



ANEJO 4: HIDROLOGÍA



ANEJO 4: HIDROLOGÍA

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. ESTACIÓN METEOROLÓGICA.....	3
3. CÁLCULO DE LA MÁXIMA PRECIPITACIÓN DIARIA PARA LOS DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO.....	4
3.1. PARÁMETROS ESTADÍSTICOS.....	4
3.2. MÉTODO LOCAL. DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL.....	5
3.3. MÉTODO REGIONAL.....	6
4. ELECCIÓN DEL VALOR DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA DIARIA.....	10
5. HIETOGRAMA DE PROYECTO.....	10



1. INTRODUCCIÓN

En el presente anejo se recogen los cálculos efectuados para obtener los datos de lluvias para el diseño de la lluvia de proyecto correspondientes a los distintos períodos de retorno en el ámbito de estudio de la población de Vilamarín

Los datos de lluvia han sido obtenidos de la serie histórica de la base de datos de AEMET.

Los cálculos se han realizado en base a dos métodos, el Método Local y el Método Regional Adoptado, escogiendo el resultado más desfavorable de los dos obtenidos.

Se han seguido los siguientes pasos:

- Identificación de las cuencas de estudio y obtención de las características significativas de las mismas.
- Selección de la estación meteorológica de referencia para la obtención de los datos de precipitaciones máximas diarias en cada año.
- Obtención de la precipitación máxima correspondiente a distintos períodos de retorno según el métodos de Gumbel y SQRT-Max.
- Obtención de la serie de caudales a partir de los datos de precipitaciones máximas. A continuación se desarrolla cada uno de los pasos anteriores.

A continuación se desarrolla cada uno de los pasos anteriores.

2. ESTACIÓN METEOROLÓGICA

A partir de la base de datos facilitada por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), figuran las existencias de las estaciones meteorológicas de Galicia con datos de precipitación y temperatura.

A partir del mismo se han localizado las estaciones operativas en la zona, más próximas al ámbito de estudio, de forma que las mismas cubriesen la zona de nuestra población.

La elección de la estación a considerar se basa en criterios de fiabilidad y homogeneidad de datos y situación relativa de las estaciones.

Se ha seleccionado como estación meteorológica para el presente estudio la estación 1.690A Ourense.

La razón de seleccionar esta estación, además de la cercanía a la zona de estudio, unos 17 km de nuestra población, es que cuenta con un número suficiente de datos para poder realizar sobre los mismos el análisis estadístico necesario.

Las características de la misma se recogen en el siguiente esquema:

Datos para la estación meteorológica de Ourense			
PROVINCIA:	Ourense	LATITUD:	421931N
INDICATIVO:	1.690A	LONGITUD:	075135W
ALTITUD:	143		

Datos de precipitaciones máximas recogidos en la estación meteorológica:

Precipitaciones máximas en 24 horas									
Año	P (mm)	Año	P (mm)	Año	P (mm)	Año	P (mm)	Año	P (mm)
1980	46,3	1988	48,5	1996	47,7	2004	42,5	2012	26,7
1981	41,3	1989	49,2	1997	75,5	2005	36,8	2013	49,8
1982	26,8	1990	48,8	1998	28,9	2006	54,7	2014	41,0
1983	36,8	1991	38,1	1999	77,8	2007	24,2	2015	53,0
1984	33,0	1992	50,7	2000	43,5	2008	42,0		
1985	31,2	1993	45,8	2001	43,0	2009	65,0		
1986	56,9	1994	54,3	2002	96,2	2010	58,7		
1987	54,9	1995	41,1	2003	41,8	2011	79,7		

3. CÁLCULO DE LA MÁXIMA PRECIPITACIÓN DIARIA PARA LOS DISTINTOS

PERIODOS DE RETORNO

3.1. PARÁMETROS ESTADÍSTICOS

Estos parámetros extraen información de la muestra, indicando las características de la población. Los principales estadísticos son:

- **Media aritmética:** es el valor esperado de la variable misma. Primer momento respecto a la origen. Muestra la tendencia central de la distribución. Su valor se determinara según la siguiente expresión:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{36} \cdot 1762,2 = 48,95 \text{ mm}$$

Donde:

x_i : Precipitación máxima en 24 horas en mm.

n : Número de observaciones.

