

ANEJO 4

ESTUDIO HIDROLÓGICO



TUTOR: FERRER POLO, JOSÉ

COTUTOR: AGUADO GARCÍA, DANIEL

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS



AUTOR: GALINDO MARTÍN, VÍCTOR

Índice

1. Introducción	1	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	6
2. Datos de partida	1	APÉNDICES.....	7
3. Análisis precipitación.....	1	Apéndice 1 Ajuste de precipitaciones.....	8
3.1. Análisis de la información existente	1	Apéndice 2 Tormentas de diseño.....	13
3.2. Análisis estadístico local de la serie de máximos.....	1		
3.2.1. Funciones de distribución de máximos.....	1		
3.2.2. Estimación de parámetros.....	2		
3.2.3. Función de distribución empírica	2		
3.2.4. Test de bondad de ajuste.....	2		
3.2.5. Selección del modelo estadístico	3		
3.2.6. Cuantiles de precipitación	3		
3.3. Construcción de tormentas de diseño.....	3		
3.3.1. Método de los bloques alternos.....	3		
3.3.2. Curvas Intensidad, Duración y Frecuencia.....	4		
3.3.3. Tormentas de diseño	5		

1. Introducción

Es objeto de este Anejo, desde el punto de vista hidrológico, determinar la tormenta de proyecto, con el objetivo de proceder al correcto dimensionamiento de las infraestructuras de saneamiento atendiendo tanto a las aguas pluviales como a las aguas residuales procedentes del nuevo Sector Residencial.

Para ello, se ha recopilado información de una estación pluviométrica cercana al ámbito de la actuación, para un posterior tratamiento estadístico de los datos, a partir de los cuales se obtendrá un valor de precipitación media para cada periodo de retorno asociado al cálculo hidráulico de las conducciones.

2. Datos de partida

Los datos disponibles de partida proceden de tres estaciones pluviométricas, cercanas a la zona de actuación. Dichas estaciones son:

Estación: Embalse de Forata	
Indicativo	8318
Periodo	1979 - 2015
Años disponibles	35
Distancia: 15,2 km	Altitud: 401 m
Longitud: 00° 52' 0.72"	Latitud: 39° 20' 28"

Tabla 1 Información sobre la estación meteorológica Embalse de Forata.

Estación: Chiva	
Indicativo	8334
Periodo	1983, 1994 - 2015
Años disponibles	12
Distancia: 9,4 km	Altitud: 280 m
Longitud: 00° 43' 0.92"	Latitud: 39° 28' 25"

Tabla 2 Información sobre la estación meteorológica Chiva.

Estación: Turís – Masía – Calabarra	
Indicativo	8337
Periodo	1969 - 2015
Años disponibles	46
Distancia: 6,5 km	Altitud: 186 m
Longitud: 00° 37' 29.20"	Latitud: 39° 23' 32"

Tabla 3 Información sobre la estación meteorológica Turís - Masía – Calabarra.

En la elección de las estaciones pluviométricas se ha tenido en cuenta el número de años con registros, la disponibilidad de datos correspondientes a los últimos años y la cercanía a la zona de actuación.

De las tres estaciones de las que se disponían datos, se ha escogido finalmente la estación meteorológica de ¹Turís – Masía - Calabarra (Indicativo: 8337) al encontrarse a una distancia de la zona a estudio de aproximadamente 6,5 kilómetros y disponer de una larga serie histórica ininterrumpida. De los datos obtenidos de la nombrada estación, nos centraremos en los concernientes a la precipitación máxima diaria, pues estas, constituyen la fuente de precipitación histórica más representativa y completa para establecer relaciones entre cantidades de precipitación máximas estimadas y periodos de retorno.

¹ En adelante se citará dicha estación pluviométrica como Turís, para simplificar la redacción del documento.

3. Análisis precipitación

Se opta por el análisis estadístico de los valores máximos anuales registrados de precipitación máxima diaria, ya que aprovecha la información más reciente frente a otros métodos desactualizados.

3.1. Análisis de la información existente

En vistas al uso previo en los datos obtenidos en la estación pluviométrica, es necesario contemplar si dichos años de los que se disponen están completos, ya sea por ausencia de datos o por errores de la instrumentación. Por este motivo es necesario establecer unos criterios de aceptación para efectuar una criba de datos.

Dichos criterios serán: que los años hidrológicos no podrán exceder un número de fallos de cuatro por año y/o que falten los tres meses iniciales del año hidrológico, es decir, octubre, noviembre y diciembre.

Tras aplicar este criterio, de los 46 años hidrológicos, 45 cumplen los criterios establecidos, correspondiendo al periodo comprendido de 1979-80 a 2014-15.

3.2. Análisis estadístico local de la serie de máximos

3.2.1. Funciones de distribución de máximos

Para ello se ha realizado una selección de las distribuciones de probabilidad ampliamente utilizadas para variables hidrológicas, las distribuciones teóricas de máximos consideradas en el estudio son:

- Gumbel
- Square Root Exponential Type Distribution of the Maximum (SQRT-ET max)
- Generated Extreme Value (GEV)

Definiremos a continuación las características esenciales de las distribuciones seleccionadas:

Función de distribución de Gumbel

Fue concebida por el matemático alemán Emil Julius Gumbel, bautizada en su honor, la aplicabilidad de esta distribución para representar los máximos se debe a la teoría de valores extremos, en la que estuvieron involucrados también Leonard Tippett y Ronald Fisher.

Es la distribución de extremos de uso más extendido en el ámbito de la hidrología, con buenos resultados tras años de aplicación parece confirmar su utilidad en la resolución de problemas prácticos de ingeniería de dimensionamiento de redes de drenaje y diversas obras hidráulicas.

Su expresión analítica viene dada por:

$$F(x) = e^{-\lambda e^{-\theta x}} \quad - \infty < x < +\infty$$

Donde:

- x es el valor de la variable aleatoria, en este caso de aplicación, la precipitación diaria máxima anual.
- $F(x)$ es la probabilidad de que se presente un valor igual o menor que x
- θ es el parámetro de escala
- λ es el parámetro de forma.

El cuantíl asociado a un periodo de retorno se obtiene mediante la resolución matemática de la siguiente expresión:

$$T_{x_a} = \frac{1}{1 - F(x_a)}$$

Siendo:

x_a el cuantíl asociado a un periodo de retorno T_{x_a} , $F(x_a)$ la expresión analítica definida anteriormente en función de x_a .

