recommend the use of TERC instead of Gumbel, GEV, Log Pearson Type III, and Two-component extreme value distribution (TCEV) (Rossi *et al.*, 1984).

In the case of the areas under study, the climatic conditions of the Segura River Basin—which have very extensive and extremely low flow—cause short-duration and high-intensity rains. Usually, these rains result in floods with overflows and maximum flows of the same nature as the greater known values in the world for basins with similar area (Pérez and Gil, 2012, Romero and Maurandi, 2000). Therefore, in this type of semi-arid regions, establishing IDF relationships is necessary to define short-duration storms (less than 60 minutes) for proper hydrological

con estiajes muy extensos y extremos, se registren lluvias de corta duración y elevada intensidad que suelen provocar crecidas con desbordamientos y caudales máximos del mismo orden que los valores mayores conocidos en el mundo para cuencas de superficie similar (Pérez y Gil, 2012; Romero y Maurandi, 2000). Es necesario, por tanto, en este tipo de regiones semiáridas establecer relaciones IDF para definir tormentas de corta duración (menores de 60 min) para una correcta gestión y planificación hídrica e hidráulica, así como para un correcto dimensionamiento de infraestructuras (Jiang y Tung, 2013).

El objetivo de este estudio fue obtener las curvas IDF para intervalos de duración de 15, 30 y 60 min en la cuenca del río Segura, situada en el sureste de España, y determinar cuáles de las FDP estudiadas se ajustan mejor en cada una de las estaciones consideradas. Además, las expresiones analíticas de las IDF en esas estaciones configurarán una fuente de consulta que facilitará conocer la intensidad de lluvia requerida en cualquier lugar de esta cuenca en función del periodo de retorno considerado.

MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca de río Segura se ubica en el sureste de España (Figura 1) con una superficie de 18208 km². La zonificación en altura ofrece esta distribución: 18 % de la superficie está debajo de los 200 m de altitud 40 % debajo de los 500 m de altitud y 81 % por debajo de la cota 1000 m. Sus cauces transportan caudales de escasa magnitud (65 Mm³ totales) que se consumen localmente, sin aportar retornos significativos al Segura. La red de estaciones meteorológicas gestionadas por el organismo de cuenca del río Segura (Confederación Hidrográfica del Segura) se compone de 66 estaciones (Figura 1). Los datos proporcionados por cada pluviógrafo consisten en registros de precipitación cada 5 min desde el año hidrológico 1992-1993 hasta el año 2012-2013. De las 66 estaciones iniciales, las estaciones número 2, 39 y 40 se descartaron por falta de registros en numerosos años. Para cada una de las otras 63 estaciones se obtuvieron las intensidades máximas anuales en los intervalos de 15, 30 y 60 min. ya que existen precedentes de lluvias cortas de gran intensidad y de gran impacto que produjeron grandes daños materiales. Todo ello incide en la relevancia de las mismas (Machado *et al.*, 2011; Hooke y Mant, 2002). Estas tormentas condicionan el dimensionamiento de los sistemas colectores de aguas pluviales y tanques de tormentas, para los cuales es necesaria información de precipitaciones de una duración y frecuencia específicas (Jiang y Tung, 2013).

and hydraulic planning and management, as well as for the correct sizing of infrastructures (Jiang and Tung, 2013).

The objective of this study was to obtain the IDF curves for 15, 30, and 60 min intervals in the Segura River Basin, located in southeastern Spain, and to determine which of the FDPs studied fits better each one of the stations under consideration. In addition, the analytical expressions of the IDFs in the those stations will conform a source of information that will allow researchers to find out the intensity of rain required in any place of this basin, depending on the return period under consideration.

MATERIALS AND METHODS

The Segura River Basin is located in the southeast of Spain (Figure 1) and it has an area of 18208 km². The height zoning results in the following distribution: 18 % of the area is located below 200 m altitude, 40 %, below 500 m, and 81 %, below 1000 m. Its streams transport small magnitude flows (65 Mm³ total) that are consumed locally, without providing significant returns to the Segura River. The meteorological station network—managed by the organization of the Segura River Basin (Confederación Hidrográfica del Segura)— is composed of

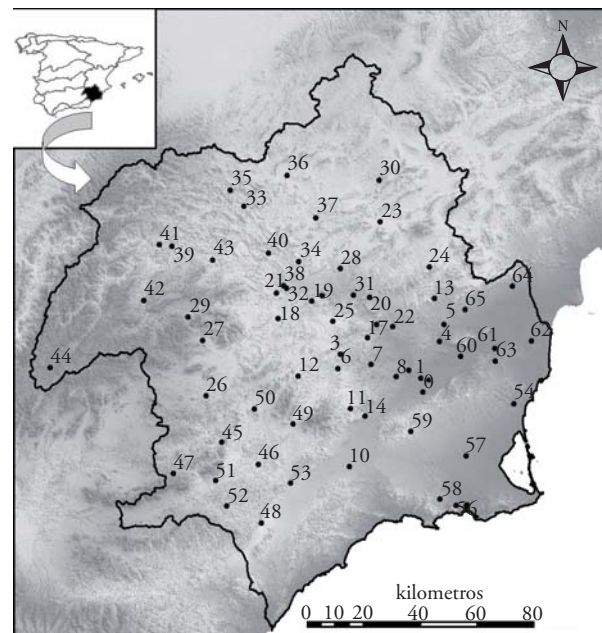


Figura 1. Localización zona de estudio y estaciones meteorológicas.