- **Varianza:** mide la variabilidad de los datos. Es el segundo momento respecto a la media. En general, es un indicador que indica cuanto cerca de la media está el valor de la variable. Siendo su valor estimado a partir de la siguiente expresión:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{36-1} \cdot 8.639,36 = 246,839 \text{ mm}$$

La raíz cuadrada de la varianza se llama desviación estándar (s). La desviación estándar es el parámetro de dispersión más usado en hidrología.

- **Coefficiente de asimetría:** es el tercer momento alrededor de la media. Describe la distribución de los datos alrededor de la media. Es un parámetro muy usado en estudios regionales.

3.2. MÉTODO LOCAL. DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL

El método propuesto en las “Recomendaciones para el Cálculo Hidrometeorológico de Avenidas” del CEDEX es la Caracterización estadística de la lluvia, que consta de las siguientes fases:

- Primeramente deberemos obtener las máximas precipitaciones diarias (P_d), de N años. En nuestro caso con 25 años será suficiente ya que es el máximo que nos fija la Instrucción de Carreteras para el diseño de colectores. A pesar de esto, emplearemos el total de las 36 muestras que ya hemos obtenido para realizar el cálculo por el Método de Gumbel en el apartado anterior, calculando así un dato con una mayor exactitud.

Por lo tanto nuestro valor de N será de 36, ($N = 36$).

- Ordenaremos los valores de las máximas precipitaciones diarias (P_d) de forma creciente, atribuyendo al valor situado en el lugar “ n ” la frecuencia F , tal que:

$$F = \frac{2n - 1}{2N}$$

P (mm)	n	F	P (mm)	n	F	P (mm)	n	F
24,2	1	0,014	41,8	13	0,347	50,7	25	0,681
26,7	2	0,042	42,0	14	0,375	53,0	26	0,708
26,8	3	0,069	42,5	15	0,403	54,3	27	0,736
28,9	4	0,097	43,0	16	0,431	54,7	28	0,764
31,2	5	0,125	43,5	17	0,458	54,9	29	0,792
33,0	6	0,153	45,8	18	0,486	56,9	30	0,819
36,8	7	0,181	46,3	19	0,514	58,7	31	0,847
36,8	8	0,208	47,7	20	0,542	65,0	32	0,875
38,1	9	0,236	48,5	21	0,569	75,5	33	0,903
41,0	10	0,264	48,8	22	0,597	77,8	34	0,931
41,1	11	0,292	49,2	23	0,625	79,7	35	0,958
41,3	12	0,319	49,8	24	0,653	96,2	36	0,986

- Para proseguir con el método, deberemos establecer el periodo de retorno T de cada dato:

$$T = \frac{1}{1 - F}$$

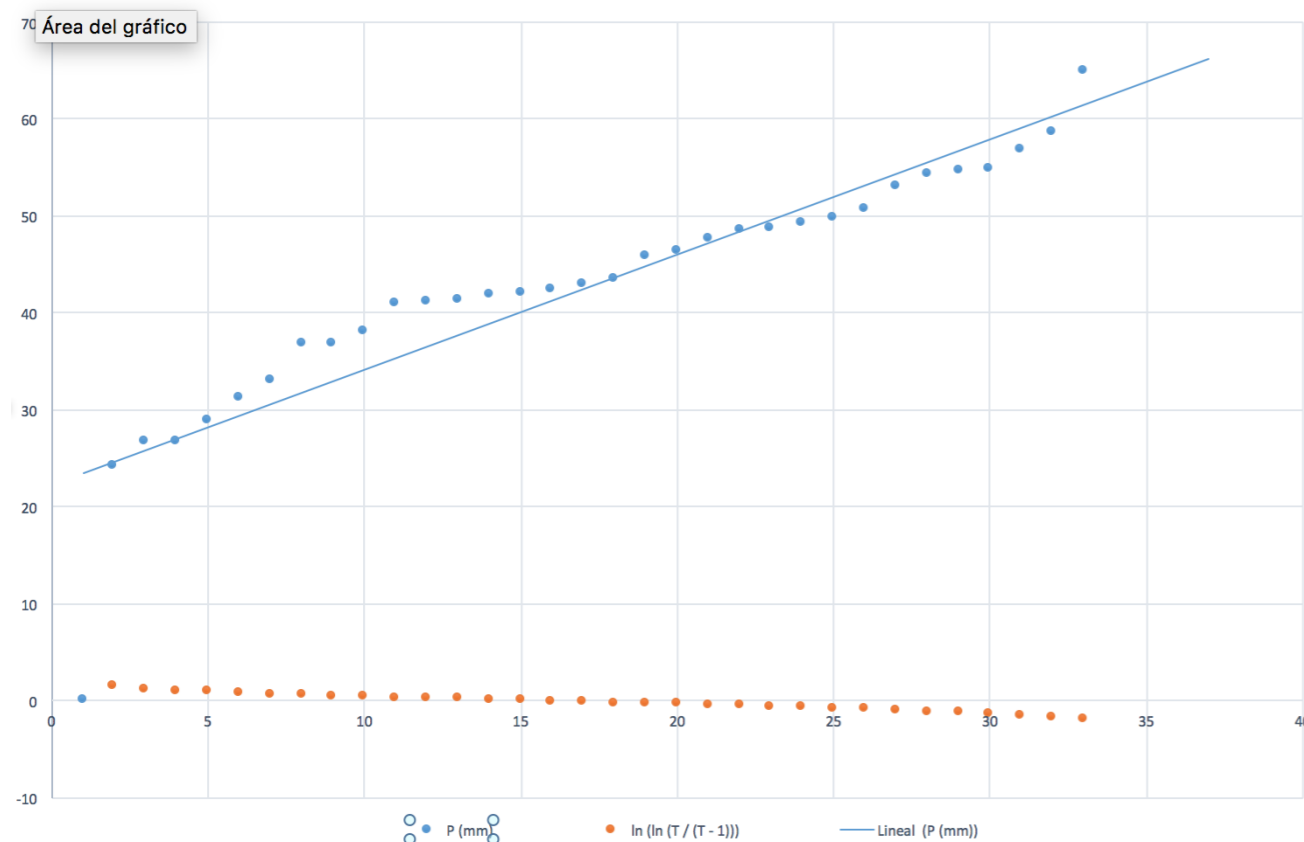
P (mm)	T	P (mm)	T	P (mm)	T	P (mm)	T
24,2	1,014	41,1	1,412	48,5	2,320	58,7	6,536
26,7	1,044	41,3	1,468	48,8	2,481	65,0	8,000
26,8	1,074	41,8	1,531	49,2	2,667	75,5	10,309
28,9	1,107	42,0	1,600	49,8	2,881	77,8	14,493
31,2	1,143	42,5	1,675	50,7	3,135	79,7	23,810
33,0	1,181	43,0	1,757	53,0	3,425	96,2	71,429
36,8	1,221	43,5	1,845	54,3	3,788		
36,8	1,263	45,8	1,946	54,7	4,237		
38,1	1,309	46,3	2,058	54,9	4,808		
41,0	1,359	47,7	2,183	56,9	5,525		

- La última parte del método, consiste en ajustar mediante mínimos cuadrados la siguiente expresión:

$$P_d = -\frac{K_2}{K_1} + \frac{1}{K_1} \ln\left(\ln \frac{T}{T-1}\right)$$

P (mm)	$\ln\left(\ln \frac{T}{T-1}\right)$	P (mm)	$\ln\left(\ln \frac{T}{T-1}\right)$	P (mm)	$\ln\left(\ln \frac{T}{T-1}\right)$	P (mm)	$\ln\left(\ln \frac{T}{T-1}\right)$
24,2	1,455	41,1	0,208	48,5	-0,573	58,7	-1,795
26,7	1,153	41,3	0,134	48,8	-0,662	65,0	-2,013
26,8	0,984	41,8	0,057	49,2	-0,755	75,5	-2,282
28,9	0,849	42,0	-0,019	49,8	-0,853	77,8	-2,638
31,2	0,732	42,5	-0,096	50,7	-0,953	79,7	-3,149
33,0	0,629	43,0	-0,172	53,0	-1,063	96,2	-4,262
36,8	0,536	43,5	-0,247	54,3	-1,182		
36,8	0,450	45,8	-0,327	54,7	-1,312		
38,1	0,367	46,3	-0,407	54,9	-1,456		
41,0	0,286	47,7	-0,490	56,9	-1,611		

Ajuste de los resultados



El coeficiente de asimetría, para la corrección de posibles desvíos:

Esta asimetría para el método de Gumbel es constante: $C_s = \pm 1,1396$

MÉTODO DE GUMBEL			
Periodo de retorno (T)	Xt (mm)	Coeficiente de asimetría	Precipitación máxima (mm)
2	26,00	$\pm 1,1396$	27,14
5	28,00	$\pm 1,1396$	29,14
10	34,50	$\pm 1,1396$	35,64
25	52,50	$\pm 1,1396$	53,64

3.3. CÁLCULO MEDIANTE EL MÉTODO REGIONAL ADOPTADO

El enfoque de este método asume la existencia de una región homogénea respecto a algunas características estadísticas de la lluvia, permitiendo aprovechar de este modo la información en dicha región.