Función de distribución SQRT-ET max

Este modelo de distribución de máximos fue concebido en 1986 por los ingenieros japoneses Etoh, Murrota y Nakanishi, cuenta con la ventaja de haber sido concebida de forma específica para modelar los máximos anuales de precipitación, además al contar con tan solo dos parámetros para caracterizar el ajuste cuenta con la misma precisión que el ajuste de la distribución de Gumbel, su expresión analítica es:

$$F(x) = e^{(-k(1+\sqrt{\alpha x}) \cdot e^{(-\sqrt{\alpha x}))}} \quad 0 \leq x < +\infty$$

Donde:

- x es el valor de la variable aleatoria, en este caso de aplicación, la precipitación diaria máxima anual.
- $F(x)$ es la probabilidad de que se presente un valor igual o menor que x
- k y α son los parámetros de forma y escala respectivamente, con $k > 0$ y $\alpha > 0$.

El cuantíl de precipitación asociado a un periodo de retorno concreto se obtendría de forma análoga a lo expuesto anteriormente, particularizando la expresión analítica.

Función de distribución GEV

La distribución de Valores Extremos Generalizada que también es conocida como la distribución de Fisher-Tippett, fue inicialmente introducida por Jenkinson en 1955. En investigaciones más recientes (Martins y Stedinger, 2000) expusieron que la probabilidad obtenida GEV están dentro de los valores representativos para la hidrología.

La expresión analítica de la distribución es:

$$F(x) = e^{\left[- \left(1 - \frac{\beta(x-x_0)}{\alpha} \right)^{1/\beta} \right]} \quad \begin{cases} -\infty < x \leq x_0 + \alpha/\beta & \text{si } \beta > 0 \\ x_0 + \alpha/\beta \leq x < +\infty & \text{si } \beta > 0 \\ -\infty < x < +\infty & \text{si } \beta = 0 \end{cases}$$

Donde:

- x es el valor de la variable aleatoria, en este caso de aplicación, la precipitación diaria máxima anual.
- $F(x)$ es la probabilidad de que se presente un valor igual o menor que x
- x_0 , α y β son los parámetros de la distribución.

El cuantíl asociado a un periodo de retorno definido se obtendría de forma análoga a lo expuesto anteriormente en la distribución Gumbel, particularizando la expresión analítica.

3.2.2. Estimación de parámetros

Cuyo objeto es ajustar la distribución de probabilidad de la variable aleatoria de la muestra observada, en el caso que nos acontece, la precipitación diaria máxima anual.

A continuación se describe el método escogido para la estimación de los parámetros de ajuste de las funciones de distribución seleccionadas.

El método de los Momentos ordinarios o iniciales, se encuentra entre los métodos más habituales, el cual considera que una estimación adecuada de los parámetros de una función de probabilidad es aquella para la cual los momentos de la función de densidad de probabilidad alrededor del origen son iguales a los momentos correspondientes a los datos. Es robusto y de sencilla aplicación.

Adicionalmente, tras los ajustes, se les ha sometido a un test de bondad de ajuste χ^2 , para facilitar la elección de la función de distribución más adecuada.

3.2.3. Función de distribución empírica

La asignación de probabilidades empíricas a los valores de la muestra exige su ordenación previa de todos los valores. Para la representación gráfica de los puntos de la serie, emplearemos la fórmula de Cunnane.

$$F_x(x_i^*) = \frac{i - \alpha}{n + 1 - 2\alpha}$$

Dado que dicha formulación x_i^* es la muestra ordenada de menor a mayor, es necesario realizar una ligera modificación a la expresión de Cunnane para así trabajar con los valores ordenados de mayor a menor. A este efecto, la expresión finalmente es:

$$F_x(x_i) = \frac{(n + 1) - i - \alpha}{n + 1 - 2\alpha}$$

Donde x_i es la muestra ordenada de mayor a menor (incluidos los valores repetidos), n es el tamaño de dicha muestra, i es el orden y α constante dependiente de la función a contrastar, en nuestro caso asumiremos un valor de 0.44.

3.2.4. Test de bondad de ajuste

Hablamos de bondad de ajuste cuando queremos comparar una distribución observada con los correspondientes de una distribución teórica. En nuestro caso, compararemos las distribuciones de máximos, anteriormente citadas, individualmente con la distribución empírica definida por Cunnane.

Un test adecuado de la hipótesis nula, de que los datos provienen de una población con distribución de Poisson, es el definido por el estadístico:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - c_i)^2}{c_i}$$

Donde las f_i y c_i son las frecuencias observadas y esperadas respectivamente, dicho estadístico es el denominado Test χ^2 .

3.2.5. Selección del modelo estadístico

La serie registrada por la estación de ¹Turís tiene una longitud de 45 años. El máximo de la serie se registró con un valor de 230,0 mm, dicho dato se encuentra ligado al evento de la gota fría de Octubre de 2000, concretamente fue registrado el día 22 obteniendo un total de lluvia acumulado, desde los días 21 al 25, de 396,0 mm.

A continuación se muestra el ajuste gráfico en primer lugar conjunto a los valores que definen cada distribución considerada, complementándose con los resultados obtenidos tras el test de bondad de ajuste.

El eje de ordenadas se reserva para la escala doble logarítmica definida por la variable y y el de abscisas para valores de máxima precipitación diaria expresada en mm/día.

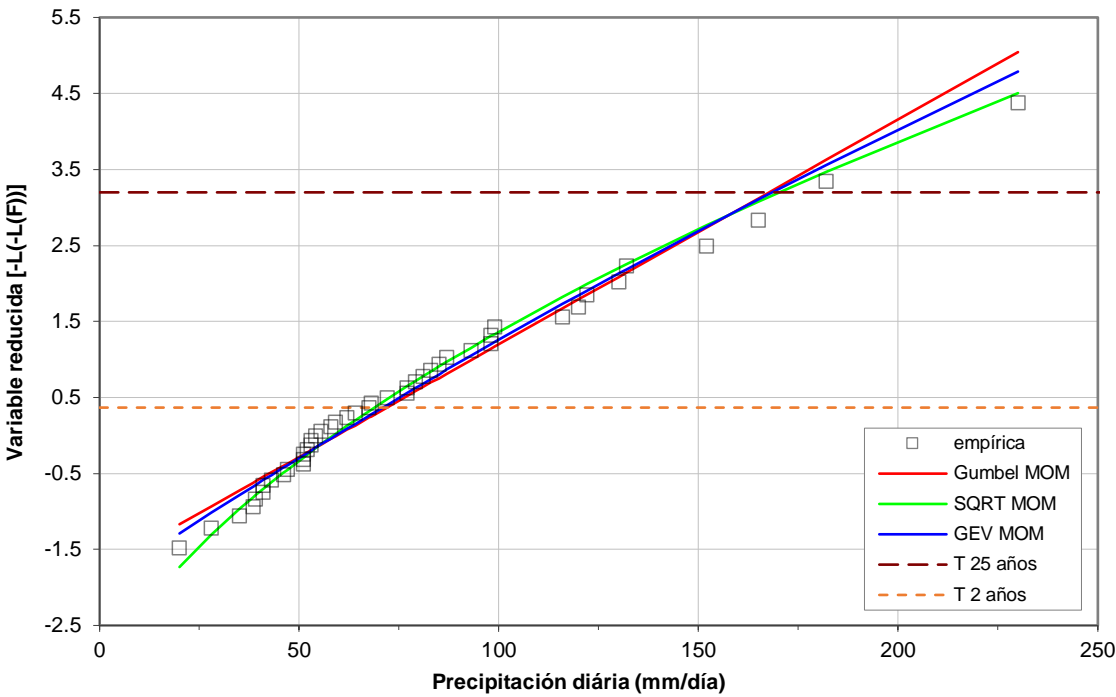


Figura 1 Funciones de distribución de extremos.