Figure 1. Study area and meteorological stations location.

Para verificar la independencia y homogeneidad de las series registradas se aplicó el test de von Neumann (WMO, 1971) y el test de Wald-Wolfowitz (Bobée y Ashkar, 1991; Rao y Hamed, 2000). El cálculo de los tests de Neuman y Wald-Wolfowitz se realizó mediante los paquetes climtrends y randtests (Mateus y Caeiro, 2014) de R Core Team. La media del valor obtenido para el test de Neumann en las estaciones estudiadas estaba por encima de 2.1 para las duraciones de tormenta consideradas, con una desviación típica inferior a 0.45. Sólo la estación número 31 ofreció un valor inferior al crítico: 5 % de 1.30 para n=20 (Bartels, 1982), por lo que se decidió descartarla. Tras la aplicación del test de Wald-Wolfowitz las estaciones 20 y 38 no aseguraron la independencia de las series, y quedaron 60 estaciones para desarrollar el estudio.

Con la distribución espacial de las intensidades máximas para las duraciones 15, 30 y 60 min se realizó una interpolación de los valores medios y de las desviaciones típicas de las intensidades para las duraciones en cada estación (Figura 2).

La interpolación se realizó mediante un kriging ordinario con un semivariograma esférico con el uso de Arcmap 10.2. Las intensidades y su variabilidad aumentan de noroeste a sudeste (Figura 2). Para períodos de 15 min las intensidades medias registradas están en torno a 54 mm h⁻¹ frente a los 35 mm h⁻¹ y 20 mm h⁻¹ para duraciones de 30 min y 60 min, respectivamente. Las desviaciones típicas de las intensidades para 15 min alcanzan valores superiores a 30 mm h⁻¹, lo que supone intensidades máximas próximas a 80 mm h⁻¹, mientras estas grandes desviaciones se reducen y estabilizan a valores máximos de 20 mm h⁻¹ si el tiempo se amplía a 30 o 60 min.

Las FDP usadas en el presente estudio fueron Gumbel, GEV, Log Pearson Tipo III (LPIII) y TERC (Cuadro 1). Todas las FDP fueron ajustadas mediante el método de momentos (MO) excepto la GEV en la que se usó la de momentos L (ML). Los ajustes obtenidos en cada estación, se evaluaron con el test de Lilliefors, en sus versiones de D_{max} (1) y D_{rms} (2) (Hennemuth *et al.*, 2013) y el error estándar de ajuste (3) (EEA) (Kite, 1977).

$$D_{max} = \max|F_n(x) - F(x)| \tag{1}$$

$$D_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_n(x) - F(x))^2} \tag{2}$$

$$EEA = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{(N - m_j)}} \tag{3}$$

donde $F(x)$: valor teórico de la función de distribución de valores extremos; $F_n(x)$: valor de la función empírica de distribución de

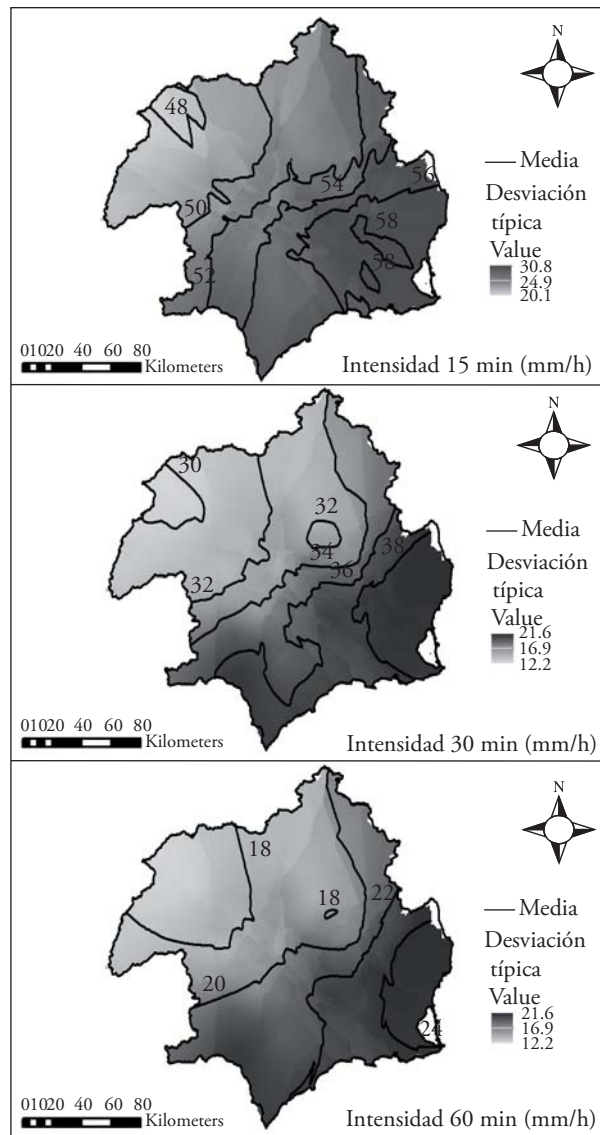


Figura 2. Variación espacial en la cuenca del río Segura, España, de las estadísticas de las intensidades de lluvia para 15, 30 y 60 min.

Figure 2. Spatial variation of the rain intensities statistics for 15, 30, and 60 min. in the Segura River Basin, Spain.

66 stations (Figure 1). The data provided by each pluviograph consist of rainfall records (every 5 min), from the hydrological 1992-1993 year to the 2012-2013 year. Of the 66 initial stations, stations number 2, 39, and 40 were discarded due to lack of records in several years. For each one of the remaining 63 stations, the maximum annual intensities were obtained in 15, 30 and 60 min intervals, since there are precedents of short rains of great intensity and high impact that caused serious material damages. All this has an impact on their relevance (Machado *et*

Cuadro 1. FDP utilizadas en el estudio.

Table 1. FDP used in the study.

Distribución	Función distribución acumulada	Rangos de variable aleatoria y parámetros
Gumbel	$F(x) = e^{-e^{-(x-\beta)/\alpha}}$	$-\infty \leq x \leq \infty, \alpha > 0, \beta > 0$
GEV	$F(x) = e^{-\left(1 - \frac{k(x-u)}{\alpha}\right)^{1/k}}$	$u + \alpha/k \leq x \leq \infty$ si $k < 0, -\infty < x \leq u + \alpha/k$ si $k > 0$
Log Pearson tipo III	$F(x) = \frac{\lambda^\beta (y - \varepsilon)^{\beta-1} e^{-(y-\varepsilon)}}{x\Gamma(\beta)}$	$x \geq \gamma$ si $\gamma > 0; x \leq \gamma$ si $\alpha < 0, y = \log x \geq \varepsilon$
TERC	$F(x) = e^{-k(1+\sqrt{\alpha x})e^{-\sqrt{\alpha x}}}$	$x \geq 0$

probabilidad (FDP); x_i : valores históricos de la muestra; y_i : valores obtenidos con la FDP; n : tamaño de la muestra; m_j : número de parámetros en la FDP.

Una vez seleccionada la función con un mejor ajuste, también se obtuvieron las expresiones analíticas de las curvas IDF mediante el método de Aparicio (1997), cuya ecuación es: $I = K T^m D^{-n}$ (4) donde T es el periodo de retorno en años, D es la duración de la tormenta en minutos u horas, e I es la intensidad de precipitación en mm h^{-1} . Si a la ecuación (4) se le extrae logaritmos a cada lado se llega a un modelo de regresión lineal múltiple del tipo $\log I = \log k + m \log T - n \log D$ (5) donde k, m y n son las constantes a ajustar para cada estación. Para comprobar la bondad de los ajustes de la ecuación de Aparicio (1997) en el dominio real (Pandey y Nguyen, 1999) se usó la desviación absoluta media (DAM) (6) y el error estándar medio (EEM) (7) (Campos–Aranda, 2014).

$$DAM = \frac{1}{n - m_j} \sum_{i=1}^n |I_i^e - I_i^o| \tag{6}$$

$$EEM = \sqrt{\frac{1}{n - m_j} \sum_{i=1}^n (I_i^e - I_i^o)^2} \tag{7}$$

donde I_i^e : intensidad estimada; I_i^o : intensidad observada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las 60 estaciones estudiadas, 27 de ellas obtuvieron el mejor ajuste con la función de Gumbel, lo

al., 2011; Hooke and Mant, 2002). These storms determine the sizing of rainwater harvesting systems and storm tanks; therefore, information about rainfall with specific duration and frequency is necessary (Jiang and Tung, 2013).

In order to verify the independence and homogeneity of the recorded series, the Von Neumann test (WMO, 1971) and the Wald-Wolfowitz test (Bobée and Ashkar, 1991; Rao and Hamed, 2000) were applied. The calculation of the Neuman and Wald-Wolfowitz tests was carried out using the R Core Team climtrends and randtests packages (Mateus and Caeiro, 2014). The mean value obtained with the Neumann test at the stations under study was above 2.1, for the storm durations under study, with a standard deviation of less than 0.45. Only station number 31 showed a value lower than the critical: 5 % of 1.30 for $n=20$ (Bartels, 1982); therefore, we decided to discard it. Finally, after the Wald-Wolfowitz test was applied, stations 20 and 38 did not guarantee the independence of the series, leaving a total of 60 stations in which the study was carried out.

With the spatial distribution of the maximum intensities for 15, 30, and 60 min durations, an interpolation of mean values and typical deviations of the intensities was carried out for the durations in each station (Figure 2).

The interpolation was carried out with Arcmap 10.2, using an ordinary kriging with a spherical semivariogram. The intensities and their variability increase from northwest to southeast (Figure 2). For 15 min periods, approximately 54 mm h^{-1} mean intensities were recorded, versus 35 mm h^{-1} and 20 mm h^{-1} for 30 min and 60 min, respectively. The intensities' standard deviations reach values higher than 30 mm h^{-1} for 15 min periods—which means maximum intensities close to 80 mm h^{-1} —; however, if the time is extended to 30 or 60 min, these large deviations are reduced and stabilized at maximum values of 20 mm h^{-1} .

que supone el 45 % de la cuenca, mientras que las FDP GEV y LPIII lo presentaron en 19 y 12 estaciones, respectivamente. La función TERC sólo obtuvo el mejor ajuste en dos de las estaciones. Si se analizan los parámetros estadísticos básicos de los valores de D_{max} , D_{rms} y EEA obtenidos para todas las estaciones (Cuadro 2) se observa que tanto para D_{max} como para D_{rms} los valores medios son muy similares para todas las FDP variando entre 0.15 y 0.13 para D_{max} y 0.07 y 0.06 para D_{rms} , por lo que, teniendo sólo en cuenta el test de Lilliefors, cualquiera de las FDP estudiadas ofrecen buenos ajustes para la cuenca del río Segura. Parecido comportamiento se observa en los coeficientes de variación (C.V.) aunque con un rango más amplio y con menores oscilaciones para las funciones de Gumbel y GEV.

Sin embargo, en el EEA aparecen las mayores diferencias entre las FDP. La función de Gumbel presenta un valor medio del EEA 50 % menor al resto de funciones. Asimismo, el valor máximo de la función TERC triplica al de las otras funciones mientras que la función de Gumbel presenta los valores menores de la cuenca. La variabilidad de GEV y LPIII se encuentra alrededor del 40 % mientras que el C.V aumenta hasta 60 % para las funciones de Gumbel y TERC.

Un resumen de los resultados obtenidos para las 60 estaciones analizadas está en el Cuadro 3. Además de indicar la FDP con un mejor ajuste para cada una, con los resultados de la evaluación del ajuste, se define la ecuación (4) IDF mediante la definición de los parámetros de los que depende k , m y n .

Tanto la DAM como el EEM ofrecen valores medios alrededor de 25 con una variabilidad del 26 % y 28 %, respectivamente, teniendo en cuenta la serie completa. Si se analiza la bondad del ajuste para períodos de retorno superiores a 10 años, los valores

The FDPs used in this study were Gumbel, GEV, Log Pearson Type III (LPIII), and TERC (Table 1). All FDPs were adjusted using the method of moments (MO), except the GEV in which the L-moment (ML) method was used. The adjustments obtained in each station were evaluated using the D_{max} (1) and D_{rms} (2) versions of the Lilliefors test, (Hennemuth *et al.*, 2013) and the standard error adjustment (3) (EEA) (Kite, 1977).

$$D_{max} = \max|F_n(x) - F(x)| \tag{1}$$

$$D_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_n(x) - F(x))^2} \tag{2}$$

$$EEA = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{(N - m_j)}} \tag{3}$$

where $F(x)$: theoretical value of the distribution function of extreme values; $F_n(x)$: value of the empirical probability distribution function (FDP); x_i : past values of the sample; y_i : values obtained with the FDP; n : sample size; m_j : number of parameters of the FDP.

Once the best adjusted function has been selected, the analytical expressions of the IDF curves are also obtained, using the Aparicio (1997) method, based on the following equation: $I=K T^m D^{-n}$ (4), where T is the return period in years, D is the duration of the storm in minutes or hours, and I is the precipitation intensity in $mm h^{-1}$. If logarithms are extracted from each side of the equation, the result is a multiple linear regression model of the $\log I = \log k + m \log T - n \log D$ (5) type, where k , m , and n are the constants to be adjusted for each station. In order to verify the goodness-of-fit of the Aparicio equation (1997) in the real domain (Pandey and Nguyen, 1999), the mean absolute deviation (DAM) (6) and the standard error of the mean (EEM) (7) were used (Campos-Aranda, 2014).

Cuadro 2. Estadística básica de los ajustes de las FDP.
Table 2. Basic statistics of FDP adjustments.

	D_{max}				D_{rms}				EEA			
	Gumbel	TERC	GEV	LPIII	Gumbel	TERC	GEV	LPIII	Gumbel	TERC	GEV	LPIII
Media	0.15	0.14	0.12	0.13	0.07	0.07	0.06	0.06	5.38	10.25	11.54	9.24
C.V.(%)	22.90	28.80	22.50	30.10	24.90	28.40	18.10	27.00	57.90	60.40	44.10	41.60
Máximo	0.25	0.28	0.20	0.27	0.14	0.14	0.09	0.12	21.43	57.31	26.80	20.00
Mínimo	0.08	0.07	0.07	0.07	0.04	0.04	0.04	0.04	1.45	2.47	3.52	2.44

C.V.: Coeficiente de variación ♦ CV: Coefficient of Variation.

Cuadro 3. Síntesis de resultados.
Table 3. Summary of the results.

Nº	Nombre	Altitud (msnm)	FDP adoptada	Método de ajuste	Eval. del ajuste			Parámetros de la ecuación (4)				
					D_{\max}	D_{rms}	EEA	k	m	n	DAM	EEM
1	01A01P1	60	GUMBEL	MO	0.21	0.14	10.81	29.62	0.24	0.38	30.88	32.97
3	01A03P1	43	GUMBEL	MO	0.18	0.11	12.73	29.27	0.24	0.46	35.13	40.22
4	01E01P1	336	GEV	ML	0.11	0.09	27.67	30.46	0.17	0.61	42.73	51.34
5	01E02P1	83	GUMBEL	MO	0.15	0.10	8.17	21.81	0.22	0.42	30.88	23.29
6	01L01P1	138	GUMBEL	MO	0.16	0.10	9.09	19.74	0.24	0.60	29.89	36.07
7	01O02P1	280	GEV	ML	0.11	0.08	23.06	28.03	0.15	0.61	33.63	39.41
8	01O03P1	178	GEV	ML	0.11	0.08	23.12	27.47	0.16	0.61	33.55	39.07
9	01O04P1	106	GUMBEL	MO	0.15	0.13	9.26	25.30	0.18	0.47	25.33	27.24
10	01O05P1	55	GUMBEL	MO	0.16	0.11	8.90	24.33	0.22	0.49	26.45	29.40
11	01O06P1	210	GUMBEL	MO	0.14	0.10	8.84	23.90	0.24	0.41	26.75	29.75
12	01P02P1	417	LPIII	MO	0.10	0.08	13.36	20.85	0.28	0.34	19.85	21.18
13	01P03P1	677	GEV	ML	0.19	0.12	16.73	34.61	0.07	0.42	21.33	23.83
14	01P04P1	245	GEV	ML	0.14	0.13	17.69	23.22	0.32	0.31	30.07	31.72
15	01U01P1	244	GUMBEL	MO	0.13	0.10	9.23	34.61	0.23	0.34	35.06	37.63
16	02A01P1	216	GUMBEL	MO	0.19	0.12	5.83	20.27	0.20	0.40	16.04	17.44
17	02A02P1	118	GUMBEL	MO	0.20	0.15	14.49	30.75	0.23	0.49	35.84	40.05
18	02E01P1	281	GEV	ML	0.12	0.09	14.26	24.85	0.17	0.62	33.21	40.40
19	02E02P1	418	LPIII	MO	0.19	0.15	11.49	23.16	0.08	0.47	12.86	15.56
21	02E04P1	216	GUMBEL	MO	0.16	0.12	7.61	19.51	0.22	0.51	21.82	24.87
22	02O01P1	305	LPIII	MO	0.19	0.08	10.23	17.63	0.22	0.38	12.62	13.25
23	02O03P1	126	GUMBEL	MO	0.12	0.10	5.29	19.11	0.21	0.43	16.61	18.30
24	02P01P1	471	GUMBEL	MO	0.16	0.11	8.36	21.20	0.21	0.62	26.44	32.63
25	02P02P1	660	GUMBEL	MO	0.12	0.12	11.34	23.80	0.22	0.42	22.74	25.08
26	02P03P1	440	GUMBEL	MO	0.16	0.12	8.89	19.09	0.25	0.54	27.54	32.11
27	02P04P1	997	GEV	ML	0.11	0.08	16.64	21.25	0.24	0.48	27.68	30.11
28	02P05P1	989	GEV	ML	0.15	0.11	11.98	22.50	0.12	0.43	15.25	16.38
29	02P06P1	293	GEV	ML	0.13	0.10	10.24	22.46	0.20	0.41	12.02	15.33
30	02P07P1	1143	GEV	ML	0.10	0.09	19.15	17.16	0.36	0.65	39.13	47.31
32	02R01P1	166	LPIII	MO	0.13	0.11	21.41	14.32	0.34	0.54	24.11	27.48
33	03A03P1	270	LPIII	MO	0.19	0.12	17.44	16.33	0.32	0.47	19.62	21.31
34	03E02P1	515	GEV	ML	0.11	0.08	17.76	29.88	0.09	0.45	22.03	25.23
35	03E03P1	398	GUMBEL	MO	0.18	0.14	11.55	24.03	0.22	0.52	26.88	32.38
36	03L01P1	657	LPIII	MO	0.12	0.09	17.53	21.33	0.32	0.33	22.43	22.80
37	03P01P1	649	GEV	ML	0.13	0.11	16.46	25.58	0.20	0.37	22.82	24.01
41	04A02P1	366	GEV	ML	0.12	0.10	17.77	30.47	0.12	0.48	24.42	26.99
42	04A03P1	544	GEV	ML	0.17	0.10	14.33	22.67	0.10	0.53	18.25	20.82
43	04L01P1	830	GEV	ML	0.12	0.10	17.02	27.72	0.16	0.40	24.63	25.94
44	04N01P1	716	GUMBEL	MO	0.18	0.16	11.93	20.47	0.23	0.44	23.58	25.07
45	04N02P1	1534	LPIII	MO	0.11	0.07	10.51	20.64	0.20	0.38	16.77	17.82
46	05E02P1	697	GUMBEL	MO	0.21	0.15	14.38	28.17	0.25	0.40	33.24	35.85
47	05E03P1	454	GUMBEL	MO	0.18	0.14	12.99	27.52	0.24	0.41	31.73	34.17
48	05N01P1	1207	LPIII	MO	0.08	0.07	14.35	19.90	0.30	0.27	18.40	19.04
49	05O01P1	486	LPIII	MO	0.15	0.12	23.11	18.95	0.39	0.33	27.16	28.76
50	05P01P1	735	GUMBEL	MO	0.14	0.12	7.53	23.04	0.20	0.44	20.42	21.69
51	05P02P1	761	GEV	ML	0.19	0.13	15.89	25.19	0.09	0.59	21.36	25.33
52	05P03P1	707	GUMBEL	MO	0.16	0.11	8.54	24.82	0.22	0.45	25.29	28.21
53	05P04P1	833	GUMBEL	MO	0.17	0.12	12.14	26.71	0.24	0.48	33.24	37.87
54	05R01P1	331	GEV	ML	0.13	0.09	18.11	29.34	0.14	0.37	23.80	25.46
55	06L01P1	67	LPIII	MO	0.09	0.08	17.99	19.62	0.27	0.41	19.11	20.15
56	06M01P1	6	LPIII	MO	0.09	0.07	23.57	25.82	0.31	0.37	29.26	31.32

Cuadro 3. Continuación.

Nº	Nombre	Altitud (msnm)	FDP adoptada	Método de ajuste	Eval. del ajuste			Parámetros de la ecuación (4)				
					D_{max}	D_{rms}	EEA	k	m	n	DAM	EEM
57	06P01P1	94	LPIII	MO	0.13	0.08	19.45	27.66	0.26	0.32	26.44	27.12
58	06P02P1	57	TERC	MO	0.14	0.10	25.70	23.85	0.26	0.43	25.97	28.49
59	06P03P1	166	GUMBEL	MO	0.18	0.12	11.61	30.43	0.24	0.37	33.70	34.95
60	06P04P1	335	GUMBEL	MO	0.15	0.10	9.31	23.37	0.22	0.52	25.35	29.18
61	07A01P1	30	GUMBEL	MO	0.22	0.12	7.11	24.71	0.24	0.33	24.73	26.18
62	07A03P1	21	GUMBEL	MO	0.14	0.10	12.07	36.07	0.24	0.33	35.95	38.88
63	07A04P1	12	GEV	ML	0.13	0.10	23.27	33.44	0.20	0.38	35.36	38.05
64	07E01P1	114	TERC	MO	0.14	0.11	21.83	26.49	0.25	0.38	24.16	26.50
65	07E02P1	136	LPIII	MO	0.08	0.07	20.08	20.64	0.32	0.45	28.13	31.65
66	07U01P1	132	GUMBEL	MO	0.19	0.13	12.35	25.14	0.22	0.43	25.95	28.32

recogidos en la tabla se reducen a más de la mitad en la mayoría de los casos ya que todas las FDP sobreestiman las intensidades para períodos de retorno inferiores a 10 años pero ofrecen un ajuste óptimo para períodos de retorno superiores a 5-10 años.

Una vez estimados los parámetros de cada ecuación empírica para cada una de las estaciones consideradas, se podrán ponderar los valores de k , m y n de la ecuación (4) para cualquier localidad en cuenca del Río Segura, España, con base en la relación inversa al cuadrado, cuidando de transportar la información correspondiente al mismo piso altitudinal.

CONCLUSIONES

Todas las FDP estudiadas ofrecieron valores muy similares con la aplicación del test de Lilliefors en sus versiones de D_{max} y D_{rms} , pero es necesario el cálculo del EEA para realizar una comparativa efectiva entre las FDP y la selección de la mejor función para cada una de las estaciones consideradas. La función de Gumbel presentó un mejor ajuste en el 45 % de las estaciones de la cuenca, la GEV en el 32 % y la TERC sólo en dos de las 60 estaciones. El uso generalizado de la función TERC en España precisa de una revisión y estudio regionalizado que justifique o descarte su empleo.

El ajuste analítico de las curvas IDF mediante el método de regresión lineal (Aparicio, 1997) presentó sobreestimaciones para períodos de retorno inferiores a 10 años aunque las desviaciones para períodos de retorno superiores, utilizados en el dimensionamiento

$$DAM = \frac{1}{n - m_j} \sum_{i=1}^n |I_i^e - I_i^o| \tag{6}$$

$$EEM = \sqrt{\frac{1}{n - m_j} \sum_{i=1}^n (I_i^e - I_i^o)^2} \tag{7}$$

where I_i^e : estimated intensity; I_i^o : observed intensity

RESULTS AND DISCUSSION

Out of 60 stations studied, 27 had the best adjustment with the Gumbel function —representing 45 % of the basin—, while the GEV and LPIII FDP were used in 19 and 12 stations, respectively. The TERC function only had the best adjustment in two stations. If the basic statistical parameters of the D_{max} , D_{rms} , and EEA values obtained for all stations are analyzed, the mean values for both D_{max} and D_{rms} are very similar for all FDPs —ranging from 0.15 to 0.13 for D_{max} , and 0.07 to 0.06 for D_{rms} . Therefore, taking into consideration only the Lilliefors test, any of the studied FDPs offers good adjustments for the Segura River Basin (Table 2). A similar behavior is observed in the coefficients of variation (CV), although they show a wider range and smaller oscillations, for the Gumbel and GEV functions.

However, the major differences between the FDPs appear in the EEA. The Gumbel function has an average EEA value of 50 % less than the other functions. The maximum value of the TERC function is three times higher than other functions.

de las infraestructuras hidráulicas, se redujeron considerablemente. Esto avala el uso de las expresiones calculadas en cualquier punto de la cuenca mediante relaciones inversas al cuadrado de los valores calculados.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Confederación Hidrográfica del Segura su colaboración en el suministro de la información necesaria para llevar a cabo este estudio. Asimismo, los autores reconocen su agradecimiento a los comentarios realizados por los dos revisores anónimos y, especialmente, a las recomendaciones del editor, que han contribuido a la sustancial mejora del presente estudio. Todos los datos, tests aplicados y resultados de las curvas IDF procesadas, no mostrados por limitación de espacio, están disponibles con el autor.

LITERATURA CITADA

- Al-anazi, K. K. and I. H. El Sebaie. 2013. Development of intensity-duration-frequency relationships for Abha City in Saudi Arabia. *Int. J. Comput. Eng. Res.* 3: 58-65.
- Antigha, R.E. and N.M. Ogarekpe. 2013. Development of intensity duration frequency curves for Calabar metropolis, south-south, Nigeria. *Int. J. Eng. Sci.* 2: 39-42.
- Aparicio M., F.J. 1997. *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Limusa Grupo Noriega. México. 303 p.
- Bernard, M. M. 1932. Formulas for rainfall intensities of long durations. *Trans. ASCE* 96: 592-624.
- Bartels, R. 1982. The rank version of von Neumann's ratio test for randomness. *J. Am. Stat. Assoc.* 77 (377): 40-46.
- Bobée, B. and F. Ashkar. 1991. The Gamma Family and Derived Distributions Applied in Hydrology. Chapter 1: Data requirements for hydrologic frequency analysis (pp: 1–12). Littleton, Colorado, U.S.A.: Water Resources Publications. 203 p.
- Campos-Aranda, D. F. 2014. Obtención de ecuaciones empíricas para estimación de crecientes de diseño en la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa) de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 5: 125-143.
- Elsebaie, I. H. 2012. Developing rainfall intensity-duration-frequency relationship for two regions in Saudi Arabia. *J. of King Saud University-Engineering Sci.* 24: 131-140.
- Hennemuth, B., Bender, S., Bülow, K., Dreier, N., Keup-Thiel, E., Krüger, O., Mudersbach, C., Radermacher, and C., Schoetter, R. 2013. Statistical methods for the analysis of simulated and observed climate data. Report 13 of the Climate Service Center. Germany. 138 p.
- Hooke, J. M., and J. Mant. 2002. Floodwater use and management strategies in valleys of southeast Spain. *Land Degrad. Dev.* 13: 165-175.
- Jiang, P., and Y.K. Tung. 2013. Establishing rainfall depth-duration-frequency relationships at daily raingauge stations in Hong Kong. *J. Hydrol.* 504: 80-93.

The Gumbel function presents the lowest values in the basin. GEV and LPIII have an approximately 40 % variability, while the CV increases up to 60 %, for the Gumbel and TERC functions.

Table 3 includes a summary of the results obtained from the 60 stations analyzed. In addition to indicating which FDP fits better each one—based on the results of the adjustment evaluation—the IDF equation (4) is set by means of the definition of the parameters on which k, m and, n depend.

Taking into account the overall series, both DAM and EEM offer mean values around 25. with a 26 % and 28 % variability, respectively. If the goodness-of-fit is analyzed for 10+ years return periods, the values included in the table are reduced more than half in most of the cases, because all the FDPs overestimate the intensities for less than 10 years return periods, but offer an optimal adjustment for 5-10+ return periods.

Once the parameters of each empirical equation were calculated for each one of the stations under consideration, the k, m, and n values of the equation (4) can be weighted for any locality in the Segura River Basin, Spain, based on the inverse square relationship, taking care to transport the information corresponding to the same altitudinal floor.

CONCLUSIONS

All the FDPs studied offered very similar values when the D_{max} and D_{rms} versions of the Lilliefors test were applied, requiring the calculation of the *EEA*, in order to effectively compare the FDPs and the selection of the best function for each one of the stations under consideration. The Gumbel function was better fitted to 45 % of the basin stations, the GEV in 32 %, the TERC only at two of the 60 stations. The widespread use of the TERC function in Spain requires a regionalized review and study, in order to justify or discard its use.

The analytical adjustment of the IDF curves using the linear regression method (Aparicio, 1997) showed overestimations for return periods of less than 10 years. However, the deviations for higher return periods—regularly used to size hydraulic infrastructures—were significantly reduced. This validates the use of expressions calculated at any point of the basin, based on the inverse square relationship of the calculated values.

- Kite, G. W. 1977. Frequency and Risk Analyses in Hydrology. Chapter 12: Comparison of frequency distributions. Colorado, USA: Water Resources Publications. 224 p.
- Koutsoyiannis, D., D. Kozonis, and A. Manetas. 1998. A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *J. Hydrol.* 206: 118-135.
- Machado, M. J., G. Benito, M. Barriendos, and F.S. Rodrigo. 2011. 500 years of rainfall variability and extreme hydrological events in southern Spain drylands. *J. Arid Environ.* 75: 1244-1253.
- Mateus, A., and F. Caeiro. 2014. An R implementation of several Randomness Tests. Simos, T. E. Z. Kalogiratou, and T. Monovasilis (eds). *AIP Conf. Proc.* 1618: 531-534.
- Ministerio de Fomento. 1999. Máximas lluvias en la España peninsular. <http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/ABE22688-F967-4902-BA96-51FE8AB76145/55856/0610300.pdf> 55 pp. (Consulta: marzo 2016).
- Overeem, A., A. Buishand, and I. Holleman. 2008. Rainfall depth-duration-frequency curves and their uncertainties. *J. Hydrol.* 348: 124-134.
- Pandey, G. R., and V. T. V. Nguyen. 1999. A comparative study of regression based methods in regional flood frequency analysis. *J. Hydrol.* 225: 92-101.
- Pereyra D., D., J. A. A. Pérez S., y L. Gómez R. 2004. Ecuaciones que estiman las curvas intensidad-duración-periodo de retorno de la lluvia. *Geos* 24: 46-56.
- Pérez M., A., y S. Gil G. 2012. La avenida de 22 de octubre de 1948 en la cuenca del Segura. Revisión y análisis. *Estudios Geogr.* 73: 163-187.
- Rao, A. R., and K. H. Hamed. 2000. Flood Frequency Analysis. Theme 1.8: Tests on hydrologic data (pp: 12-21). Boca Raton, Florida, U.S.A.: CRC Press. 350 p.
- Romero D., A., y A. Maurandi G., 2000. Las inundaciones en la cuenca del Segura en las dos últimas décadas del siglo XX. Actuaciones de prevención. *Serie geográfica* 9: 93-120.
- Rossi, F., M. Fiorentino, and P. Versace. 1984. Two-component extreme value distribution for flood-frequency analysis. *Wat. Resour. Res.* 20 (7): 847-856.
- Salas R., L., and J. A. Fernández Y. 2007. In-site regionalization to estimate an intensity-duration-frequency law: a solution to scarce spatial data in Spain. *Hydrol. Process.* 21: 3507-3513.
- Sherman, C.W. 1931. Frequency and intensity of excessive rainfall at Boston, Massachusetts. *T. Am. Soc. Civ. Eng.* 95: 951-960.
- Svensson, C., R.T. Clarke, and D.A. Jones. 2007. An experimental comparison of methods for estimating rainfall intensity-duration-frequency relations for fragmentary records. *J. Hydrol.* 341: 79-89.
- Svensson, C., and D.A. Jones. 2010. Review of rainfall frequency estimation methods. Centre for ecology and hydrology. Wallingford. 33 p.
- Vélez, J. I., G. Poveda, O. J. Mesa, L.F. Salazar, S. C. Viera, J. F. Mejía, C. D. Hoyos, y D. I. Quevedo. 2002. Aplicación de diferentes metodologías para estimación de curvas intensidad-frecuencia-duración en Colombia. *In: Memorias XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica.* 1-5 octubre. Ciudad de La Habana, Cuba.
- WMO. 1971. Annexed III: Standard tests of significance to be recommended in routine analysis of climatic fluctuations. Climatic Change. Technical Note No. 79. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization. Reprinted. pp: 58-71.