El método regional adoptado, denominado tradicionalmente “índice de avenida”, asume que la variable Y resultante de dividir en cada estación los valores máximos anuales por su media ($Y = P / \bar{P}$) sigue una distribución idéntica de frecuencia en toda la región considerada. Los parámetros de dicha distribución, una vez seleccionado el modelo de ley, son obtenidos a partir del conjunto de datos de las estaciones de la región; mientras que el valor local de la media \bar{P} se estima únicamente a partir de los datos de las estaciones.

La estimación de los cuantiles locales X_t en un determinado punto se reduce a reescalar los cuantiles regionales con Y_t con la media local \bar{P} según la siguiente expresión:

$$X_t = Y_t \cdot \bar{P}$$

- Estimación regional de cuantiles:

La primera etapa para realizar la estimación regional de cuantiles consistió en agrupar el total de las 1545 estaciones básicas en 26 regiones geográficas.

Dichas regiones están definidas en la medida que se trata de agrupar zonas del marco territorial con unas características meteorológicas comunes al mismo tiempo que se complementa con el análisis de los C_v (coeficientes de variación) maestres. Para finalizar y contrastar la homogeneidad de las regiones se realizó un test estadístico de X^2 .



Ilustración 1: División de la España Peninsular en 26 regiones geográficas con características meteorológicas comunes.

La segunda etapa consiste en la estimación regional de los parámetros y cuantiles de los siguientes modelos de función de distribución, los cuales para periodos de retorno bajos y medios (2, 5, 10 y 25 años, como ocurre en nuestro caso para el posterior diseño) las diferencias entre ellos son apenas inexistentes:

Distribución	$f(x)$ ó $F(x)$	Parámetros
GEV	$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 - k \left(\frac{x-u}{\alpha} \right) \right]^{1/k} \right\}$	u, α, k
LP3	$\frac{\log_{10}}{\Gamma} \exp \left\{ \frac{\log_{10}}{\Gamma} \right\}$	u, α, k
TCEV	$F(x) = \exp (-\alpha_1 e^{-x/\theta_1} - \alpha_2 e^{-x/\theta_2})$	$\alpha_j, \theta_j, j = 1, 2$
SQRT-ET max	$F(x) = \exp [-k (1 + \sqrt{\alpha x}) \exp(-\sqrt{\alpha x})]$	α, k

Ilustración 2: Funciones de distribución seleccionadas.

Este hecho, reduce en cierto modo la transcendencia del proceso de selección de la ley, siendo la SQRT-ET max la elegida debido a:

- De los modelos propuestos, este ha sido propuesto específicamente para la modelización estadística de máximas lluvias diarias.
- Ya que solo presenta dos parámetros, conseguimos una mayor facilidad de presentación de resultados.
- Proporciona unos valores más conservadores de los resultados que la ley de Gumbel.
- Ha demostrado tener una óptima capacidad para reproducir las propiedades estadísticas en los datos.

El enfoque tradicional de los métodos regionales permite estimar el valor de los cuantiles regionales en un punto simplemente asignándole los valores obtenidos en la región en la que dicho punto está incluido, lo que presenta como principales inconvenientes tanto la incertidumbre existente respecto a los límites considerados en las regiones, como la indeseable discontinuidad que presentan los resultados en dichos límites. Para resolver estos problemas, se optó por presentar los resultados en forma “suavizada” trazando un mapa nacional de Isolíneas del coeficiente de variación (C_v).

El C_v fue seleccionado como parámetro básico debido a su fácil comprensión al estar directamente relacionado con el valor de los cuantiles debido al modelo de ley y al método de estimación de parámetros adoptados.