Los parámetros, obtenidos tras el pertinente ajuste, que definen a cada distribución son los siguientes:

- Gumbel $\lambda = 5,812646$ $\theta = 0,029581$
- SQRT-ET max $k = 29,184202$ $\alpha = 0,461465$
- GEV $x_0 = 59,178753$ $\alpha = 31,408481$ $\beta = -0,052171$

La muestra de datos de máximos diarios de precipitación parecen ajustarse con más naturalidad a la distribución SQRT-ET max, sin embargo no parece ser que se experimente lo mismo con la distribución generalmente más usada, Gumbel. La distribución GEV se encuentra entre ambas, de hecho los resultados arrojados por el test de bondad de ajuste corroboran dichas apreciaciones:

- Gumbel $\rightarrow \chi^2 = 76,184$
- SQRT-ET max $\rightarrow \chi^2 = 5,394$
- GEV $\rightarrow \chi^2 = 24,704$

En vista a los resultados obtenidos, se adopta la función de distribución SQRT-ET max para la el cálculo de los cuantiles requeridos.

3.2.6. Cuantiles de precipitación

Los cuantiles estimados asociados a distintos periodos de retorno según la distribución seleccionada y sus parámetros definidos son:

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de ocurrencia	Cuantil (mm/día)
2	0,500	68,74
5	0,800	104,56
10	0,900	131,79
25	0,960	170,14
50	0,980	201,39
100	0,990	234,75
200	0,995	270,29
500	0,998	320,68

3.3. Construcción de tormentas de diseño

Una vez obtenidos los valores de los cantiles de precipitación máxima diaria, nos encontramos en disposición para definir las tormentas de proyecto necesarias para el correcto diseño hidráulico de los colectores.

La construcción de las citadas tormentas, se realizarán mediante la definición de un hietograma por el método de los bloques alternos.

3.3.1. Método de los bloques alternos

Dicho método permite desarrollar de forma simple un hietograma de diseño utilizando una curva IDF. La distribución temporal de la lluvia según este método se basa en asumir, que para cualquier intervalo de tiempo la intensidad media más desfavorable.

En primer lugar se fijan n intervalos de tiempo de duración Δt , de manera que la duración total de la tormenta sea igual a $n \cdot \Delta t$. Seguidamente se obtienen, a partir de la curva IDF empleada, las intensidades de precipitación correspondientes a cada una de las duraciones, $i_T(k \cdot \Delta t)$.

El valor de intensidad correspondiente a cada uno de los n bloques se define de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} b_1 &= i_T(\Delta t) \\ \frac{b_1 + b_1}{2} &= i_T(2 \cdot \Delta t) \\ &\vdots \\ \frac{\sum_{j=1}^{k-1} b_j}{k} &= i_T(k \cdot \Delta t) \end{aligned}$$

Definiéndose la siguiente formulación, como la intensidad de un bloque k de n que conforman la tormenta:

$$b_k = k \cdot i_T(k \cdot \Delta t) - \sum_{j=1}^{k-1} b_j$$

Finalmente los bloques se reordenan en una secuencia temporal de manera que, la intensidad máxima esté localizada en el centro del hietograma y que los demás bloques queden en orden decreciente alternativamente de derecha a izquierda.

Para el caso que nos acontece, son necesarias dos tormentas diferenciadas:

Periodo de retorno de 2 años

Chubasco que se empleará en las comprobaciones de velocidades mínimas para asegurar las condiciones de autolimpieza de los colectores.

Periodo de retorno de 25 años

El cual será necesario para las comprobaciones de las velocidades máximas en las conducciones y evitar la erosión. Se ha decidido por un periodo de retorno de 25 años, en vez del habitual en infraestructuras de drenaje urbano de 10 años, al encontrarnos en una región donde se dan con frecuencia eventos de ciclogénesis explosiva o gota fría.

3.3.2. Curvas Intensidad, Duración y Frecuencia

Uno de los primeros pasos que se debe seguir en el diseño de un drenaje urbano es la determinación del evento o los eventos de lluvia que deben usarse. La forma más común de hacerlo es utilizar una tormenta de diseño que involucre una relación entre intensidad de lluvia, la duración y la frecuencia o periodo de retorno apropiados.

La curva Intensidad – Duración – Frecuencia empleada para la obtención de tormentas de diseño es la propuesta en la Instrucción 5.2 – IC de Drenaje Superficial de febrero de 2016, la cual se estipula de forma ligeramente diferente a la de 1990, las expresiones que la definen son:

$$I(T, t) = I_d \cdot F_{int}$$

Donde $I(T, t)$ es la intensidad de precipitación correspondiente a un periodo de retorno T y a una duración del aguacero t , se expresa en mm/h .

$$I_d = \frac{P_d \cdot K_A}{24}$$

Donde I_d es la intensidad media diaria de precipitación corregida correspondiente al periodo de retorno T , se expresa en mm/h . P_d es la precipitación diaria correspondiente al periodo de retorno T (los cuantiles de precipitación obtenidos anteriormente), se expresa en mm . K_A es el factor reductor de la precipitación por área de la cuenca, es adimensional.

$$K_A = 1 \rightarrow A < 1 \text{ km}^2$$

$$K_A = 1 - \frac{\log_{10} A}{15} \rightarrow A \geq 1 \text{ km}^2$$

En nuestro caso, la zona de estudio presenta una superficie total de $103.874,83 \text{ m}^2$, por tanto el factor reductor de la precipitación por área de la cuenca es 1.

Por otro lado tenemos F_{int} , que es el factor de intensidad que introduce la torrencialidad de la lluvia en el área de estudio y depende de la duración del aguacero y del periodo de retorno T si se dispone de una curva IDF de un pluviógrafo situado en el entorno de la zona de estudio. Como no disponemos de tal información, y F_{int} se define como el máximo entre el factor obtenido a partir del índice de torrencialidad (I_1/I_d) y el factor obtenido a partir de las curvas IDF de un pluviógrafo próximo, asumiremos que el máximo es el conocido.

Definiríamos pues el factor de intensidad en base al factor obtenido a partir del índice de torrencialidad como:

$$\left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{3.5287 - 2.5287 \cdot t^{0.1}}$$

El índice de torrencialidad se obtiene a través del siguiente mapa:

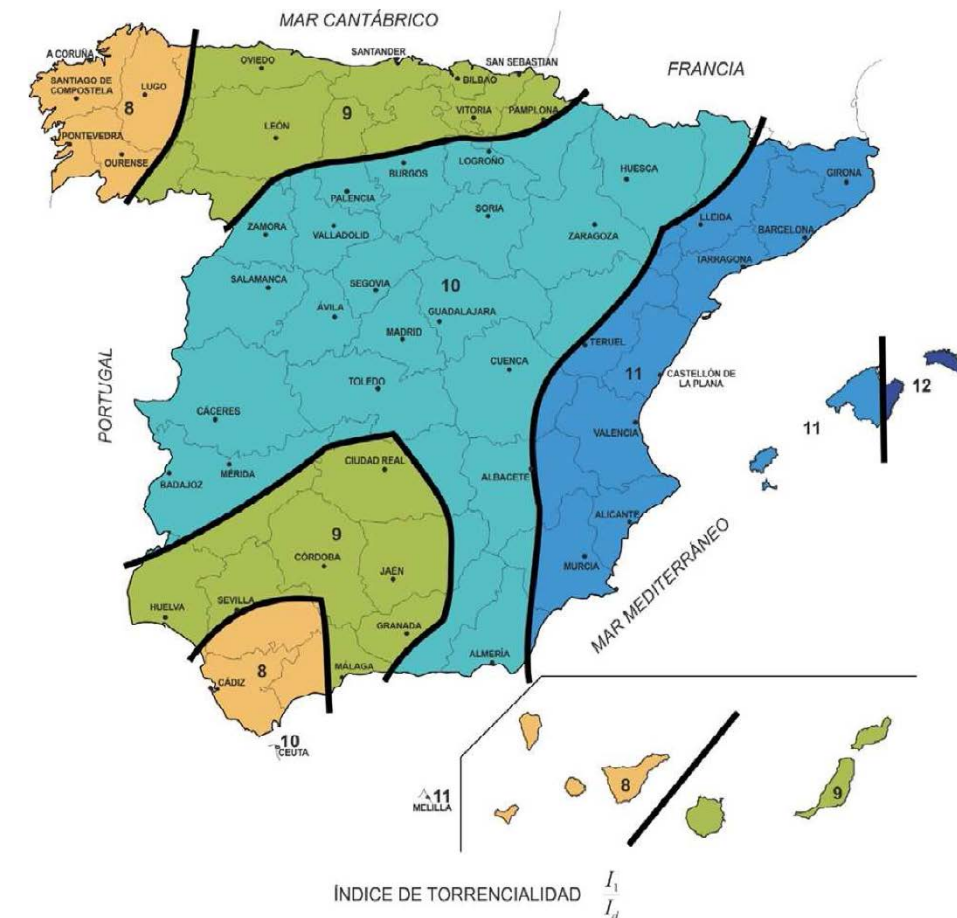


Figura 2 Mapa del Índice de Torrencialidad (I_1/I_d)

Adoptaremos un índice de torrencialidad de 11, pues la zona de estudio se encuentra en el término municipal de Turís en la Provincia de Valencia.

Una vez definidas todas las expresiones y valores necesarios, pasamos a definir gráficamente las Curvas IDF para la construcción de los hietogramas.

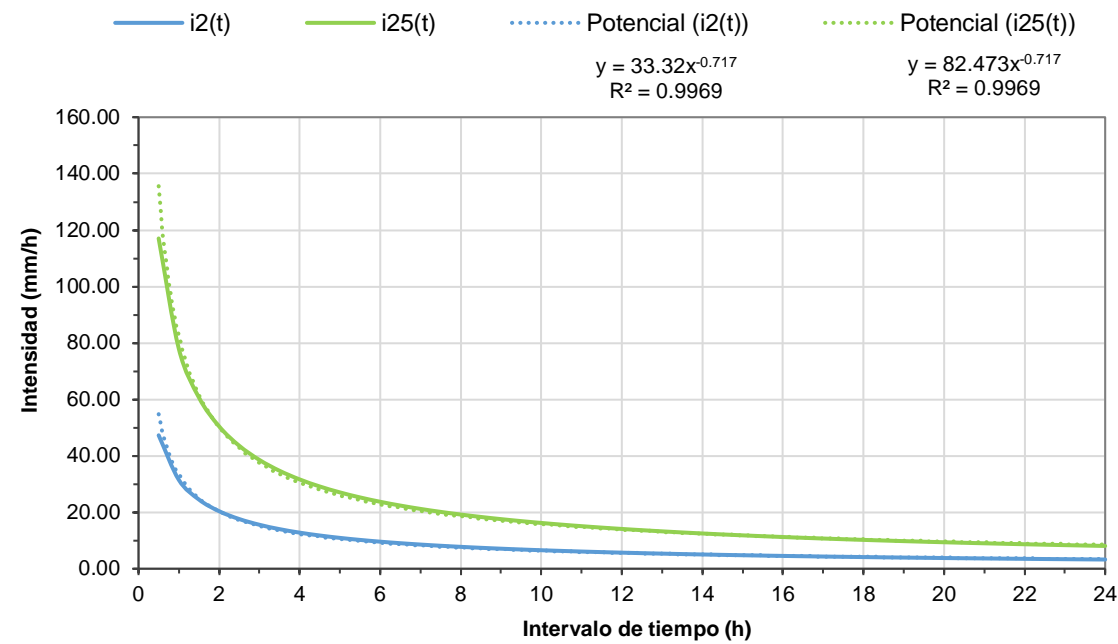


Figura 3 Curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia

3.3.3. Tormentas de diseño

Finalmente, tras todo lo expuesto en apartados anteriores, construimos los hietogramas correspondientes a cada periodo de retorno deseado mediante el método de los bloques alternos cuyas intensidades se obtendrán mediante las Curvas IDF definidas. Los hietogramas contarán con una discretización temporal seleccionada diezminutal, y una duración de las tormentas de 2 horas.