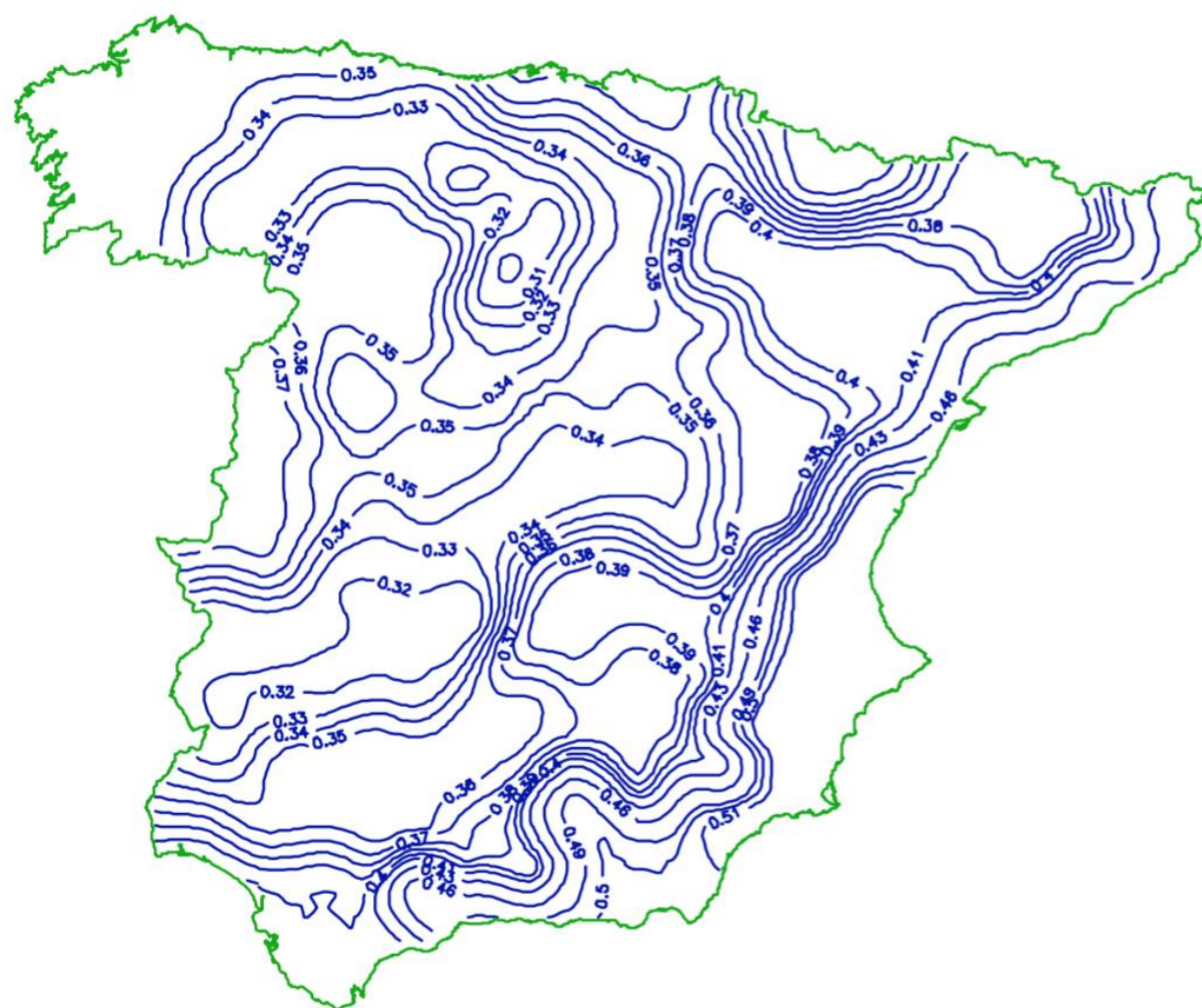


Ilustración 3: Mapa de isolíneas del valor regional del coeficiente de variación C_v .

- **Distribución espacial del valor medio como factor de escala local:**

La estimación de cuantiles en un determinado punto es el resultado de aplicar la expresión de distribución de SQRT-ET max, en la que la media \bar{P} de las series analizadas actúa como factor local.

El análisis de la distribución espacial de \bar{P} se abordó mediante interpolación espacial con técnicas de krigeado a partir de los valores medios de las series de 2231 estaciones, que incluyen las 1545 “básicas”, ya empleadas en la modelación estadística y otras 686 “complementarias” con series de más de 20 años.

La técnica del krigeado presenta como ventaja fundamental, frente a otros métodos de interpolación, la

posibilidad de aprovechar directamente la información sobre correlación espacial existente en los propios datos, que queda reflejada en el denominado variograma muestral.

Para la aplicación del krigeado se consideraron 15 zonas geográficas con similar comportamiento de la variable analizada, caracterizado fundamentalmente por unas variaciones “bruscas” en zonas montañosas y “suaves” en el resto. En dichas zonas se calcularon los variogramas muestrales y se ajustaron variogramas teóricos. El proceso de obtención de los variogramas teóricos y de resolución de las ecuaciones básicas del krigeado se abordó mediante el software GEO-EAS, realizando una estimación de la variable sobre una malla cuadrada de 2500 m de lado.

- **Aplicación de un sistema de información geográfica:**

Un sistema de información geográfico SIG es una base de datos geo- referenciada que permite realizar una serie de operaciones con los datos captados. Estas operaciones son de almacenamiento, catalogación tratamiento o procesado, de análisis y representación gráfica de la información.

En un sistema de información geográfico, la representación de los datos se puede realizar utilizando dos sistemas:

- a) **Representación vectorial:** una característica queda delimitada gráficamente por la línea que une los puntos que definen su contorno. Cada punto de ese contorno está unívocamente definido por un par de números que indican las coordenadas X e Y en sistemas de representación geodésica universales o en el sistema particular de referencia del usuario.
- b) **Representación matricial o raster:** en esta representación el área de estudio es subdividida en una fina malla de celdas (la precisión que se obtendrá en las imágenes será función de la resolución que se de a estas celdas) a las cuales se asignan los atributos de la superficie de terreno encerrada por la celda.

La referida en último lugar es la más recomendable para el estudio de datos que varían de forma continua en el espacio, como es el caso de la precipitación, permitiendo un mayor poder analítico aprovechando la potencialidad de las operaciones matriciales.

Los SIG matriciales organizan la información existente en capas unitarias, cada una de las cuales contiene los datos de un determinado tipo en todas las celdas del mallado considerado. En el presente estudio, las capas de información de interés corresponden a los valores numéricos de las siguientes características pluviométricas: valor medio \bar{P} , coeficiente de variación C_v , cuantiles regionales Y_t y cuantiles locales X_t .

Este conjunto de información espacial debe geo-referenciarse, es decir localizarse respecto a un sistema conocido de coordenadas. La geo-referenciación adoptada, que cubre la totalidad del territorio peninsular, ha consistido en:

- Sistema de referencia: coordenadas UTM referidas al huso 30.
- Unidades de referencia: metros.
- Coordenadas de los bordes: inferiores (ymin), superior (ymax), izquierdo (xmin) y derecho (xmax) de la malla considerada.

$$\begin{aligned} X_{\min} &= -116250 & X_{\max} &= 1161250 \\ Y_{\min} &= 3893750 & Y_{\max} &= 4971250 \end{aligned}$$

El anterior sistema de referencia, junto con la resolución espacial adoptada de 2500mx2500m, define una matriz de 511 columnas y 431 filas y permite situar geográficamente el valor numérico asignado a cada celda.

Las capas de información pluviométrica obtenidas han sido las siguientes:

a) Valor medio \bar{P} :

La metodología para el análisis espacial de la variable \bar{P} ha conducido a su estimación en los puntos de un mallado coincidente con el adoptado y que queda guardado en el archivo en el mismo programa, por lo que una vez hayamos introducido las coordenadas en el mismo, obtendremos el valor de la precipitación automáticamente.

b) Coeficiente de variación C_v .

El mapa de Isolíneas de C_v fue obtenido mediante una interpolación espacial en una malla por el método del inverso de la distancia al cuadrado. Los datos empleados para la interpolación fueron las 1545 estaciones “básicas” a las que se asigna el C_v regional correspondiente.

Este mismo proceso, pero sobre una malla idéntica a la adoptada en \bar{P} , ha permitido la obtención de la capa de información del C_v . Este campo se suministra en el archivo que genera el propio programa, por lo que obtendremos el valor de manera automática.

• Resultados obtenidos:

Para iniciar los cálculos mediante este método, es necesario georreferenciar la zona de estudio en coordenadas UTM referidas al huso 30, en nuestro caso hablamos de la población de Vilamarín, las cuales son:

- **Coordenada X UTM Huso 30: 98480.5**
- **Coordenada Y UTM Huso 30: 4713243**

Los cálculos realizados han sido para un período de retorno $T = 25$, para realizar los cálculos de dimensionamientos de nuestros colectores y un período de retorno $T = 2$ para que se nos cumplan las garantías de autolimpieza de nuestro colector.

En base a estas premisas hemos obtenidos los siguientes resultados :

	T = 2	T = 25
Valor medio (\bar{P})	62,00 mm/día	62,00 mm/día
Coef. Variación (C_v)	0,354	0,354
Cuantil de precipitación (P_t)	57,00 mm/día	108,00 mm/día

4. ELECCIÓN DEL VALOR DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA DIARIA

Tomaremos como valor de precipitación máxima diaria, la mayor de las obtenidas de los dos casos anteriores:

Precipitaciones máximas diarias (P_d máx)		
	T = 2	T = 25
Método Local	27,14 mm/día	53,64 mm/día
Método Regional	62,00 mm/día	108,00 mm/día

Dados estos valores, concluimos que los datos de precipitaciones para el diseño de nuestro hietograma de proyecto serán los obtenidos por el Método Regional, ya que estas nos dan unas precipitaciones diarias máximas mayores que el Método Local, para los periodos de retorno de estudio.

5. HIETOGRAMA DE PROYECTO

A partir de los resultados obtenidos y elegida una lluvia de diseño, realizaremos el diseño de nuestro hietograma de proyecto, para ello hemos recurrido a la expresión de la Intensidad Media de Precipitación que aparece en la Instrucción de carreteras en el apartado 5.2 – IC.

Hemos decidido suponer que el tiempo de duración de la tormenta de diseño es de 90 minutos, discretizando los bloques en duraciones de diez minutos, produciéndose los siguientes hietogramas:

T = 25			
Duración en minutos	Intensidad (mm/h)	Lluvia acumulada (mm)	Incremento de lluvia (mm)
10	91,48	15,55	15,55
20	66,23	21,86	6,31
30	54,26	27,13	5,27
40	46,87	30,93	3,80
50	41,70	34,61	3,68
60	37,83	37,83	3,22
70	34,80	40,72	2,89
80	32,34	43,01	2,29
90	30,28	45,42	2,41

T = 2			
Duración en minutos	Intensidad (mm/h)	Lluvia acumulada (mm)	Incremento de lluvia (mm)
10	52,45	8,92	8,92
20	37,97	12,53	3,61
30	31,11	15,56	3,03
40	26,87	17,73	2,17
50	23,91	19,85	2,12
60	21,69	21,69	1,84
70	19,95	23,34	1,65
80	18,54	24,66	1,32
90	17,36	26,04	1,38

un valor de 8,4.



Ilustración 4: Mapa de isótopas de la relación $\frac{I_{1h}}{I_{24h}}$ en España.

$$I_t = I_{24h} \cdot \left(\frac{I_{1h}}{I_{24h}} \right)^{3,529 - 1,679(\Delta t)^{0,1}}$$

Donde:

$$I_{24h} = \frac{P_d}{24} = \text{Intensidad media diaria}$$

$$I_{1h} = \text{Duración de la lluvia en minutos}$$

$$t = \text{Periodo de tiempo, en horas, para el que se quiere evaluar la intensidad}$$

El dato de $\frac{I_{1h}}{I_{24h}}$ lo obtendremos del siguiente mapa de isótopas, interpolando entre los valores de 8 y 9,

obteniendo

Hietogramas de proyecto									
	0-10 min	10-20 min	20-30 min	30-40 min	40-50 min	50-60 min	60-70 min	70-80 min	80-90 min
T = 2 años	18,54 mm/h	21,69 mm/h	26,87 mm/h	37,97 mm/h	52,45 mm/h	31,11 mm/h	23,91 mm/h	19,95 mm/h	17,36 mm/h
T = 25 años	32,34 mm/h	37,83 mm/h	46,87 mm/h	66,23 mm/h	91,48 mm/h	54,26 mm/h	41,70 mm/h	34,80 mm/h	30,28 mm/h