Los hietogramas resultantes que usaremos para las comprobaciones hidráulicas de las conducciones son:

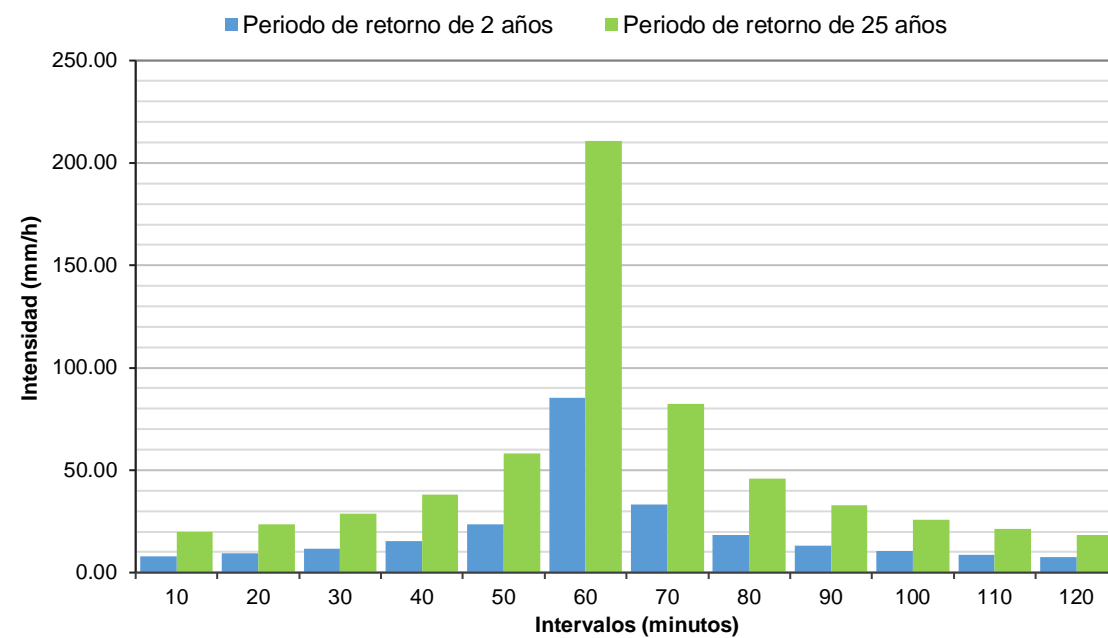


Figura 4 Tormentas de diseño

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FERRER POLO, F. J. (1996). *El modelo de función de distribución SQRT-ET max en al análisis regional de máximos hidrológicos: aplicación a lluvias diarias*. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

GÓMEZ VALENTÍN, M. (2007). *Hidrología urbana*. Barcelona: Instituto Flumen.

MILLER I. & E. FREUND, J. (1963). *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Barcelona: Ed. Reverté.

MINISTERIO DE FOMENTO (2016). *Norma 5.2 – IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras*. Madrid: Boletín Oficial del Estado.

VEN TE, C., R. MAIDMENT, D. & W. MAYS, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Colombia: Ed. Mc Graw Hill.

ZORRAQUINO JUNQUERA, C. (2000). *Estudio de la función SQRT-ET max*. Tesina de especialidad. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.

APÉNDICES

Apéndice 1

Ajuste de precipitaciones

Estación pluviométrica

Estación: Turís – Masía – Calabarra					
Indicativo	8337	Distancia	6,5 km	Altitud	186 m
Periodo	1969 - 2015	Longitud	00° 37' 29.20"	Latitud	39° 23' 32"
Años disponibles	46				

Tabla 4 Información sobre la estación meteorológica Turís - Masía – Calabarra

Datos y Análisis de precipitaciones

AÑO	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Nº Fallos	Aceptamos	Mes de máximo	Máximos (mm/día)
1969 - 1970				12	0	3,5	6,5	9	9	2	3	2	3	No	-	-
1970 - 1971	22,5	5	32	2	14	54	34	40	12	0	1,5	31	-	SI	Marzo	54
1971 - 1972	122	67	39	4	15	20	9,5	16,5	32	0	26	40	-	SI	Octubre	122
1972 - 1973	40	47	13	3	0	41	23	17	31	17	10	16	-	SI	Noviembre	47
1973 - 1974	10	1	33	4	18	98	39	12	10	27	35	0	-	SI	Marzo	98
1974 - 1975	12	0	0	2	24	51	6	18	19	0	9	21	-	SI	Marzo	51
1975 - 1976	23	77	52	0	15	0	18	23	17	18	21	11	-	SI	Noviembre	77
1976 - 1977	11	3	12	35	4,5	8	9	47	18	18	0	79	-	SI	Septiembre	79
1977 - 1978	30	17	120	9	5	4	15	10	11	0	0	0	-	SI	Diciembre	120
1978 - 1979	0	39	9	36	0	3,5	17	10,5	27	6	0	28	-	SI	Noviembre	39
1979 - 1980	14,5	0	0	67	68	5	61	28	35	0	15	15	-	SI	Febrero	68
1980 - 1981	0,5	42	5	14	18	0	130	2	12	0	0	39	-	SI	Abril	130
1981 - 1982	15	0	0	19	36	62	47	12	27	0	61	20	-	SI	Marzo	62
1982 - 1983	83	4	0	0	7	0	0	0	7	0,5	15	0	-	SI	Octubre	83
1983 - 1984	0,5	132	2	15	38	4	7	39,5	0,5	0	0	14	-	SI	Noviembre	132
1984 - 1985	3,5	116	64	11	15	0	5,5	9	0,5	1,5	0	23,5	-	SI	Noviembre	116
1985 - 1986	5	26	24	1,5	10	18	15	4	0	53	10	33	-	SI	Julio	53
1986 - 1987	152	16,5	0	83	29,5	0	0	11	0	14	2	9	-	SI	Octubre	152
1987 - 1988	57	182	17	50	11	0	32	29	35	0	0	46,5	-	SI	Noviembre	182
1988 - 1989	62	97	0	8	122	21	21,5	26	3	0	1	165	-	SI	Septiembre	165
1989 - 1990	4	82	98	52	0	5	12	27,5	0	1	0	24	-	SI	Diciembre	98
1990 - 1991	30	32	3	41	29	31	33	10	12,5	11	12	11	-	SI	Enero	41
1991 - 1992	87	24	64	4	62	6	4	34	43	0	2,5	0,5	-	SI	Octubre	87
1992 - 1993	14	0	59	15,5	21	22	11,5	8,5	8,5	5	3	28	-	SI	Diciembre	59
1993 - 1994	58	20	5	0	1,5	0,5	31	8,5	0	1,5	1,5	35,5	-	SI	Octubre	58
1994 - 1995	41	14	7	0	5	4,5	4,5	8	16	0	24	11	-	SI	Octubre	41
1995 - 1996	14	21	51,5	47,5	14,5	10	12	31	4	0	2	64	-	SI	Septiembre	64
1996 - 1997	5		38	17	4	3,5	36	46	9,5	3	19	52	1	SI	Septiembre	52
1997 - 1998	4	3	25	99	32,5	2	6	24,5	11	0	2,5	3,5	-	SI	Enero	99
1998 - 1999	0	12,5	81	21,5	3	19,5	7	11	16,5	12,5	1	42	-	SI	Diciembre	81
1999 - 2000	19	12	8,5	15,5	0	20	7	17,5	12	0	3,5	0,5	-	SI	Marzo	20

AÑO	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Nº Fallos	Aceptamos	Mes de máximo	Máximos (mm/día)
2000 - 2001	230	0	7	58	22,5	9,5	28	47	0	0	0		1	SI	Octubre	230
2001 - 2002	18	31	24	27	0	18	31,5	76	93	38	17	16	-	SI	Junio	93
2002 - 2003	27	0	27	10	40	11	44	51			0	6	2	SI	Mayo	51
2003 - 2004	36	15,5	8			52	72	39,5		1		27	4	SI	Abril	72
2004 - 2005	15	2,5	28	0,5	26	5	11	14,5	8	14	0	8	-	SI	Diciembre	28
2005 - 2006		38,5			23	6	16	16	0	0	1	24,5	3	SI	Noviembre	38,5
2006 - 2007	3	45	22		19,5	39,5	67,5	5	0	0	12	35	1	SI	Abril	67,5
2007 - 2008	77	0	22	7	28	2	2	33	35,5	6	0	19	-	SI	Octubre	77
2008 - 2009	55	31	52		5	42	10	0	0	0	1,5	85	1	SI	Septiembre	85
2009 - 2010	3	0	20	43	17	18	14	14		0,5	10	25	1	SI	Enero	43
2010 - 2011	35	11	7	6	0	35	19	12,5	0	8	1	25	-	SI	Marzo	35
2011 - 2012	10	38	6	37	3		14,5	0	0	11	0	55,5	1	SI	Septiembre	55,5
2012 - 2013	27	19	0	5	53	25,5	45	30	5	3	20	0	-	SI	Febrero	53
2013 - 2014	0		2,5	2,5	5	10	9	6	18	51	0	23	1	SI	Julio	51
2014 - 2015	2	33	26	6	6	46	1,5	12,5	21	28	7	16	-	SI	Marzo	46

Tabla 5 Precipitación máxima anual y criba de datos

e la serie de 45 años obtenemos los siguientes estadísticos:

Media	79,0111
Varianza	1.879,84
Desviación Estándar	43,3571
Coeficiente de Asimetría	1,49033
Coeficiente de Varianción	0,548746
Kurtosis	4,89889

Ajuste mediante distribución Gumbel

Definiéndose los momentos de la distribución como:

$$\mu_x = \lambda + 0,5772 \cdot \theta$$

$$\sigma_x^2 = \frac{\pi^2}{6} \cdot \theta^2$$

$$\gamma_x = 1,1396$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones teniendo en cuenta los estadísticos del apartado anterior, obtenemos los parámetros del ajuste mediante el método de los momentos ordinarios o iniciales:

$$\lambda = 5,812646 \quad \theta = 0,029581$$

Tras dichos ajustes obtenemos los siguientes cuantiles de precipitación asociados a determinados periodos de retorno:

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de ocurrencia	Cuantíl (mm/día)
2	0,500	71,89
5	0,800	110,20
10	0,900	135,57
25	0,960	167,63
50	0,980	191,41
100	0,990	215,01
200	0,995	238,53
500	0,998	269,55

Ajuste mediante distribución SQRT-ET max

El momento de orden r respecto al origen alfa-r responde a la siguiente expresión:

$$\alpha_r = \frac{\beta}{1-e^{-\beta}} \cdot \frac{1}{2\alpha^r} \cdot I_r \quad \text{siendo} \quad I_r = \int_0^\infty z^r e^{-\sqrt{z}} e^{-\beta[1+\sqrt{z}e^{-\sqrt{z}}]} dz$$

Definiéndose los momentos de la distribución como:

$$\mu_x = \alpha_1 - \frac{\beta}{1-e^{-\beta}} \cdot \frac{I_r}{2\alpha}$$

$$C_v = \frac{\sqrt{\alpha_2 - \alpha_1^2}}{\alpha_1}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones teniendo en cuenta los estadísticos de la serie de precipitación, obtenemos los parámetros del ajuste mediante el método de los momentos ordinarios o iniciales:

$$k = 29,184202$$

$$\alpha = 0,461465$$

Obtenemos los siguientes cuantiles de precipitación asociados a determinados periodos de retorno, según el ajuste realizado:

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de ocurrencia	Cuantíl (mm/día)
2	0,500	68,74
5	0,800	104,56
10	0,900	131,79
25	0,960	170,14
50	0,980	201,39
100	0,990	234,75
200	0,995	270,29
500	0,998	320,68

Ajuste mediante distribución GEV

Se definen los momentos como:

$$\mu_x = x_0 + (\alpha/\beta)[1 - \Gamma(1 + \beta)]$$

$$\sigma_x^2 = (\alpha/\beta)^2[\Gamma(1 + 2\beta) - \Gamma^2(1 + \beta)]$$

$$\gamma_x = \pm \frac{-\Gamma(1 + 3\beta) + 3\Gamma(1 + \beta)\Gamma(1 + 2\beta) - 2\Gamma^3(1 + \beta)}{[\Gamma(1 + 2\beta) - \Gamma^2(1 + \beta)]^{3/2}}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones teniendo en cuenta los estadísticos de la serie de precipitación, obtenemos los parámetros del ajuste mediante el método de los momentos ordinarios o iniciales:

$$x_0 = 59,178753$$

$$\alpha = 31,408481$$

$$\beta = -0,052171$$

Una vez obtenidos dichos ajustes, obtenemos los siguientes cuantiles de precipitación asociados a determinados periodos de retorno:

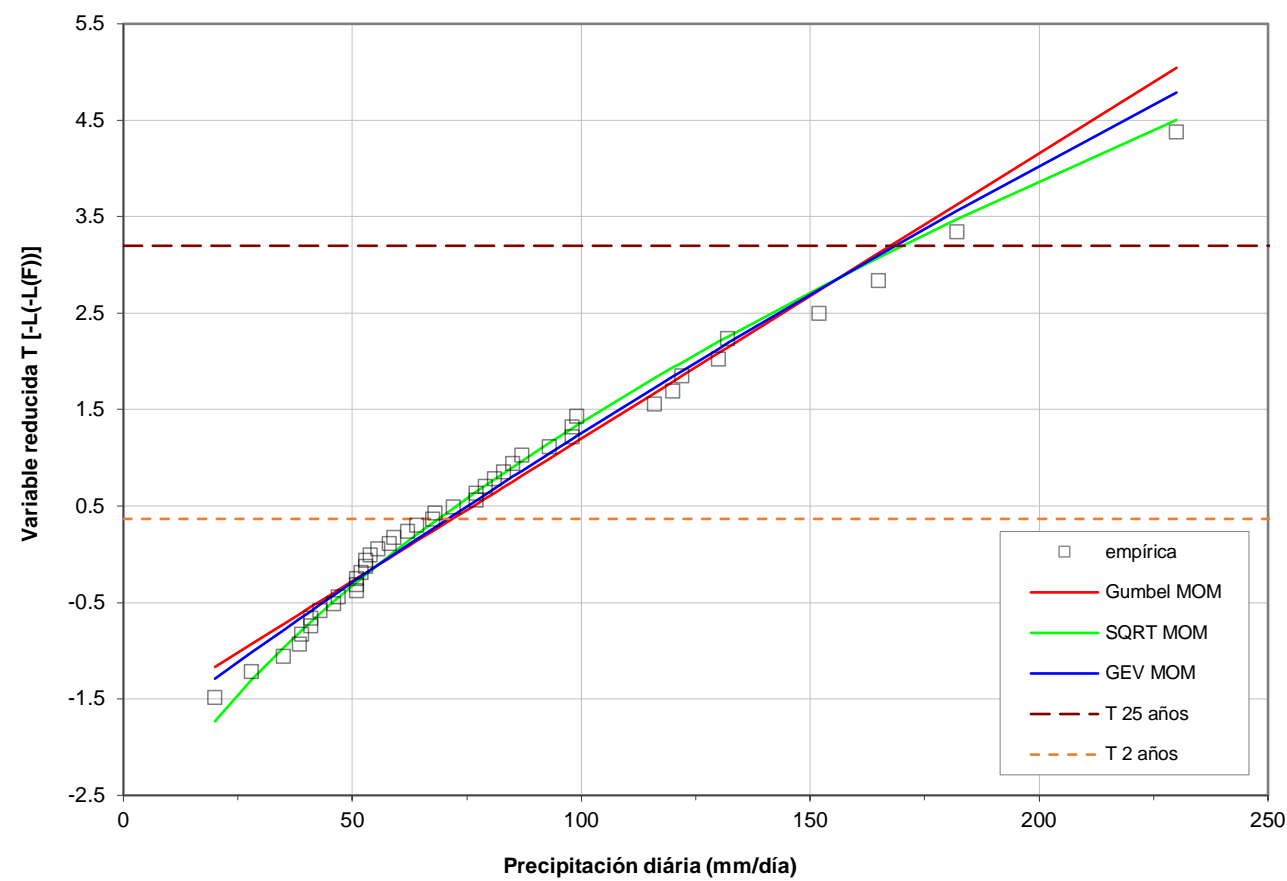
Periodo de retorno (años)	Probabilidad de ocurrencia	Cuantíl (mm/día)
2	0,500	70,80
5	0,800	108,18
10	0,900	134,18
25	0,960	168,51
50	0,980	195,10
100	0,990	222,47
200	0,995	250,76
500	0,998	289,69

Comparación de distribuciones

Orden	Precipitación (mm/día)	Probabilidad Empírica	Periodo de retorno (T en años)			
			Cunnane	Gumbel (MOM)	SQRT-Etmax (MOM)	GEV (MOM)
1	230	0,9876	80,57	155,53	90,85	120,53
2	182	0,9654	28,92	37,98	32,70	35,62
3	165	0,9433	17,63	23,17	22,21	22,79
4	152	0,9211	12,67	15,94	16,36	16,12
5	132	0,8989	9,89	9,05	10,05	9,43
6	130	0,8768	8,12	8,56	9,56	8,94
7	122	0,8546	6,88	6,87	7,82	7,22
8	120	0,8324	5,97	6,50	7,43	6,84
9	116	0,8103	5,27	5,84	6,71	6,15
10	99	0,7881	4,72	3,74	4,33	3,94
11	98	0,7660	4,27	3,65	4,22	3,84
12	98	0,7438	3,90	3,65	4,22	3,84
13	93	0,7216	3,59	3,22	3,70	3,38
14	87	0,6995	3,33	2,79	3,17	2,91
15	85	0,6773	3,10	2,67	3,01	2,77
16	83	0,6551	2,90	2,55	2,86	2,64
17	81	0,6330	2,72	2,43	2,72	2,52
18	79	0,6108	2,57	2,33	2,58	2,41
19	77	0,5887	2,43	2,23	2,45	2,30
20	77	0,5665	2,31	2,23	2,45	2,30
21	72	0,5443	2,19	2,00	2,17	2,05
22	68	0,5222	2,09	1,85	1,96	1,88
23	67,5	0,5000	2,00	1,83	1,94	1,86
24	64	0,4778	1,92	1,71	1,79	1,74
25	62	0,4557	1,84	1,65	1,71	1,67
26	59	0,4335	1,77	1,57	1,60	1,58
27	58	0,4113	1,70	1,54	1,56	1,55
28	55,5	0,3892	1,64	1,48	1,48	1,48
29	54	0,3670	1,58	1,45	1,44	1,44
30	53	0,3449	1,53	1,42	1,41	1,42
31	53	0,3227	1,48	1,42	1,41	1,42

Orden	Precipitación (mm/día)	Probabilidad Empírica	Periodo de retorno (T en años)			
			Cunnane	Gumbel (MOM)	SQRT-Etmax (MOM)	GEV (MOM)
32	52	0,3005	1,43	1,40	1,38	1,40
33	51	0,2784	1,39	1,38	1,36	1,37
34	51	0,2562	1,34	1,38	1,36	1,37
35	51	0,2340	1,31	1,38	1,36	1,37
36	47	0,2119	1,27	1,31	1,26	1,29
37	46	0,1897	1,23	1,29	1,24	1,28
38	43	0,1676	1,20	1,24	1,19	1,23
39	41	0,1454	1,17	1,22	1,15	1,20
40	41	0,1232	1,14	1,22	1,15	1,20
41	39	0,1011	1,11	1,19	1,12	1,17
42	38,5	0,0789	1,09	1,18	1,12	1,17
43	35	0,0567	1,06	1,15	1,08	1,13
44	28	0,0346	1,04	1,09	1,03	1,07
45	20	0,0124	1,01	1,04	1,00	1,03

Representación gráfica de la comparativa

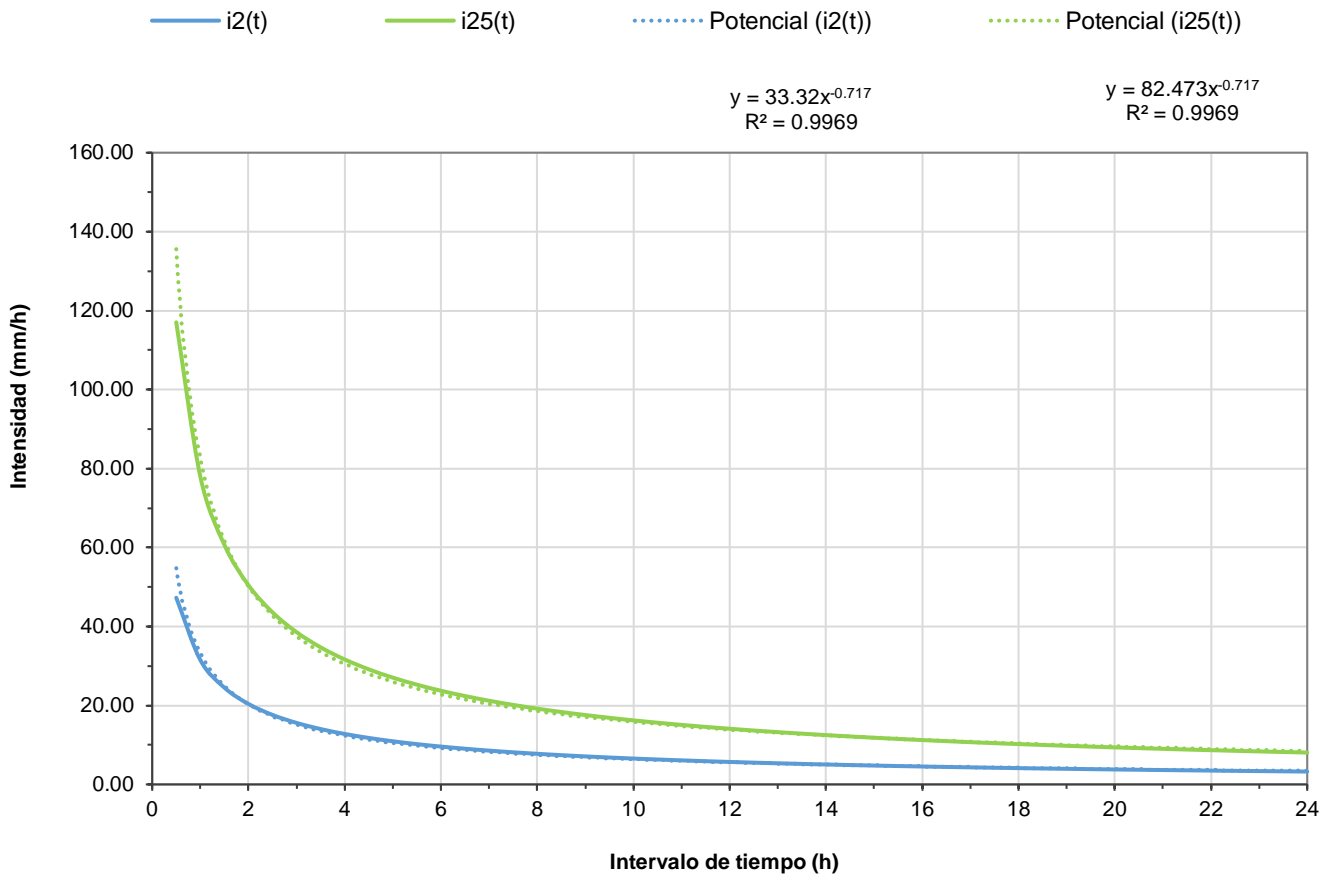


Apéndice 2

Tormentas de diseño

t (horas)	i ₂ (t) (mm/h)	i ₂₅ (t) (mm/h)
16,5	4,4287	10,9617
17	4,3237	10,7018
17,5	4,2238	10,4546
18	4,1287	10,2192
18,5	4,0380	9,9947
19	3,9514	9,7804
19,5	3,8686	9,5755
20	3,7894	9,3795
20,5	3,7135	9,1916
21	3,6408	9,0115
21,5	3,5709	8,8387
22	3,5039	8,6726
22,5	3,4393	8,5129
23	3,3773	8,3593
23,5	3,3175	8,2113
24	3,2598	8,0687

La representación gráfica de lo obtenido anteriormente, resultan ser las curvas IDF que se adoptarán para la construcción de las tormentas de diseño:



Hietogramas

Aplicando el método de los bloques alternos para la construcción de los hietogramas el valor de intensidad correspondiente a cada uno de los n bloques se define de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} b_1 &= i_T(\Delta t) \\ \frac{b_1 + b_1}{2} &= i_T(2 \cdot \Delta t) \\ &\vdots \\ \frac{\sum_{j=1}^{k-1} b_j}{k} &= i_T(k \cdot \Delta t) \end{aligned}$$

Definiéndose la siguiente formulación, como la intensidad de un bloque k de n que conforman la tormenta:

$$b_k = k \cdot i_T(k \cdot \Delta t) - \sum_{j=1}^{k-1} b_j$$

Finalmente los bloques se reordenan en una secuencia temporal de manera que, la intensidad máxima esté localizada en el centro del hietograma y que los demás bloques queden en orden decreciente alternativamente de derecha a izquierda.

Dando como resultado lo siguiente para el periodo de retorno:

Periodo de retorno de 2 años

k _i	b _i	Y (mm/h)	X (h)	X (min)
1	85,19	7,98	0,17	10
2	33,23	9,46	0,33	20
3	23,45	11,68	0,50	30
4	18,50	15,41	0,67	40
5	15,41	23,45	0,83	50
6	13,27	85,19	1,00	60
7	11,68	33,23	1,17	70
8	10,45	18,50	1,33	80
9	9,46	13,27	1,50	90
10	8,65	10,45	1,67	100
11	7,98	8,65	1,83	110
12	7,40	7,40	2,00	120

Periodo de retorno de 25 años

k_i	b_i	Y (mm/h)	X (h)	X (min)
1	210,85	19,74	0,17	10
2	82,24	23,43	0,33	20
3	58,03	28,91	0,50	30
4	45,78	38,14	0,67	40
5	38,14	58,03	0,83	50
6	32,84	210,85	1,00	60
7	28,91	82,24	1,17	70
8	25,86	45,78	1,33	80
9	23,43	32,84	1,50	90
10	21,42	25,86	1,67	100
11	19,74	21,42	1,83	110
12	18,31	18,31	2,00	120

Finalmente representados gráficamente los hietogramas correspondientes a los periodos de retorno de 2 y 25 años:

