

Trabajo Fin de Máster

CHAPARRÓN ESPACIO-TEMPORAL PARA APLICACIONES EN HIDROLOGÍA URBANA

Intensificación: *HIDRÁULICA URBANA*

Autor:

MIGUEL RICO CORTÉS

Codirector/es:

RAFAEL LUIS GARCÍA BARTUAL

IGNACIO ANDRÉS DOMÉNECH

JULIO,2015



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a Rafael García Bartual y a Ignacio Andrés Doménech. Gracias por haberme aconsejado, guiado y tutelado a lo largo del trabajo que aquí se presenta. Gracias por haber confiado en mí, y por toda la ayuda y dedicación prestada. Trabajar con vosotros ha sido un verdadero placer, que espero poder repetir a lo largo de mi vida profesional.

Gracias a mi familia, a mis padres. Gracias por haberme apoyado siempre y por haberme permitido, un año más, el privilegio de continuar mi formación académica fuera de casa. Y a mi hermana, por qué no necesariamente hay que ser ingeniero, ni tan siquiera ser mayor, para hacerme aprender muchas cosas.

No puedo olvidarme de mis compañeros, de mis amigos de siempre. Vicente y Cristina, siempre prestando su apoyo y dispuestos a emprender un nuevo viaje. Antonio, desde la ventosa Delft, animando, apoyando y esperando que nuestros caminos vuelvan a transcurrir paralelos. Habrá que volver a visitarte pronto...

Mención aparte se ha ganado Alberto Gay, compañero de mesa, almuerzos, prácticas, meriendas y horas de biblioteca para sacar juntos el curso adelante. También acordarme de todos los compañeros del MIHMA, que me han vuelto a recordar que todavía me queda mucha gente increíble por conocer.

Tras cinco años de convivencia, poco tengo que añadir de mis compañeros de piso, mi familia en Valencia. Jordi, Carlos i Andreu: gràcies per tots eixos moments, per les vesprades d'estudi i de no-estudi. En definitiva, per tots aquests anys perfectes. Els trobaré a faltar en aquesta nova aventura que comença.

Por último, qué decir de mi compañera de vida Irene. Siempre atenta, siempre dispuesta a dar luz a los momentos más oscuros. Simplemente recordarte que lo mejor está por llegar.

Desgraciadamente, en esta ocasión debo acordarme también de los que ya no están. La más especial de las dedicatorias para mi abuelo, que nos ha dejado recientemente. Sin él, puedo asegurar sin temor a equivocarme, que no estaría hoy escribiendo estas líneas. Iaio, va per tu.

“Lo que podemos hacer cuando cae la lluvia, es dejarla caer”

Henry Wadsworth Longfellow

“No es el conocimiento, sino el acto de aprendizaje, y no la posesión, sino el acto de llegar allí, que concede el mayor disfrute.”

Carl Friedrich Gauss

A José Cortés Nicolau per, tal volta, massa coses

INDICE DE CAPÍTULOS

<u>CAPÍTULO 1.-</u>	<u>INTRODUCCIÓN.</u>	<u>1</u>
<u>CAPÍTULO 2.-</u>	<u>ESTADO DEL ARTE.</u>	<u>7</u>
<u>CAPÍTULO 3.-</u>	<u>ANÁLISIS DE LAS SERIES PLUVIOMÉTRICAS HISTÓRICAS</u>	<u>23</u>
<u>CAPÍTULO 4.-</u>	<u>AJUSTE DEL MODELO TEÓRICO A LA MUESTRA EMPÍRICA.</u>	<u>57</u>
<u>CAPÍTULO 5.-</u>	<u>SÍNTESIS DE LA METODOLOGÍA DE USO DEL CDET.</u>	<u>83</u>
<u>CAPÍTULO 6.-</u>	<u>CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.</u>	<u>97</u>
<u>REFERENCIAS</u>		<u>101</u>
<u>ANEJO –</u>	<u>AJUSTE DE TORMENTAS SELECCIONADAS.</u>	<u>105</u>

INDICE GENERAL

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN.	1
1.1 – MOTIVACIÓN.	1
1.2 – OBJETIVO Y METODOLOGÍA EMPLEADA.	4
CAPÍTULO 2.- ESTADO DEL ARTE.	7
2.1 – MEDICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN.	7
2.2 – ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS PLUVIOMÉTRICOS.	9
2.3 – SOBRE EL ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL.	13
2.3.1 – MEDICIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN.	14
2.3.2 – ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN EN LA CIUDAD DE BARCELONA.	16
2.4 – EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS CHAPARRONES DE PROYECTO.	20
CAPÍTULO 3.- ANÁLISIS DE LAS SERIES PLUVIOMÉTRICAS HISTÓRICAS	23
3.1 – LA CIUDAD DE VALENCIA Y SU CLIMATOLOGÍA.	23
3.2 – OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE LOS DATOS PLUVIOMÉTRICOS.	26
3.2.1 – ORIGEN DE LOS DATOS.	26
3.2.2 – VALORACIÓN DE LOS DATOS.	27
3.3 – PROCESADO DE LOS DATOS.	30
3.3.1 – SEPARACIÓN DE EVENTOS INDEPENDIENTES.	30
3.3.2 – SELECCIÓN DE EVENTOS INDEPENDIENTES REPRESENTATIVOS.	32
3.4 – ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS EVENTOS INDEPENDIENTES.	33
3.5 – IDENTIFICACIÓN DE CHAPARRONES EN LOS EVENTOS LLUVIOSOS.	38
3.6 – ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA MUESTRA DE CHAPARRONES.	42
3.7 – ESTUDIO DE LA RELACIÓN VOLUMEN-DURACIÓN.	49
CAPÍTULO 4.- AJUSTE DEL MODELO TEÓRICO A LA MUESTRA EMPÍRICA.	57
4.1 – UN MODELO DE CHAPARRÓN CON DISTRIBUCIÓN ESPACIO- TEMPORAL.	57
4.2 – METODOLOGÍA DE AJUSTE DEL CDET A LOS DATOS EMPÍRICOS.	61
4.3 – RESULTADOS DEL PROCESO DE AJUSTE.	64
4.4 – ANÁLISIS DEL AJUSTE DEL MODELO TEÓRICO.	72
4.4.1 – ANÁLISIS DE LOS ERRORES.	72
4.4.2 – VALIDACIÓN DE LAS EXPRESIONES DE ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS.	74
4.5 – INCLUSIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL EN EL MODELO TEÓRICO.	79
CAPÍTULO 5.- SÍNTESIS DE LA METODOLOGÍA DE USO DEL CDET.	83
5.1 – DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN TOTAL ACUMULADO.	83
5.2 – DURACIONES ESPERABLES EN FUNCIÓN DE LA INTENSIDAD.	86
5.3 – OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO TEÓRICO.	88

5.4 – EJEMPLO DE APLICACIÓN.	92
<u>CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.</u>	97
6.1 – CONCLUSIONES.	97
6.2 – FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.	99
<u>REFERENCIAS</u>	101
<u>ANEJO – AJUSTE DE TORMENTAS SELECCIONADAS.</u>	105

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Procedimiento de ajuste de un modelo elíptico a las estructuras convectivas identificadas. Fuente: Barnolas M. et al. _____	17
Figura 2.2 - Parámetros de las funciones de distribución propuestas para cada parámetro geométrico. Fuente: Barnolas M. et al. _____	18
Figura 2.3 - Detalle del litoral mediterráneo español. Remarcadas en rojo, las ciudades de Barcelona y Valencia. Elaboración propia. _____	19
Figura 2.4 - Hietogramas obtenidos empleando distintos modelos de design storm. Fuente: Marsalek J. y Watt W.E. (1984). _____	21
Figura 3.1 - Porcentaje anual de fallos en el Periodo I. Elaboración propia. _____	28
Figura 3.2 - Porcentaje anual de fallos en el Periodo II. Elaboración propia. _____	29
Figura 3.3 - Esquema de la metodología de obtención de t_{crit} . Fuente: Rastrepo-Posada & Eagleson, 1982. _____	30
Figura 3.4 - Número de eventos seleccionados por año. Elaboración propia. _____	33
Figura 3.5 - Histograma de frecuencias de "nº de eventos por año". Elaboración propia. _____	34
Figura 3.6 - Histograma de frecuencias de la variable "Volumen". Elaboración propia. _____	43
Figura 3.7 - Histograma de frecuencias de la variable "Intensidad máxima". Elaboración propia. _____	43
Figura 3.8 - Histograma de frecuencias de la variable "Duración". Elaboración propia. _____	44
Figura 3.9 - Funciones de distribución estudiadas para la variable "Volumen". Elaboración propia. _____	47
Figura 3.10 - Funciones de distribución estudiadas para la variable "Intensidad máxima". Elaboración propia. _____	47
Figura 3.11 - Funciones de distribución estudiadas para la variable "Duración". Elaboración propia. _____	48
Figura 3.12 - Parejas Volumen-Duración para todos los chaparrones de la muestra. Elaboración propia. _____	50
Figura 3.13 - Parejas Volumen-Intensidad máxima para todos los chaparrones de la muestra. Elaboración propia. _____	51
Figura 3.14 - Parejas Intensidad máxima-Duración para todos los chaparrones de la muestra. Elaboración propia. _____	51
Figura 3.15 - Parejas Volumen-Duración y ajuste lineal, para chaparrones con intensidad máxima baja ($I_{max} < 55$ mm/h). Elaboración propia. _____	54
Figura 3.16 - Parejas Volumen-Duración y ajuste lineal, para chaparrones con intensidad máxima media ($55 < I_{max} < 75$ mm/h). Elaboración propia. _____	54
Figura 3.17 - Parejas Volumen-Duración y ajuste lineal, para chaparrones con intensidad máxima alta ($I_{max} > 75$ mm/h). Elaboración propia. _____	55
Figura 3.18 - Parejas Volumen-Duración y ajuste lineal, para todas las familias de intensidades. Elaboración propia. _____	55
Figura 4.1 - Histograma de frecuencias para la variable "Volumen teórico". Elaboración propia. _____	66
Figura 4.2 - Histograma de frecuencias para la variable "Intensidad máxima teórica". Elaboración propia. _____	67
Figura 4.3 - Histograma de frecuencias para la variable "Duración teórica". Elaboración propia. _____	67
Figura 4.4 - Histograma de frecuencias para la variable "Volumen teórico". Elaboración propia. _____	70
Figura 4.5 - Histograma de frecuencias para la variable "Intensidad máxima teórica". Elaboración propia. _____	70
Figura 4.6 - Histograma de frecuencias para la variable "Duración teórica". Elaboración propia. _____	71
Figura 4.7 - Parejas Volumen observado-Alpha para intensidades máximas comprendidas entre 30 y 50 mm/h. Elaboración propia. _____	75
Figura 4.8 - Parejas Volumen observado-Alpha para intensidades máximas comprendidas entre 50 y 70 mm/h. Elaboración propia. _____	75

<i>Figura 4.9 - Parejas Volumen observado-Alpha para intensidades máximas comprendidas entre 70 y 90 mm/h. Elaboración propia.</i>	76
<i>Figura 4.10 - Distintas familias de parejas Volumen-Alpha. Elaboración propia.</i>	76
<i>Figura 4.11 - Parejas duración observada-alpha. Elaboración propia.</i>	77
<i>Figura 4.12 - Parejas Intensidad máxima observada-Parámetro i_0. Elaboración propia.</i>	78
<i>Figura 4.13 - Aspecto de la función de distribución espacial propuesta por García-Bartual. Fuente: García-Bartual, 2013.</i>	79
<i>Figura 4.14 - Ejemplo de ajuste de la función de distribución espacial para un evento convectivo. Fuente: García-Bartual, 2013.</i>	80
<i>Figura 4.15 - Parámetros de las funciones de distribución propuestas para cada parámetro geométrico. Fuente: Barnolas M. et al.</i>	80
<i>Figura 5.1 - Representación gráfica de la función de distribución TCEV y de los datos empíricos para la variable "Volumen". Elaboración propia.</i>	84
<i>Figura 5.2 - Parejas volumen-duración y ajustes lineales para todas las familias de intensidades. Elaboración propia.</i>	86
<i>Figura 5.3 - Parejas duración-alpha y relación teórica propuesta por García-Bartual. Elaboración propia.</i>	88
<i>Figura 5.4 - Parejas volumen-alpha y relación teórica para distintos rangos de intensidad máxima. Elaboración propia.</i>	89
<i>Figura 5.5 - Esquema del proceso seguido para la obtención de los chaparrones de proyecto, asociados a un T dado. Elaboración propia.</i>	92
<i>Figura 5.6 - Evolución temporal de la intensidad para los chaparrones calculados. Elaboración propia.</i>	95

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1 - Estadísticos univariados de los parámetros geométricos estudiados. Fuente: Barnolas M. et al.</i>	17
<hr/>	
<i>Tabla 3.1 - Parámetros climáticos promedio de Valencia. Fuente: Agencia Española de Meteorología.</i>	23
<i>Tabla 3.2 - Fallos por año del pluviómetro de estudio. Elaboración propia.</i>	27
<i>Tabla 3.3 - Estadísticos univariados de "nº de eventos por año". Elaboración propia.</i>	34
<i>Tabla 3.4 - Estadísticos univariados de los descriptores de cada evento independiente. Elaboración propia.</i>	35
<i>Tabla 3.5 - Matriz de correlación de los descriptores de episodios independientes. Elaboración propia.</i>	36
<i>Tabla 3.6 - Distribución estacional de los eventos independientes. Elaboración propia.</i>	37
<i>Tabla 3.7 - Descriptores de los chaparrones seleccionados. Elaboración propia.</i>	39
<i>Tabla 3.8 - Estadísticos univariados de los descriptores de los chaparrones. Elaboración propia.</i>	42
<i>Tabla 3.9 - Matriz de correlación de los descriptores de la muestra de chaparrones. Elaboración propia.</i>	42
<hr/>	
<i>Tabla 3.10 - Parámetros de las funciones de distribución estudiadas para los descriptores de la muestra de chaparrones. Elaboración propia.</i>	46
<i>Tabla 3.11 - Nº de eventos y coeficiente de ajuste para la Opción I. Elaboración propia.</i>	52
<i>Tabla 3.12 - Nº de eventos y coeficiente de ajuste para la Opción II. Elaboración propia.</i>	53
<i>Tabla 3.13 - Nº de eventos y coeficiente de ajuste para la Opción III. Elaboración propia.</i>	53
<i>Tabla 3.14 - Relación entre volumen y duración para las familias estudiadas. Elaboración propia.</i>	56
<i>Tabla 4.1 - Parámetros y descriptores teóricos del ajuste del modelo a la muestra empírica, mediante MCO. Elaboración propia.</i>	64
<i>Tabla 4.2 - Resumen estadístico para los descriptores fundamentales y parámetros del modelo teórico. Elaboración propia.</i>	66
<i>Tabla 4.3 - Matriz de correlaciones para los descriptores y parámetros teóricos. Elaboración propia.</i>	66
<i>Tabla 4.4 - Parámetros y descriptores teóricos del ajuste del modelo a la muestra empírica, mediante Función PSI. Elaboración propia.</i>	68
<i>Tabla 4.5 - Resumen estadístico para los descriptores fundamentales y parámetros del modelo teórico. Elaboración propia.</i>	69
<i>Tabla 4.6 - Matriz de correlaciones para los descriptores y parámetros teóricos. Elaboración propia.</i>	70
<i>Tabla 4.7 - Estadísticos para los errores absolutos y porcentuales con la metodología de ajuste MCO. Elaboración propia.</i>	72
<i>Tabla 4.8 - Estadísticos para los errores absolutos y porcentuales con la metodología de ajuste PSI. Elaboración propia.</i>	72
<i>Tabla 5.1 - Parámetros de la función TCEV para la variable "Volumen". Elaboración propia.</i>	83
<i>Tabla 5.2 - Cuantiles asociados a los periodos de retorno más comunes.</i>	85
<i>Tabla 5.3 - Ecuaciones obtenidas para relacionar el volumen con la duración de un evento, para distintos rangos de intensidades. Elaboración propia.</i>	87
<i>Tabla 5.4 - Duraciones de chaparrón calculadas para un periodo de retorno de 50 años.</i>	93
<i>Tabla 5.5 - Procedimiento de cálculo del parámetro alpha. Elaboración propia.</i>	93
<i>Tabla 5.6 - Procedimiento de cálculo del parámetro i_0. Elaboración propia.</i>	93
<i>Tabla 5.7 - Hietogramas de los tres chaparrones de proyecto calculados. Elaboración propia.</i>	94
<i>Tabla 5.8 - Principales descriptores de los chaparrones sintéticos generados. Elaboración propia.</i>	95

Capítulo 1.- Introducción.

1.1 – Motivación.

La vertiente mediterránea de la Península Ibérica sufre habitualmente la crudeza de los episodios de lluvias torrenciales. Por ello, sus infraestructuras hidráulicas urbanas deben dimensionarse con mucha precaución, y prestando especial atención a la precipitación y a todas sus variables internas.

El proceso de diseño de infraestructuras hidráulicas presenta un claro enfrentamiento entre la seguridad y la economía, circunstancia que debe resolverse siempre teniendo presente que la elección de un mal criterio o una deficiencia en el análisis de la realidad, puede provocar graves daños materiales e incluso la pérdida de vidas humanas.

En este contexto, tener un buen conocimiento sobre la precipitación y cuál es su distribución espacio-temporal esperable, puede ser una herramienta de gran utilidad, que permitirá reducir la incertidumbre en las técnicas de diseño.

No obstante, en ocasiones la persecución de un mayor realismo en los modelos empleados para reproducir la precipitación, provoca que su utilización sea sumamente compleja; o que los resultados arrojados por el modelo sean difíciles de interpretar y disponer para su utilización. Este es el motivo por el cual este trabajo tendrá un enfoque eminentemente práctico, persiguiendo en todo momento que los resultados conseguidos sean operativos y fácilmente utilizables para cualquier aplicación futura.

Los chaparrones de proyecto han sido una herramienta habitual en la hidrología desde mediados del siglo XX. Lógicamente, su obtención supone grandes simplificaciones del fenómeno de la precipitación, pues su complejidad e imprevisibilidad, convierten a la lluvia en un elemento difícilmente modelable.

Sus aplicaciones son numerosas, pudiendo ser empleados tanto para el dimensionamiento o gestión de infraestructuras hidráulicas urbanas como para la

Capítulo 1 – Introducción

Miguel Rico Cortés

modelación de recursos hídricos. Habitualmente, la precipitación es el principal input de una gran cantidad de modelos utilizados en la hidrología. Destacan los modelos precipitación-escorrentía, unos de los más utilizados en la ingeniería, y que requieren de esta información como dato de entrada para conocer que porción de lluvia se infiltra al terreno, y que parte de la misma fluye por la superficie.

Uno de los chaparrones de proyecto más empleados en la actualidad, es el modelo de bloques alternos (Keifer C.J. y Chu H.H., 1957), que se basa en la relación existente entre la intensidad de un evento y su duración, para una probabilidad de ocurrencia dada. Esta información se estructura en las conocidas curvas I-D (intensidad-duración), que se encuentran definidas para los periodos de retorno más habituales en la hidráulica urbana.

Para la obtención de una lluvia sintética por bloques alternos, se define una intensidad pico igual a la intensidad asociada a la duración de la discretización temporal (Δt) que se desee, tomando este valor de la curva I-D asociada a la probabilidad de no excedencia determinada. El resto de bloques del hietograma, también se construyen empleando la curva I-D y se van colocando alternativamente a derecha e izquierda en orden decreciente de intensidad.

Esta técnica presenta dos limitaciones muy importantes:

- En primer lugar, no se está contemplando ninguna variabilidad espacial, considerando que la lluvia se produce de manera homogénea en toda el área de estudio. Esta hipótesis puede ser válida si se consideran áreas de estudio pequeñas. En cambio, si se desea modelizar el comportamiento global de la red de colectores de una ciudad de extensión considerable (como podría ser Valencia), esta condición puede suponer una restricción importante que impedirá el correcto análisis.
- Por otro lado, el hietograma obtenido empleando bloques alternos, no reproduce adecuadamente la variabilidad temporal mostrada en los patrones observados en la información obtenida a través de mediciones empíricas. En definitiva, el modelo produce una sobreestimación de la lluvia

asociada a una probabilidad de ocurrencia, que, aunque deja al proyectista del lado de la seguridad, no debe olvidarse que no se está representando la realidad de forma adecuada.

La tesina final de máster que aquí se presenta, surge con la motivación de presentar una alternativa real al chaparrón de proyecto por bloques alternos, presentando un modelo que permita tanto la reproducción de la variabilidad espacial de la precipitación, como la representación adecuada de los patrones de variación temporal de la intensidad, para la ciudad de Valencia. También, se buscará que el modelo sea capaz de reproducir adecuadamente las relaciones internas existentes entre los distintos descriptores fundamentales de la lluvia (volumen, intensidad máxima y duración), sin perder de vista en todo momento, que debe tratarse de un método operativo y funcional.

1.2 – Objetivo y metodología empleada.

El objetivo principal del trabajo de investigación que aquí se presenta, es la definición de una metodología clara y sencilla para la obtención de chaparrones de proyecto, asociados a un determinado periodo de retorno, y que respeten las relaciones de dependencia fundamentales en las variables internas del proceso. El foco práctico de la tesina persigue la obtención de estos chaparrones sintéticos para que puedan ser empleados en aplicaciones de hidrología urbana en la ciudad de Valencia.

Para la consecución del objetivo global de la tesina, se acometerán los siguientes hitos:

- Revisión detallada de la bibliografía existente en materia de análisis de series pluviográficas, obtención de tormentas de diseño y distribución espacio-temporal de la precipitación.
- Estudio y análisis de las series pluviográficas históricas de la ciudad de Valencia.
- Selección de tormentas y chaparrones atendiendo a criterios estructurales, obteniéndose una muestra representativa de chaparrones de tipología convectiva.
- Aplicación de un modelo de chaparrón con distribución temporal a la muestra de chaparrones extraída. Definición de una metodología de ajuste y comprobación de la validez de las expresiones teóricas del modelo.
- Revisión de los ajustes obtenidos y valoración crítica de los resultados.
- Síntesis de la metodología y particularización en la ciudad de Valencia.
- Estudio de la distribución espacial de la precipitación, basado en la revisión de estudios previos en la ciudad de Barcelona.

- Definición de líneas futuras de investigación.

Capítulo 2.- Estado del arte.

En este capítulo se pretende realizar una breve contextualización histórica de las técnicas de predicción y estimación de la precipitación.

2.1 – Medición de la precipitación.

El interés del ser humano por conocer cómo y en qué forma se va a producir la precipitación, ha sido una constante a lo largo de la historia. Una de las primeras muestras de interés por la precipitación conocidas, data del siglo IV antes de cristo, en la India; donde unos sencillos pluviómetros cilíndricos eran empleados para establecer una correlación entre la lluvia y la metodología de cultivo más idónea (Shamasastry R., 1967).

La tecnología empleada en la medición de la precipitación, ha ido mejorando a lo largo de los años, así como la calidad e interés de los datos. Los hitos más importantes a lo largo de los siglos, han sido los siguientes (Strangeways I., 2010):

- *Benedetto Castelli (1578-1643)*. Uso del primer pluviómetro mecánico.
- *Sir Christopher Wren (1632-1723)*. Invención de la estación atmosférica multi-variable.
- *William Heberden (1710-1801)*. Estudio de la variabilidad espacial de la precipitación y el efecto de la altura sobre el nivel del mar en el volumen de precipitación.
- *William Stanley Jevons (1835-1882)*. Estudio sobre la afección del viento en la toma de datos en pluviómetros.

- *George James Symons (1838-1900)*. Recopila los datos de 3600 pluviómetros en Inglaterra, constituyendo el primer estudio a escala nacional.

En cuanto a la tecnología de los pluviómetros, la entrada en la era de la información ha traído los avances más significativos. Los primeros modelos, consistentes en un cilindro con la altura graduada, que debían ser leídos manualmente, han sido progresivamente sustituidos por pluviómetros de balancín, capaces de enviar un pulso eléctrico cuando se ha alcanzado un determinado volumen de sensibilidad, permitiendo registrar de este modo la variabilidad temporal de la precipitación con mayor detalle.

Más recientemente han aparecido los disdrómetros ópticos, capaces de registrar el número, el tamaño y la velocidad de las gotas que precipitan en su área de influencia. La principal ventaja de estos instrumentos es que miden adecuadamente la precipitación en cualquiera de sus formas, sin importar que se trate de nieve, granizo o lluvia.

Los problemas más habituales en la captación de datos mediante pluviómetro, están relacionados con otras variables climatológicas. La presencia de viento en el momento de la precipitación, dificulta la entrada de la lluvia en el pluviómetro debido a la turbulencia generada, falseando de este modo los resultados presentados por el pluviómetro. La precipitación en forma de nieve o granizo también puede ocasionar errores en la medida al obstruir o impedir el correcto funcionamiento de alguno de los elementos mecánicos del aparato. También, son relativamente frecuentes los fallos en la comunicación y registro de los datos, ocasionando “huecos” en las series pluviométricas o la inclusión de algún dato anómalo.

2.2 – Análisis e interpretación de datos pluviométricos.

La toma de datos simplemente constituye la primera piedra para tener conocimiento sobre la precipitación. Los datos obtenidos, deben ser clasificados, catalogados y analizados para extraer conclusiones de relevancia.

Como ya se ha comentado anteriormente, los pluviómetros suelen presentar algún fallo en su funcionamiento durante su vida útil. Estos fallos, suelen representarse por la ausencia de algún dato o por la existencia de algún dato claramente fuera de rango. Por tanto, antes de acometer un estudio de la precipitación en un periodo concreto, es recomendable realizar una revisión y validación estadística de los datos. En este proceso, debe comprobarse que se dispone de una muestra suficientemente extensa, excluyendo los fallos y, cerciorarse de que la presencia de algún dato anómalo indetectable no alterará de forma significativa las conclusiones del estudio.

Las series pluviométricas que abarcan periodos temporales largos, son una cadena de datos difíciles de abordar, con abundantes periodos secos. En este contexto resulta imprescindible la separación de los episodios lluviosos estadísticamente independientes. Existen numerosos estudios sobre esta materia, abordando la cuestión desde un punto de vista meteorológico o estrictamente estadístico (Adams B. y Papa F., 2000). Restrepo-Posada y Eagleson (1982) marcan las pautas de cómo realizar esta separación, considerándose únicamente la estructura externa del chaparrón, sin necesidad de introducir otras variables de información secundaria. Para este procedimiento, debe estimarse la existencia de una separación crítica temporal, que hace que la serie de separaciones entre sucesos independientes se ajuste a una función exponencial (ver epígrafe 3.3.1).

Habitualmente, un alto porcentaje del volumen total acumulado durante un evento lluvioso, se concentra en un espacio temporal relativamente corto. Es lo que habitualmente se denomina chaparrón. La identificación de los chaparrones en los sucesos lluviosos independientes, no es un proceso tan sencillo y resulta complicado de automatizar, pues la casuística es muy variable, existiendo episodios que contienen

varios chaparrones muy marcados y otros cuya identificación y separación de la intensidad de fondo es muy variable.

La precipitación de tipología convectiva es la causante de la mayor parte de inundaciones y sucesos relacionados con lluvias de alta intensidad. La identificación de este tipo de lluvias sin emplear otras variables climatológicas, ha sido uno de los principales objetivos del trabajo de Llasat M.C. (2001) “An objective classification of rainfall events on the basis of their convective features: application to rainfall intensity in the northeast of Spain”, en el que se propone la definición de un indicador de convectividad β^* , capaz cuantificar el grado de convectividad de un evento lluvioso, empleando únicamente los datos de la serie pluviométrica:

$$\beta_{L,\Delta T}^* = \frac{\sum_{i=1}^N I(t_i, t_i + \Delta T) \theta(I - L)}{\sum_{i=1}^N I(t_i, t_i + \Delta T)}$$

Siendo $\theta(I-L)$ una función de Heaviside, y L un umbral de convectividad dependiente de ΔT , y estimado en 35 mm/h por Llasat (2001) para un ΔT cinco-minutal.

$$(I - L) = 1 \text{ si } I > L$$

$$(I - L) = 0 \text{ si } I < L$$

$$(I - L) = 1 \text{ si } I = L$$

En definitiva, este indicador obtiene la porción de lluvia total que ha precipitado con una intensidad superior a un determinado umbral. El valor de este umbral varía según la resolución temporal, habiendo sido obtenido para la región nordeste de España para discretizaciones temporales de 5 y 10 minutos.

Según el valor calculado para el indicador, puede determinarse cuál es su grado de convectividad, siguiendo lo expuesto por el propio autor:

- $\beta^* = 0$ No convectiva (*non-convective*)
- $0 < \beta^* \leq 0.3$ Ligeramente convectiva (*slightly convective*)
- $0.3 < \beta^* \leq 0.8$ Moderadamente convectiva (*moderately convective*)
- $0.8 < \beta^* \leq 1.0$ Fuertemente convectiva (*strongly convective*)

Más allá del grado de convectividad, tres son los descriptores fundamentales de los chaparrones, que permiten hacerse una idea de sus características:

- *Volumen*: Esta variable recoge la cantidad total de precipitación registrada por unidad de superficie durante el episodio lluvioso.
- *Intensidad máxima*: Refleja la máxima intensidad promedio en el intervalo de discretización temporal.
- *Duración*: Muestra el tiempo transcurrido desde el inicio de la precipitación hasta el final del episodio lluvioso, incluyendo posibles periodos internos del evento con ausencia de precipitación.

Las funciones de distribución de probabilidad (cdf), describen la probabilidad de que una variable aleatoria real X , sujeta a una determinada ley de distribución de probabilidad, se inscriba en la zona de valores menores o iguales a un determinado valor x .

$$F(x) = P(X \leq x)$$

Empíricamente, y a lo largo de los siglos, los científicos han ido determinando la forma, parámetros y naturaleza de estas funciones, de modo que describan la naturaleza de los sucesos del modo más realista y aproximado posible. En el ámbito de las crecidas y las precipitaciones, las funciones más empleadas en la ingeniería son la distribución GUMBEL, la General Extreme Value (GEV) y la Two Component Extreme Value (TCEV).

- La función de distribución acumulada GUMBEL, llamada así en honor a Emil Julius Gumbel (siglo XX), constituye la distribución teórica de los extremos de una población normal. El coeficiente de asimetría es constante y de valor 1.1396. Es una de las más empleadas en el mundo, aunque no suele adaptarse bien a los climas torrenciales mediterráneos. Se requieren dos parámetros: λ y θ .

$$F_x(x) = \exp(-\lambda e^{-\theta x})$$

- La función de distribución acumulada GEV, es una generalización de la función Gumbel, empleada en el Reino Unido por recomendación del NERC. Se requieren tres parámetros: x_0 , α y β .

$$Fx(x) = \exp \left[- \left(1 - \beta \frac{x - x_0}{\alpha} \right)^{1/\beta} \right]$$

- La función de distribución acumulada TCEV, surge en Italia en los años 80 con la finalidad de adaptarse mejor a los climas torrenciales mediterráneos. Recoge la existencia de dos poblaciones Gumbel independientes, una para las crecidas ordinarias, y otra para las extraordinarias. Se requieren cuatro parámetros: λ_1 , λ_2 , θ_1 y θ_2 .

$$Fx(x) = \exp(-\lambda_1 e^{-\theta_1 x} - \lambda_2 e^{-\theta_2 x})$$

Estas funciones de distribución permiten el cálculo de cuantiles asociados a una determinada probabilidad de ocurrencia, técnica muy utilizada para el análisis de las variables internas de la precipitación.

2.3 – Sobre el estudio de la variabilidad espacial.

La idea de que los eventos lluviosos descargan sobre un área de superficie finita es clara. Sin embargo, conocer o intuir como varían espacialmente las intensidades dentro de la zona lluviosa no resulta tan trivial.

La distribución espacial de la precipitación guarda una relación muy estrecha con el origen y tipología de la tormenta y, como ya se ha comentado anteriormente, las posibilidades en este aspecto son infinitas, ya que las tormentas no suelen pertenecer a una determinada tipología, sino que habitualmente constituyen una mezcla de dos o más tipos.

Las tormentas convectivas, son las que más problemas causan en la vertiente mediterránea de la península Ibérica, al ser el origen de la mayoría de inundaciones y problemas relacionados con su alta intensidad. Además, esta tipología de tormenta se caracteriza por producir su descarga en un área relativamente pequeña, si se compara con otros fenómenos borrascosos de escala sinóptica.

2.3.1 – Medición espacial de la precipitación.

En la actualidad existen dos metodologías fundamentales para la medición de la precipitación en una región: las redes de pluviómetros automáticos y el radar meteorológico.

Los pluviómetros constituyen el elemento de medida de la precipitación más antiguo, existiendo evidencias de su uso en la India en el siglo IV A.C. Los pluviómetros actuales proporcionan una medida de la precipitación acontecida en un intervalo de tiempo, pudiendo alcanzarse resoluciones temporales (Δt) muy precisas. En definitiva constituyen un método de medida bastante eficaz. No obstante, a la hora de percibir la variabilidad espacial, aparece el inconveniente de que proporcionan una información puntual, siendo necesaria la creación de una red con numerosos pluviómetros, y el empleo de técnicas de estimación estadística (combinación lineal ponderada de la información disponible), que permita conocer la información en puntos donde no se ha producido la medición directa.

El gran desarrollo de la tecnología Radar se produce durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), con finalidades bélicas. Tras el final de la guerra, se empieza a explotar esta tecnología para otros usos, como la localización de yacimientos de oro en las minas o la medición en tiempo real de la precipitación. El principio básico de esta tecnología es la medición de la reflectividad de las ondas emitidas por el radar, existiendo una relación biunívoca entre la precipitación y esta reflectividad. La siguiente expresión, muestra la relación por Marshall J.S. y Palmer W.M.K. (1948) para la obtención de la precipitación (mm/h) a partir de la reflectividad Z (mm^6/m^3):

$$P_{str} \left(\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right) = \left(\frac{10^{Z/10}}{200} \right)^{5/8}$$

Esta expresión, fue corregida por Llasat M.C. et al. en 2007, para adaptarla a las lluvias de tipología convectiva, frecuentes en el litoral mediterráneo, dando lugar a la siguiente expresión:

$$P_{conv} \left(\frac{mm}{h} \right) = \left(\frac{10^{Z/10}}{800} \right)^{5/8}$$

Aunque el radar permite un conocimiento de la distribución de la precipitación en toda la zona de influencia, presenta el gran inconveniente de que la medición se realiza de forma indirecta, presentando errores más importantes que los arrojados por los pluviómetros. En esta dirección, existe un número ingente de publicaciones e investigaciones, focalizadas en reducir los errores producidos por esta tecnología (Chumchean S. et al., 2006).

2.3.2 – Estudio de la distribución espacial de la precipitación en la ciudad de Barcelona.

En el año 2010, Branolas M., Rigo T. y Llasat M.C. publican un estudio sobre las características espaciales de las celdas convectivas en Catalunya, empleando para ello la tecnología radar. El documento analiza las características geométricas de 13,472 estructuras convectivas entre los años 1996 y 2000. Estas estructuras han sido seleccionadas atendiendo a unos criterios geométricos (deben presentar una superficie mayor de 32 km²) y pluviométricos (el indicador de convectividad β debe ser mayor de 0.3). Adicionalmente, se añade un tercer criterio, para seleccionar únicamente aquellos eventos que hayan producido una precipitación diaria superior a 60 mm en alguno de los pluviómetros de la red.

El radar meteorológico empleado en el estudio, se encuentra a 20 km de la ciudad de Barcelona, a una altitud de 654 msnm. Éste, permite una resolución temporal de 10 minutos y un tamaño de pixel de 2x2 km². Se tienen por tanto un total de 143 imágenes de radar para cada día del intervalo de estudio.

Una vez son identificadas todas las estructuras que cumplen los requisitos expresados, se plantea un ajuste de la geometría de las mismas a una elipse, que es la forma recomendada por autores como Rebora N. y Ferraris L. (2006) para estas latitudes mediterráneas. Esta tipología de ajuste también ha sido empleada con buenos resultados en el suroeste de Francia (Feral L. et al., 2000). Adicionalmente, el ajuste elíptico presenta la ventaja de que las funciones de autocorrelación espacial empleadas poseen contornos elípticos (Northrop P.J., 1998).

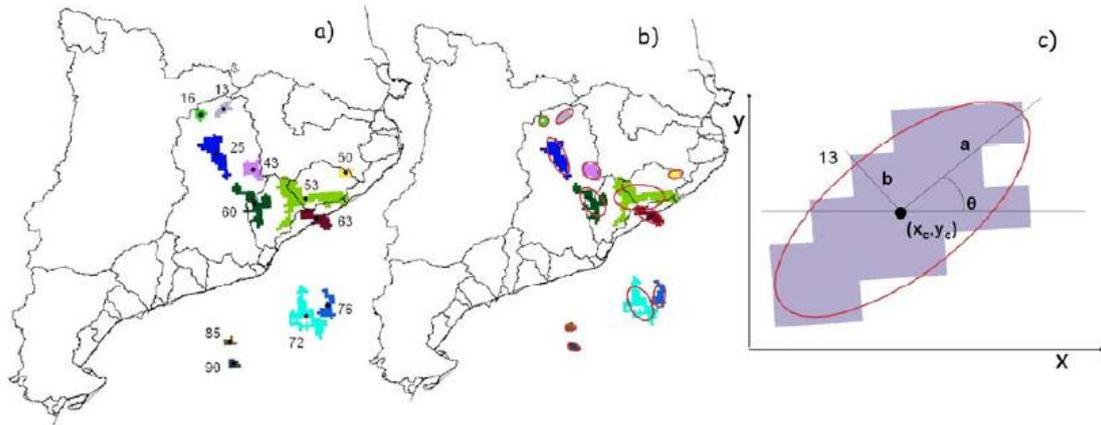


Figura 2.1 - Procedimiento de ajuste de un modelo elíptico a las estructuras convectivas identificadas.
 Fuente: Barnolas M. et al. (2010).

Las elipses que incluyen cada una de las estructuras analizadas vienen caracterizadas por las variables habituales que describen cualquier cuerpo geométrico en el espacio. Las coordenadas del centroide, determinan el origen de los ejes mayor y menor y constituyen el centro de la estructura convectiva. Las longitudes del eje mayor y menor, acaban de definir la geometría de la elipse. El área es también un magnitud importante, ya que permite conocer cual es la superficie de influencia de la estructura convectiva. Así mismo, resulta también muy importante conocer la orientación de las estructuras, definida como el ángulo existente entre el eje mayor de las elipses y el eje x de referenica (ver Figura 2.1), pudiendo oscilar este valor entre 0 y 180º. La siguiente tabla muestra los estadísticos univariados más habituales sobre las variables descriptoras de las elipses de ajuste.

Tabla 2.1 - Estadísticos univariados de los parámetros geométricos estudiados. Fuente: Barnolas M. et al.

Parámetro	Media	Mínimo	Máximo	Rango	Desviación típica
Área (km ²)	107.19	32.00	2348.00	2380.00	148.01
Perímetro (km)	63.44	24.00	804.00	780.00	51.34
Eje mayor (km)	7.79	3.19	49.18	45.99	4.58
Eje menor (km)	3.66	0.72	20.46	19.74	1.85
Espesor (km)	2.26	1.00	13.07	12.07	1.45
Orientación (º)	81.42	0.00	180.00	180.00	47.64

Para caracterizar la variabilidad existente en los distintos parámetros geométricos, Barnolas M. et al, propone el ajuste de una función de distribución de máximos a la muestra extraída. Se ensayan la función de Pareto Generalizada y la General Extreme Value, cuyas expresiones se muestran a continuación respectivamente:

$$f(x|k, \sigma, \theta) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \left(1 + k \frac{(x - \theta)}{\sigma}\right)^{-1-1/k}$$

siendo:

- x: cuantil asociado a la probabilidad de ocurrencia.
- k: parámetro de forma.
- θ : parámetro de localización.
- σ : parámetro de escala.

$$f(x|k, \mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \exp\left(-\left(1 + \kappa \frac{(x - \mu)}{\sigma}\right)^{-1/k}\right) \left(1 + k \frac{(x - \mu)}{\sigma}\right)^{-1-1/k}$$

siendo:

- x: cuantil asociado a la probabilidad de ocurrencia.
- k: parámetro de forma.
- μ : parámetro de localización.
- σ : parámetro de escala.

Empleando el método de máxima verosimilitud (MLE), se obtienen los siguientes parámetros para las funciones de distribución y para cada uno de los descriptores geométricos considerados:

Parameters	Distribution	Distribution parameter values		
		Scale	Shape	threshold/location
Area	Generalized Pareto	35.28±0.56 km ²	0.60±0.01	30.00±0.00 km ²
Perimeter	GEV	14.85±0.15 km	0.56±0.01	40.00±0.15 km
Major Axis	GEV	1.90±0.02 km	0.10±0.01	5.63±0.02 km
Minor Axis	GEV	0.91±0.07 km	0.25±0.01	2.82±0.01 km
Orientation	GEV	44.77±0.31 km	0.22±0.01	63.28±0.15°
MAP	GEV	0.0394±0.002 mm	0.112±0.007	0.617±0.001 mm

Figura 2.2 - Parámetros de las funciones de distribución propuestas para cada parámetro geométrico. Fuente: Barnolas M. et al. (2010).

2.4 – Evolución histórica de los chaparrones de proyecto.

La reproducción de la lluvia en una región empleando chaparrones de proyecto es una técnica relativamente reciente. A lo largo de la segunda mitad del siglo XX, han ido apareciendo modelos cada vez más realistas y complejos.

Es frecuente, distinguir dos grandes familias dentro de las tormentas de diseño (Rivard G., 1996): la primera de ellas, contiene a todos los modelos que se encuentran basados en las curvas I-D-F; la segunda engloba aquellos que han estudiado la distribución temporal específica sobre una muestra de chaparrones empíricos.

Probablemente el máximo exponente de los modelos de la primera familia es el Chicago design storm. En el año 1957 Keifer D.J. y Chu H.H. proponen un chaparrón de proyecto para la ciudad de Chicago, relacionado con las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (I-D-F) obtenidas previamente en esta ciudad. Las intensidades asociadas a cada intervalo de tiempo se obtienen siguiendo la premisa de que la intensidad media para cualquier intervalo de tiempo, ha de ser igual a la intensidad proporcionada por la curva I-D. Seguidamente los bloques se reordenan, colocándose alternativamente a izquierda y derecha del pico, originando el sobrenombre de este modelo, más conocido como chaparrón por bloques alternos. Su metodología sencilla y práctica, y la facilidad de adaptación a otras regiones empleando la curva I-D-F característica, lo convirtieron en un modelo muy empleado.

Los inconvenientes de los modelos basados en las curvas I-D-F han sido profundamente estudiados por numerosos autores (McPherson M.B., 1978). Probablemente, las desventajas más importantes de estos métodos son que el volumen total de precipitación es elegido en función de una duración arbitraria, y que el periodo de retorno real es desconocido.

La otra gran corriente de modelos, se basa en el estudio de las características de la distribución temporal de la lluvia en una región. En esta línea, el trabajo de Huff F.A. (1967), sienta las bases del análisis de series pluviométricas, realizando el análisis de 261 tormentas en el estado de Illinois, y determinando en que cuartil del tiempo total se

produce la intensidad máxima. Todo su trabajo queda plasmado posteriormente en el modelo ISWS (Illinois State Water Survey Design Storm).

Hogg W.D. (1980, 1982) prosigue con el análisis de la variabilidad temporal, presentando un trabajo sobre la distribución temporal de la lluvia en distintas regiones de Canadá, para eventos de distinta duración. Sus investigaciones fueron empleadas para dar lugar el AES design storm, muy empleado para el dimensionamiento del drenaje urbano.

El SCS (Soil Conservation Service) estadounidense también aporta su grano de arena a la generación de lluvias sintéticas, presentando un modelo calibrado para distintos tipos de tormenta, distintas duraciones y regiones dentro de los Estados Unidos (Soil Conservation Service, 1975).

Por último, cabe mencionar el modelo de distribución temporal uniforme. Este sencillo modelo, supone una intensidad constante a lo largo de todo el periodo de simulación, y es muy utilizado en algunos modelos de producción de escorrentía, como por ejemplo el método racional.

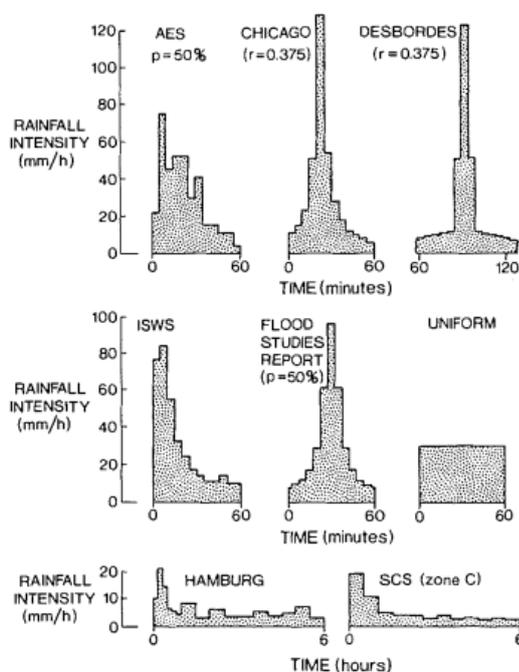


Figura 2.4 - Hietogramas obtenidos empleando distintos modelos de design storm. Fuente: Marsalek J. y Watt W.E. (1984).

Capítulo 3.- Análisis de las series pluviométricas históricas

En el capítulo que sigue se describe el proceso empleado para el análisis de la serie histórica de precipitaciones de la ciudad de Valencia.

3.1 - La ciudad de Valencia y su climatología.

El trabajo de investigación que aquí se expone, empleará en su desarrollo los datos meteorológicos de la ciudad de Valencia (España).

Valencia, es una ciudad costera mediterránea, ubicada en la parte oriental de la península Ibérica. Se trata de la tercera ciudad más poblada de España, contando en su área metropolitana con más de 1.5 millones de habitantes en su área metropolitana (Fuente: Datos de padrón de habitantes, Ayuntamiento de Valencia; 2013). A lo largo de la última mitad del siglo XX, la ciudad ha crecido de manera notable, estableciéndose como un importante destino turístico.

Tabla 3.1 - Parámetros climáticos promedio de Valencia. Fuente: Agencia Española de Meteorología.

Parámetros climáticos promedio de Valencia (1981–2010)													
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Temperatura máxima media (°C)	16.4	17.1	19.3	20.8	23.4	27.1	29.7	30.2	27.9	24.3	19.8	17	22.8
Temperatura media (°C)	11.8	12.5	14.4	16.2	19	22.9	25.6	26.1	23.5	19.7	15.3	12.6	18.3
Temperatura mínima media (°C)	7.1	7.8	9.6	11.5	14.6	18.6	21.5	21.9	19.1	15.2	10.8	8.1	13.8
Precipitación total (mm)	37	36	33	38	39	22	8	20	70	77	47	48	475
Días de precipitaciones (≥ 1 mm)	4.4	3.9	3.6	4.8	4.3	2.6	1.1	2.4	5	5	4.3	4.8	46.3

La ciudad presenta clima mediterráneo en su variedad típica (*Csa*, clasificación climática de Köppen). Esta climatología se caracteriza por tener unas temperaturas suaves, sin extremos muy acusados, y una precipitación superior a los 450 mm/año. Esta precipitación se encuentra distribuida de forma desigual a lo largo del año, con unos

mínimos muy marcados en los meses de junio, julio y agosto; y unos máximos localizados en los meses de septiembre y octubre, concentrándose casi un tercio de las lluvias anuales en estos dos meses.

Otra característica importante del régimen de precipitaciones es la irregularidad, produciéndose alternancia entre periodos de sequía e intervalos más húmedos. Estos periodos secos o húmedos suelen extenderse a lo largo de varios años debido a la inercia climática mediterránea. La torrencialidad de las lluvias es también supone un inconveniente en el régimen de lluvias de la región, siendo frecuentes los sistemas convectivos de mesoescala (SCM), más conocidos como gota fría, que se caracterizan por precipitaciones muy localizadas espacialmente y de gran intensidad.

Cabe reseñar que, aunque popularmente se cree que cualquier episodio de lluvias torrenciales está producido por este fenómeno, es un suceso poco frecuente y que solo se produce con intensidad algunos años en los meses de septiembre u octubre. Los SCM, son unas estructuras atmosféricas generadoras de tiempo adverso en superficie, con una vida que puede ir desde una simple tormenta hasta las 24 horas. El término mesoescala hace referencia a que son sistemas más pequeños que las borrascas y los anticiclones (escala sinóptica).

El origen de los SCM está fuertemente ligado a la diatermancia del Mar Mediterráneo. Las aguas marinas se enfrían más lentamente que las tierras emergidas por lo que, en los meses de septiembre y octubre, las aguas todavía conservan las temperaturas del verano, mientras que las tierras continentales se encuentran mucho más frías en proporción. La llegada del otoño trae consigo las primeras bolsas de aire frío en altura, por lo que se produce una convección de aire caliente desde la superficie marina hacia arriba. La cálida temperatura del agua, favorece la evaporación y la formación de nubes de tipología cumulonimbos, así como el rápido enfriamiento del vapor en altura, desencadena las intensas precipitaciones. El viento de Levante, muy habitual en el litoral español, es el encargado de transportar estas borrascas desde las inmediaciones del Mediterráneo hacia las costas.

Las fuertes e irregulares precipitaciones de la región, han traído consigo numerosas inundaciones a lo largo de su historia. Una de las más importantes tuvo lugar

el 14 de octubre de 1957, cuando se produjo una fuerte crecida en el río Turia (ondas de crecida de más de 3500 m³/s, fuente: CHJ) provocada por importantes precipitaciones a lo largo y ancho de la cuenca hidrográfica homónima. Esta crecida comportó gravísimos daños materiales y la pérdida de más de 80 vidas humanas. Para evitar que se volviesen a producir inundaciones de estas características, se acometió el desvío del río Turia, en una gran obra de ingeniería fluvial denominada Plan Sur.

3.2 - Obtención y preparación de los datos pluviométricos.

3.2.1 - Origen de los datos.

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se van a emplear datos pluviométricos cinco-minutales de la ciudad de Valencia. Estos datos provienen del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ), más concretamente de la estación meteorológica ubicada en la propia sede de la CHJ, en la avenida Blasco Ibáñez nº48.

El SAIH de la CHJ lleva en funcionamiento desde finales de 1989, siendo el primero en entrar en servicio en España, con el objetivo fundamental de tener mejores datos para optimizar el control y la seguridad en la gestión de los recursos hídricos. El sistema se desarrolló en el marco a escala nacional del Programa de Seguridad y Explotación de Presas, motivado por dos episodios lluviosos, en 1982 y 1983, que trajeron, entre otras consecuencias, la rotura de la presa de Tous.

Este sistema, consta de una amplia red de recogida de datos de precipitación, caudales circulantes, estado de compuertas de embalses, y muchas otras variables meteorológicas y de estado de masas de agua superficiales; que cubre el territorio adscrito de la Confederación. De este modo, se permite un seguimiento en tiempo real de todas estas variables. Esta red de tele-medida está en constante desarrollo y ampliación, constando en la actualidad con más de 200 puntos de toma de datos. Los datos recogidos, son enviados telemáticamente al Centro de Procesos de la Cuenca (CPC), donde se procede a su registro y análisis, para posteriormente quedar a disposición general.

La serie de datos que se va a emplear cubre el periodo comprendido entre 1990 y 2012 con una discretización temporal cinco-minutal.

3.2.2 - Valoración de los datos.

Aunque todos los datos empleados provienen de la misma fuente (SAIH-CHJ), ha de hacerse una distinción entre dos periodos de datos, según los estudios previos existentes:

- Periodo I: 1990-2006
- Periodo II: 2007-2012

Los datos comprendidos en el periodo I, han sido analizados y validados por Andrés-Doménech (2010), mientras que los del periodo II han sido tratados previamente por Martínez Mercado (2014).

Originalmente, los datos provenían de un fichero de texto ASCII, que además de los identificadores del intervalo temporal y del valor de lluvia registrado, también incluye un código informativo sobre el estado del pluviómetro en el momento de la medida. El código empleado es el siguiente:

- A: funcionamiento correcto.
- B: funcionamiento incorrecto.
- C: funcionamiento indeterminado.

De este modo, resulta posible realizar un análisis sobre la calidad de los datos, estudiando el porcentaje anual de datos que corresponde a cada una de las categorías anteriores. Las siguientes figuras muestran el número anual de fallos y datos registrados, así como su porcentaje sobre los datos registrados. Para su elaboración, se ha considerado como “fallo” tanto los datos pertenecientes al grupo B, como los pertenecientes al grupo C.

Tabla 3.2 - Fallos por año del pluviómetro de estudio. Elaboración propia.

Periodo	Año	Número de fallos	% Fallos	Datos registrados	% Registrado
Periodo I	1990	7663	7.29%	105120	100.00%
	1991	20282	19.29%	105120	100.00%
	1992	7547	7.16%	105408	100.00%
	1993	9909	9.43%	105120	100.00%
	1994	7424	7.06%	105120	100.00%
	1995	1173	1.12%	105110	99.99%
	1996	13498	12.81%	105408	100.00%

Capítulo 3 – Análisis de las series pluviométricas históricas

Miguel Rico Cortés

	1997	10000	9.51%	105120	100.00%
	1998	6748	6.42%	105120	100.00%
	1999	17353	16.51%	105120	100.00%
	2000	1103	1.05%	105408	100.00%
	2001	342	0.33%	105120	100.00%
	2002	231	0.22%	105120	100.00%
	2003	475	0.45%	105120	100.00%
	2004	475	0.45%	105408	100.00%
	2005	835	0.79%	105120	100.00%
	2006	397	0.38%	105120	100.00%
Periodo II	2007	111	0.11%	105120	100.00%
	2008	354	0.34%	105408	100.00%
	2009	53	0.06%	87552	83.29%
	2010	461	0.44%	105120	100.00%
	2011	1589	1.51%	105120	100.00%
	2012	252	0.25%	102431	97.18%
MEDIA	4707.6	4.48%	104301	99.15%	

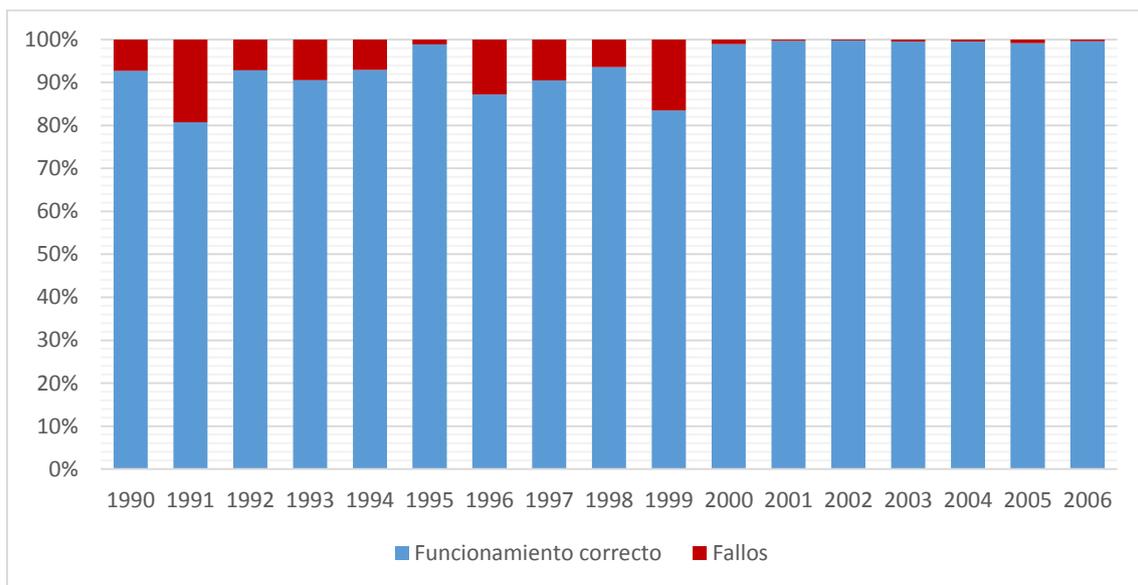


Figura 3.1 - Porcentaje anual de fallos en el Periodo I. Elaboración propia.

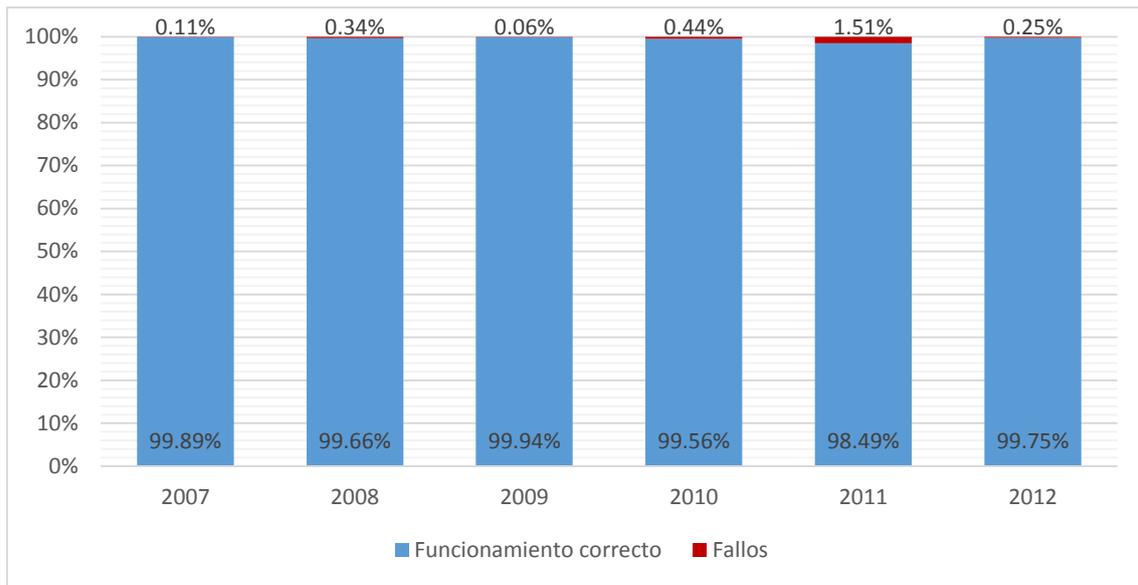


Figura 3.2 - Porcentaje anual de fallos en el Periodo II. Elaboración propia.

De los gráficos anteriores se desprende que existe una evolución favorable en la calidad de los datos, concentrándose la mayor parte de los fallos en los primeros nueve años de funcionamiento del sistema. También puede apreciarse como el porcentaje de fallos existente no es estadísticamente significativo para el desarrollo del trabajo que aquí se presenta.

Por otro lado, y coincidiendo con Martínez Mercado (2014), se ha comprobado que en los estados de fallo de los pluviómetros, no se han incluido valores de precipitación desproporcionados, sino que la mayoría presenta valores nulos (0 mm) o volúmenes despreciables. De este modo, los fallos incluidos en la serie de datos no van a provocar una invalidez de la investigación que se aborda.

Por tanto, se asumen como válidos los datos del SAIH-CHJ, correspondientes al intervalo 1990-2012, con discretización temporal cinco-minutal.

3.3 – Procesado de los datos.

3.3.1 - Separación de eventos independientes.

Una de las primeras cuestiones a abordar en el presente estudio, es la separación de eventos lluviosos estadísticamente independientes, de la serie continua de precipitaciones ya validada. Posteriormente, se determinarán unos criterios para seleccionar aquellos eventos independientes que sean provechosos para este estudio.

El concepto de episodio o evento de lluvia tiene un enfoque diferente desde el punto de vista meteorológico y desde el punto de vista puramente estadístico (Adams B. y Papa F., 2000). Si se quiere considerar desde un punto de vista exclusivamente estadístico, bastará con considerar la estructura externa del evento para poder asociar unas probabilidades de ocurrencia y superación.

Aunque no existe una metodología universal para la identificación de episodios estadísticamente independientes, el trabajo de Restrepo-Posada y Eagleson (1982) sigue marcando las directrices generales a seguir en la materia. Según estos autores, los eventos de precipitación deben considerarse estadísticamente independientes, de modo que existirá una determinada separación crítica S_{crit} que provocará que la serie de separaciones entre eventos independientes s , se ajuste a una

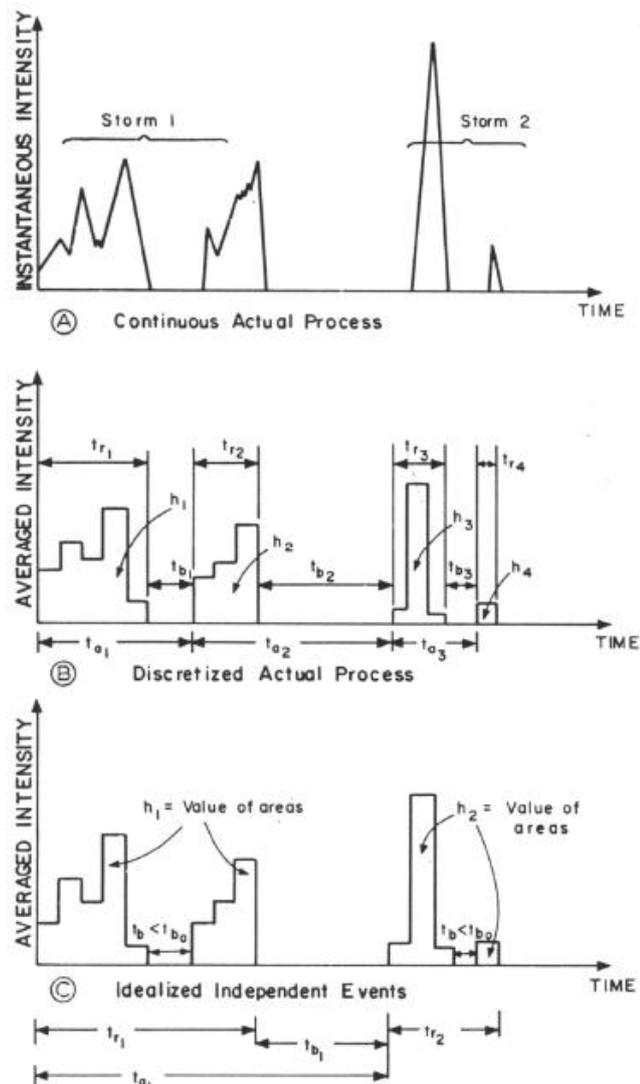


Figura 3.3 - Esquema de la metodología de obtención de t_{crit} . Fuente: Restrepo-Posada P.J. y Eagleson P.S. (1982).

función de distribución exponencial, de modo que siga un proceso de Poisson.

La metodología a seguir requiere por tanto la definición de series para distintos valores de s_{crit} , comprobando cuál de ellos se ajusta mejor al citado proceso de Poisson. De este modo, para cada separación propuesta, se tiene la siguiente función de distribución exponencial:

$$F_S(s) = 1 - e^{-\beta s} \quad s > 0$$

Esta función tiene un único parámetro, que puede estimarse por máxima verosimilitud mediante:

$$\hat{\beta}_{MLE} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n s} = [E(s)]^{-1}$$

Adicionalmente, el coeficiente de variación de la distribución puede obtenerse mediante la siguiente expresión, debiendo tomar un valor próximo a la unidad.

$$CV(s) = \frac{\sigma(s)}{E(s)}$$

Para el caso de la ciudad de Valencia, otros autores han estudiado esta separación crítica, fijando este valor en $s_{crit}=22$ horas (Andrés-Doménech, 2010). En definitiva, se considerarán como independientes aquellos eventos entre los que exista un tiempo igual o superior a 22 horas sin que se produzca precipitación.

3.3.2 - Selección de eventos independientes representativos.

Para el estudio que se aborda, no se emplearán todos los eventos independientes de la serie histórica, sino únicamente aquellos que cumplan unas determinadas condiciones.

Los episodios lluviosos requeridos, deben tener un cierto carácter convectivo, por lo que únicamente se considerarán aquellos que cumplan las siguientes condiciones:

$$i_{max} \geq 35 \text{ mm/h}$$

$$\beta^* \geq 0.3$$

El indicador de convectividad β^* de Llasat M.C. (2001) refleja de una manera objetiva el mayor o menor grado de convectividad de un episodio lluvioso, basándose exclusivamente en los datos registrados de precipitación cinco-minutales, sin requerir información meteorológica adicional. El parámetro propuesto, tiene la siguiente expresión:

$$\beta_{L,\Delta T}^* = \frac{\sum_{i=1}^N I(t_i, t_i + \Delta T) \theta(I - L)}{\sum_{i=1}^N I(t_i, t_i + \Delta T)}$$

Siendo $\theta(I-L)$ una función de Heaviside, y L un umbral de convectividad dependiente de ΔT , y estimado en 35 mm/h por Llasat (2001) para un ΔT cinco-minutal.

$$(I - L) = 1 \text{ si } I > L$$

$$(I - L) = 0 \text{ si } I < L$$

$$(I - L) = 1 \text{ si } I = L$$

En definitiva, este indicador obtiene la porción de lluvia total que ha precipitado con una intensidad superior a 35 mm/h. Aunque el umbral de convectividad L , ha sido estimado para la región de Catalunya, es perfectamente admisible suponer el mismo valor para la ciudad de Valencia.

Aplicando estos criterios, se tienen un total de 64 eventos independientes que reúnen las condiciones solicitadas.

3.4 - Análisis estadístico de los eventos independientes.

Una vez se dispone de la selección de eventos estadísticamente independientes, que reúnen las características solicitadas, se pasará al análisis estadístico y descriptivo de los mismos.

Una de las primeras consecuencias de los criterios impuestos para la elección de los episodios objeto de estudio, es que el número de tormentas por año no será constante y puede presentar cierta variabilidad. En la siguiente gráfica puede apreciarse el número de eventos independientes seleccionados por cada año de la serie histórica de datos.

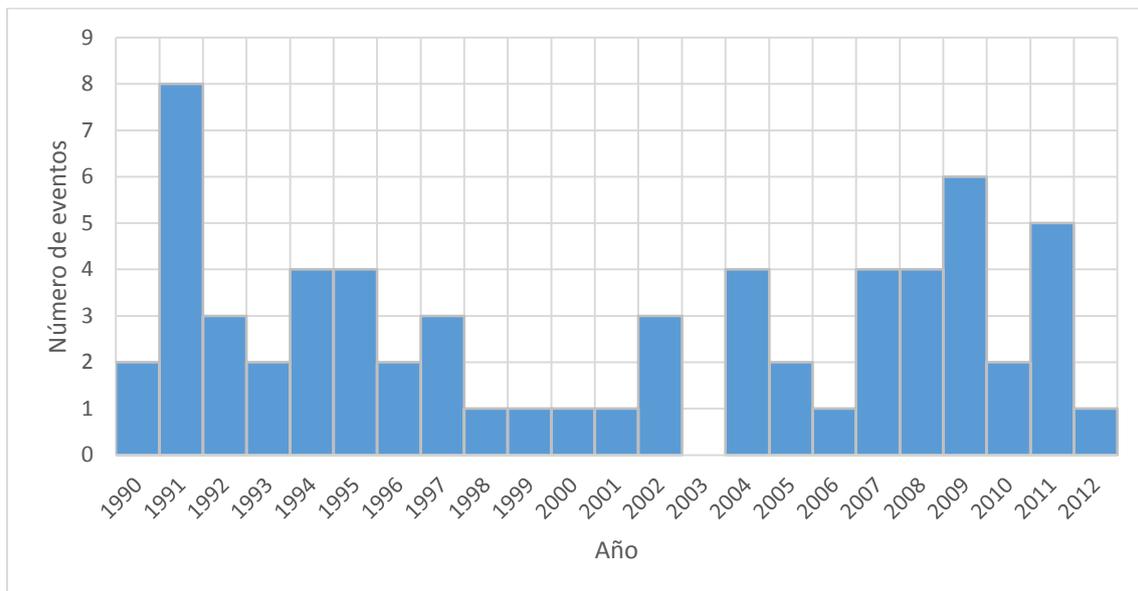


Figura 3.4 - Número de eventos seleccionados por año. Elaboración propia.

Del gráfico anterior se desprende que los episodios se encuentran relativamente bien distribuidos por los distintos años de la serie histórica, existiendo al menos un registro para cada año, exceptuando el 2003. Resulta destacable la abundancia de eventos en 1991.

En la siguiente tabla se muestran los estadísticos univariados habituales aplicados a la variable “número de eventos por año”. En ésta puede verse como la distribución muestra una ligera asimetría hacia la derecha (asimetría positiva),

presentando un sesgo mayor que 0. Por otro lado, el coeficiente de curtosis es menor que el propio de una distribución normal, lo que indica que la distribución tiene un pico menos agudo. Perfilando el histograma de frecuencias de esta variable, puede apreciarse perfectamente esta asimetría positiva, que aleja a la variable de ser normalmente distribuida.

Tabla 3.3 - Estadísticos univariados de "nº de eventos por año". Elaboración propia.

Número de eventos	64
Media	2.783
Máximo	8
Mínimo	0
Moda	1
Mediana	2
Desviación típica	1.906
Sesgo	0.9877
Curtosis	1.096

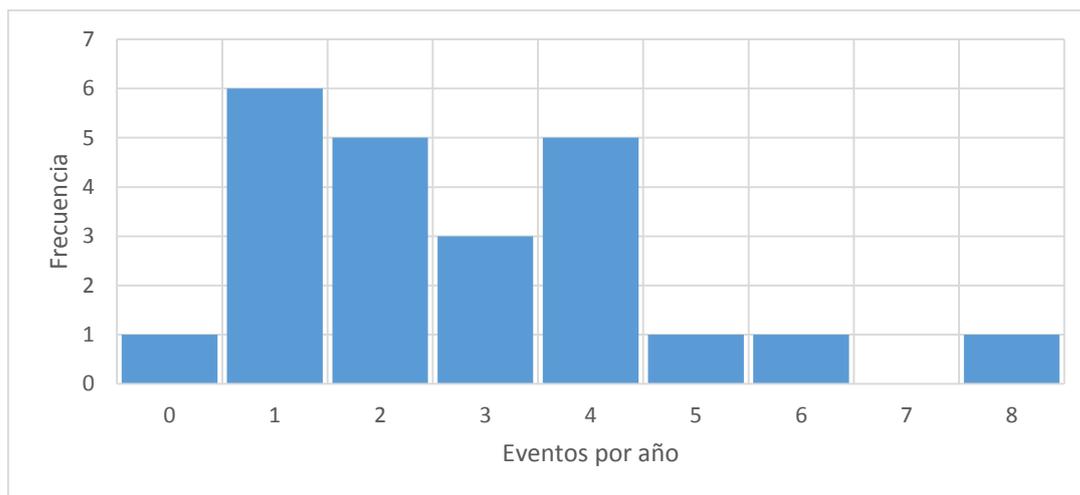


Figura 3.5 - Histograma de frecuencias de "nº de eventos por año". Elaboración propia.

Estudiada la distribución anual de los eventos, puede pasarse a la descripción estadística de las tormentas seleccionadas. Para este análisis se atenderá a cuatro descriptores fundamentales de cada episodio:

- *Beta*: El indicador de convectividad adimensional definido por Llasat (2001) valora de manera objetiva el grado de convectividad del evento. Se ha considerado uno de los criterios de selección de tormentas objeto de estudio, forzando a éstas a tener un $\beta^* > 0.3$.

- *Volumen*: Esta variable recoge la cantidad total de precipitación registrada por unidad de superficie durante el episodio lluvioso. Medido en litros por metro cuadrado, o lo que es lo mismo, milímetros.
- *Intensidad máxima*: Refleja la máxima intensidad promedio cinco-minutal registrada durante todo el evento, medida en milímetros por hora.
- *Duración*: Muestra el tiempo transcurrido desde el inicio de la precipitación hasta el final del episodio lluvioso, incluyendo posibles periodos internos del evento con ausencia de precipitación. Medida en minutos.

Atendiendo a estos descriptores se realiza un análisis estadístico univariado de los mismos, obteniéndose la tabla de resultados que se muestra; en la que pueden verse los valores promedio de los descriptores, así como sus rangos de variación. También se incluyen los sesgos y coeficientes de curtosis, que muestran como todas las variables tienen una asimetría positiva, como es habitual en esta tipología de variables geoestadísticas.

Tabla 3.4 - Estadísticos univariados de los descriptores de cada evento independiente. Elaboración propia.

	Beta	Volumen	Intensidad máxima	Duración
Media	0.58	33.81	78.86	610.2
Máximo	1.00	220.8	206.4	4010
Mínimo	0.30	4.6	36	15
Mediana	0.53	21.1	69.6	250
Desviación típica	0.1941	41.41	38.35	802.6
Sesgo	0.5375	2.597	1.395	2.013
Curtosis	-0.7219	7.386	1.774	4.647

Destacable resulta la enorme variabilidad existente en las duraciones de los eventos. Como ya se ha comentado en la descripción de las variables, la duración puede incluir grandes periodos internos con ausencia de precipitación. La concatenación de varias celdas convectivas espaciadas unas horas, entre las que puede existir o no precipitación, da lugar a estos episodios lluviosos que pueden llegar a varios días de duración.

En ocasiones estas celdas convectivas (denominadas también, y en adelante, como chaparrones), están unidas entre sí por una lluvia de intensidad muy débil (entre 2.4 y 4.8 mm/h) denominada intensidad de fondo. Habitualmente, estas celdas convectivas solo cubren una pequeña parte de la duración total del episodio, sin embargo suponen un alto porcentaje de la lluvia total acumulada, en muchas ocasiones superior al 80%.

Estos eventos extremadamente largos son la puerta de entrada al siguiente paso a abordar en este estudio, que consistirá en tratar de aislar aquellas celdas convectivas (chaparrones) que son las verdaderas protagonistas del episodio lluvioso. Estos chaparrones son los realmente importantes a efectos prácticos y, al fin y al cabo, los que se pretenden simular con el modelo temporalmente distribuido propuesto.

El coeficiente de correlación es un reflejo de la dependencia lineal existente entre dos variables, pudiendo variar entre -1 y 1. Obteniendo este coeficiente para todas las parejas de variables y disponiéndolos ordenadamente, se tiene la matriz de correlación. En la siguiente tabla se muestra dicha matriz, en la que se puede ver como no existe una correlación lineal elevada para ninguna pareja de descriptores. Como resulta evidente, se trata de una matriz simétrica con valores unitarios en la diagonal (autocorrelación).

Tabla 3.5 - Matriz de correlación de los descriptores de episodios independientes. Elaboración propia.

	β	V (mm)	I _{max} (mm/h)	t (min)
β	1	-	-	-
V (mm)	-0.1806	1	-	-
I _{max} (mm/h)	0.3806	0.4241	1	-
t (min)	-0.3867	0.6484	0.1397	1

Para Llasat (2001), el indicador de convectividad β^* sirve como criterio para realizar una clasificación cualitativa de las tormentas. El autor, propone la siguiente clasificación:

- $\beta^* = 0$ No convectiva (*non-convective*)
- $0 < \beta^* \leq 0.3$ Ligeramente convectiva (*slightly convective*)
- $0.3 < \beta^* \leq 0.8$ Moderadamente convectiva (*moderately convective*)
- $0.8 < \beta^* \leq 1.0$ Fuertemente convectiva (*strongly convective*)

De las 64 tormentas independientes, 10 tienen un carácter fuertemente convectivo, presentando valores de β^* superiores a 0.8.

También puede resultar de utilidad conocer la distribución estacional de los eventos de precipitación. Para ello se clasificarán las tormentas atendiendo a su época de ocurrencia, según las indicaciones propuesta por Martínez Mercado (2014) para la ciudad de Valencia:

- Época lluviosa: Comprende los meses de septiembre y octubre.
- Época intermedia: Incluye los meses de diciembre, enero, febrero, marzo, abril, mayo y la primera quincena de junio.
- Época seca: Abarca la segunda quincena de junio, y los meses de julio y agosto.

En la siguiente tabla puede verse el número de eventos ocurridos en cada una de las épocas de precipitación. También puede verse la distribución de los indicadores β^* en los distintos periodos.

Tabla 3.6 - Distribución estacional de los eventos independientes. Elaboración propia.

Caracterización de β		Eventos por época		
Grado de convectividad	N	<i>Lluviosa</i>	<i>Intermedia</i>	<i>Seca</i>
<i>Moderately convective</i>	54	33	10	11
<i>Strongly convective</i>	10	3	6	1
TOTAL	64	36	16	12

3.5 - Identificación de chaparrones en los eventos lluviosos.

Como ya se ha adelantado en el apartado anterior, uno de los pasos clave en el desarrollo de este trabajo de investigación, será la obtención de aquellos chaparrones que se encuentran embebidos en los eventos lluviosos independientes seleccionados.

Se entiende por chaparrón, una lluvia de intensidad media considerable que concentra un alto porcentaje del total de lluvia precipitada en un episodio lluvioso. Están relacionados con la presencia de celdas convectivas de precipitación que descargan el volumen que almacenan sobre una determinada región.

Antes de acometer la tarea de identificación se propone una clasificación cualitativa que trate de describir la diversidad existente en los eventos seleccionados.

- *Tipo I:* Se trata de una tormenta formada por una única celda convectiva. Se caracterizan por tener una duración moderada y una intensidad media considerable. Pueden tener intervalos de intensidad baja antes y/o después del grueso de la precipitación.

- *Tipo II:* Episodios lluviosos de larga duración que se componen de dos o más chaparrones separados en el tiempo. En este espaciamiento temporal puede existir una precipitación de baja intensidad (entre 2.4 y 4.8 mm/h) denominada intensidad de fondo. También puede no existir precipitación en este espaciamiento, siendo éste siempre inferior a las 22 horas requeridas para que los episodios sean estadísticamente independientes.

Siguiendo esta clasificación para los eventos independientes identificados en el apartado anterior, se tienen 58 del tipo I y 6 del tipo II.

Aunque no existe ninguna metodología específica para el aislamiento de estos chaparrones dentro de los episodios independientes, se tratará de seguir el siguiente proceso sistemático.

1 – Se identifica el pico del evento, siempre superior a 35 mm/h, y su entorno más próximo.

2 – El inicio del chaparrón vendrá marcado, por el bloque anterior a aquel que tenga una intensidad superior a 9.6 mm/h.

3 – El final del chaparrón vendrá marcado por un cambio en el signo de la derivada del hietograma, siempre en un entorno de intensidad inferior a 9.6 mm/h.

Desafortunadamente se trata de un procedimiento complejo y difícil de automatizar. Además cada chaparrón requiere de una revisión de sus características particulares, que podrían requerir romper alguna de las reglas propuestas para así poder incluir su particularidad. Siguiendo esta metodología, se extraen de los episodios independientes un total de 73 chaparrones, con las características que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.7 - Descriptores de los chaparrones seleccionados. Elaboración propia.

Año	Datos episodio completo		Datos chaparrón			% episodio completo	
	V _t (mm)	t _t (min)	V (mm)	I _{max} (mm/h)	t (min)	% V _t	% t _t
1990	23.6	1310	18.6	81.6	35	78.81%	2.67%
1990	8.8	50	8	50.4	30	90.91%	60.00%
1991	5	25	4.8	36	15	96.00%	60.00%
1991	11.4	135	8.8	52.8	25	77.19%	18.52%
1991	5.2	20	5.2	57.6	15	100.00%	75.00%
1991	14.8	80	10.2	84	20	68.92%	25.00%
1991	22	105	6.6	45.6	25	30.00%	23.81%
1991	22	105	15	43.2	35	68.18%	33.33%
1991	40.6	650	38.6	170.4	55	95.07%	8.46%
1991	10.2	130	9.8	57.6	25	96.08%	19.23%
1991	58	1125	39	91.2	65	67.24%	5.78%
1992	4.6	15	4.6	45.6	15	100.00%	100.00%
1992	74	745	69.2	148.8	70	93.51%	9.40%
1992	4.6	15	4.6	38.4	15	100.00%	100.00%
1993	5.2	20	5.2	50.4	20	100.00%	100.00%
1993	8.6	115	7.8	57.6	25	90.70%	21.74%
1994	13	285	11.4	136.8	10	87.69%	3.51%
1994	12.8	30	12.8	120	30	100.00%	100.00%
1994	92	1810	38.6	182.4	50	41.96%	2.76%
1994	30.6	140	29.4	103.2	55	96.08%	39.29%

Capítulo 3 – Análisis de las series pluviométricas históricas

Miguel Rico Cortés

1995	12.4	15	12.4	76.8	15	100.00%	100.00%
1995	5	95	4.2	38.4	15	84.00%	15.79%
1995	10.6	335	10	76.8	20	94.34%	5.97%
1995	21	25	21	129.6	25	100.00%	100.00%
1996	11.2	440	7.6	64.8	20	67.86%	4.55%
1996	17.6	805	8	72	15	45.45%	1.86%
1997	36	225	5	36	25	13.89%	11.11%
1997	36	225	15	62.4	35	41.67%	15.56%
1997	25.2	85	23.2	60	55	92.06%	64.71%
1997	21.2	255	12.4	55.2	35	58.49%	13.73%
1998	9.4	40	9.2	36	30	97.87%	75.00%
1999	30.8	245	25.8	105.6	35	83.77%	14.29%
2000	220.8	4010	34.2	81.6	65	15.49%	1.62%
2000	220.8	4010	10.6	48	25	4.80%	0.62%
2000	220.8	4010	33.8	55.2	70	15.31%	1.75%
2000	220.8	4010	22.2	57.6	45	10.05%	1.12%
2001	31.2	1365	24.8	72	45	79.49%	3.30%
2002	120	500	52.4	124.8	75	43.67%	15.00%
2002	120	500	19.8	38.4	80	16.50%	16.00%
2002	7.4	20	7.4	40.8	20	100.00%	100.00%
2002	11.8	160	9.6	57.6	25	81.36%	15.63%
2004	45	40	45	206.4	40	100.00%	100.00%
2004	77.6	1415	31	79.2	60	39.95%	4.24%
2004	9.4	300	7.4	60	25	78.72%	8.33%
2004	39.4	735	28	50.4	85	71.07%	11.56%
2005	24	65	24	72	65	100.00%	100.00%
2005	4.8	25	4.6	38.4	15	95.83%	60.00%
2006	25.8	30	25.8	117.6	25	100.00%	83.33%
2007	13.2	980	10	48	30	75.76%	3.06%
2007	24.2	200	15	38.4	45	61.98%	22.50%
2007	105.4	2225	66.8	62.4	115	63.38%	5.17%
2007	158.8	835	51.4	105.6	70	32.37%	8.38%
2007	158.8	835	53.6	96	90	33.75%	10.78%
2008	8	45	4.8	40.8	20	60.00%	44.44%
2008	10.2	90	9.4	62.4	20	92.16%	22.22%
2008	8.8	490	5.4	50.4	20	61.36%	4.08%
2008	103.6	370	58.6	170.4	50	56.56%	13.51%
2009	16.6	615	11.4	48	35	68.67%	5.69%
2009	26.8	185	22.2	64.8	45	82.84%	24.32%
2009	42.8	1170	16.6	117.6	25	38.79%	2.14%
2009	51.4	4395	10.2	86.4	20	19.84%	0.46%
2009	51.4	4395	19.8	76.8	30	38.52%	0.68%
2009	148.4	2350	51.4	98.4	80	34.64%	3.40%
2009	148.4	2350	16.6	98.4	45	11.19%	1.91%

Chaparrón espacio-temporal para aplicaciones en hidrología urbana
Trabajo final de Máster

2009	148.4	2350	8.6	57.6	25	5.80%	1.06%
2010	14	580	11.2	67.2	25	80.00%	4.31%
2010	24.2	165	20.6	74.4	45	85.12%	27.27%
2011	41.8	1030	31.6	86.4	60	75.60%	5.83%
2011	12.2	25	12.2	62.4	25	100.00%	100.00%
2011	9	1465	5.8	36	20	64.44%	1.37%
2011	28	1010	23.6	103.2	40	84.29%	3.96%
2011	25	395	22.2	86.4	35	88.80%	8.86%
2012	29	1885	16	72	35	55.17%	1.86%

3.6 - Análisis estadístico de la muestra de chaparrones.

Dispuesta la muestra de chaparrones seleccionados de la serie histórica de partida, se da por finalizada la fase de extracción de información de la misma, pudiéndose pasar a abordar el análisis estadístico pormenorizado de la serie empírica de chaparrones disponible.

En primer lugar se realiza un análisis univariado de los tres descriptores fundamentales de los chaparrones. En éste puede observarse como el rango de variación de la variable duración, se encuentra mucho más acotado que en la muestra de eventos lluviosos independientes, presentando además una asimetría mucho menos marcada. Además, puede advertirse como todos los descriptores presentan asimetrías positivas y unos picos menos agudos que el de la distribución normal.

Tabla 3.8 - Estadísticos univariados de los descriptores de los chaparrones. Elaboración propia.

	Volumen	Intensidad máxima	Duración
Media	19.97	76.41	38.0
Máximo	69.2	206.4	115
Mínimo	4.2	36	10
Mediana	15	64.8	30
Desviación típica	15.90	37.28	21.9
Sesgo	1.394	1.461	1.210
Curtosis	1.363	2.091	1.176

Si se obtiene la matriz de correlaciones entre las variables, puede advertirse como existe una importante relación entre el volumen y la duración del chaparrón. Esta relación, intuitiva a primera vista, constituye un avance importante que podría permitir una relación biunívoca entre el volumen de un evento y su duración. Será por tanto, objeto de estudio en este mismo capítulo.

Tabla 3.9 - Matriz de correlación de los descriptores de la muestra de chaparrones. Elaboración propia.

	V (mm)	I _{max} (mm/h)	t (min)
V (mm)	1	-	-
I _{max} (mm/h)	0.6386	1	-
t (min)	0.8394	0.2609	1

La obtención de los histogramas de frecuencias de los tres descriptores también puede aportar información sobre la naturaleza de estas variables. Para ello, basta con determinar una serie de intervalos, denominados clases, y ver el número de sucesos que se inscriben dentro de cada uno de ellos. Aplicando este procedimiento a las tres variables dadas, se obtienen los histogramas que se muestran a continuación. En ellos puede observarse la ya mencionada asimetría positiva, así como la distribución de los datos.

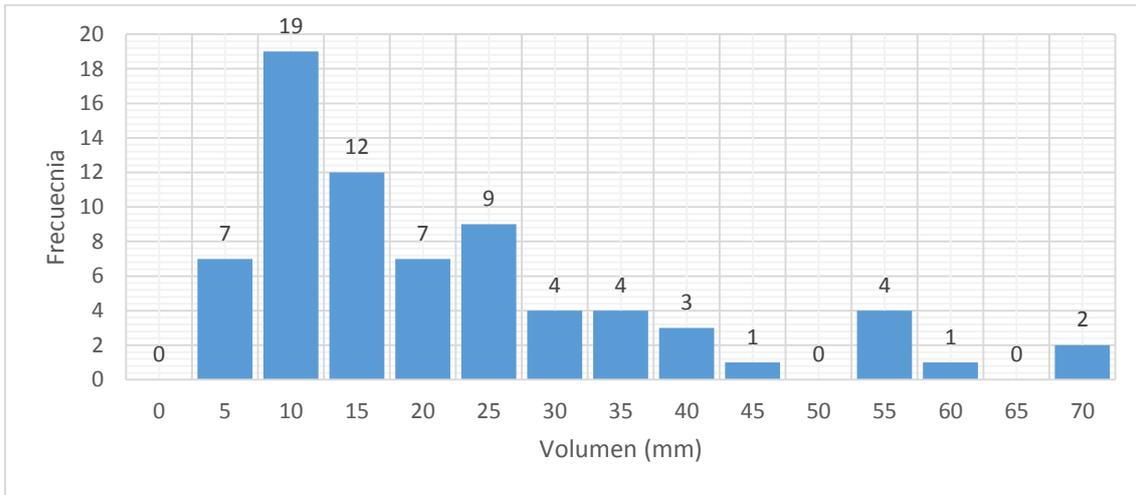


Figura 3.6 - Histograma de frecuencias de la variable "Volumen". Elaboración propia.

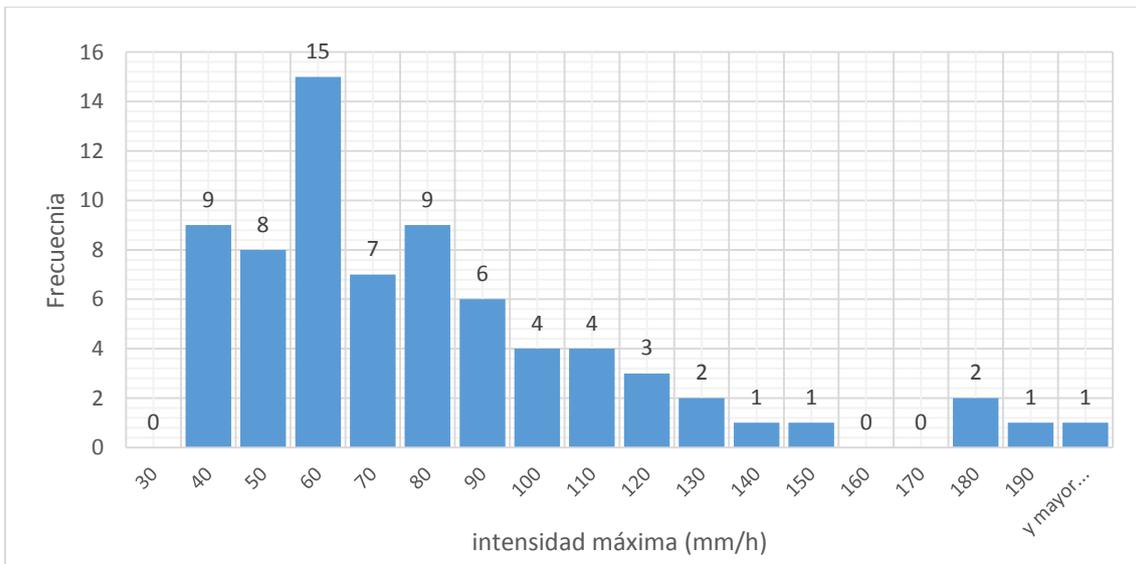


Figura 3.7 - Histograma de frecuencias de la variable "Intensidad máxima". Elaboración propia.

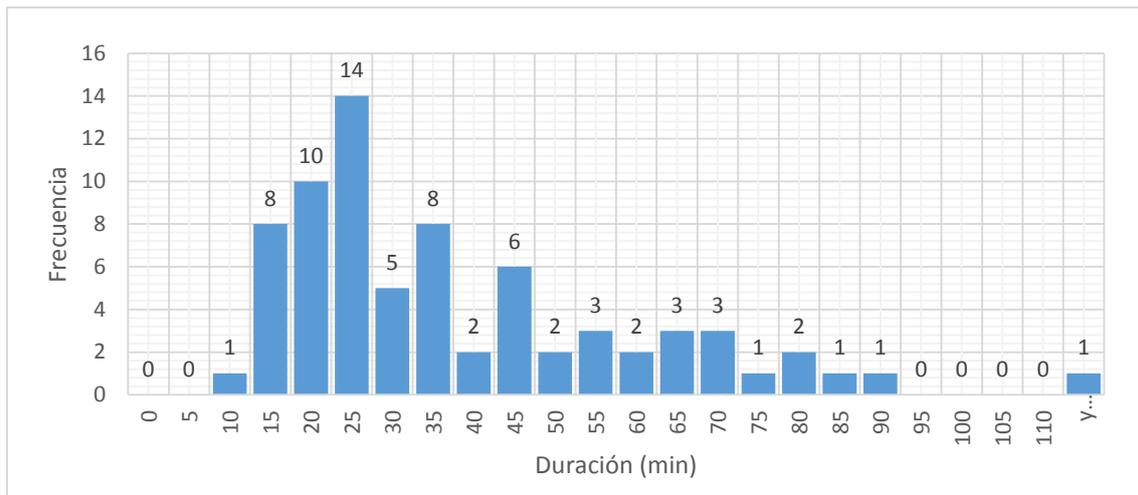


Figura 3.8 - Histograma de frecuencias de la variable "Duración". Elaboración propia.

Una vez conocidos los histogramas de frecuencia para todos los descriptores de los chaparrones, se pasará al ajuste de las principales funciones de distribución acumuladas. Se considerarán las siguientes funciones, ya descritas en el epígrafe 2.2:

- Gumbel:

$$Fx(x) = \exp(-\lambda e^{-\theta x})$$

- General Extreme Value (GEV):

$$Fx(x) = \exp\left[-\left(1 - \beta \frac{x - x_0}{\alpha}\right)^{1/\beta}\right]$$

- Two Component Extreme Value (TCEV):

$$Fx(x) = \exp(-\lambda_1 e^{-\theta_1 x} - \lambda_2 e^{-\theta_2 x})$$

Conocida la naturaleza de las funciones de distribución, puede pasarse a la obtención de los parámetros que las definen. Para ello, existen varias metodologías, entre las que destacan el Método de los Momentos (MOM) y el Método de Máxima Verosimilitud (MLE).

El Método de los Momentos, consiste en establecer tantas ecuaciones como parámetros, e igualar los momentos poblacionales con los momentos muestrales. Por

ejemplo, para establecer los parámetros de una función Gumbel, pueden igualarse las expresiones de la media y de la varianza, que son conocidas, con los mismos valores de la muestra poblacional. Se trata de un método sencillo y robusto, y muy utilizado para obtener una primera aproximación de los parámetros, antes de pasar el proceso a algoritmos de optimización.

$$\mu = (\ln \lambda + 0.5772) / \theta$$
$$\sigma^2 = \pi^2 / 6\theta^2$$

Por otro lado, el Método de Máxima Verosimilitud es un proceso mucho más exacto y complejo. En éste, se escogen aquellos parámetros que maximizan la función de verosimilitud. La función de verosimilitud es cualquier función proporcional a la función de densidad conjunta evaluada en la muestra observada. Es decir, los parámetros por ML son aquellos que maximizan la densidad de probabilidad de la muestra.

El software informático AFINS (Análisis de Frecuencia de extremos con información sistemática y no sistemática), desarrollado por el Grupo de Investigación de Hidráulica e Hidrología, enmarcado en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia (DIHMA-UPV), permite obtener los parámetros de las funciones anteriormente expuestas de un modo muy rápido y fiable. Para ello, el programa empieza realizando una estimación inicial por el Método de los Momentos, para posteriormente realizar una optimización de los parámetros, basada en el método de máxima verosimilitud.

Empleando este programa, se obtienen los parámetros que caracterizan las funciones de distribución de extremos citadas, para las variables volumen, intensidad máxima y duración de la muestra de chaparrones. La siguiente tabla detalla los resultados obtenidos en la estimación de los parámetros para las cuatro variables, mientras que las gráficas que siguen muestran la representación de estas funciones frente a la distribución empírica (*plotting position*). Esta función de distribución empírica está especialmente recomendada para el ajuste de valores extremos (Gringorten I.I., 1963)

$$F_{empirica}(x) = \frac{(n + 1) - i - \alpha}{(n + 1) - 2\alpha}$$

siendo:

- i: posición ocupada en el vector ordenado.
- α : parámetro probabilístico fijado en 0.44.

Tabla 3.10 - Parámetros de las funciones de distribución estudiadas para los descriptores de la muestra de chaparrones. Elaboración propia.

Gumbel					
Volumen		Intensidad max.		Duración	
λ	3.67991	λ	11.6248	λ	6.68739
θ	0.098168	θ	0.040448	θ	0.066723
General Extreme Value (GEV)					
Volumen		Intensidad max.		Duración	
X_0	10.6961	X_0	56.8199	X_0	10.6961
α	7.16371	α	20.7772	α	7.16371
β	-0.5703	β	-0.31747	β	-0.5703
Two Component Extreme Value (TCEV)					
Volumen		Intensidad max.		Duración	
λ_1	8.79829	λ_1	11.1999	λ_1	6.948
θ_1	0.361146	θ_1	0.042892	θ_1	0.076551
λ_2	2.01666	λ_2	0.521636	λ_2	0.502259
θ_2	0.072333	θ_2	0.019879	θ_2	0.032761

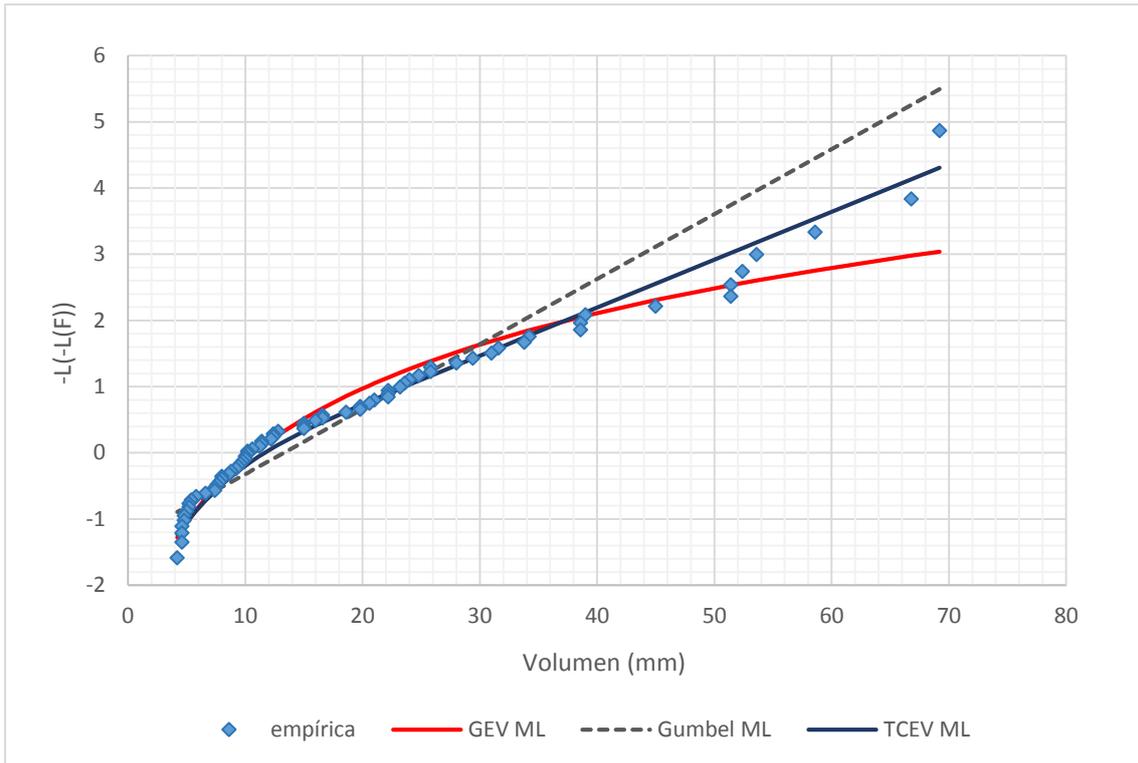


Figura 3.9 - Funciones de distribución estudiadas para la variable "Volumen". Elaboración propia.

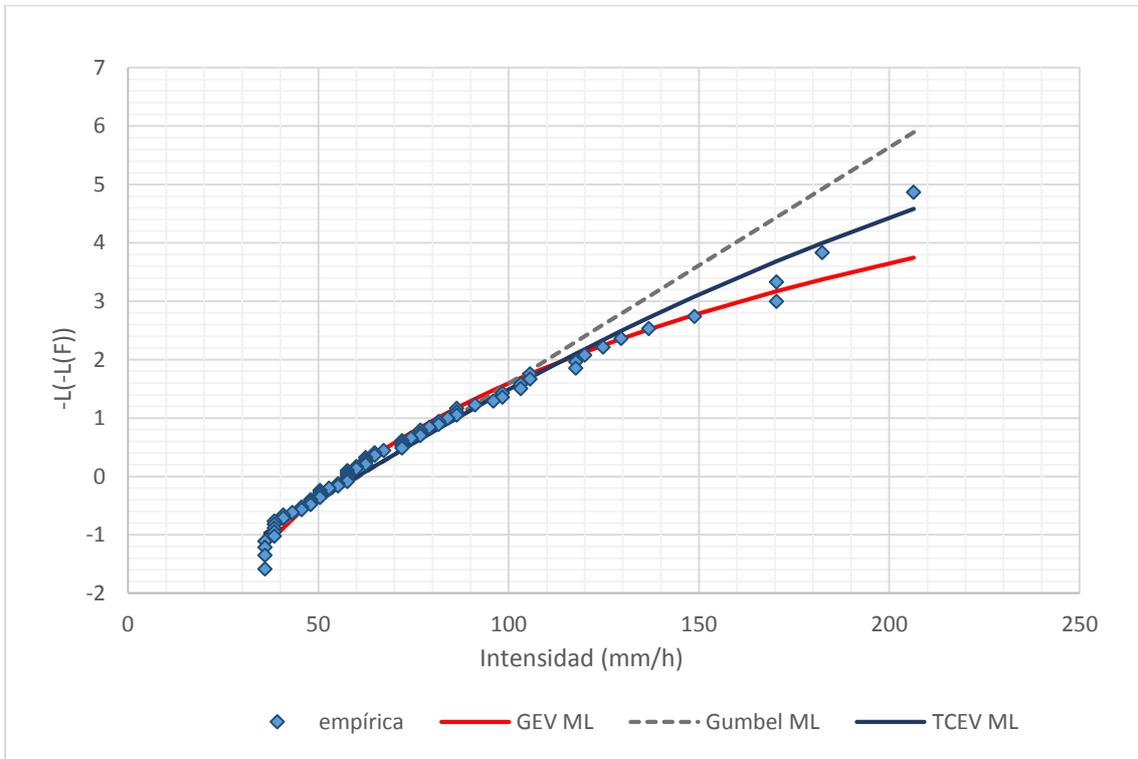


Figura 3.10 - Funciones de distribución estudiadas para la variable "Intensidad máxima". Elaboración propia.

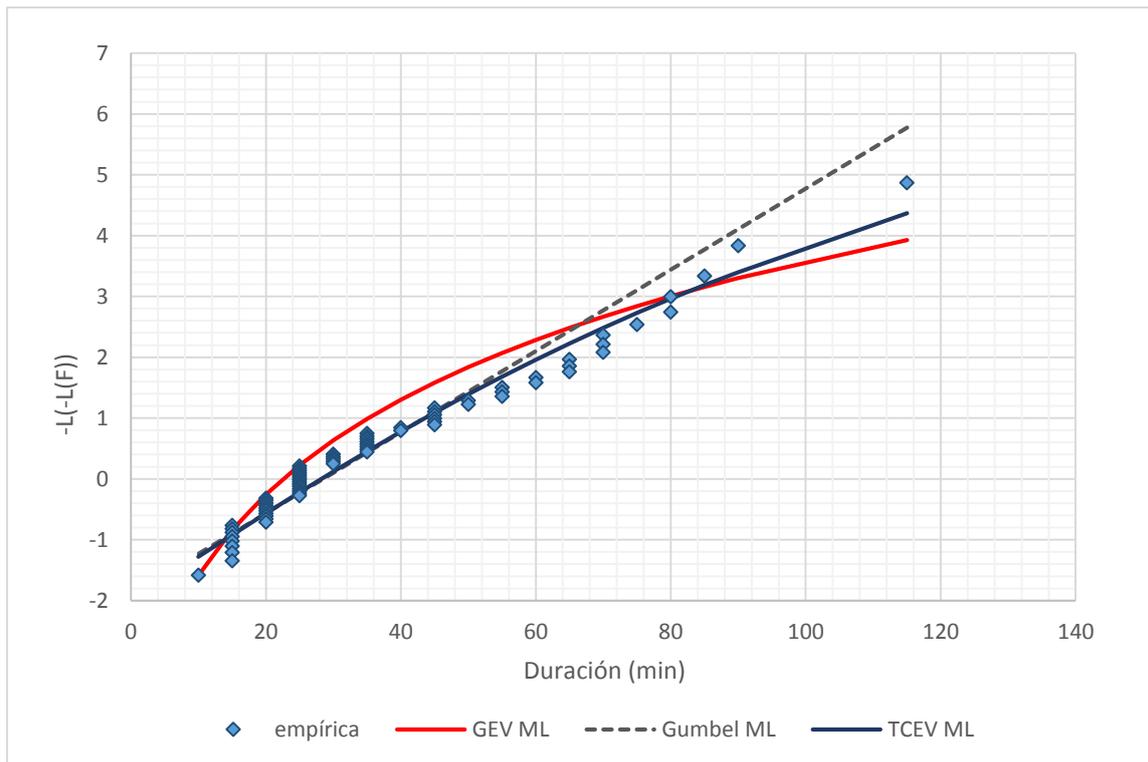


Figura 3.11 - Funciones de distribución estudiadas para la variable "Duración". Elaboración propia.

Atendiendo a las gráficas anteriores, pueden extraerse varias conclusiones importantes. Por un lado, puede comprobarse que para las tres variables, la función de distribución TCEV es la que presenta un mejor ajuste. La función Gumbel tiende a subestimar la probabilidad de ocurrencia, mientras que la GEV incurre en sobrestimaciones excesivas. El escalonamiento en la distribución empírica de duraciones es debido a la naturaleza discreta de esta magnitud, ya que se está trabajando con un Δt cinco-minutal.

Estas funciones de distribución van a permitir obtener los cuantiles de las variables estudiadas, asociados a una determinada probabilidad de ocurrencia. Además, a partir del número de eventos promedio por año y esta probabilidad, pueden obtenerse los periodos de retorno, una de las principales herramientas en el dimensionamiento de infraestructuras de hidráulicas.

3.7 - Estudio de la relación Volumen-Duración.

Como ya se ha comentado tras la obtención de la matriz de correlaciones, existe una importante correlación entre el volumen total precipitado de un chaparrón y su duración. Con el estudio de esta vinculación entre dos de los descriptores fundamentales de la muestra de chaparrones, se tratará de establecer una relación biunívoca, estadísticamente significativa, entre las dos variables.

El coeficiente de correlación de Pearson muestra posibles dependencias lineales entre variables aleatorias cuantitativas, además, y a diferencia de la covarianza, esta relación es independiente de la magnitud de las variables comparadas.

$$\rho_{XY} = \frac{1/n \sum_{i=1}^n (x_i - m_x) \cdot (y_i - m_y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

Valores próximos a la unidad, delatan una correlación positiva perfecta, en la que existe una dependencia total entre las variables en la que si una de ellas aumenta, la otra lo hace también en proporción constante. Para las variables volumen y duración, se tiene un coeficiente de correlación de 0.84, por lo que existe una importante linealidad positiva.

Al representar todas las parejas volumen-duración de los chaparrones empíricos extraídos de la serie (Figura 3.12), puede apreciarse como existe una clara relación lineal entre ambas variables. No obstante, la nube de puntos planteada presenta una excesiva dispersión concentrada en los volúmenes intermedios, lo que podría dar lugar a errores excesivos en la estimación de una duración a partir de un volumen.

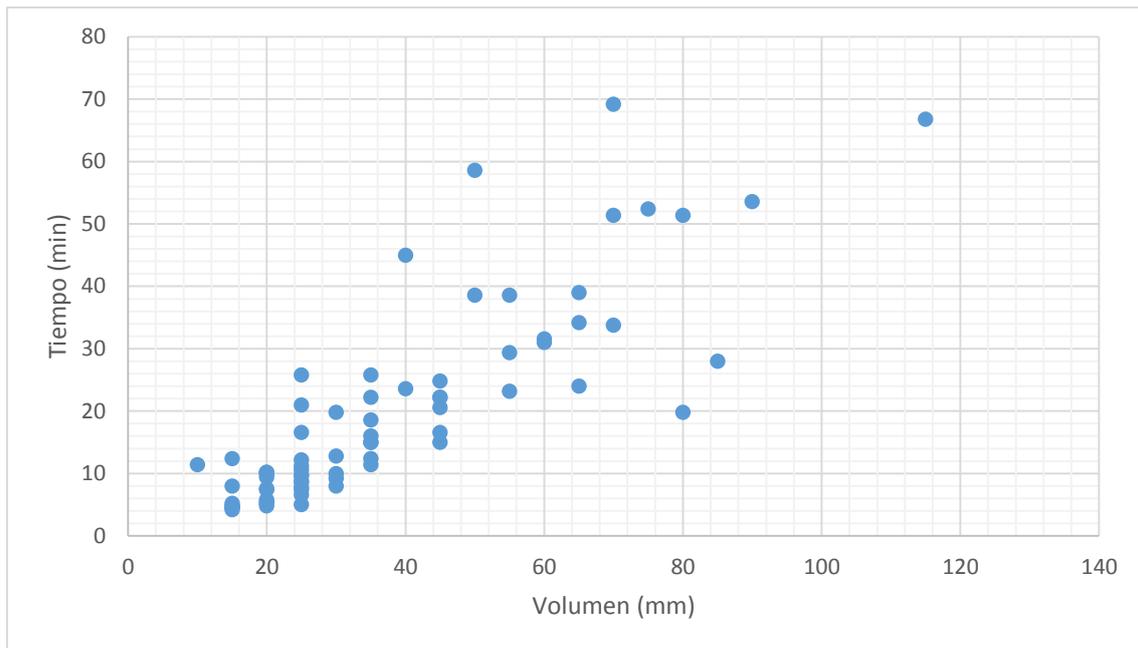


Figura 3.12 - Parejas Volumen-Duración para todos los chaparrones de la muestra. Elaboración propia.

Para tratar de mejorar esta situación, se tratará de abordar un análisis conjunto de las tres variables fundamentales: el volumen, la duración y la intensidad máxima.

Representando las nubes de puntos de las parejas Volumen-Intensidad máxima (Figura 3.13) e Intensidad máxima-Duración (Figura 3.14), no se puede observar ningún patrón que resulte de utilidad, presentando nubes de puntos bastante erráticas, tal y como era previsible en vista de los bajos coeficientes de correlación obtenidos para estas parejas de variables.

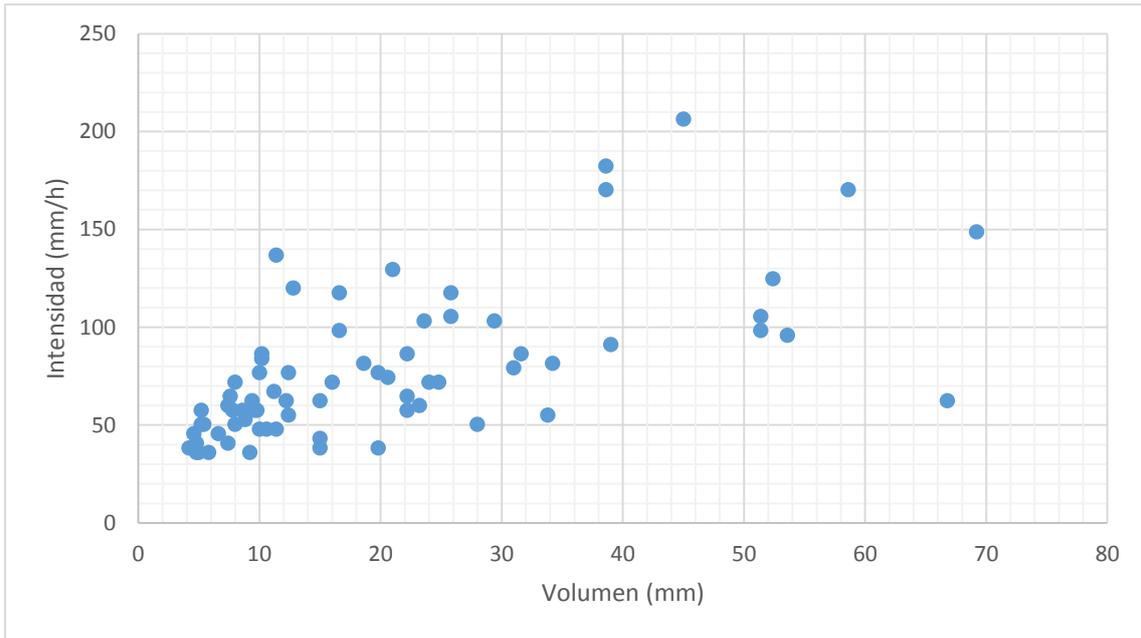


Figura 3.13 - Parejas Volumen-Intensidad máxima para todos los chaparrones de la muestra. Elaboración propia.

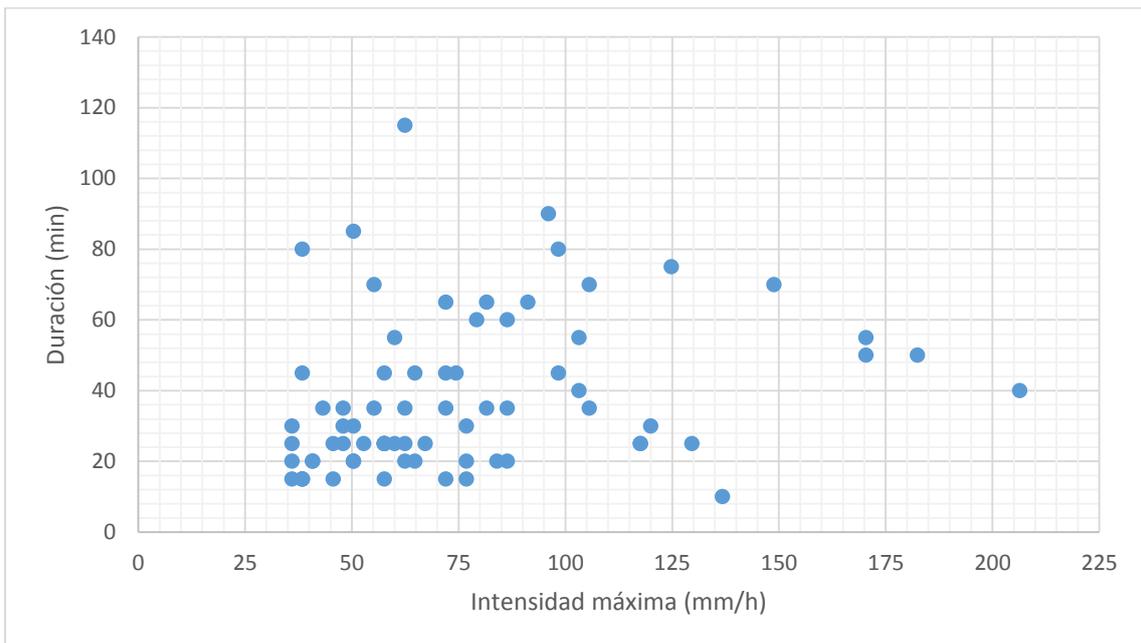


Figura 3.14 - Parejas Intensidad máxima-Duración para todos los chaparrones de la muestra. Elaboración propia.

Una posibilidad para tratar de abordar el análisis, consiste en fraccionar la población de chaparrones, entre poblaciones independientes, atendiendo a la intensidad máxima registrada en el chaparrón. Para abordar este procedimiento, se requiere la definición de los umbrales que van a constituir la separación entre las

poblaciones de chaparrones. Se determinaran, por tanto, dos valores de intensidad A y B, que reclasificarán los chaparrones según se muestra:

- $I_{\max} < A$: Intensidad baja
- $A < I_{\max} < B$: Intensidad media
- $I_{\max} > B$: Intensidad alta

La determinación de estos valores A y B de intensidad, puede resultar un proceso sumamente complicado que puede requerir de un análisis de sensibilidad estadística. Sin embargo, se realizará un procedimiento simplificado en el que se propondrán tres parejas de umbrales y se adoptará finalmente la que presente unas condiciones más favorables.

▪ **Opción I.**

- $I_{\max} < 50$ mm/h : Intensidad baja
- $50 < I_{\max} < 100$ mm/h: Intensidad media
- $I_{\max} > 100$ mm/h: Intensidad alta

Tabla 3.11 - Nº de eventos y coeficiente de ajuste para la Opción I. Elaboración propia.

Tipología	nº de eventos	R ² ajuste
Intensidad baja	30	0.8377
Intensidad media	24	0.8911
Intensidad alta	19	0.7082

Esta primera aproximación propone unos intervalos cualitativamente correctos para lo que en Valencia se consideran intensidades bajas, medias y altas. El ajuste lineal mejora muy significativa respecto a la nube de puntos inicial. No obstante, la gran diferencia entre el nº de eventos en una y otra categoría (Tabla 3.11) puede resultar problemática desde el punto de vista de la significancia estadística.

▪ **Opción II.**

- $I_{\max} < 55$ mm/h : Intensidad baja
- $55 < I_{\max} < 80$ mm/h: Intensidad media
- $I_{\max} > 80$ mm/h: Intensidad alta

Tabla 3.12 - Nº de eventos y coeficiente de ajuste para la Opción II. Elaboración propia.

Tipología	nº de eventos	R ² ajuste
Intensidad baja	22	0.9039
Intensidad media	26	0.926
Intensidad alta	25	0.6775

En esta segunda estimación, se persigue que los números de eventos por tipología sean lo más similares posible, siempre dentro de unos valores cualitativamente correctos para la ciudad de Valencia. Sin embargo, la gran diferencia existente entre los valores del coeficiente de determinación (Tabla 3.12) entre las intensidades baja y media y la intensidad alta, puede ser mejorada.

▪ **Opción III.**

- $I_{\max} < 55$ mm/h : Intensidad baja
- $55 < I_{\max} < 75$ mm/h: Intensidad media
- $I_{\max} > 75$ mm/h: Intensidad alta

Tabla 3.13 - Nº de eventos y coeficiente de ajuste para la Opción III. Elaboración propia.

Tipología	nº de eventos	R ² ajuste
Intensidad baja	22	0.9039
Intensidad media	22	0.9497
Intensidad alta	29	0.7018

En esta última alternativa se busca una homogenización en los coeficientes de determinación, buscando también que el número de eventos sea lo más similar posible (Tabla 3.13).

Finalmente, se asumen los umbrales propuestos por la Opción III al ser la que mejor compatibiliza el número de eventos por tipología con un buen ajuste de cada categoría. Representando las muestras asociadas a cada población (tipología) y planeando un ajuste lineal sobre las mismas, se obtienen las siguientes salidas gráficas:

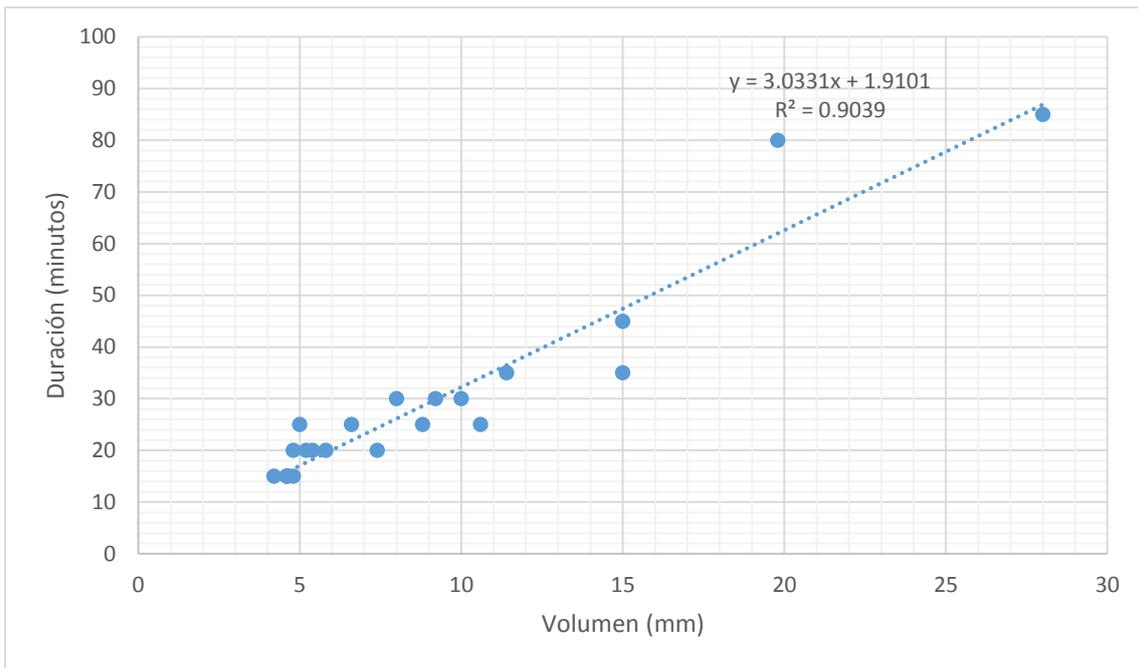


Figura 3.15 - Parejas Volumen-Duración y ajuste lineal, para chaparrones con intensidad máxima baja ($I_{max} < 55$ mm/h). Elaboración propia.

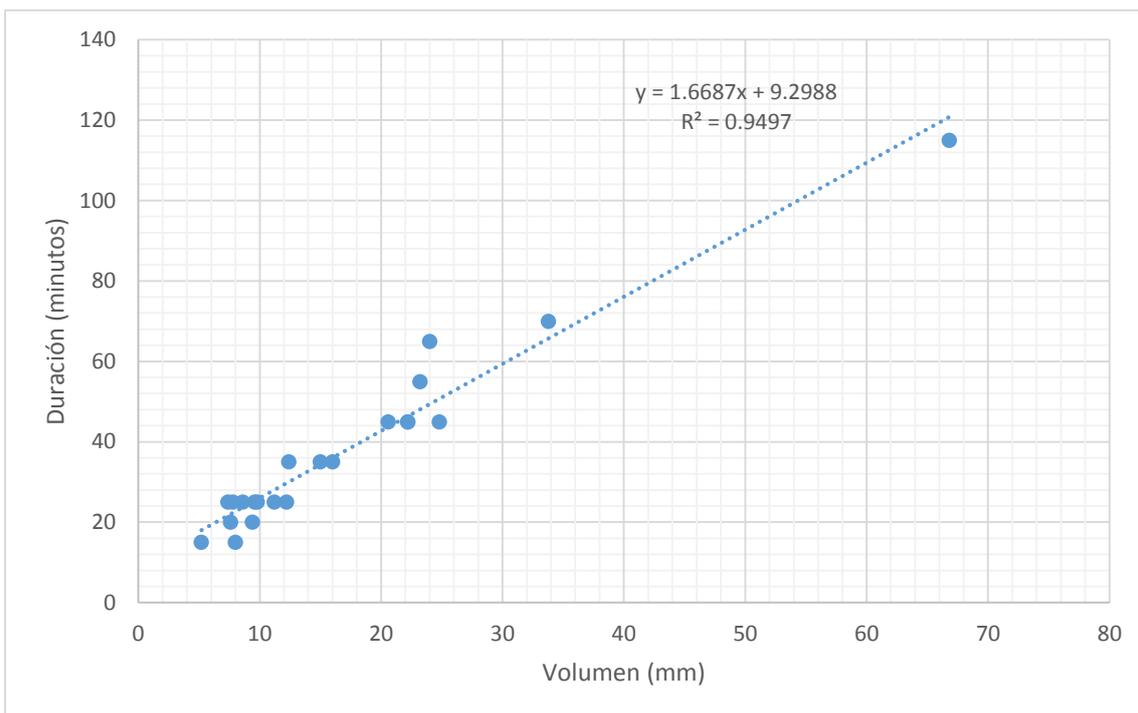


Figura 3.16 - Parejas Volumen-Duración y ajuste lineal, para chaparrones con intensidad máxima media ($55 < I_{max} < 75$ mm/h). Elaboración propia.

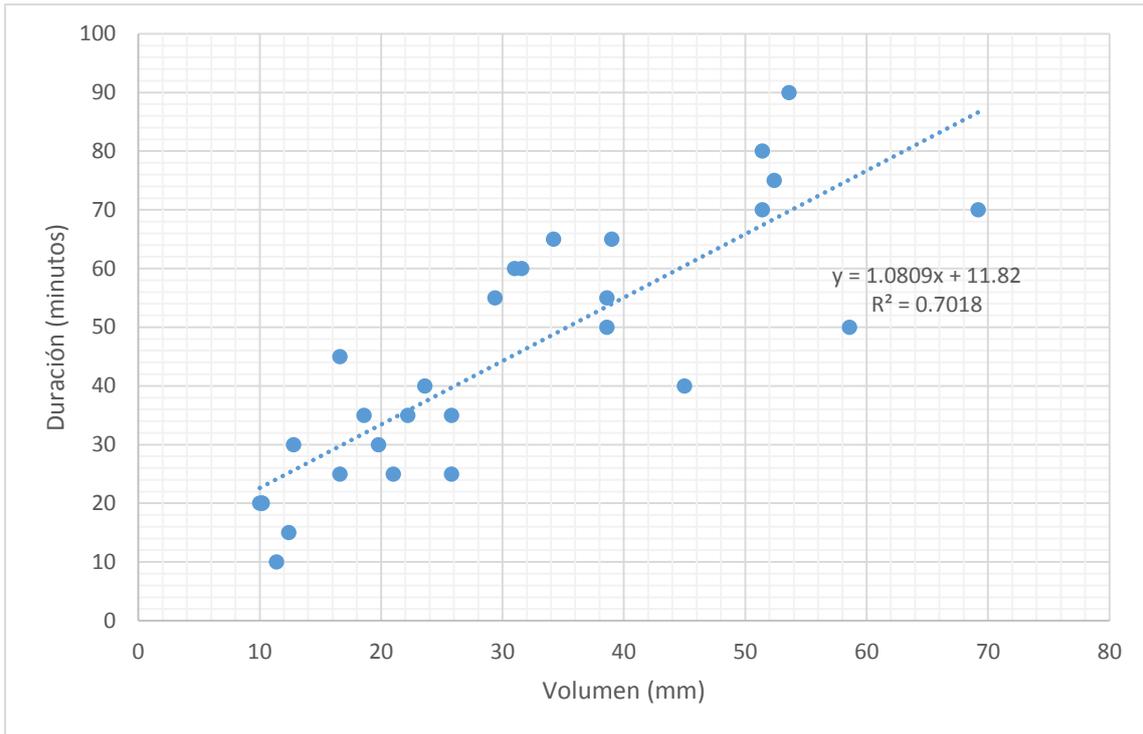


Figura 3.17 - Parejas Volumen-Duración y ajuste lineal, para chaparrones con intensidad máxima alta ($I_{max} > 75$ mm/h). Elaboración propia.

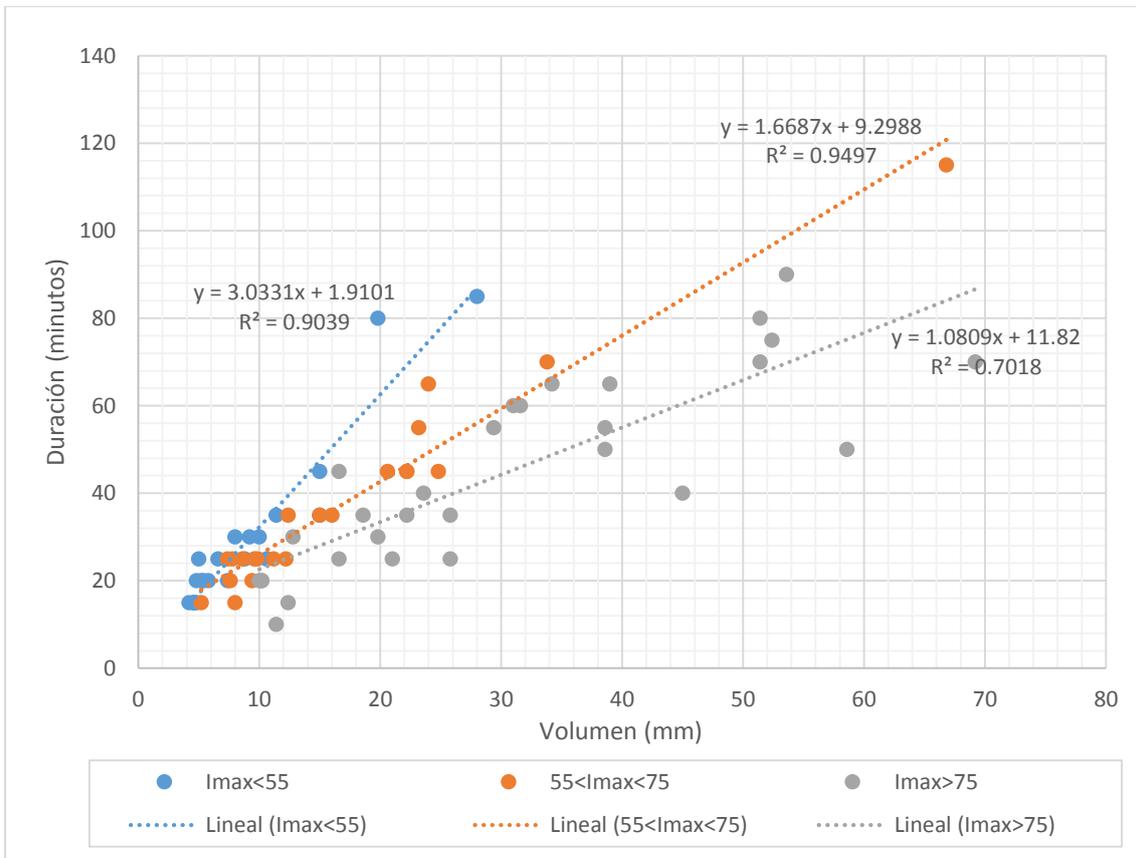


Figura 3.18 - Parejas Volumen-Duración y ajuste lineal, para todas las familias de intensidades. Elaboración propia.

En conclusión, de los ajustes lineales planteados se obtienen las siguientes relaciones Volumen-Duración (con Volumen en mm e Intensidad máxima en mm/h):

Tabla 3.14 - Relación entre volumen y duración para las familias estudiadas. Elaboración propia.

Tipología	Intervalo	Ecuación	R ²
Intensidad baja	$I_{\max} < 55$	$D = 3.0331 \cdot V + 1.9101$	0.9039
Intensidad media	$55 < I_{\max} < 75$	$D = 1.6687 \cdot V + 9.298$	0.9497
Intensidad alta	$I_{\max} > 75$	$D = 1.0809 \cdot V + 11.82$	0.7018

Capítulo 4.- Ajuste del modelo teórico a la muestra empírica.

En el capítulo que aquí se presenta, se describe el modelo teórico a emplear así como el procedimiento seguido para su calibración a los datos empíricos obtenidos y procesados en el Capítulo 3.

4.1 – Un modelo de chaparrón con distribución espacio-temporal.

Los chaparrones de proyecto (*design storm*) han venido utilizándose en la ingeniería hidrológica desde mediados del siglo XX. La posibilidad de simplificar un fenómeno tan caótico e imprevisible como es la lluvia, en un único hietograma representativo de una determinada región, asociado a una probabilidad de ocurrencia, ha sido una herramienta ampliamente utilizada en el dimensionamiento de infraestructuras hidráulicas, estudios de crecida y otros ámbitos enmarcados dentro de la gestión de recursos hídricos.

Uno de los modelos de chaparrón más empleados en estos últimos años ha sido el chaparrón de bloques alternos (Keifer D.J. y Chu H.H., 1957), basado en la curva Intensidad-Duración asociada a un determinado periodo de retorno. Esta metodología propone una intensidad para el primer bloque (pico), igual a la intensidad asociada a la duración de la discretización temporal (Δt) en la curva I-D. El resto de bloques se construyen siguiendo la premisa de que para cualquier intervalo de tiempo, la intensidad media del conjunto de bloques ha de ser igual a la obtenida en la curva I-D, dando lugar a la siguiente ecuación general del método de bloques:

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

Seguidamente, los bloques se reordenan quedando el bloque más intenso en el intervalo central y el resto alternativamente a derecha e izquierda en orden decreciente de intensidad.

Este procedimiento presenta dos limitaciones importantes. Por un lado no contempla la distribución espacial de la precipitación en una determinada región; y por otro, no representa adecuadamente patrones observables en los eventos de lluvia torrencial, presentando un pico excesivamente acusado. Este último hecho, provoca una sobreestimación de la lluvia asociada a un periodo de retorno, y en consecuencia una mala representación de la realidad.

El modelo de chaparrón teórico que se va a emplear (*García-Bartual, 2013*) está indicado únicamente para regiones con una fuerte convectividad en sus episodios de lluvia extremos. Estas tormentas tienen un núcleo muy definido, y los picos de intensidad máxima decrecen conforme su localización se aleja del núcleo de la celda convectiva. Para simular este efecto, el autor propone una función adimensional gaussiana que atenúe las intensidades conforme aumenta la distancia al núcleo:

$$\frac{i(r)}{i(0)} = e^{-r^2/2 \cdot D^2}$$

siendo:

- D: parámetro espacial a estimar.
- r: distancia al centro de la tormenta.

Nótese que conforme el valor de r aumenta, las intensidades resultantes son más pequeñas, tendiendo a 0 para valores de r grandes. El valor del parámetro D determinará cuanto de acusado es el decaimiento al aumentar la distancia, estando este parámetro ligado al tamaño de la tormenta.

Para la descripción temporal del evento, *García-Bartual (1990)* propone una función continua de tipo Gamma:

$$\frac{i(t)}{i(t_M)} = C \cdot t \cdot e^{-\varphi \cdot t}$$

siendo:

- φ : Parámetro temporal (min^{-1})
- C: constante adimensional

Aunando ambas funciones, se obtiene la expresión general del chaparrón con distribución espacio-temporal (CDET)

$$i(r; t) = i_0 \cdot e^{-r^2/2 \cdot D^2} \cdot \alpha \cdot e^2 \cdot t \cdot e^{-\alpha \cdot e \cdot t}$$

siendo parámetros del modelo:

- i_0 : Intensidad máxima, en mm/h, en el núcleo de la celda convectiva para el instante $t=1/(\alpha \cdot e)$.
- D: Parámetro espacial en km.
- α : Parámetro temporal en min^{-1} .

siendo variables de cálculo:

- r: Distancia en km al núcleo de la celda convectiva.
- t: Instante de cálculo en minutos.

La función propuesta es asintótica tanto para grandes valores de r como de t. Por ello, deben definirse unos límites que posibiliten su truncamiento. Considerando nulas aquellas intensidades menores al 10% de la intensidad máxima, surgen algunas relaciones matemáticas que resultan de gran utilidad para la definición de los descriptores fundamentales de un chaparrón teórico:

$$P = 0.0159 \cdot \frac{i_0}{\alpha}$$

$$t_c = \frac{1.8}{\alpha}$$

Capítulo 4 – Ajuste del modelo teórico a la muestra empírica

Miguel Rico Cortés

siendo:

- P: volumen total acumulado en milímetros.
- t_c : duración del chaparrón en minutos.
- i_0 : intensidad máxima en el núcleo de la celda, en mm/h.

4.2 – Metodología de ajuste del CDET a los datos empíricos.

Una vez resulta conocido el modelo de chaparrón teórico, puede abordarse el ajuste a la muestra de chaparrones disponibles. Para el planteamiento del ajuste, no se considerará la variabilidad espacial mencionada en el apartado anterior, ya que se disponen datos de un único pluviómetro. Para ello, se considerará que la distancia al núcleo de la celda convectiva es nula, por lo que el término que contempla la variabilidad espacial resulta unitario, y en consecuencia irrelevante. Se requieren por tanto, únicamente dos parámetros (α e i_0) para definir completamente un chaparrón teórico.

El proceso de ajuste de los distintos chaparrones empíricos al modelo teórico puede realizarse atendiendo a múltiples criterios. A grandes rasgos, todos los métodos tratan de obtener los parámetros α e i_0 que minimizan una función objetivo, mediante algún algoritmo de optimización. De las distintas naturalezas de la función objetivo, surgen las diversas formas de ajuste de la serie teórica a la empírica.

En el presente estudio, se emplearán dos funciones objetivo que atienden a distintos criterios de ajuste:

- *Ajuste por mínimos cuadrados ordinarios (ajuste MCO)*. Esta metodología trata de minimizar el cuadrado de los errores entre las intensidades reales de cada instante t , y las propuestas por el modelo teórico para el mismo instante. Persigue por tanto, que las intensidades del modelo sean lo más parecidas posible a las de la serie empírica, sin tener en cuenta otros descriptores del chaparrón.

$$\min \left[F(\alpha; i_0) = \sum_{j=1}^n (i(j) - i^*(j))^2 \right]$$

siendo:

- $i(j)$: intensidad de la serie empírica (en mm/h), asociada al instante j .
- $i^*(j)$: intensidad de la serie teórica (en mm/h), asociada al instante j .

- *Ajuste mediante la función PSI (ajuste PSI).* Se trata de una función objetivo a minimizar que no solamente persigue minimizar el error entre las intensidades teóricas y empíricas, sino que también busca que los volúmenes, intensidades máximas, duraciones y tiempos-pico sean lo más similares posible. Esta función incorpora como sumandos los errores cuadráticos relativos de los descriptores comentados. Además, se incluyen unos coeficientes adimensionales a modo de pesos a otorgar a los distintos sumandos.

$$\min \left[\Psi(\alpha; i_0) = A \cdot \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{i(j) - i^*(j)}{i^*(j)} \right)^2 \right] + B \cdot \left(\frac{V - V^*}{V^*} \right)^2 + C \cdot \left(\frac{t - t^*}{t^*} \right)^2 + D \cdot \left(\frac{i_{max} - i_{max}^*}{i_{max}^*} \right)^2 + E \cdot \left(\frac{t_p - t_p^*}{t_p^*} \right)^2 \right]$$

siendo:

- $i(j)$: intensidad de la serie empírica (en mm/h), asociada al instante j .
- $i^*(j)$: intensidad de la serie teórica (en mm/h), asociada al instante j .
- V : volumen de precipitación total (en mm) de la serie empírica.
- V^* : volumen de precipitación total (en mm) de la serie teórica.
- t : duración total (en minutos) del chaparrón de la serie empírica.
- t^* : duración total (en minutos) del chaparrón de la serie teórica.
- i_{max} : intensidad máxima (en mm/h) de la serie empírica.
- i_{max}^* : intensidad máxima (en mm/h) de la serie teórica.
- t_p : porcentaje de tiempo transcurrido hasta llegar al pico de intensidad en la serie empírica.
- t_p^* : porcentaje de tiempo transcurrido hasta llegar al pico de intensidad en la serie teórica.
- A, B, C, D, E : coeficientes adimensionales de peso para los distintos descriptores, con la siguiente propuesta de valores:

A	$1/n$ (siendo n el número de intervalos de la serie empírica)
B	10
C	2
D	5
E	1

Definidas las funciones objetivo a minimizar, puede pasarse a la optimización de las mismas y al ajuste de la serie teórica de CDET. Para la optimización se empleará el algoritmo Evolutionary, incluido en las últimas versiones de Microsoft Excel, con una precisión en las restricciones de 1E-6.

4.3 – Resultados del proceso de ajuste.

En primer lugar, se abordará el ajuste de los 73 chaparrones observados empleando Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO).

En la siguiente tabla (Tabla 4.1) se exponen los tres descriptores principales de cada chaparrón teórico, así como los parámetros del modelo ajustado a cada uno de ellos. Adicionalmente se muestra el valor de la función tras el proceso de optimización (residuo). Seguidamente, se muestran los resúmenes estadísticos de las distintas variables (Tabla 4.2), la matriz de correlación (Tabla 4.3) y los histogramas de frecuencias de los descriptores (Figura 4.1 a 4.3).

Tabla 4.1 - Parámetros y descriptores teóricos del ajuste del modelo a la muestra empírica, mediante MCO. Elaboración propia.

Fecha	Descriptores teóricos			Parámetros CDET		
	V (mm)	I _{max} (mm/h)	t (min)	α	i ₀	Residuo MCO
23/05/1990	18.88	82.54	26	0.0695	82.54	1208.88
04/10/1990	8.00	56.09	16	0.1115	56.09	118.95
14/01/1991	5.89	44.40	15	0.1199	44.40	48.65
16/04/1991	7.95	59.99	15	0.1199	59.99	429.72
17/05/1991	12.68	208.57	7	0.2616	208.57	11.52
11/08/1991	12.86	97.02	15	0.1199	97.02	11.92
03/09/1991	7.59	48.68	18	0.1020	48.68	8.93
03/09/1991	16.02	42.04	43	0.0417	42.04	496.05
06/09/1991	29.72	168.10	20	0.0899	168.10	5524.08
13/09/1991	10.96	27.55	45	0.0400	27.55	2025.66
04/10/1991	40.86	57.78	80	0.0225	57.78	5002.11
01/04/1992	8.29	117.71	8	0.2259	117.71	92.16
15/06/1992	59.47	149.86	45	0.0401	149.86	10884.03
10/07/1992	5.96	44.92	15	0.1199	44.92	2.66
21/04/1993	13.79	256.46	6	0.2956	256.46	97.92
22/09/1993	8.47	81.52	12	0.1530	81.52	236.16
21/06/1994	22.20	277.41	9	0.1987	277.41	0.00
23/09/1994	18.36	207.70	10	0.1799	207.70	83.18
27/09/1994	33.62	182.68	21	0.0864	182.68	3596.25
13/10/1994	65.57	46.78	159	0.0113	46.78	97.92
14/03/1995	14.95	84.59	20	0.0899	84.59	1366.46
31/08/1995	7.64	117.26	7	0.2439	117.26	144.00
02/09/1995	11.34	97.41	13	0.1366	97.41	368.64
04/09/1995	23.17	104.84	25	0.0720	104.84	5435.87
29/08/1996	15.22	260.61	7	0.2722	260.61	293.76
09/09/1996	16.54	279.41	7	0.2686	279.41	576.00
14/09/1997	9.49	173.20	6	0.2901	173.20	172.80

Chaparrón espacio-temporal para aplicaciones en hidrología urbana
Trabajo final de Máster

15/09/1997	15.13	57.04	30	0.0600	57.04	1099.53
18/09/1997	24.66	44.85	62	0.0289	44.85	1424.16
26/09/1997	13.23	49.90	30	0.0600	49.90	342.39
27/05/1998	9.90	22.41	50	0.0360	22.41	872.20
05/09/1999	24.54	112.50	25	0.0729	112.50	2568.10
23/10/2000	37.81	54.25	79	0.0228	54.25	3847.11
24/10/2000	11.45	51.81	25	0.0720	51.81	166.05
24/10/2000	25.99	48.07	61	0.0294	48.07	1898.14
24/10/2000	24.12	45.25	60	0.0298	45.25	1842.99
06/09/2001	23.86	63.35	43	0.0422	63.35	1761.40
01/07/2002	38.96	80.15	55	0.0327	80.15	14831.31
01/07/2002	20.86	23.60	100	0.0180	23.60	641.17
13/07/2002	8.71	34.40	29	0.0628	34.40	349.19
10/08/2002	10.52	41.81	28	0.0632	41.81	970.72
14/06/2004	42.32	203.86	24	0.0766	203.86	4162.26
03/09/2004	28.59	62.81	52	0.0349	62.81	1209.61
21/10/2004	8.84	86.75	12	0.1560	86.75	149.76
12/12/2004	20.19	38.07	60	0.0300	38.07	3616.84
17/09/2005	24.72	48.60	58	0.0313	48.60	1119.86
14/10/2005	5.96	44.92	15	0.1199	44.92	2.66
18/10/2006	29.42	95.10	35	0.0514	95.10	4832.13
03/05/2007	8.09	45.03	20	0.0885	45.03	1009.77
14/09/2007	14.04	31.77	50	0.0360	31.77	1384.32
21/09/2007	63.95	45.21	160	0.0112	45.21	10733.40
11/10/2007	43.61	75.54	65	0.0275	75.54	11627.84
11/10/2007	53.04	92.31	65	0.0277	92.31	2026.57
27/05/2008	7.78	115.36	8	0.2357	115.36	172.80
23/08/2008	10.31	68.84	17	0.1062	68.84	248.84
27/09/2008	13.86	258.22	6	0.2963	258.22	80.64
09/10/2008	61.19	153.85	45	0.0400	153.85	5853.92
07/04/2009	10.81	48.91	25	0.0720	48.91	214.91
08/07/2009	23.77	44.82	60	0.0300	44.82	2567.37
09/08/2009	18.19	130.81	16	0.1144	130.81	200.00
15/09/2009	12.74	110.74	13	0.1382	110.74	34.56
17/09/2009	20.88	78.73	30	0.0600	78.73	1368.16
28/09/2009	41.61	68.84	68	0.0263	68.84	8169.11
28/09/2009	15.95	106.64	17	0.1063	106.64	317.50
29/09/2009	9.34	62.75	17	0.1068	62.75	65.92
19/08/2010	9.99	103.30	11	0.1643	103.30	2327.04
09/10/2010	12.50	70.73	20	0.0899	70.73	5757.06
22/04/2011	31.29	60.98	58	0.0310	60.98	3088.35
07/05/2011	14.51	46.89	35	0.0514	46.89	1607.57
03/09/2011	6.90	28.17	28	0.0649	28.17	275.89
24/09/2011	23.91	104.17	26	0.0693	104.17	1270.08
29/10/2011	23.72	89.46	30	0.0600	89.46	533.62
28/09/2012	16.74	75.74	25	0.0720	75.74	456.13

Capítulo 4 – Ajuste del modelo teórico a la muestra empírica

Miguel Rico Cortés

Tabla 4.2 - Resumen estadístico para los descriptores fundamentales y parámetros del modelo teórico. Elaboración propia.

	Volumen	Intensidad máxima	Duración	α	i_0	Residuo MCO
Media	20.88	93.18	34.47	0.09642	93.18	2019.6
Máximo	65.57	279.4	160.1	0.2963	279.4	14831
Mínimo	5.887	22.41	6.075	0.01124	22.41	0.00
Mediana	15.95	70.73	25.02	0.07195	70.73	872.20
Desviación típica	14.59	64.79	30.09	0.07672	64.79	3029.8
Sesgo	1.518	1.505	2.220	1.293	1.505	2.372
Curtosis	1.881	1.564	6.624	0.8059	1.564	5.852

Tabla 4.3 - Matriz de correlaciones para los descriptores y parámetros teóricos. Elaboración propia.

	V	i	t	α	i_0	MCO
V	1					
i	0.06989	1				
t	0.7182	-0.4414	1			
α	-0.4813	0.7300	-0.6693	1		
i_0	0.06989	1	-0.4414	0.7300	1	
MCO	0.6811	-0.03803	0.4428	-0.4156	-0.03803	1

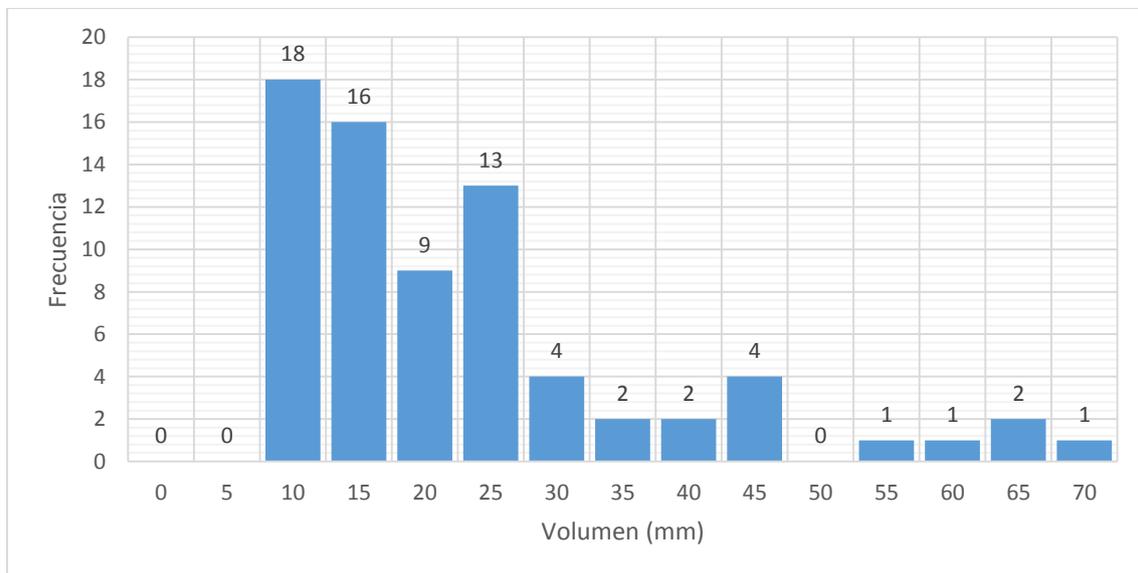


Figura 4.1 - Histograma de frecuencias para la variable "Volumen teórico". Elaboración propia.

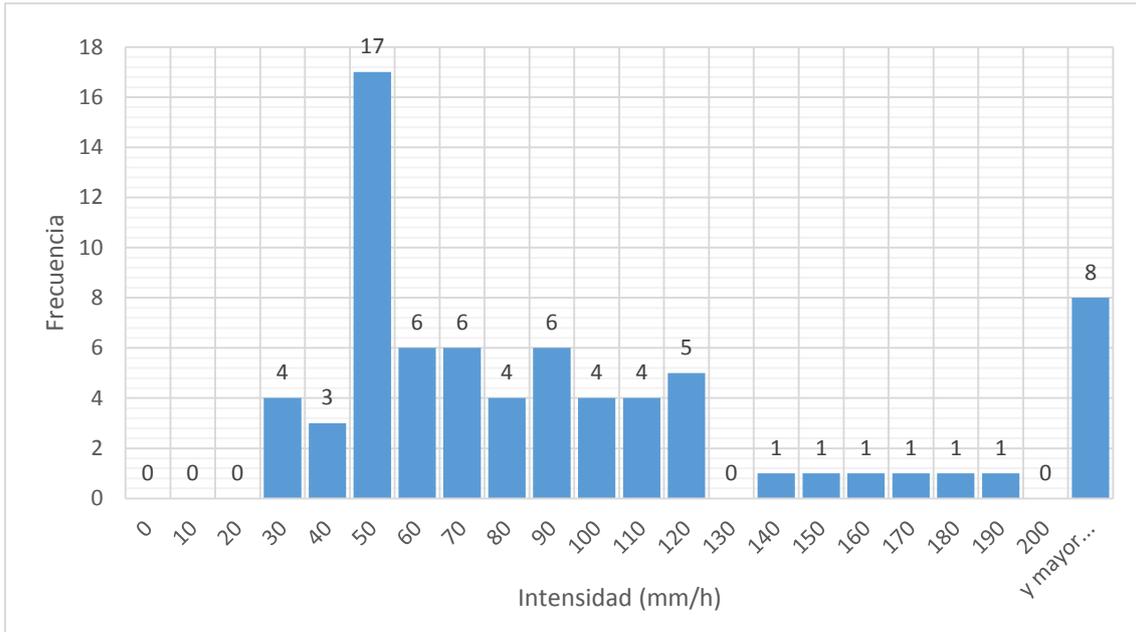


Figura 4.2 - Histograma de frecuencias para la variable "Intensidad máxima teórica". Elaboración propia.

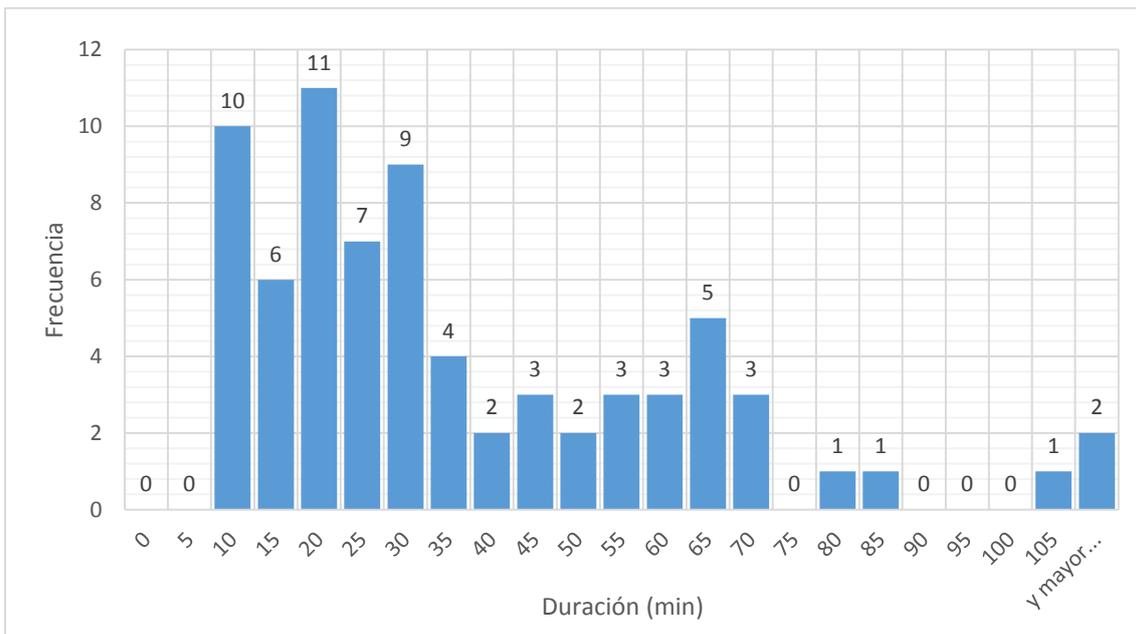


Figura 4.3 - Histograma de frecuencias para la variable "Duración teórica". Elaboración propia.

Capítulo 4 – Ajuste del modelo teórico a la muestra empírica

Miguel Rico Cortés

A continuación, se muestran los descriptores teóricos y los parámetros del chaparrón realizando el ajuste mediante la función PSI descrita en el apartado anterior:

Tabla 4.4 - Parámetros y descriptores teóricos del ajuste del modelo a la muestra empírica, mediante Función PSI. Elaboración propia.

Fecha	Descriptores teóricos			Parámetros CDET		
	V (mm)	I _{max} (mm/h)	t (min)	α	i ₀	Residuo PSI
23/05/1990	19.85	74.85	30	0.05996	74.85	0.5045
04/10/1990	9.12	42.36	24	0.07383	42.36	2.7631
14/01/1991	4.94	37.27	15	0.11992	37.27	0.5813
16/04/1991	9.74	47.76	23	0.07792	47.76	1.2921
17/05/1991	5.62	52.81	12	0.14947	52.81	0.9073
11/08/1991	10.62	80.12	15	0.11992	80.12	2.3795
03/09/1991	7.08	40.99	20	0.09207	40.99	1.2098
03/09/1991	14.86	48.04	35	0.05140	48.04	3.4695
06/09/1991	45.89	139.09	37	0.04819	139.09	1.1228
13/09/1991	9.89	55.96	20	0.08994	55.96	8.9286
04/10/1991	41.54	85.45	55	0.03271	85.45	0.3691
01/04/1992	4.87	42.74	13	0.13941	42.74	5.6739
15/06/1992	73.25	138.11	60	0.02998	138.11	3.6556
10/07/1992	4.85	36.61	15	0.11992	36.61	0.4925
21/04/1993	5.79	43.98	15	0.12083	43.98	2.7858
22/09/1993	8.71	49.28	20	0.08994	49.28	1.4832
21/06/1994	12.17	137.71	10	0.17988	137.71	2.3943
23/09/1994	16.10	95.21	19	0.09403	95.21	1.9646
27/09/1994	45.39	150.33	34	0.05266	150.33	3.0984
13/10/1994	32.15	90.93	40	0.04497	90.93	3.3537
14/03/1995	13.05	77.35	19	0.09424	77.35	5.8069
31/08/1995	4.43	36.42	14	0.13077	36.42	0.4961
02/09/1995	10.08	76.04	15	0.11992	76.04	2.3849
04/09/1995	21.81	123.38	20	0.08994	123.38	1.4117
29/08/1996	10.46	51.56	23	0.07839	51.56	3.8093
09/09/1996	8.29	69.20	14	0.13275	69.20	5.6315
14/09/1997	5.37	32.03	19	0.09484	32.03	4.3116
15/09/1997	15.59	58.79	30	0.05996	58.79	3.6181
18/09/1997	24.61	55.67	50	0.03598	55.67	0.8000
26/09/1997	13.00	51.00	29	0.06236	51.00	1.4321
27/05/1998	10.72	34.64	35	0.05140	34.64	6.2560
05/09/1999	26.90	101.45	30	0.05996	101.45	1.4518
23/10/2000	38.10	73.43	59	0.03064	73.43	3.2145
24/10/2000	10.66	48.25	25	0.07195	48.25	0.0651
24/10/2000	35.75	53.92	75	0.02398	53.92	0.9186
24/10/2000	25.79	50.70	58	0.03126	50.70	8.8788
06/09/2001	25.21	71.29	40	0.04497	71.29	3.1908
01/07/2002	55.69	114.55	55	0.03271	114.55	2.2467
01/07/2002	20.86	36.31	65	0.02767	36.31	0.6538
13/07/2002	7.81	44.16	20	0.08994	44.16	2.4889
10/08/2002	10.01	56.63	20	0.08994	56.63	4.1080

Chaparrón espacio-temporal para aplicaciones en hidrología urbana
Trabajo final de Máster

14/06/2004	49.18	185.48	30	0.05996	185.48	0.5094
03/09/2004	33.16	71.90	52	0.03447	71.90	0.2827
21/10/2004	8.36	51.40	18	0.09775	51.40	1.5068
12/12/2004	30.58	46.13	75	0.02399	46.13	1.0542
17/09/2005	25.73	64.68	45	0.03997	64.68	0.8648
14/10/2005	4.84	36.89	15	0.12126	36.89	0.4914
18/10/2006	27.43	114.10	27	0.06614	114.10	4.2293
03/05/2007	10.20	46.14	25	0.07195	46.14	0.6586
14/09/2007	15.29	38.45	45	0.03997	38.45	0.7783
21/09/2007	73.68	61.75	135	0.01332	61.75	3.2735
11/10/2007	51.83	106.62	55	0.03271	106.62	0.4291
11/10/2007	56.10	88.26	72	0.02502	88.26	0.7034
27/05/2008	5.79	36.02	18	0.09883	36.02	8.3369
23/08/2008	9.63	60.29	18	0.09958	60.29	2.3446
27/09/2008	5.91	44.56	15	0.11992	44.56	2.6604
09/10/2008	62.11	156.14	45	0.03997	156.14	0.4628
07/04/2009	11.76	45.07	30	0.06094	45.07	0.3349
08/07/2009	23.91	60.88	44	0.04048	60.88	3.4284
09/08/2009	17.89	104.83	19	0.09319	104.83	1.2554
15/09/2009	10.70	80.68	15	0.11992	80.68	0.3594
17/09/2009	23.57	70.16	38	0.04733	70.16	1.4408
28/09/2009	52.98	99.89	60	0.02998	99.89	0.6688
28/09/2009	20.25	78.87	29	0.06192	78.87	1.7696
29/09/2009	9.45	49.90	21	0.08398	49.90	1.3367
19/08/2010	11.37	64.29	20	0.08994	64.29	1.3712
09/10/2010	21.87	67.72	37	0.04923	67.72	0.6617
22/04/2011	35.80	76.20	53	0.03384	76.20	0.5771
07/05/2011	13.30	60.17	25	0.07195	60.17	1.3586
03/09/2011	6.55	32.06	23	0.07781	32.06	2.5418
24/09/2011	26.10	89.86	33	0.05474	89.86	2.6366
29/10/2011	23.13	80.40	33	0.05527	80.40	0.3017
28/09/2012	16.71	66.65	28	0.06341	66.65	3.5485

Tabla 4.5 - Resumen estadístico para los descriptores fundamentales y parámetros del modelo teórico.
Elaboración propia.

	Volumen	Intensidad máxima	Duración	α	i_0	Residuo PSI
Media	21.53	70.45	33.24	0.07205	70.45	2.244
Máximo	73.68	185.5	135	0.1799	185.5	8.929
Mínimo	4.428	32.03	10	0.01332	32.03	0.06510
Mediana	15.29	60.88	28	0.06341	60.88	1.452
Desviación típica	17.07	32.98	20.63	0.03585	32.98	2.010
Sesgo	1.362	1.355	2.082	0.6166	1.355	1.605
Curtosis	1.258	1.663	7.066	-0.1431	1.663	2.705

Capítulo 4 – Ajuste del modelo teórico a la muestra empírica

Miguel Rico Cortés

Tabla 4.6 - Matriz de correlaciones para los descriptores y parámetros teóricos. Elaboración propia.

	V	i	t	α	i_0	PSI
V	1					
i	0.6681	1				
t	0.7871	0.1427	1			
α	-0.7140	-0.1964	-0.8152	1		
i_0	0.6681	1	0.1427	-0.1964	1	
PSI	-0.1532	-0.1428	-0.0938	0.1196	-0.1428	1

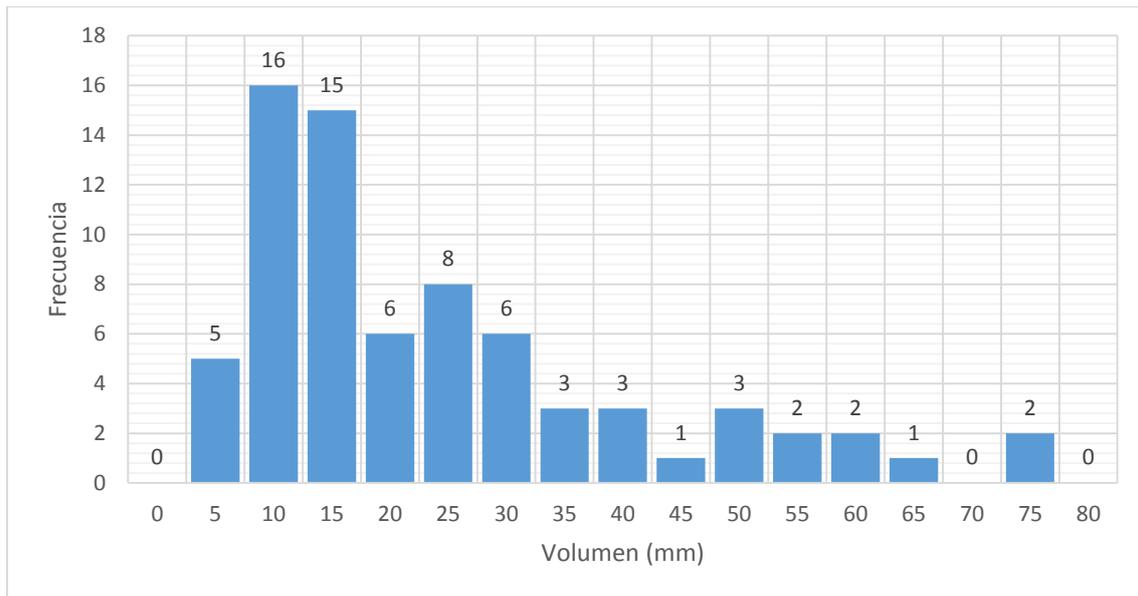


Figura 4.4 - Histograma de frecuencias para la variable "Volumen teórico". Elaboración propia.

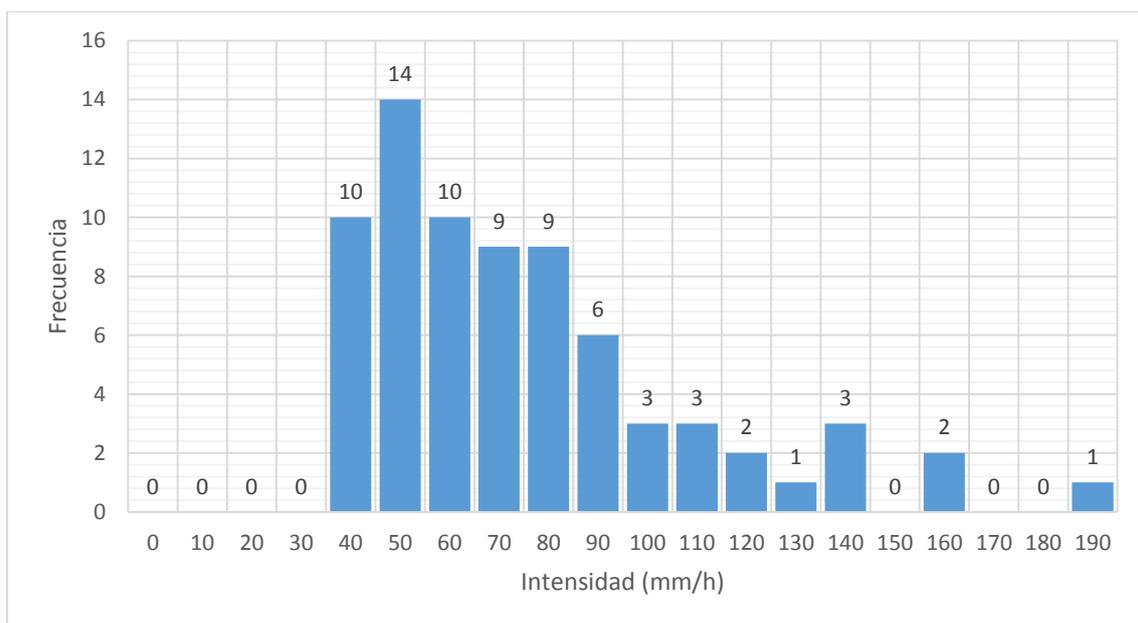


Figura 4.5 - Histograma de frecuencias para la variable "Intensidad máxima teórica". Elaboración propia.

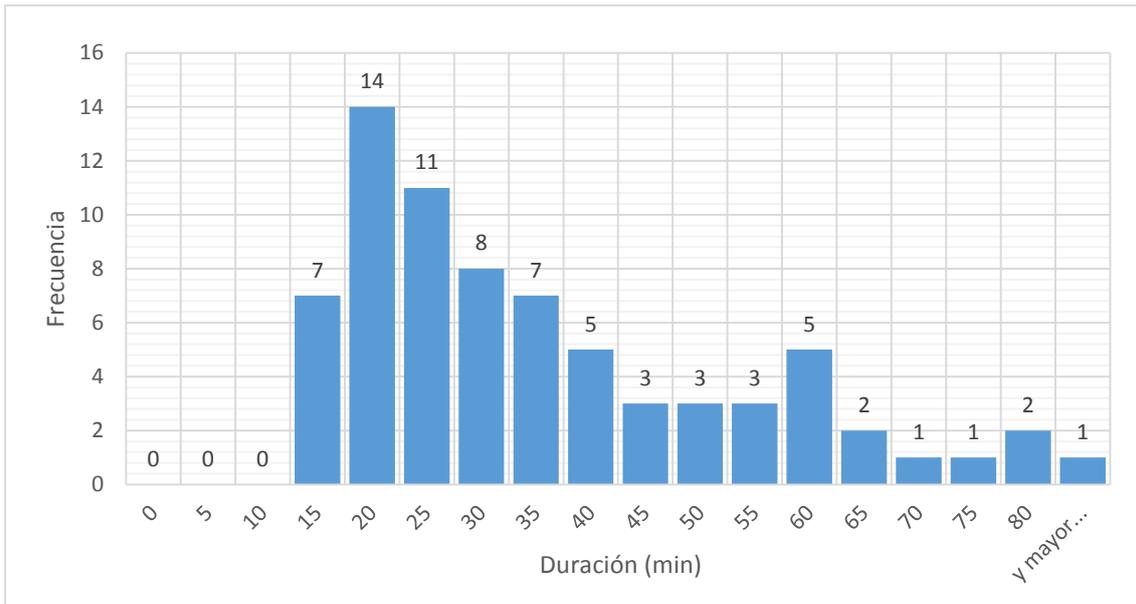


Figura 4.6 - Histograma de frecuencias para la variable "Duración teórica". Elaboración propia.

4.4 – Análisis del ajuste del modelo teórico.

4.4.1 – Análisis de los errores.

Una vez concluido el proceso de ajuste, se pasará al análisis de los resultados obtenidos. Este análisis emitirá un juicio sobre si el modelo teórico representa de forma adecuada la variabilidad temporal de la precipitación en la zona y confirmará la aplicabilidad del mismo para la elaboración de chaparrones de proyecto.

Resulta de gran interés conocer los errores que se están cometiendo en el ajuste, comparando los descriptores principales (volumen, intensidad máxima y duración) de los chaparrones de la serie observada con los obtenidos aplicando el modelo propuesto.

Tabla 4.7 - Estadísticos para los errores absolutos y porcentuales con la metodología de ajuste MCO. Elaboración propia.

Estadístico	Error volumen	Error intensidad máxima	Error duración	% Error volumen	% Error intensidad máxima	% Error duración
Media	3.53	32.69	12.69	27.00%	53.89%	34.98%
Máximo	36.17	207.8	104	165.28%	412.34%	188.56%
Mínimo	0.000	0.28	0	0.00%	0.15%	0.07%
Mediana	1.57	13.21	10	10.76%	20.70%	32.59%
Desviación típica	4.99	51.99	13.80	38.19%	96.04%	27.89%

Tabla 4.8 - Estadísticos para los errores absolutos y porcentuales con la metodología de ajuste PSI. Elaboración propia.

Estadístico	Error volumen	Error intensidad máxima	Error duración	% Error volumen	% Error intensidad máxima	% Error duración
Media	1.57	6.33	6.51	8.11%	7.78%	16.25%
Máximo	7.29	32.1	20	37.61%	20.65%	36.19%
Mínimo	0.061	0.05	0	0.58%	0.12%	0.06%
Mediana	0.94	4.61	5	6.27%	7.44%	16.74%
Desviación típica	1.64	6.45	5.49	6.41%	5.03%	9.35%

Como se puede observar en las tablas, los ajustes empleando mínimos cuadrados ordinarios (MCO) presentan unos errores mucho mayores, para todos los descriptores citados. Esto es debido a que esta tipología de ajuste, únicamente ha perseguido que para cada instante de cálculo, la intensidad teórica y observada sean lo más similares posibles, sin entrar en valoraciones globales del chaparrón.

Especialmente llamativo resulta el caso de las intensidades máximas, donde se detectan errores de hasta el 412% del valor observado. Estos errores tan importantes se producen en los chaparrones de corta duración, en los que el pico del chaparrón teórico se produce en entre dos intervalos de cálculo, siendo los dos puntos de cálculo contiguos, razonablemente similares a los observados, los únicos computados por la función.

En definitiva, la metodología multicriterio propuesta por medio de la función PSI, presenta unos resultados muy satisfactorios, presentando unos errores medios perfectamente asumibles para un fenómeno de tanta variabilidad como es la precipitación.

4.4.2 – Validación de las expresiones de estimación de parámetros.

Otro importante paso en el análisis de los resultados es la comprobación de la validez de las relaciones teóricas propuestas por Garcia-Bartual (2013). Como se ha expuesto en este mismo capítulo, existe una relación entre los parámetros del modelo de CDET y los descriptores fundamentales del chaparrón generado, pudiendo ser de gran utilidad para la estimación de los parámetros a partir de unas características del chaparrón:

$$P = 0.0159 \cdot \frac{i_0}{\alpha}$$

$$t_c = \frac{1.8}{\alpha}$$

Para realizar esta tarea de comprobación de las expresiones, se compararán los parámetros teóricos asignados mediante el ajuste por la función PSI a cada chaparrón empírico, con alguno de sus descriptores.

La primera relación, implica tanto al parámetro i_0 , como al parámetro α . Para poder evaluar la validez de la misma, se propone una discretización de los chaparrones observados en escalones de intensidad máxima de 20 mm/h. De este modo, se tienen 17 chaparrones con intensidad máxima entre 30 y 50 mm/h; 22 con intensidad máxima entre 50 y 70 mm/h y 15 con intensidad máxima entre 70 y 90 mm/h. Para cada intervalo, se tomará como valor de i_0 el valor medio del intervalo, esto es 40, 60 y 80 mm/h respectivamente. A continuación se representan las parejas Volumen observado – α teórico de cada chaparrón, acompañada de la curva con el i_0 correspondiente de cada intervalo.

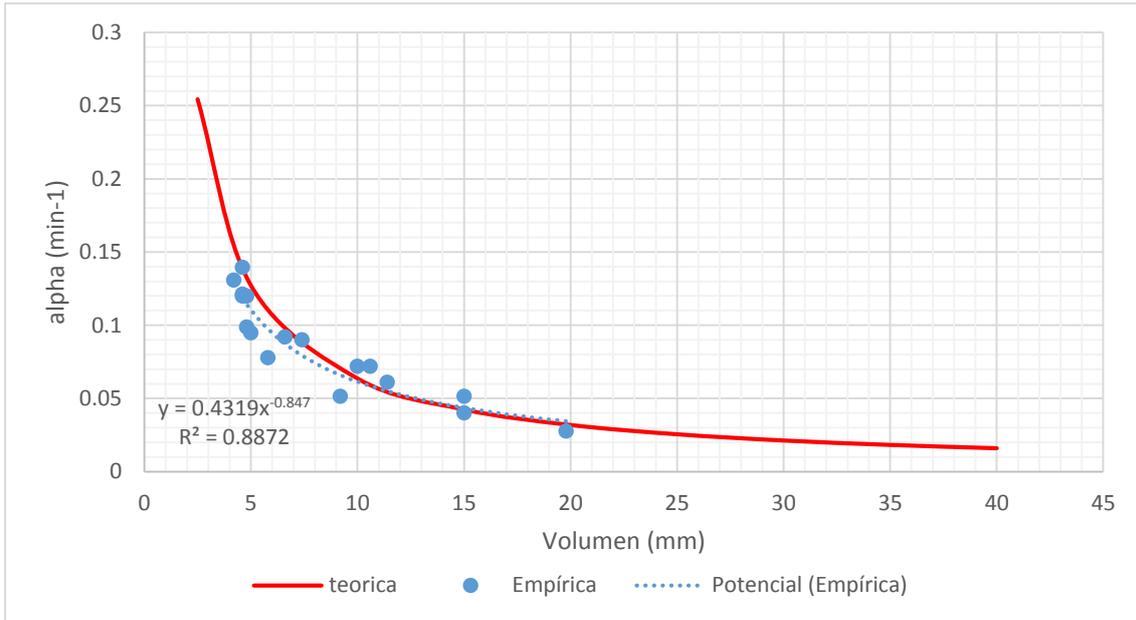


Figura 4.7 - Parejas Volumen observado-Alpha para intensidades máximas comprendidas entre 30 y 50 mm/h. Elaboración propia.

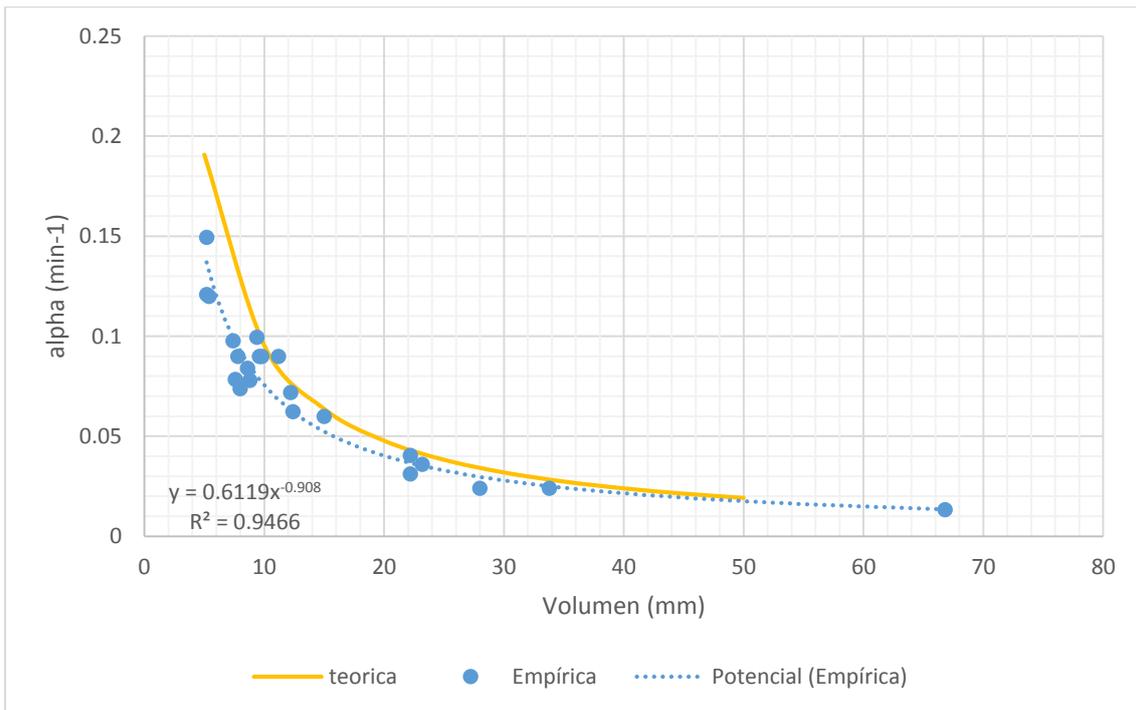


Figura 4.8 - Parejas Volumen observado-Alpha para intensidades máximas comprendidas entre 50 y 70 mm/h. Elaboración propia.

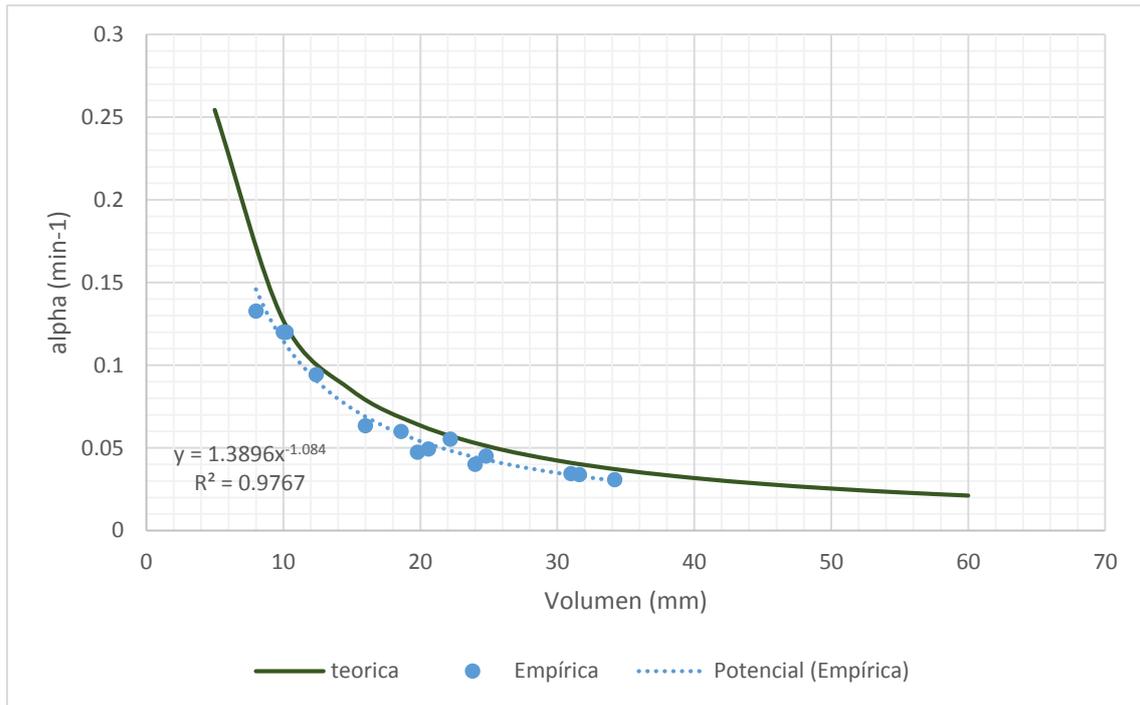


Figura 4.9 - Pares Volumen observado-Alpha para intensidades máximas comprendidas entre 70 y 90 mm/h. Elaboración propia.

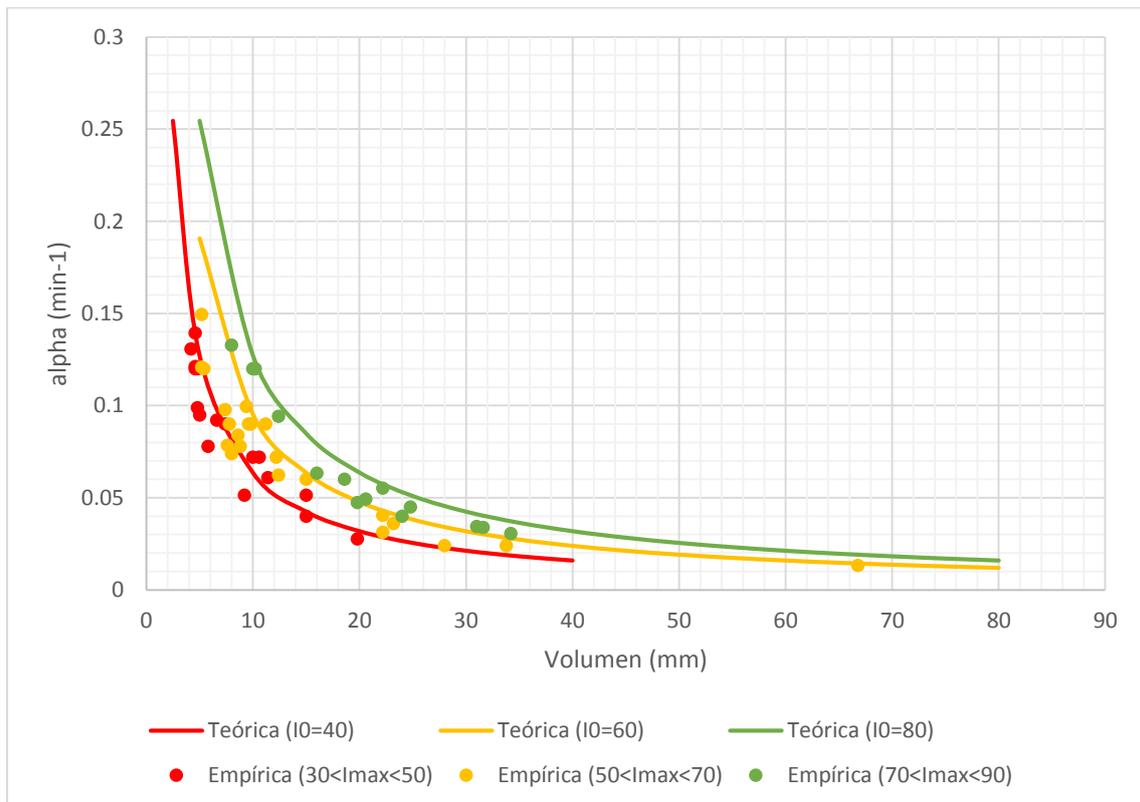


Figura 4.10 - Distintas familias de parejas Volumen-Alpha. Elaboración propia.

Como se desprende de las figuras anteriores (Figura 4.7 - Figura 4.10), el ajuste potencial realizado es razonablemente similar a la curva teórica representada. Cabe destacar que para la representación de la curva teórica, ya se ha realizado una importante simplificación, pues se ha tomado como i_0 el valor medio del intervalo.

En definitiva, puede concluirse que la relación funciona razonablemente bien y podría ser de gran utilidad para definir de forma unívoca un parámetro conociendo el volumen total precipitado (P) y uno de los dos parámetros.

La segunda de las expresiones propuestas, relaciona la duración del chaparrón observado con el parámetro alpha. Para comprobar su validez, se representa esta curva teórica junto con todas las parejas de puntos duración observada-alpha (Figura 4.11).

En la siguiente figura, puede observarse como la curva teórica propuesta se ajusta correctamente a los puntos representados. Se concluye por tanto que la segunda relación es válida y que puede utilizarse para determinar el parámetro alpha, a partir de una duración observada.

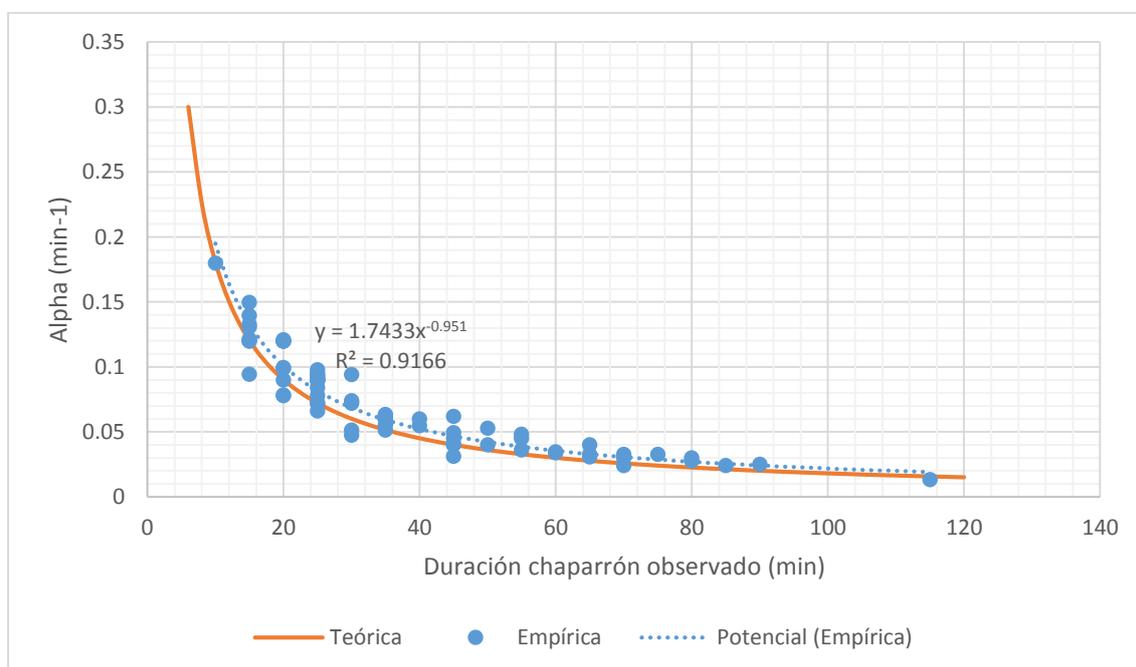


Figura 4.11 - Parejas duración observada-alpha. Elaboración propia.

Adicionalmente a las expresiones ya comentadas, existe una tercera relación entre el parámetro i_0 y la intensidad máxima observada. Como se ha comentado en el apartado 4.1, el parámetro i_0 debe ser igual a la lluvia máxima observada para cada

chaparrón. Representando las parejas Intensidad máxima observada – parámetro i_0 , se obtiene la siguiente gráfica donde puede observarse como se cumple esta condición para intensidades máximas pequeñas, existiendo cierta variación para intensidades mayores de 100 mm/h. Nótese que estos chaparrones con intensidades superiores a 100 mm/h, solo suponen una pequeña parte de la muestra disponible.

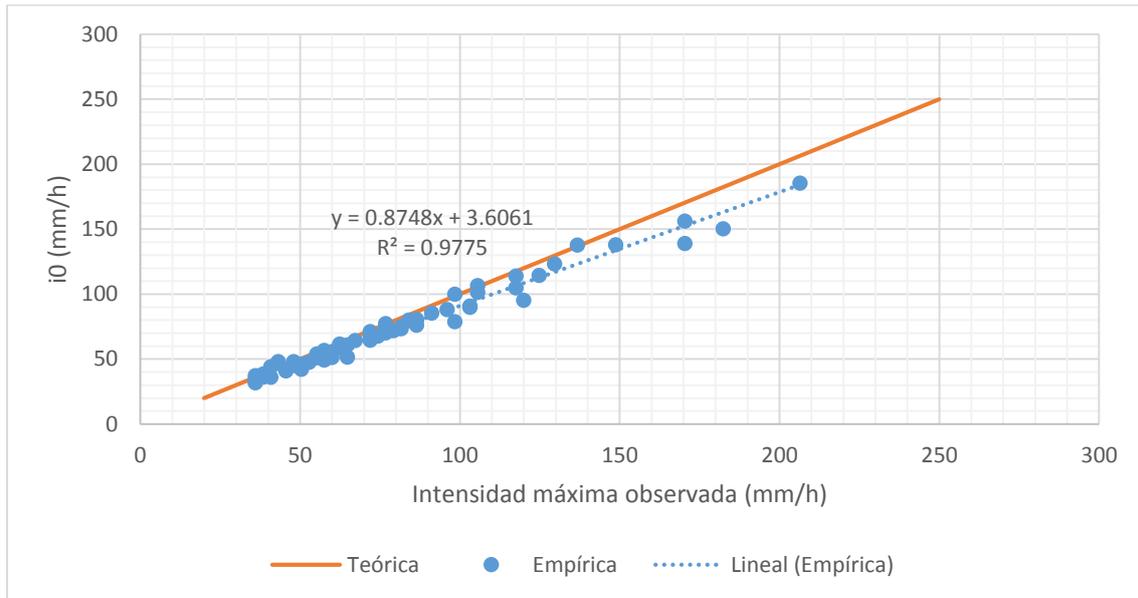


Figura 4.12 - Parejas Intensidad máxima observada-Parámetro i_0 . Elaboración propia.

En conclusión, puede afirmarse que las expresiones propuestas ofrecen una buena vinculación entre los parámetros del modelo y la realidad observada, pudiendo servir de punto de partida para la obtención de los parámetros de un determinado chaparrón de proyecto a partir de su volumen, su intensidad máxima o su duración.

4.5 – Inclusión de la variabilidad espacial en el modelo teórico.

Como ya se ha comentado al inicio de este capítulo, el modelo de chaparrón teórico propuesto por García-Bartual (2013), simula la atenuación de las intensidades conforme aumenta la distancia al núcleo de la celda convectiva, mediante una función adimensional gaussiana. Las tormentas convectivas presentan un núcleo muy definido y los picos de intensidad máxima decrecen conforme su localización se aleja del núcleo de la celda.

$$\frac{i(r)}{i(0)} = e^{-r^2/2 \cdot D^2}$$

siendo:

- D: parámetro espacial a estimar.
- r: distancia al centro de la tormenta.

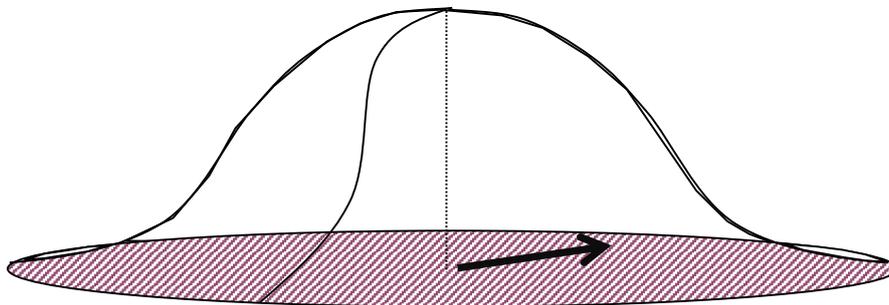


Figura 4.13 - Aspecto de la función de distribución espacial propuesta por García-Bartual. Fuente: García-Bartual (2013).

Esta función de atenuación gaussiana, presenta unos buenos resultados de ajuste para eventos de tipología convectiva. La siguiente figura muestra el ajuste de la función a unos datos pluviométricos tomados a distintas distancias del centroide de la tormenta.

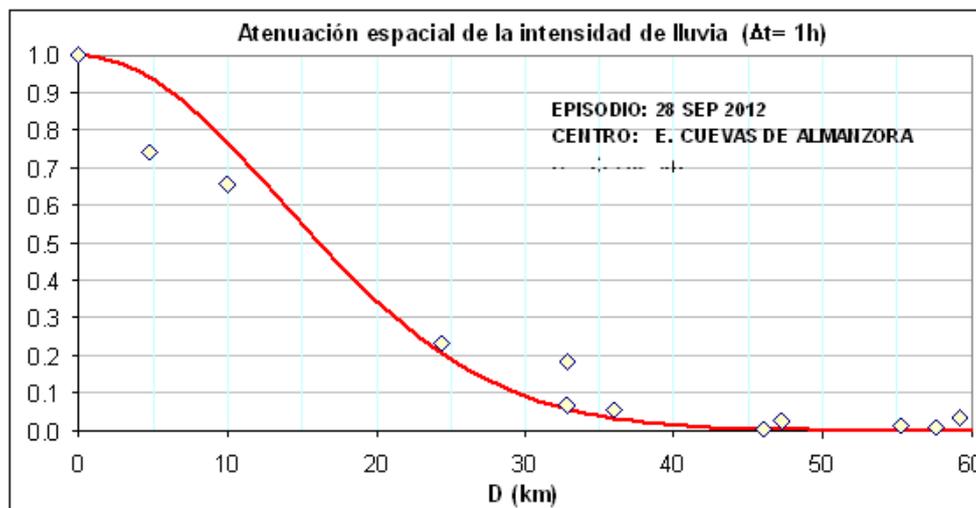


Figura 4.14 - Ejemplo de ajuste de la función de distribución espacial para un evento convectivo. Fuente: García-Bartual (2013).

Según lo descrito a lo largo del epígrafe 2.3, no existe un estudio propio de la ciudad de Valencia sobre las características geométricas de las estructuras convectivas. Por ello, y debido a las similitudes entre las variables climáticas de Barcelona y Valencia, se han aceptado como asumibles los parámetros que definen las distribuciones estadísticas de los parámetros geométricos y orientaciones de las estructuras.

Empleando los resultados obtenidos por Barnolas M. et al., sería posible la vinculación del parámetro espacial D con el área de las elipses ajustadas para las distintas estructuras convectivas. Aceptando la hipótesis de asimilación de los datos de la ciudad de Barcelona para la ciudad de Valencia, la siguiente tabla recoge los parámetros de la distribución de Pareto Generalizada, que permitirán la obtención de las áreas esperables para distintas probabilidades de ocurrencia.

Parameters	Distribution	Distribution parameter values		
		Scale	Shape	threshold/location
Area	Generalized Pareto	$35.28 \pm 0.56 \text{ km}^2$	0.60 ± 0.01	$30.00 \pm 0.00 \text{ km}^2$
Perimeter	GEV	$14.85 \pm 0.15 \text{ km}$	0.56 ± 0.01	$40.00 \pm 0.15 \text{ km}$
Major Axis	GEV	$1.90 \pm 0.02 \text{ km}$	0.10 ± 0.01	$5.63 \pm 0.02 \text{ km}$
Minor Axis	GEV	$0.91 \pm 0.07 \text{ km}$	0.25 ± 0.01	$2.82 \pm 0.01 \text{ km}$
Orientation	GEV	$44.77 \pm 0.31 \text{ km}$	0.22 ± 0.01	$63.28 \pm 0.15^\circ$
MAP	GEV	$0.0394 \pm 0.002 \text{ mm}$	0.112 ± 0.007	$0.617 \pm 0.001 \text{ mm}$

Figura 4.15 - Parámetros de las funciones de distribución propuestas para cada parámetro geométrico. Fuente: Barnolas M. et al. (2010).

Una vez es conocida el área de la elipse que inscribe una celda convectiva para una determinada probabilidad de ocurrencia o periodo de retorno, puede realizarse una aproximación del área de la elipse obtenida (A), al área de una circunferencia con la misma superficie, pudiéndose obtener el diámetro equivalente (D_{eq}), empleando la siguiente expresión:

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

siendo:

- A: Área de la elipse asociada a una probabilidad de excedencia (km^2).
- D_{eq} : Diámetro de la circunferencia con área equivalente a la elipse (km).

La relación entre el diámetro de la circunferencia equivalente y el parámetro espacial D, viene dada por la siguiente expresión (García-Bartual, 2013):

$$D = 0.233 \cdot D_{eq}$$

siendo:

- D: Parámetro espacial del modelo teórico CDET (km).
- D_{eq} : Diámetro de la circunferencia con área equivalente a la elipse (km).

De este modo, y a falta de un estudio de las estructuras convectivas propio en la ciudad de Valencia, es posible la determinación del parámetro espacial D para distintos periodos de retorno.

Capítulo 5.- Síntesis de la metodología de uso del CDET.

En este capítulo, se detallarán brevemente los pasos a realizar para la determinación de tormentas de proyecto para distintos periodos de retorno en la ciudad de Valencia.

5.1 – Determinación del volumen total acumulado.

El primer paso para la obtención de un chaparrón de proyecto para un determinado periodo de retorno, es el cálculo del volumen total esperable para esa probabilidad de ocurrencia.

A lo largo del Capítulo 3, se han expuesto todos los procedimientos seguidos para el análisis de los datos pluviométricos disponibles. Más concretamente en el epígrafe 3.6 (Análisis estadístico de la muestra de chaparrones), se han planteado ajustes de distintas funciones de distribución de extremos para todos los descriptores fundamentales de los chaparrones, es decir: la intensidad máxima, la duración y el volumen. Atendiendo a esta última variable, se ha considerado la función de distribución Two Component Extreme Value (TCEV) como la que plantea un mejor ajuste a los datos empíricos disponibles. Empleando el método de máxima verosimilitud (MLE), se obtuvieron los parámetros que caracterizan la función para los datos disponibles.

Tabla 5.1 - Parámetros de la función TCEV para la variable "Volumen". Elaboración propia.

Two Component Extreme Value (TCEV)	
Volumen	
λ_1	8.79829
θ_1	0.361146
λ_2	2.01666
θ_2	0.072333

$$Fx(x) = \exp(-\lambda_1 e^{-\theta_1 x} - \lambda_2 e^{-\theta_2 x})$$

Estas funciones de distribución van a permitir obtener los cuantiles de las variables estudiadas, asociados a una determinada probabilidad de ocurrencia. Además, a partir del número de eventos promedio por año y esta probabilidad, pueden obtenerse los periodos de retorno, una de las principales herramientas en el dimensionamiento de infraestructuras de hidráulicas.

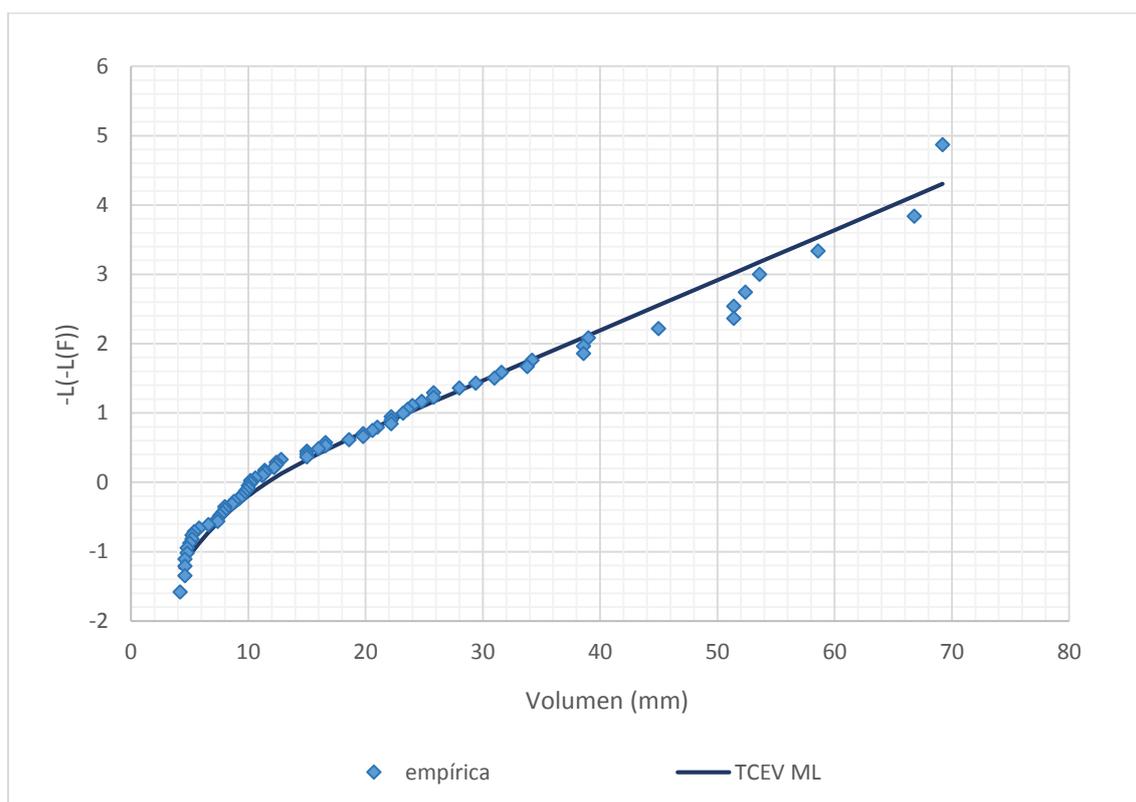


Figura 5.1 - Representación gráfica de la función de distribución TCEV y de los datos empíricos para la variable "Volumen". Elaboración propia.

Empleando los parámetros expuestos en la Tabla 5.1 y la ecuación anexa, es posible determinar el volumen esperable para distintos periodos de retorno en la ciudad de Valencia.

Para esta operación, es importante recordar que las funciones de distribución se han obtenido empleando más de un dato para cada año de la serie de estudio, por lo que no se puede utilizar la expresión convencional de cálculo de periodo de retorno a partir de una probabilidad de excedencia.

Empleando una expresión equivalente del análisis de máximos anuales (AMS), el cuantil asociado a un determinado periodo de retorno, es aquel en el que la función de probabilidad toma el siguiente valor (Andrés Doménech et. al., 2015):

$$V_T = F_{TCEV}^{-1} \left[\frac{1}{\beta} \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) + 1 \right]$$

siendo:

- β : número promedio de eventos por año.
- T: periodo de retorno en años.
- V_T : volumen asociado al periodo de retorno T.
- F_{TCEV}^{-1} : cuantil asociado a una determinada probabilidad.

La siguiente tabla, muestra los cuantiles asociados a los periodos de retorno más comúnmente empleados en la ingeniería.

Tabla 5.2 - Cuantiles asociados a los periodos de retorno más comunes.

Periodo de retorno (años)	Volumen (mm)
T=2	29.06
T=5	45.88
T=10	56.53
T=15	62.46
T=20	66.60
T=25	69.78
T=50	79.55
T=100	89.22

5.2 – Duraciones esperables en función de la intensidad.

Una vez resulta conocido el volumen del chaparrón que se desea simular, es posible estimar la duración esperable de los chaparrones en función de su torrencialidad. Como se describe de forma detallada a lo largo del epígrafe 3.7 (Estudio de la relación Volumen-Duración), es posible la determinación de una relación lineal entre el volumen precipitado y la duración de la tormenta, siempre y cuando se haga una segregación de la población de chaparrones en función de su intensidad máxima.

Se han definido como umbrales de separación, las intensidades de 55 mm/h y 75 mm/h, existiendo de este modo tres familias de tormentas (Intensidad baja, media y alta) capaces de aportar el mismo volumen con intensidades más o menos elevadas.

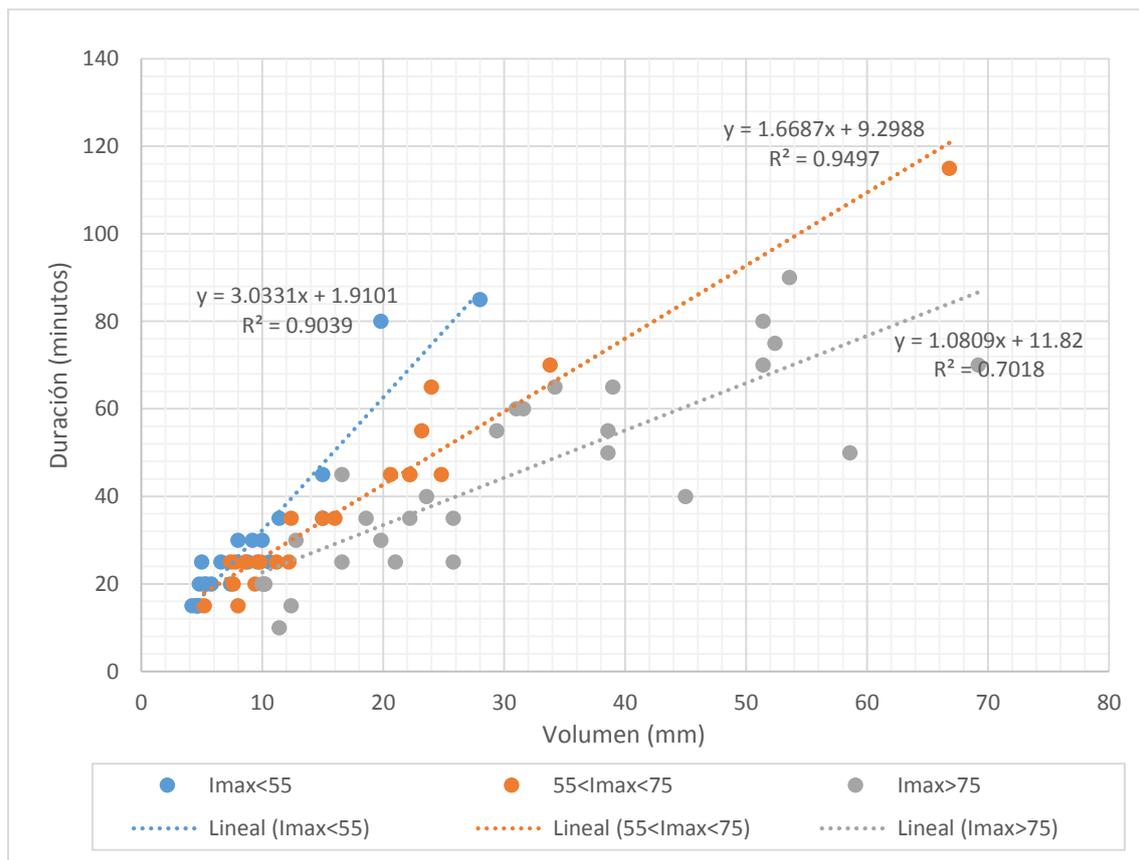


Figura 5.2 - Parejas volumen-duración y ajustes lineales para todas las familias de intensidades.
Elaboración propia.

De este modo, es posible definir tres duraciones diferentes para un volumen dado, originando la existencia de 3 chaparrones diferentes con distinto grado de torrencialidad para el mismo periodo de retorno.

Esta circunstancia puede resultar ventajosa, ya que según el tipo de aplicación que se le quiera dar a la tormenta de diseño, se puede seleccionar el tipo de chaparrón más adecuado; o ser un inconveniente ya que introduce una nueva disyuntiva y requiere una toma de decisión, para elegir uno de los tres chaparrones obtenidos.

Tabla 5.3 - Ecuaciones obtenidas para relacionar el volumen con la duración de un evento, para distintos rangos de intensidades. Con volumen en mm y duración en minutos. Elaboración propia.

Tipología	Intervalo	Ecuación	R ²
Intensidad baja	$I_{\max} < 55$	$t_c = 3.0331 \cdot V + 1.9101$	0.9039
Intensidad media	$55 < I_{\max} < 75$	$t_c = 1.6687 \cdot V + 9.298$	0.9497
Intensidad alta	$I_{\max} > 75$	$t_c = 1.0809 \cdot V + 11.82$	0.7018

Empleando las relaciones existentes en la tabla anterior, se pueden obtener tres duraciones asociadas a un único valor volumétrico.

5.3 – Obtención de los parámetros del modelo teórico.

Llegado el punto en el que son conocidos el volumen total y la duración esperada para cada chaparrón, es posible determinar los parámetros empleados por el modelo teórico empleado.

El parámetro temporal α (min^{-1}), puede obtenerse de manera directa a partir de la duración del chaparrón, empleando la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{1.8}{t_c}$$

siendo:

- t_c : duración del chaparrón en minutos.
- α : Parámetro temporal en min^{-1} .

La validez de la expresión para la estimación del parámetro α , ha sido contrastada en el epígrafe 4.4.2 (Validación de las expresiones de estimación de parámetros), obteniéndose unos resultados satisfactorios.

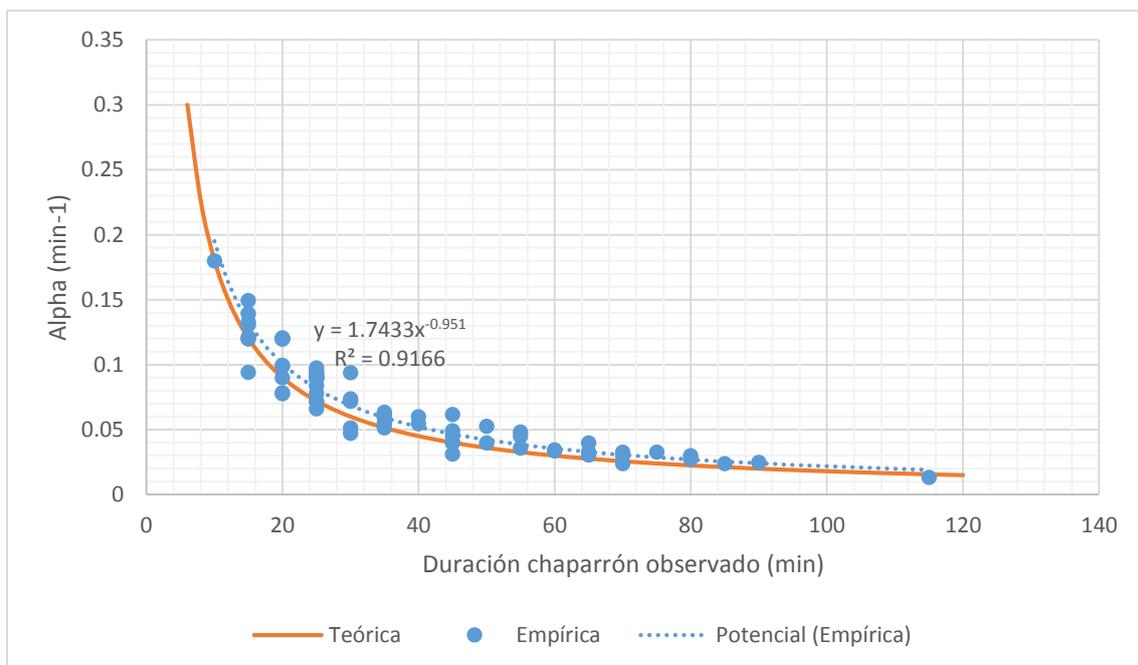


Figura 5.3 - Parejas duración- α y relación teórica propuesta por García-Bartual. Elaboración propia.

Para acabar de definir el modelo de variabilidad temporal, es necesaria la obtención de un segundo parámetro i_0 . Para ello, se empleará otra de las relaciones teóricas incluidas en el trabajo de García-Bartual (2013). En esta ocasión, se utilizarán el volumen esperado y el parámetro α , recientemente obtenido, para determinar i_0 , parámetro que hace referencia a la intensidad máxima teórica del chaparrón. La expresión a emplear, es la siguiente:

$$i_0 = \frac{P \cdot \alpha}{0.0159}$$

siendo:

- P: volumen total acumulado en milímetros.
- α : Parámetro temporal en min^{-1} .
- i_0 : intensidad máxima en el núcleo de la celda, en mm/h .

Al igual que para la expresión anterior, su validez ha sido contrastada en el epígrafe 4.4.2 (Validación de las expresiones de estimación de parámetros) comprobando su correcto funcionamiento, empleando los datos empíricos, para distintos rangos de intensidades.

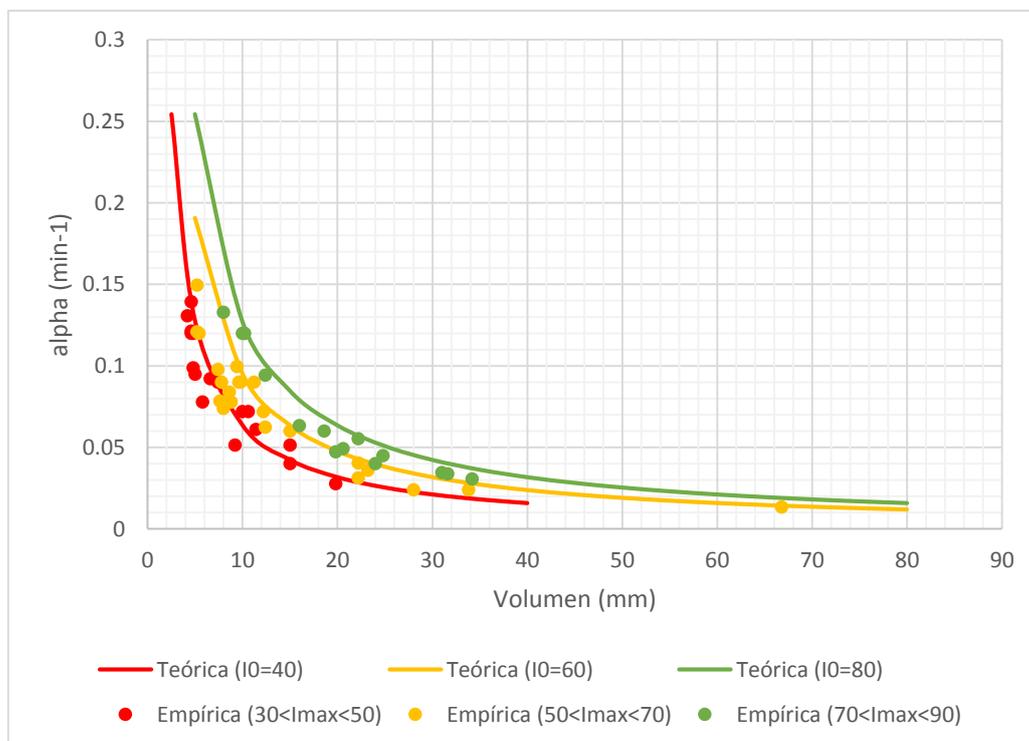


Figura 5.4 - Pares volumen-alpha y relación teórica para distintos rangos de intensidad máxima. Elaboración propia.

En definitiva, empleando las relaciones expuestas para la obtención de los parámetros α e i_0 , se tiene completamente definido el modelo temporalmente distribuido.

Si se desea modelizar la variabilidad espacial, tal y como se describe en el epígrafe 5.4 (Inclusión de la variabilidad espacial en el modelo teórico), puede emplearse la función de distribución de las áreas de las elipses ajustadas para las distintas estructuras convectivas de la ciudad de Barcelona. Esta función, proporciona una superficie asociada a una probabilidad de ocurrencia, que puede ser empleada para la obtención del parámetro espacial D , empleando las expresiones que siguen, cuya justificación viene dada en el epígrafe 5.4:

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

$$D = 0.233 \cdot D_{eq}$$

siendo:

- A : Área de la elipse asociada a una probabilidad de excedencia (km^2).
- D_{eq} : Diámetro de la circunferencia con área equivalente a la elipse (km).
- D : Parámetro espacial del modelo teórico CDET (km).

Obtenido el parámetro D , es posible emplear la ecuación general del modelo para calcular la intensidad en distintos instantes t , a una distancia r del centroide de la celda convectiva

$$i(r; t) = i_0 \cdot e^{-r^2/2 \cdot D^2} \cdot \alpha \cdot e^2 \cdot t \cdot e^{-\alpha \cdot e \cdot t}$$

siendo parámetros del modelo:

- i_0 : Intensidad máxima, en mm/h, en el núcleo de la celda convectiva para el instante $t=1/(\alpha \cdot e)$.
- D : Parámetro espacial en km.

- α : Parámetro temporal en min^{-1} .

siendo variables de cálculo:

- r : Distancia en km al núcleo de la celda convectiva.
- t : Instante de cálculo en minutos.

5.4 – Ejemplo de aplicación.

A continuación se expondrá a modo de ejemplo el procedimiento empleado para obtener el chaparrón de proyecto asociado al periodo de retorno de 50 años en la ciudad de Valencia, con un $\Delta t=5$ min. El siguiente esquema sintetiza el proceso que se seguirá:

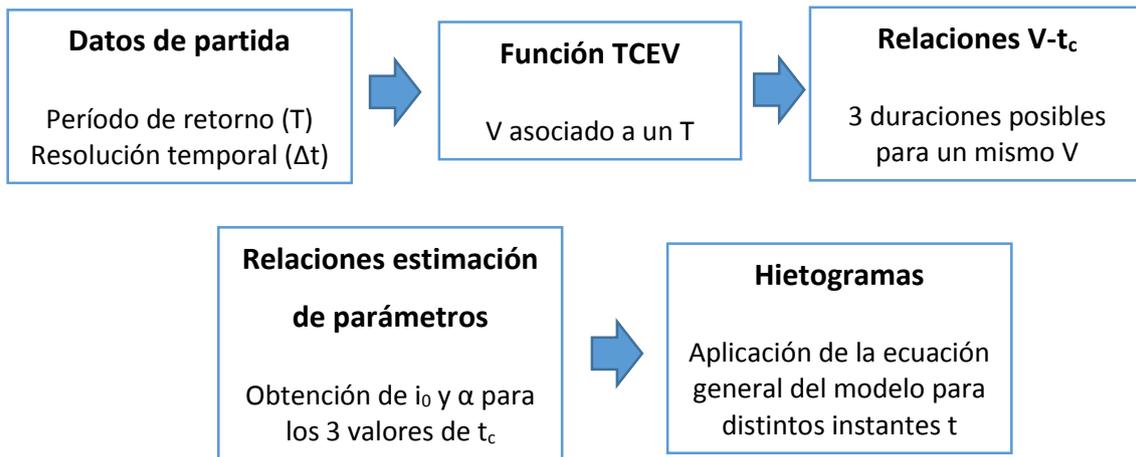


Figura 5.5 - Esquema del proceso seguido para la obtención de los chaparrones de proyecto, asociados a un T dado. Elaboración propia.

1º Cálculo del volumen de precipitación.

Empleando la función de distribución TCEV y los parámetros mostrados en la Tabla 5.1, se puede calcular el cuantil de precipitación asociado a un periodo de retorno de 50 años.

Se obtiene un valor de 79.55 mm.

2º Cálculo de la duración esperable de chaparrón.

Mediante las relaciones Volumen-Duración, expuestas en la Tabla 5.3, y el volumen obtenido en el apartado anterior, se obtienen tres duraciones esperables según el grado de torrencialidad del chaparrón.

Tabla 5.4 - Duraciones de chaparrón calculadas para un periodo de retorno de 50 años.

Tipología	Expresión	Duración esperada (min)
Intensidad baja	$t_c = 3.0331 \cdot V + 1.9101$	243.19
Intensidad media	$t_c = 1.6687 \cdot V + 9.298$	142.04
Intensidad alta	$t_c = 1.0809 \cdot V + 11.82$	97.81

3º Estimación de parámetros del modelo temporalmente distribuido.

A partir de las duraciones obtenidas en el apartado anterior y su volumen común asociado, pueden determinarse los parámetros que definen el chaparrón completamente empleando las expresiones propuestas por García-Bartual (2013):

Tabla 5.5 - Procedimiento de cálculo del parámetro alpha. Elaboración propia.

Tipología	Volumen (mm)	Duración (min)	Expresión	α (min ⁻¹)
Intensidad baja	79.55	243.19	$\alpha = 1.8/t_c$	0.0074015
Intensidad media		142.04		0.0126721
Intensidad alta		97.81		0.0184039

Tabla 5.6 - Procedimiento de cálculo del parámetro i_0 . Elaboración propia.

Tipología	Volumen (mm)	Duración (min)	Expresión	i_0 (mm/h)
Intensidad baja	79.55	243.19	$i_0 = V \cdot \alpha / 0.0159$	37.03
Intensidad media		142.04		63.40
Intensidad alta		97.81		92.08

4º Obtención de hietogramas y representación de los resultados.

Una vez son conocidos los parámetros alpha e i_0 , es posible obtener los hietogramas de los tres chaparrones descritos, empleando la formulación general del modelo:

$$i(t) = i_0 \cdot \alpha \cdot e^2 \cdot t \cdot e^{-\alpha \cdot e \cdot t}$$

Calculando la función con las tres parejas de parámetros, aumentando los valores de t de forma cinco-minutal, se obtienen los siguientes hietogramas (Tabla 5.7). Si se representan las intensidades frente al tiempo, se observan muy claramente los distintos grados de torrencialidad de los chaparrones calculados (Figura 5.6).

Capítulo 5 – Síntesis de la metodología de uso del CDET

Miguel Rico Cortés

Tabla 5.7 - Hietogramas de los tres chaparrones de proyecto calculados. Elaboración propia.

Intensidad baja		Intensidad media		Intensidad alta	
t(min)	i(t)	t(min)	i(t)	t(min)	i(t)
0	0.00	0	0.00	0	0.00
5	9.16	5	24.99	5	48.75
10	16.56	10	42.07	10	75.93
15	22.46	15	53.12	15	88.68
20	27.09	20	59.62	20	92.08
25	30.62	25	62.73	25	89.63
30	33.22	30	63.37	30	83.75
35	35.05	35	62.23	35	76.08
40	36.23	40	59.87	40	67.71
45	36.85	45	56.70	45	59.32
50	37.03	50	53.03	50	51.32
55	36.83	55	49.10	55	43.96
60	36.34	60	45.09	60	37.34
65	35.60	65	41.12	65	31.50
70	34.67	70	37.28	70	26.42
75	33.59	75	33.62	75	22.04
80	32.40	80	30.19	80	18.31
85	31.13	85	27.00	85	15.15
90	29.81	90	24.06	90	12.49
95	28.45	95	21.38	95	10.27
100	27.08	100	18.95	100	0.00
105	25.72	105	16.75		
110	24.36	110	14.77		
115	23.03	115	13.00		
120	21.73	120	11.42		
125	20.47	125	10.01		
130	19.25	130	8.76		
135	18.08	135	7.66		
140	16.96	140	6.69		
145	15.88	145	0.00		
150	14.86				
155	13.88				
160	12.96				
165	12.08				
170	11.26				
175	10.48				
180	9.75				
185	9.06				
190	8.42				
195	7.81				
200	7.24				

205	6.71		
210	6.22		
215	5.76		
220	5.33		
225	4.93		
230	4.56		
235	4.21		
240	3.89		
245	0.00		

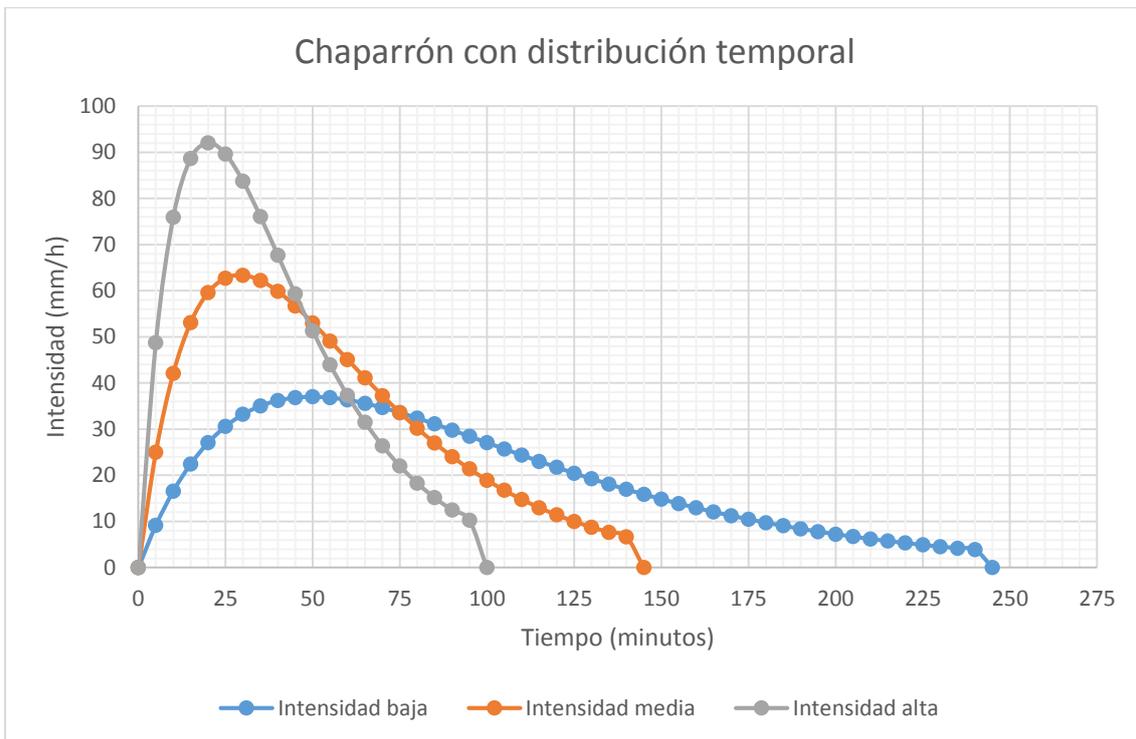


Figura 5.6 - Evolución temporal de la intensidad para los chaparrones calculados. Elaboración propia.

Tabla 5.8 - Principales descriptores de los chaparrones sintéticos generados. Elaboración propia.

Descriptor	Intensidad baja	Intensidad media	Intensidad alta
Volumen (mm)	79.55	79.55	79.55
Intensidad máxima (mm/h)	37.03	63.40	92.08
Duración (minutos)	243.19	142.04	97.81
Intensidad media (mm/h)	19.90	34.09	50.04
Tiempo al pico (minutos)	50	30	20
% Tiempo al pico	20.56 %	21.12 %	20.45 %
β	0.266	0.718	0.857

Capítulo 6.- Conclusiones y futuras líneas de investigación.

En este último capítulo se detallarán las conclusiones obtenidas a lo largo del trabajo de investigación y se definirán las líneas de investigación futuras más claras.

6.1 – Conclusiones.

En primer lugar, es importante destacar que se ha cumplido el objetivo principal del trabajo, esto es, detallar un procedimiento claro y simplificado de obtención de chaparrones de proyecto para la ciudad de Valencia.

Para lograr este objetivo se han analizado las **series pluviométricas cinco-minutales que cubren el periodo entre 1990 y 2012**, verificando su validez estadística. Posteriormente, se ha extraído la información relevante de las mismas, definiendo un criterio de selección objetivo de tormentas, y seguidamente extrayendo los chaparrones de cada tormenta siguiendo una metodología homogénea, existiendo un total de **73 chaparrones** que reúnen todos los criterios de selección.

Se ha realizado un **análisis estadístico sobre los descriptores fundamentales** de los chaparrones (volumen, duración e intensidad máxima), posibilitando el establecimiento de una **relación matemática biunívoca entre el volumen y la duración del chaparrón**, dividiendo la población en tres familias según la intensidad máxima esperable y estableciendo los umbrales de separación que mejores resultados de correlación presentan.

Por otro lado, se ha planteado **el ajuste del modelo de chaparrón con distribución espacio-temporal propuesto por García-Bartual (2013)** a los datos empíricos extraídos. Para este proceso, se ha propuesto una **función objetivo que contempla la correcta reproducción de todos los descriptores del chaparrón**, obteniéndose los parámetros del modelo empleando esta función y, paralelamente, un

ajuste de mínimos cuadrados ordinarios. Se ha realizado una **valoración crítica de los resultados**, comparando los parámetros obtenidos por las dos metodologías y determinando que los ajustes obtenidos mediante la función multi-criterio son cuantitativamente mejores. Además, **se ha verificado la validez de las expresiones teóricas** propuestas en el modelo.

En cuanto a la variabilidad espacial de la precipitación, se ha realizado una revisión bibliográfica, centrándose en un estudio previo existente en la ciudad de Barcelona, ciudad con unas **características climáticas asimilables a las de Valencia**. Se han relacionado los resultados obtenidos en dicho estudio, con los parámetros que describen la variabilidad espacial del modelo teórico considerado, pudiéndose definir completamente el modelo espacio-temporal con los datos espaciales asimilados.

Para terminar se han **sinetizado y esquematizado los resultados**, exponiendo la metodología de uso del modelo teórico de un modo práctico claro y conciso.

6.2 – Futuras líneas de investigación.

Algunas líneas de investigación derivadas del desarrollo de esta tesina son:

- Estudio de mejora de la metodología de identificación de chaparrones, realizando un análisis estadístico de los umbrales impuestos. Facilitar su programación y su sistematización.
- Comparativa de los resultados de ajuste de datos empíricos al modelo teórico, empleando la formulación multi-criterio, con otras técnicas de ajuste conocidas. Evaluar la bondad estadística de los ajustes. Realizar una comparativa de los ajustes obtenidos con la misma metodología a otros modelos teóricos de chaparrón.
- Realización de un análisis estadístico de sensibilidad para tratar de mejorar los umbrales de intensidad propuestos para la separación de familias de tormentas. Evaluar la incidencia de estos umbrales sobre la correlación de las parejas volumen-duración.

Si se desea profundizar en la descripción de la variabilidad espacial, se proponen las siguientes líneas de investigación:

- Identificar las estructuras convectivas más habituales en la ciudad de Valencia empleando la tecnología radar, y estudiar sus características geométricas siguiendo un procedimiento similar al empleado por Barnolas M. et al. (2010), proporcionaría unos resultados más exactos sobre la distribución estadística de las áreas de estas estructuras. Estos atributos geométricos, podrían emplearse para la obtención del parámetro de distribución espacial de un modo más preciso, obviando la simplificación de asumir en la ciudad de Valencia los datos de Barcelona.

Capítulo 6 – Conclusiones y futuras líneas de investigación

Miguel Rico Cortés

- Una vez se disponga de un estudio de las estructuras convectivas en Valencia, sería recomendable comprobar los resultados arrojados por el modelo teórico. Para ello se requerirá de una red de medida pluviométrica densa en la ciudad y alrededores, que permita valorar y criticar los resultados mostrados por el modelo para las distintas ubicaciones.
- En caso de que el modelo no reproduzca correctamente la variabilidad espacial, sería planteable el desarrollo de un nuevo modelo, que represente la celda convectiva en forma de elipse, con atenuación progresiva conforme aumenta la distancia a su centroide.

Referencias

- Adams B.J. y Papa F. 2000. Urban stormwater management planning with analytical probabilistic methods. *John Wiley & Sons, Inc, New York 358 pp.*
- Albentosa Hernández E. 2011. Análisis de la estructura estocástica fina de los eventos de precipitación en el entorno del pico. *Trabajo de investigación. Universitat Politècnica de València.*
- Andrés-Doménech I. 2010. Evaluación probabilística de indicadores de eficiencia para el dimensionamiento volumétrico de tanques de tormenta para el control de la contaminación de escorrentías urbanas. *Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.*
- Andrés-Doménech I., García-Bartual R., Montanari A. y Marco J.B. 2015. Climate and hydrological variability: the catchment filtering role. *Hydrology and Earth System Sciences, 19, 379-387.*
- Andrés-Doménech I., Montanari A. y Marco J.B. 2010. Stochastic rainfall analysis for storm tank performance evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences, 14, 1221-1232.*
- Barnolas M., Rigo T., Llasat M.C. 2010. Characteristics of 2-D convective structures in Catalonia (NE Spain): an analysis using radar data and GIS. *Hydrology and Earth System Sciences 14, 129-139.*
- Borga M., Anagnostou E.N., Blöschl G., Creutin J.D. 2011. Flash flood forecasting, warning and risk management: the Hydrate Project. *Environmental Science & Policy 14 834-844.*
- CEH-CEDEX 1999. Máximas lluvias diarias en la España peninsular. *Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras, Madrid.*

Referencias bibliográficas

Miguel Rico Cortés

Chumchean S., Seed A. y Sharma A. 2006. Correcting of radar mean field bias using Kalman filtering approach. *Journal of Hydrology*, 317, 123-137.

Feral L., Mesnard F., Sauvageot H., Castanet L. y Lemorton J. 2000. Rain cells shape and orientation distribution in south-west of France. *Physics and chemistry of the Earth*, 25(10-12), 1073-1078.

Ferrer Polo, F.J. 2000. Recomendaciones para el cálculo hidrometeorológico de avenidas. *Centro de Estudios Hidrográficos - CEDEX, Madrid*.

García-Bartual R. 2013. Chaparrón de proyecto espacio-temporal para la estimación de hidrogramas de crecida. *III Jornadas de Ingeniería del Agua. La protección contra los riesgos hídricos. vol. 2, 543-550*.

García-Bartual R. y Marco Segura J.B. 1990. A stochastic model of the internal structure convective precipitation in time at a raingauge site. *Journal of Hydrology*, 118. pp. 129-142.

García-Bartual R., Schneider M. 2001. Estimating maximum expected short-duration rainfall intensities from extreme convective storms. *Physics and chemistry of the Earth, vol. 26, nº 9, 675-681*.

Gringorten I.I. 1963. A plotting rule for extreme probability paper. *Journal of Geophysics research. 68. Nº 3, 813-814*.

Hogg W.D. 1980. Time distribution of short duration storm rainfall in Canada. *Proceedings, Canadian Hydrology Symposium: 80, Toronto. National Research Council of Canada, Ottawa, Ont. pp 53-63*.

Hogg W.D. 1982. Distribution of rainfall with time: design considerations. *American Geophysical Union Chapman Conference on Rainfall Rates, Urbana, IL. April 27-29*.

Huff F.A. 1967. Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research 3(4), pp. 1007-1019*.

- Karklinsky M., Morin E. 2006. Spatial characteristics of radar-derived convective rain cells over southern Israel. *Meteorologische vol. 15, Nº 5, 513-250.*
- Keifer C.J. y Chu H.H. 1957. Synthetic storm pattern for drainage design. *ASCE Journal of the Hydraulics Division, 83(HY4), pp. 1332-1 a 1332-25.*
- Llasat M.C. 2001. An objective classification of rainfall events on the basis of their convective features: application to rainfall intensity in the northeast of Spain. *International Journal of Climatology 21, 1385-1400.*
- Llasat M.C., Rigo T., Ceperuelo M. y Barrera A. 2005. Estimation of convective precipitation: the meteorological radar versus an automatic rain gauge network. *Advances in Geosciences, 2, 103-109.*
- Llasat M.C., Ceperuelo M. y Rigo T., 2007. Rainfall regionalization on the basis of the precipitation convective features using a rain gauge network and weather radar observations. *Atmospheric Research, 83, 415-426.*
- Marco Segura J.B., Albentosa Hernández E. y Andrés Doménech I. 2010. Estudio de las características estocásticas a escala temporal fina de los eventos de lluvia en regiones áridas para el análisis de la formación y umbrales de escorrentía. *Instituto de ingeniería del agua y medio ambiente. Universitat Politècnica de València.*
- Marsalek J. y Watt W.E. 1984. Design storms for urban drainage design. *Canadian Journal of Civil Engineering, 11, pp: 574-584.*
- Marshall J.S. y Palmer W.M.K. 1948. The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology, 5, 156-166.*
- Martínez Mercado C. 2014. Modelo estacional de lluvias en base a procesos de Poisson no homogéneos. *Trabajo final de Máster. Universitat Politècnica de València.*
- McPherson M.B. 1978. Urban Runoff control planning. *EPA-600/9-78-035, Environmental Protection Agency, Washington, D.C.*

Referencias bibliográficas

Miguel Rico Cortés

Northrop P.J. 1998. A clustered spatial-temporal model of rainfall. *Royal society of London A454, 1875-1888.*

Rebora N., Ferraris L. 2006. The structure of convective rain cells at mid-latitudes. *Advances in Geosciences, 7, 31-35.*

Restrepo-Posada P.J. y Eagleson P.S. 1982. Identification of independent rainstorms. *Journal of Hydrology, Elsevier, 55 (1-4) 303-319.*

Rigo T. y Llasat M.C. 2007. Analysis of mesoscale convective systems in Catalonia using meteorological radar for the period 1996-2000. *Atmospheric Research 83 458-472.*

Rivard G. 1996. Design storm events for urban drainage based on historical rainfall data: a conceptual framework for a logical approach. *Journal of Water Management Modeling R191-12.*

Romero Villafranca R. y Zúnica Ramajo L.R. 2010. Métodos estadísticos en ingeniería. *Departamento de Estadística e Investigación Operativa Aplicadas y Calidad. Universidad Politécnica de Valencia.*

Shamasastry, R. 1967. Arthashastra. *Indian treatise: pp. 166–167.*

Soil Conservation Service. 1975. Urban hydrology for small watersheds. *Technical Release NO.55, Engineering Division, Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, Washington D.C.*

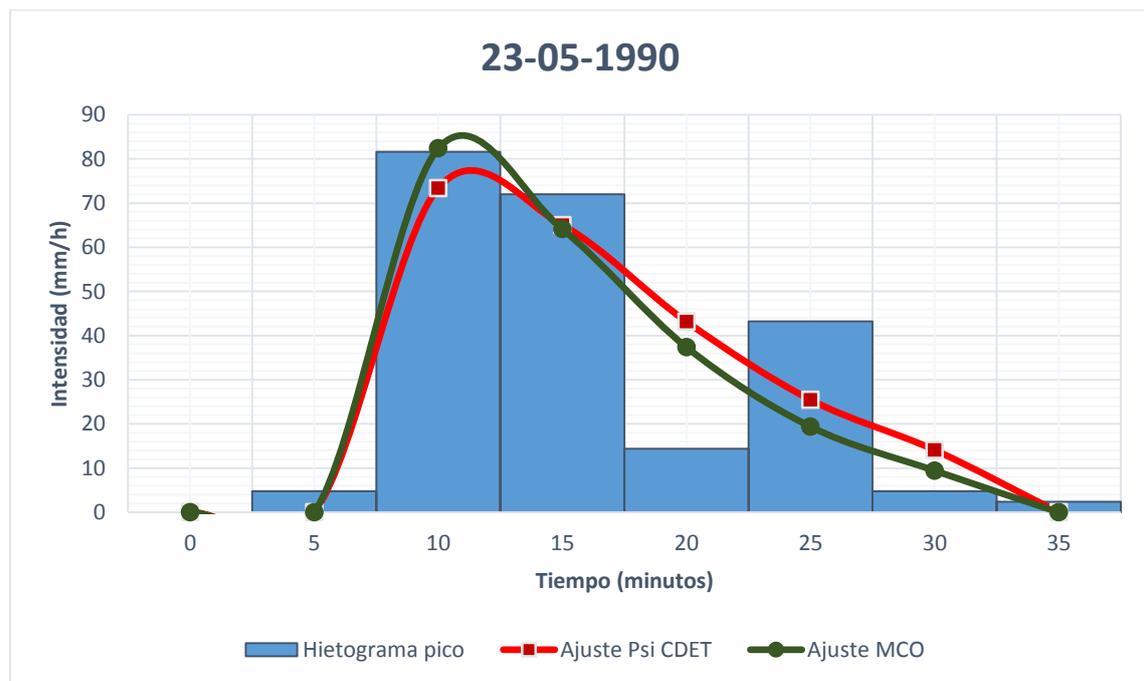
Strangeways I. 2010. A history of rain gauges. *Weather 65.5, 133-138. ISSN 1477-8696*

ANEJO – Ajuste de tormentas seleccionadas.

A continuación, se presentan los hietogramas de los chaparrones seleccionados así como los ajustes del modelo CDET empleando las dos metodologías explicadas en el Capítulo 4.

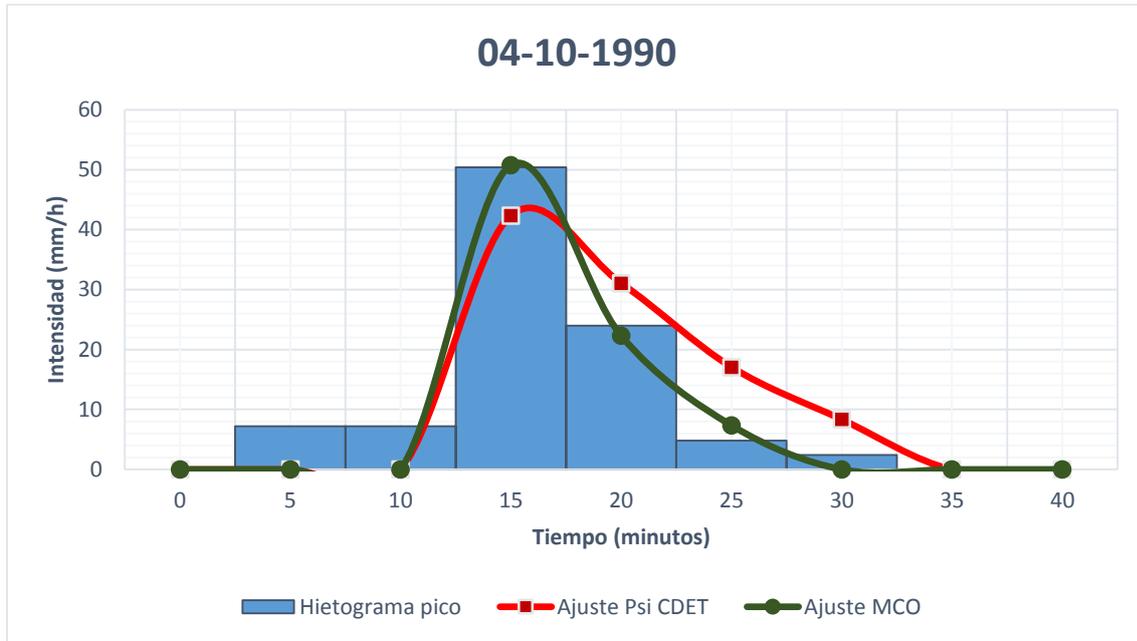
1990

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
23/05/1990	PSI	5	0.05996	74.85
23/05/1990	MCO	5	0.0695	82.54

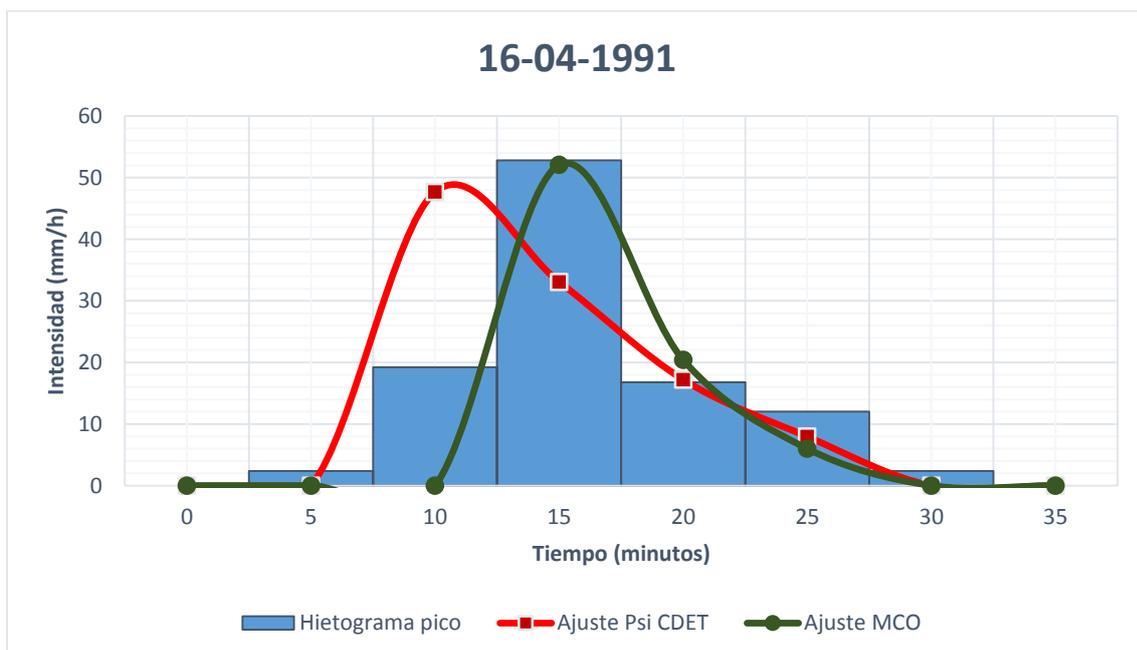


1991

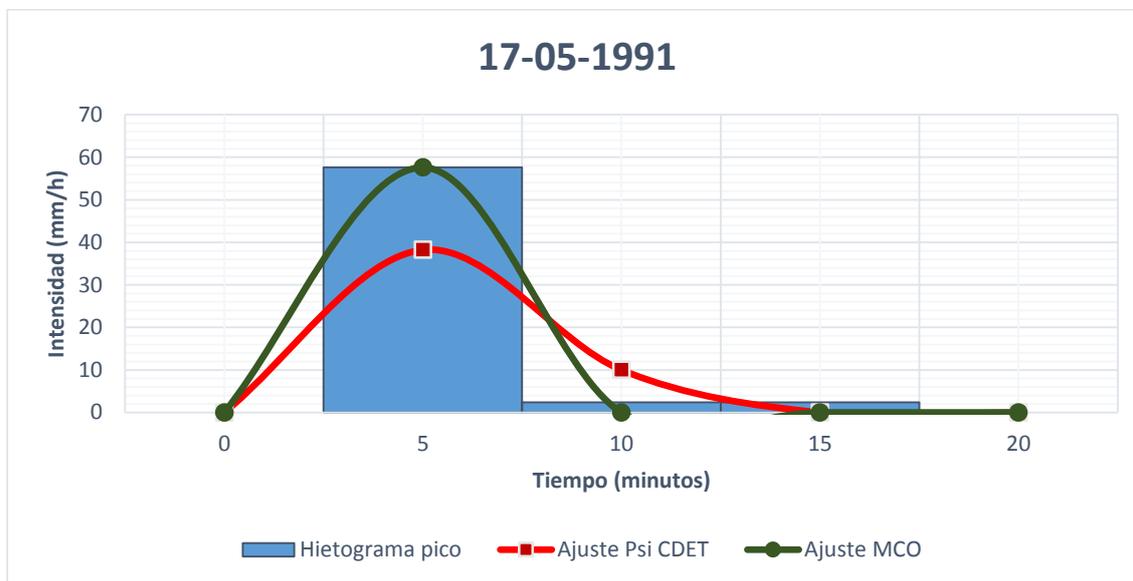
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
14/01/1991	PSI	10	0.11992	37.27
14/01/1991	MCO	10	0.1199	44.40



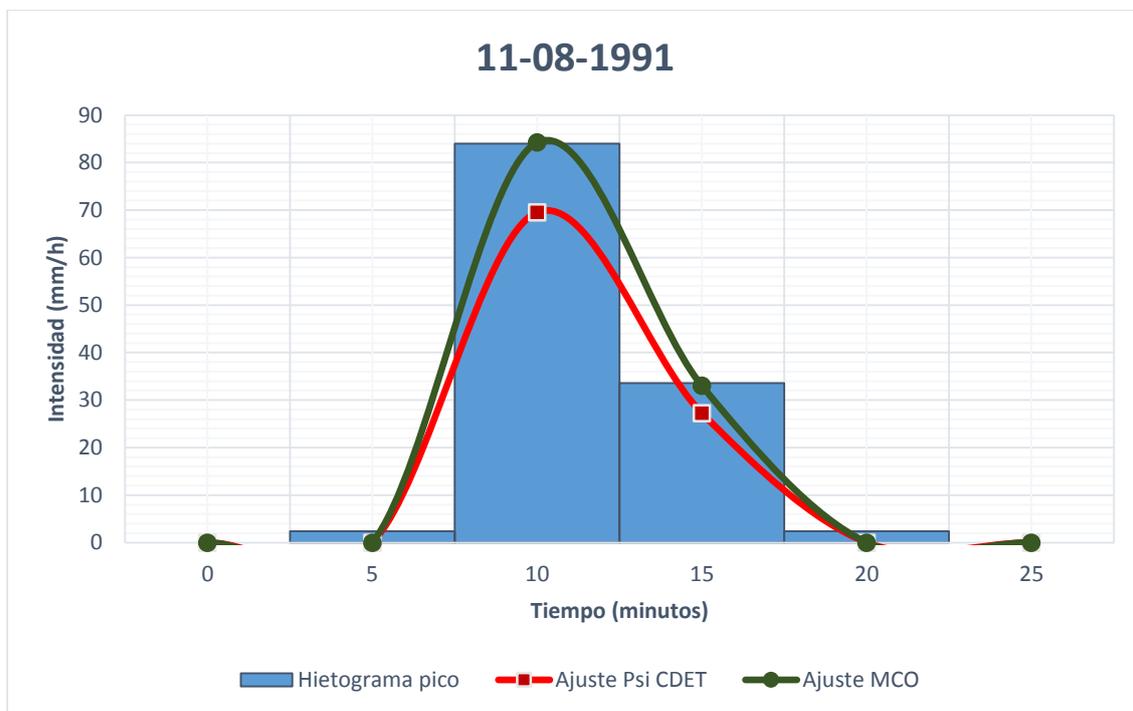
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
16/04/1991	PSI	5	0.07792	47.76
16/04/1991	MCO	10	0.1199	59.99



Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
17/05/1991	PSI	0	0.14947	52.81
17/05/1991	MCO	0	0.2616	208.57



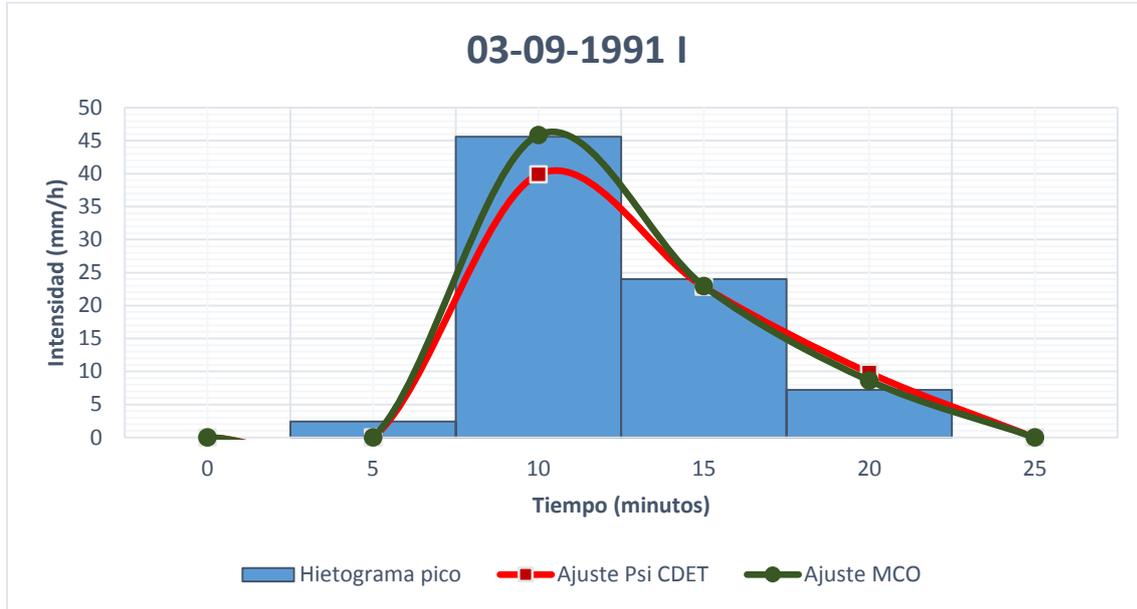
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
11/08/1991	PSI	5	0.11992	80.12
11/08/1991	MCO	5	0.1199	97.02



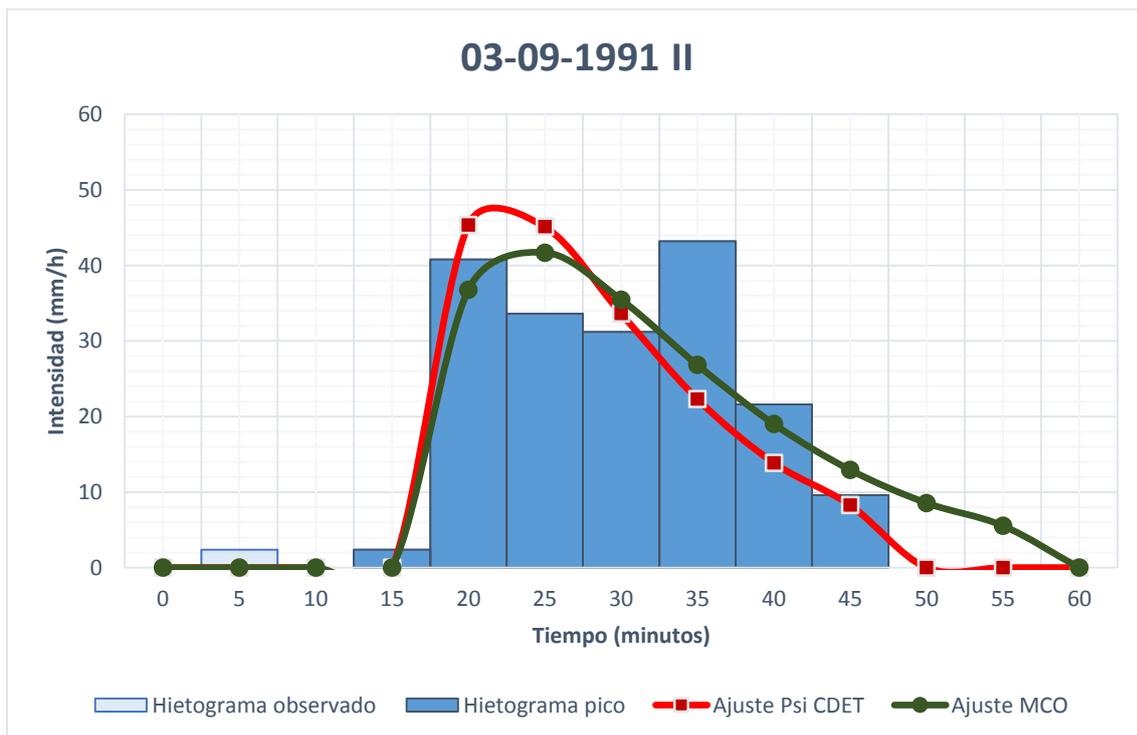
ANEJO – Ajuste de tormentas seleccionadas.

Miguel Rico Cortés

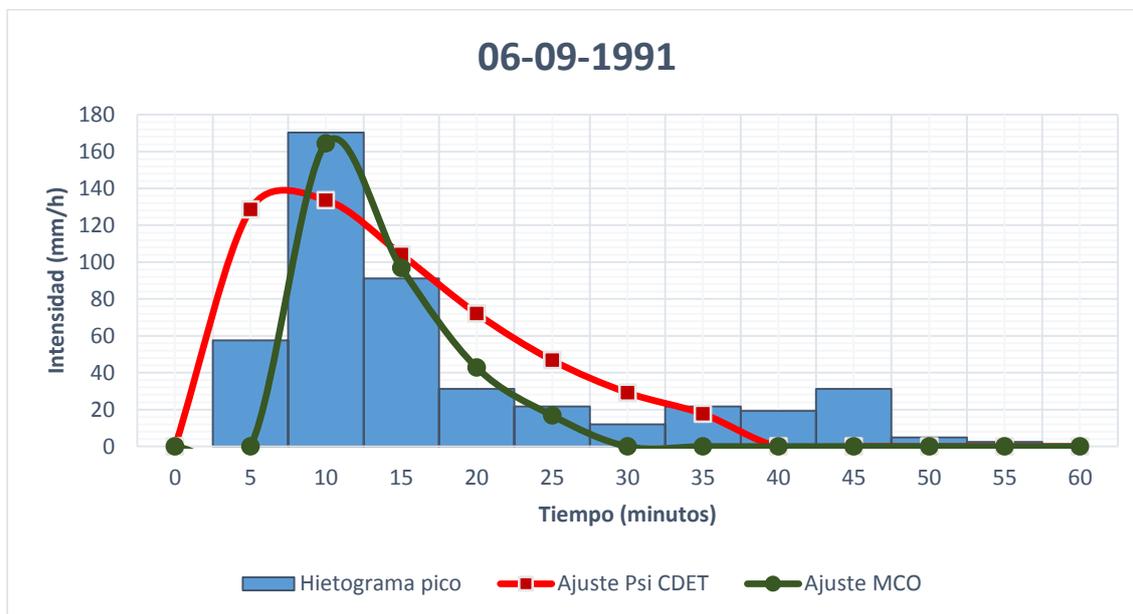
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
03/09/1991	PSI	5	0.09207	40.99
03/09/1991	MCO	5	0.1020	48.68



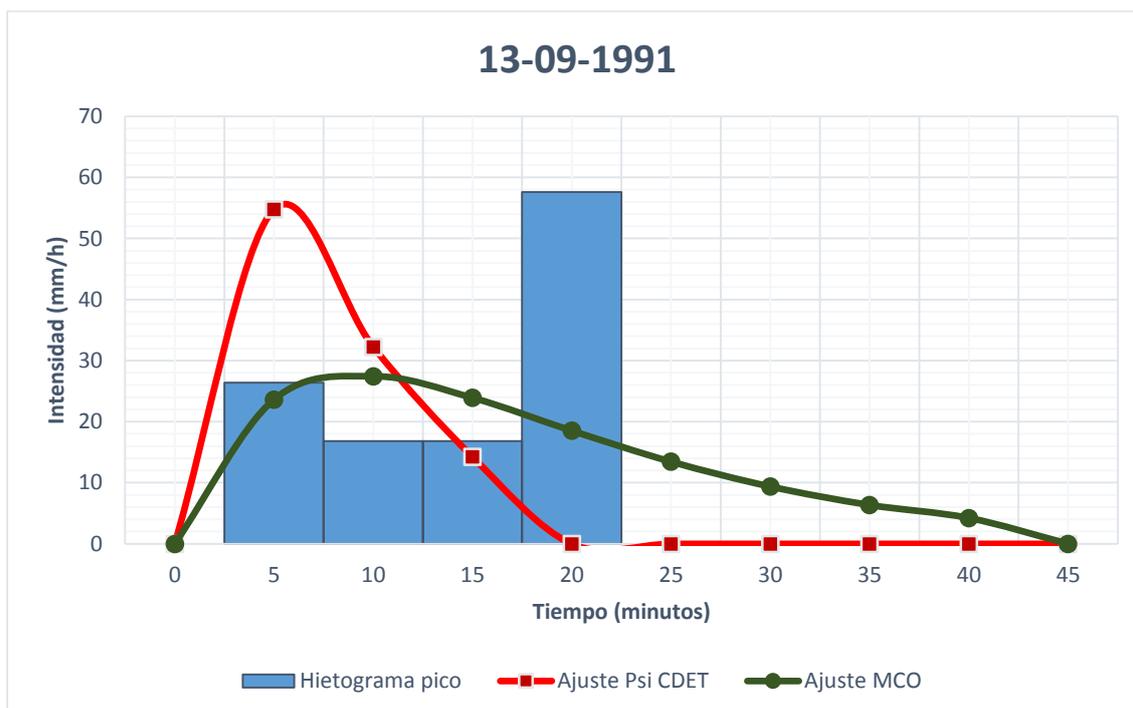
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
03/09/1991	PSI	15	0.05140	48.04
03/09/1991	MCO	15	0.0417	42.04



Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
06/09/1991	PSI	0	0.04819	139.09
06/09/1991	MCO	5	0.0899	168.10



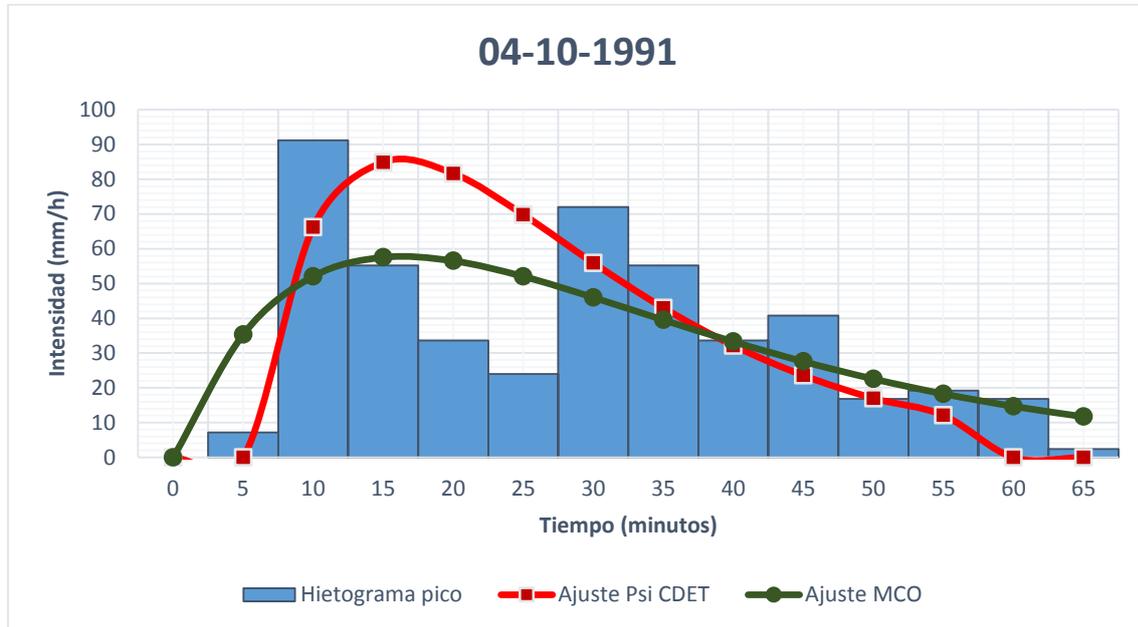
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
13/09/1991	PSI	0	0.08994	55.96
13/09/1991	MCO	0	0.0400	27.55



ANEJO – Ajuste de tormentas seleccionadas.

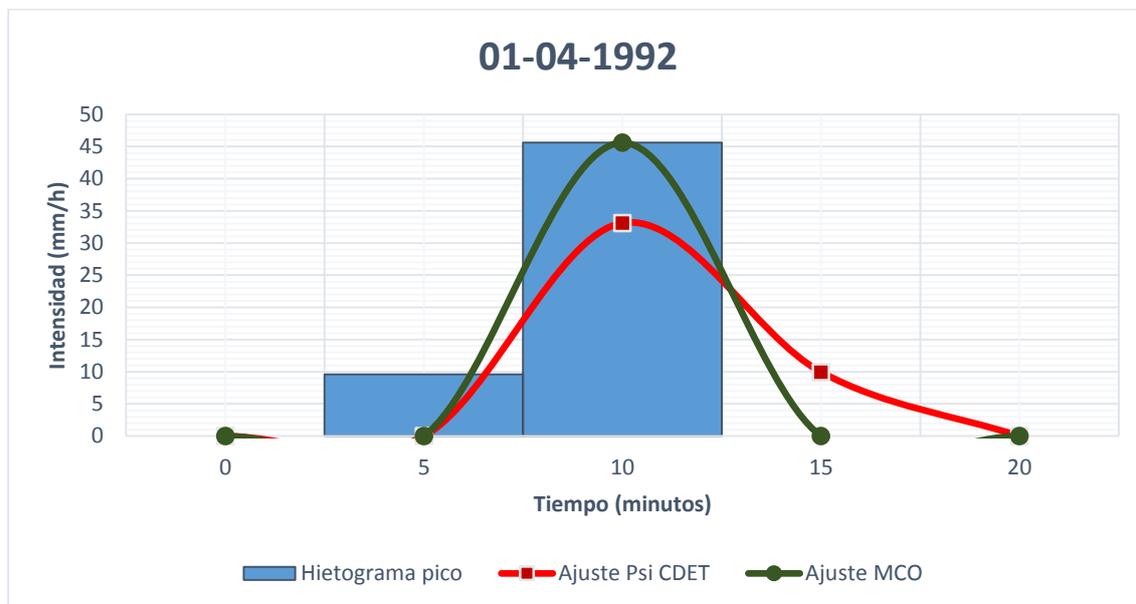
Miguel Rico Cortés

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
04/10/1991	PSI	5	0.03271	85.45
04/10/1991	MCO	0	0.0225	57.78

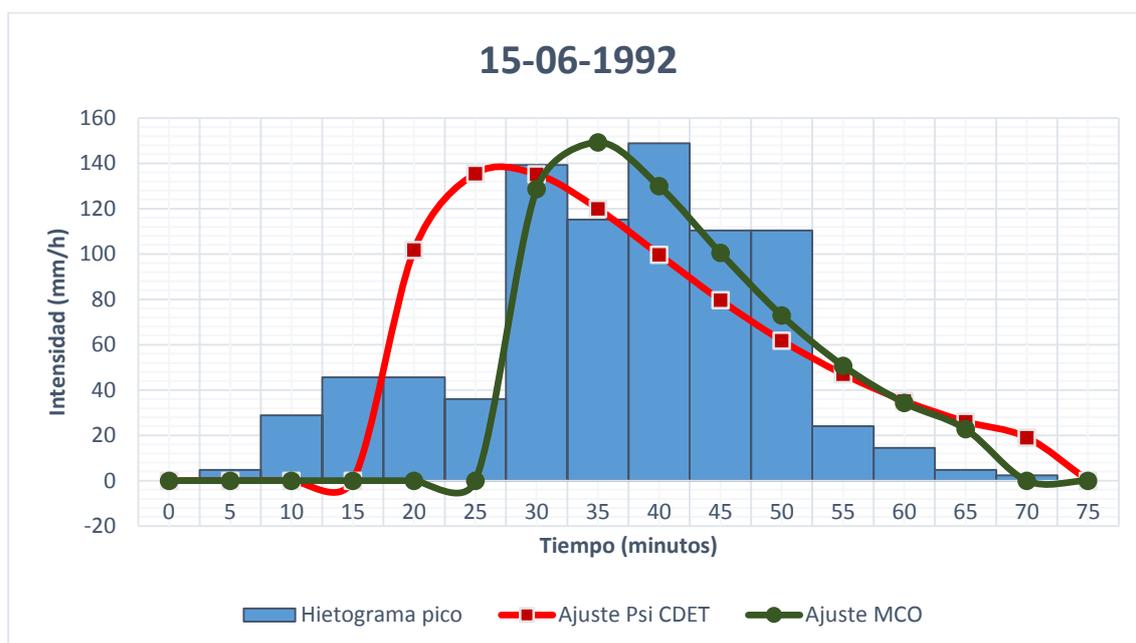


1992

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
01/04/1992	PSI	5	0.13941	42.74
01/04/1992	MCO	5	0.2259	117.71



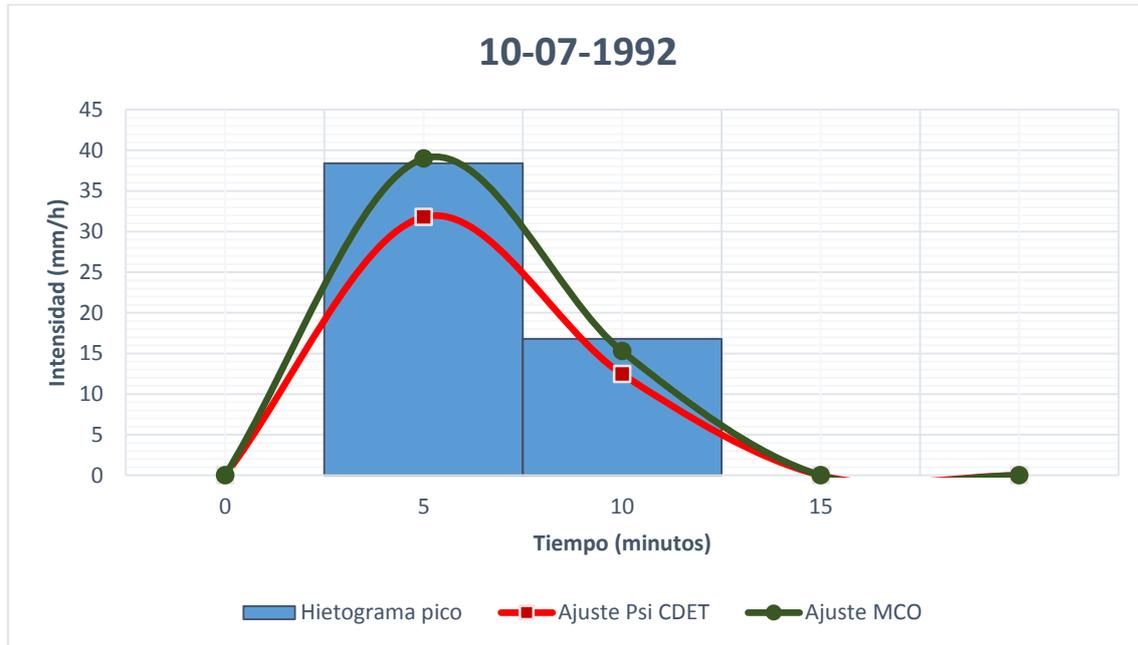
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
15/06/1992	PSI	15	0.02998	138.11
15/06/1992	MCO	25	0.0401	149.86



ANEJO – Ajuste de tormentas seleccionadas.

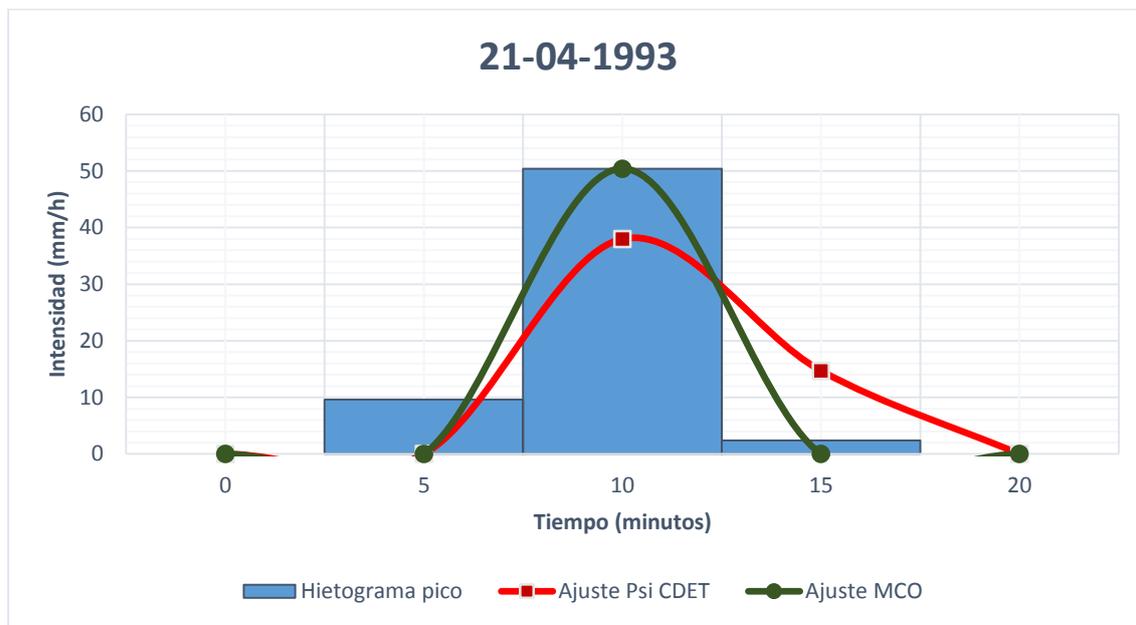
Miguel Rico Cortés

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
10/07/1992	PSI	0	0.11992	36.61
10/07/1992	MCO	0	0.1199	44.92

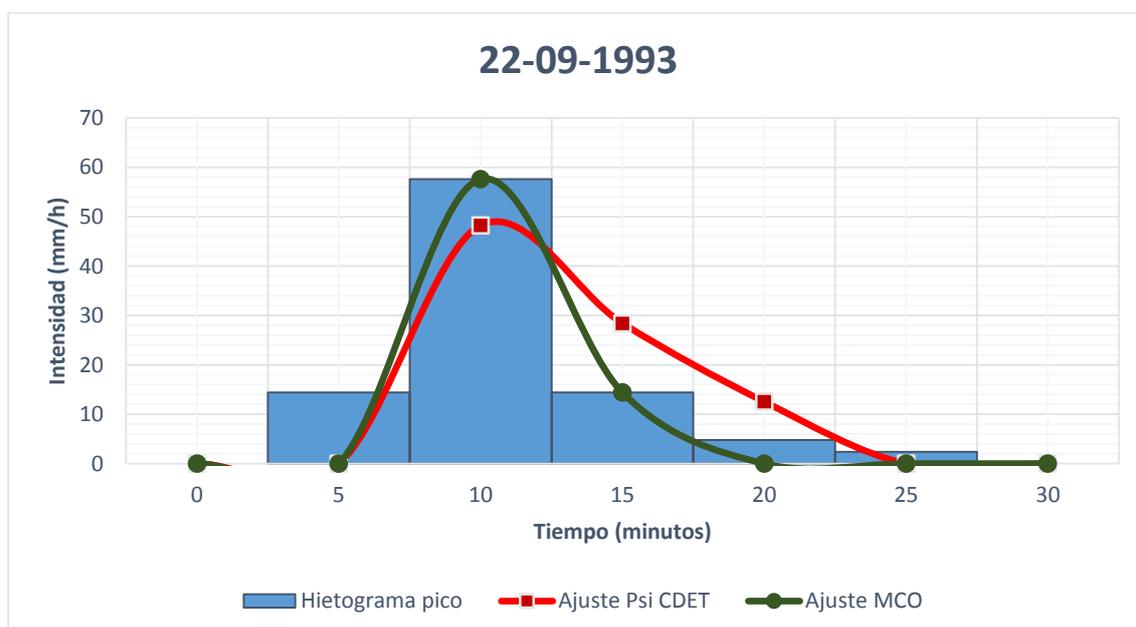


1993

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
21/04/1993	PSI	5	0.12083	43.98
21/04/1993	MCO	5	0.2956	256.46

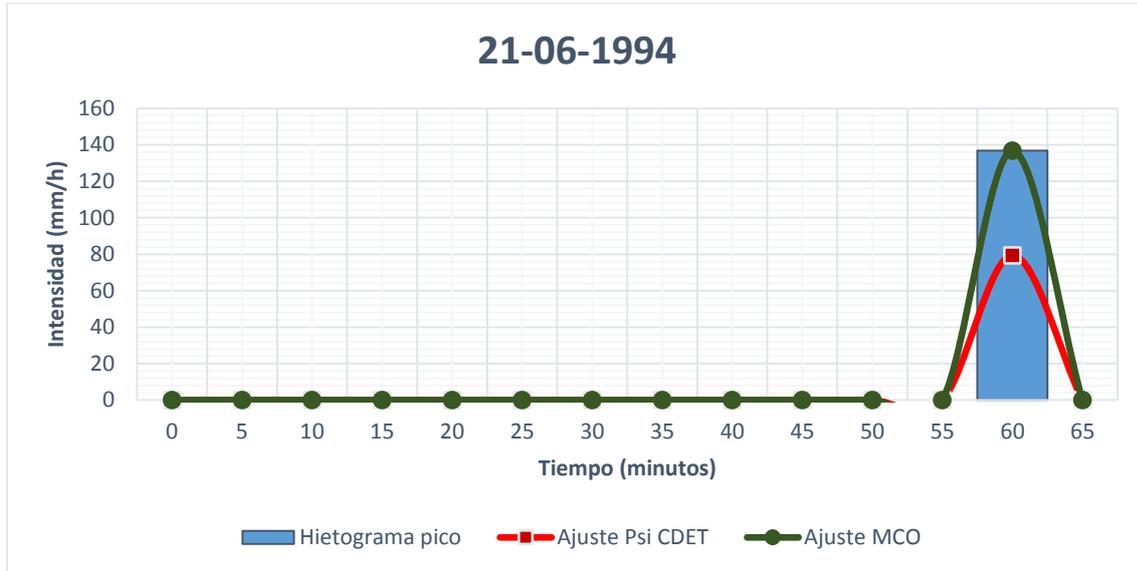


Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
22/09/1993	PSI	5	0.08994	49.28
22/09/1993	MCO	5	0.1530	81.52

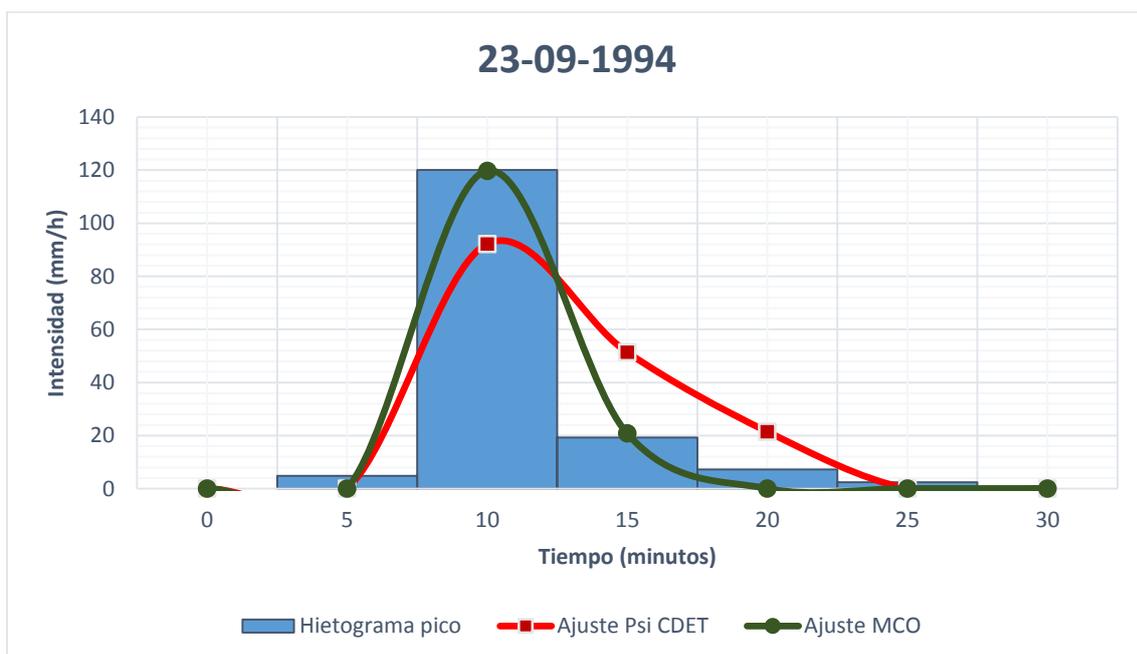


1994

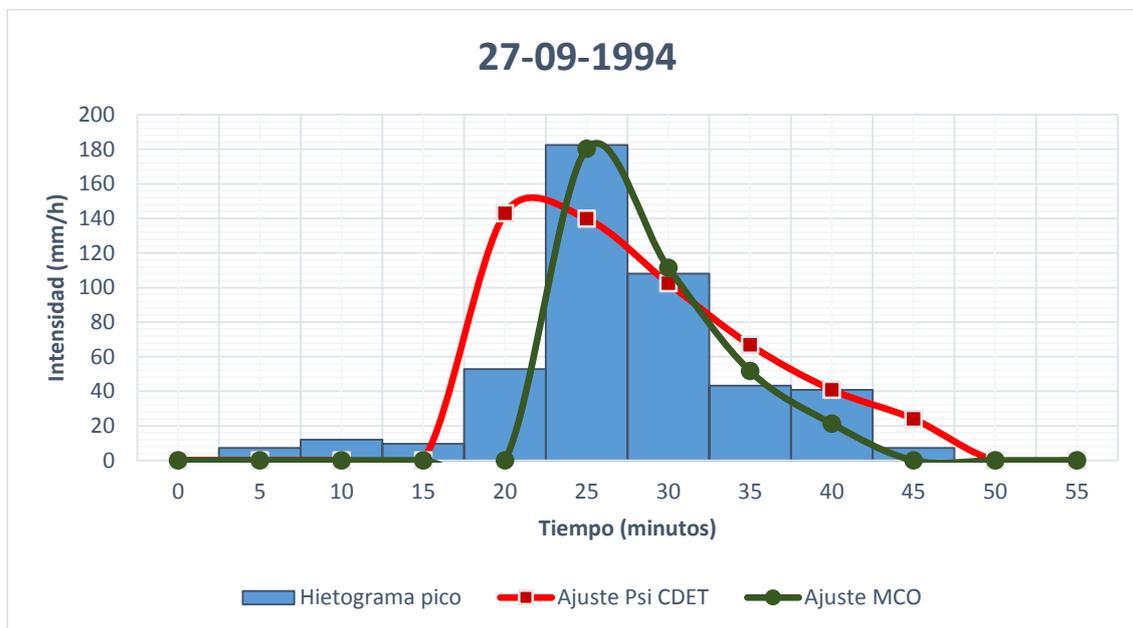
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
21/06/1994	PSI	55	0.17988	137.71
21/06/1994	MCO	55	0.1987	277.41



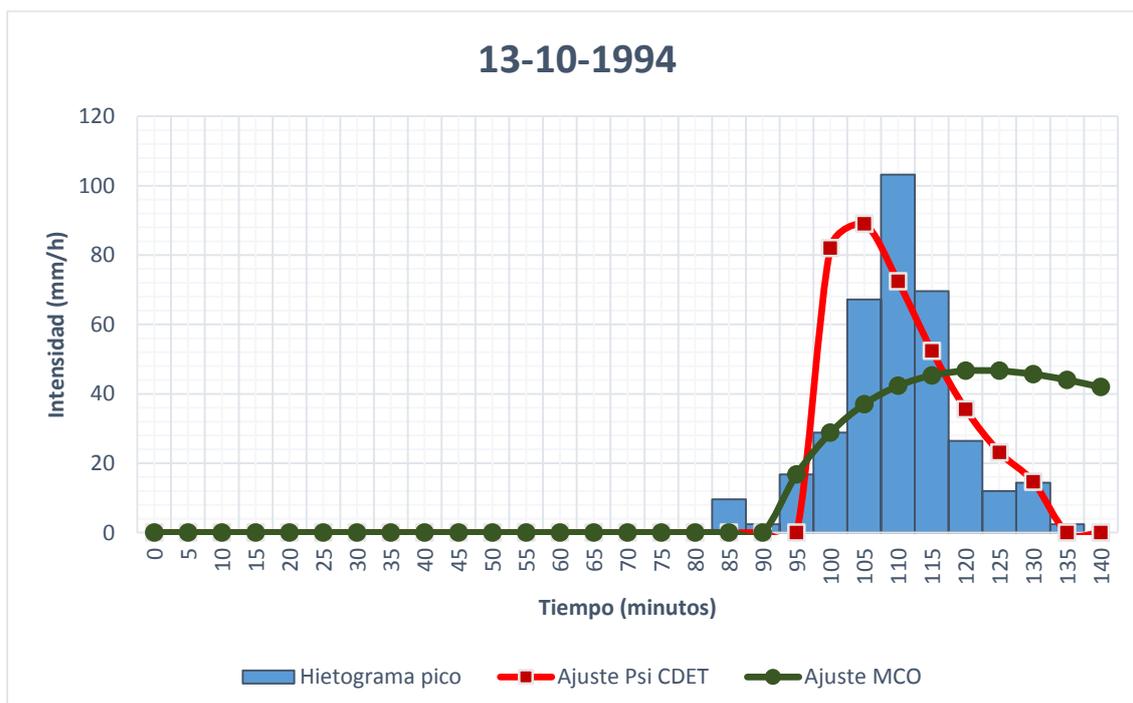
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
23/09/1994	PSI	5	0.09403	95.21
23/09/1994	MCO	5	0.1799	207.70



Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
27/09/1994	PSI	15	0.05266	150.33
27/09/1994	MCO	20	0.0864	182.68

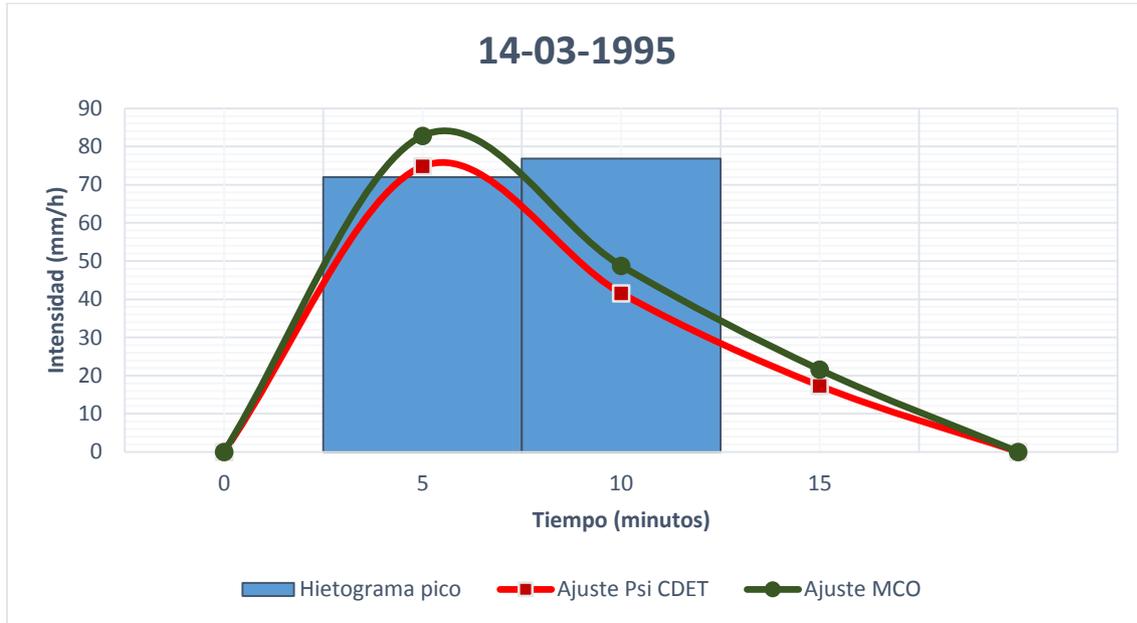


Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
13/10/1994	PSI	95	0.04497	90.93
13/10/1994	MCO	90	0.0113	46.78

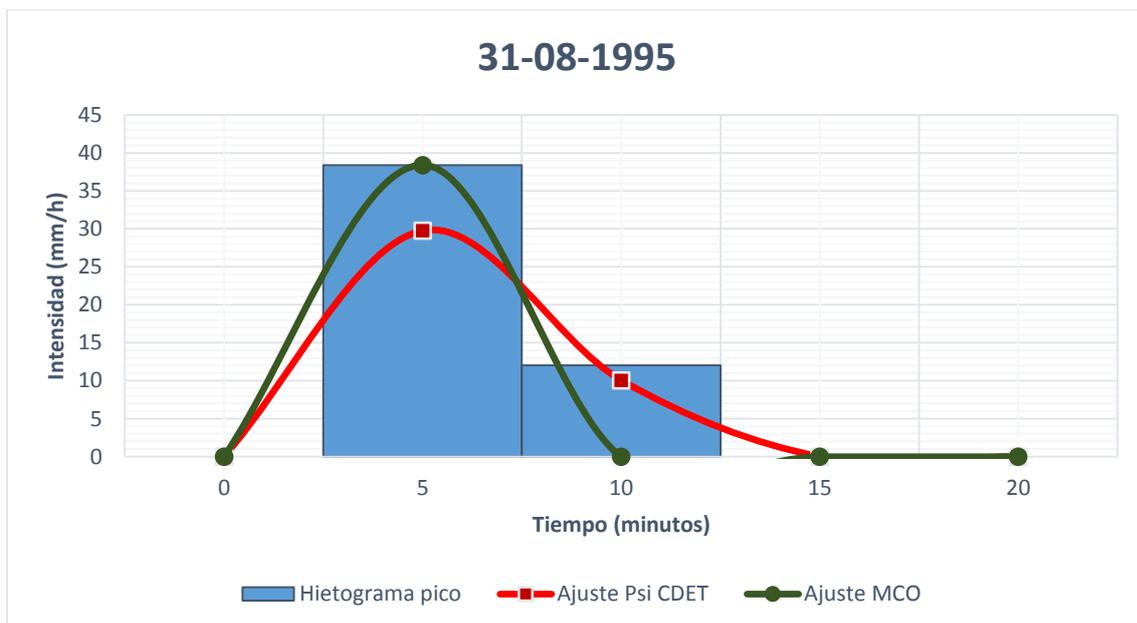


1995

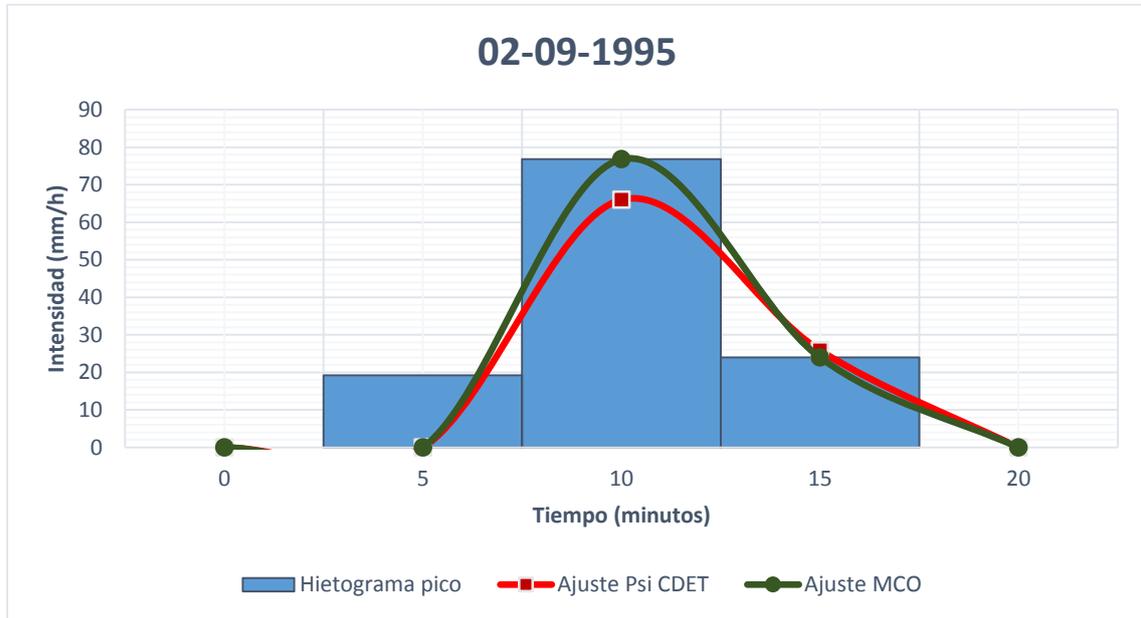
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
14/03/1995	PSI	0	0.09424	77.35
14/03/1995	MCO	0	0.0899	84.59



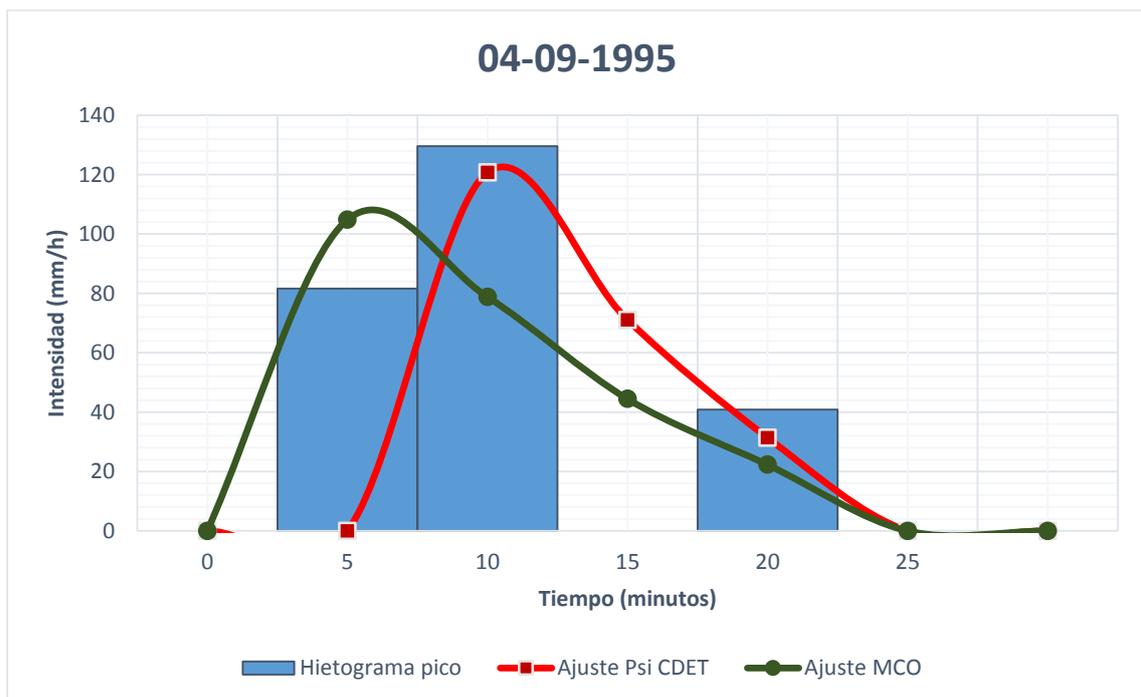
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
31/08/1995	PSI	0	0.13077	36.42
31/08/1995	MCO	0	0.2439	117.26



Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
02/09/1995	PSI	5	0.11992	76.04
02/09/1995	MCO	5	0.1366	97.41

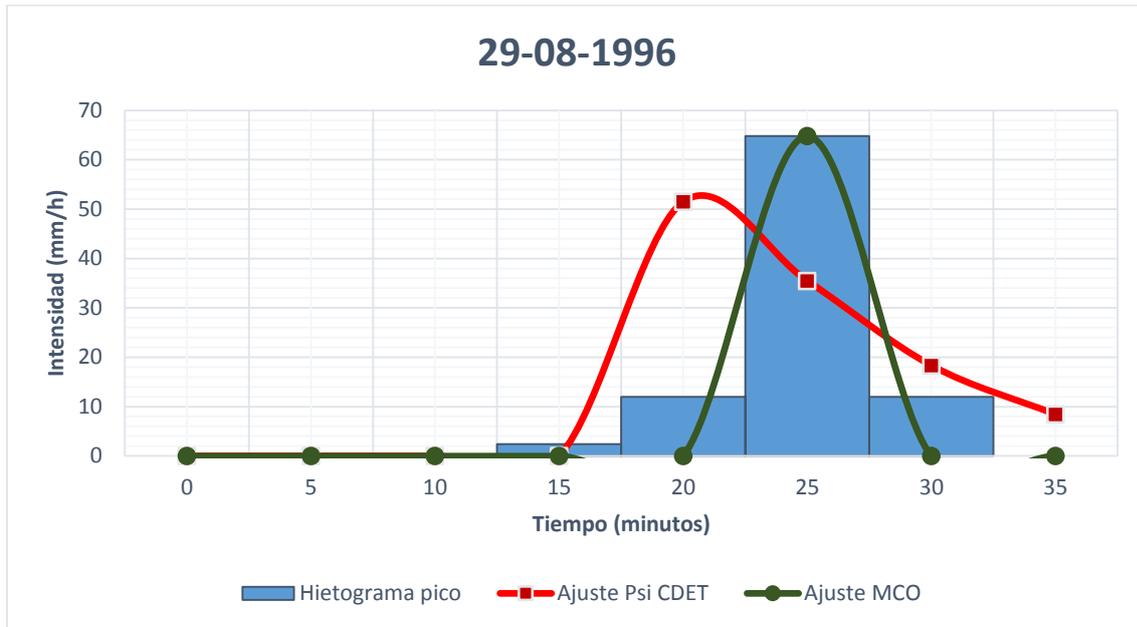


Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
04/09/1995	PSI	5	0.08994	123.38
04/09/1995	MCO	0	0.0720	104.84

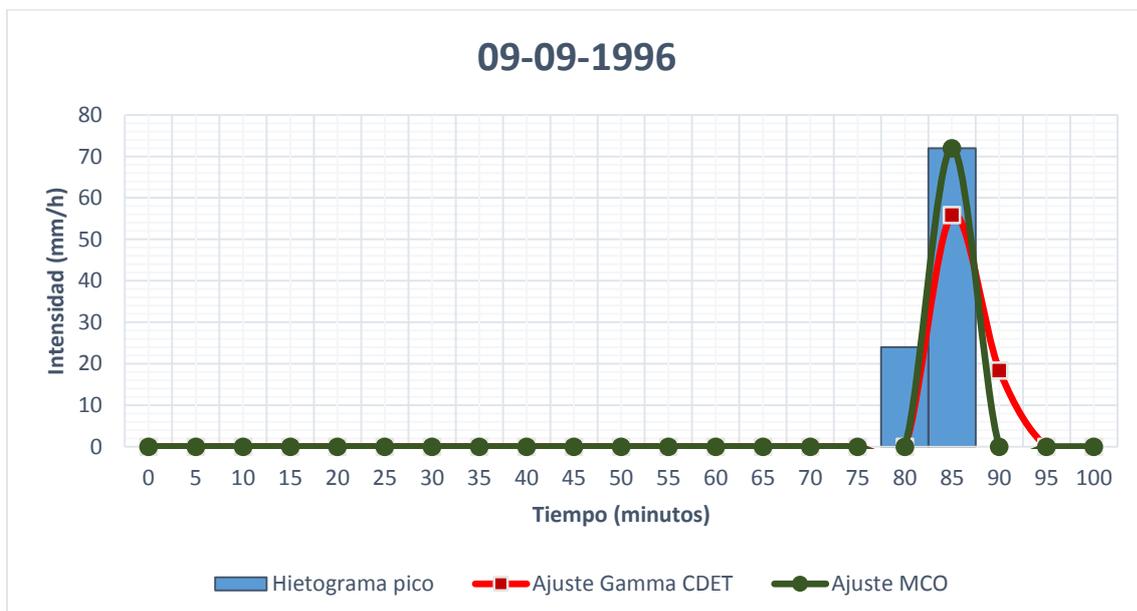


1996

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
29/08/1996	PSI	15	0.07839	51.56
29/08/1996	MCO	20	0.2722	260.61

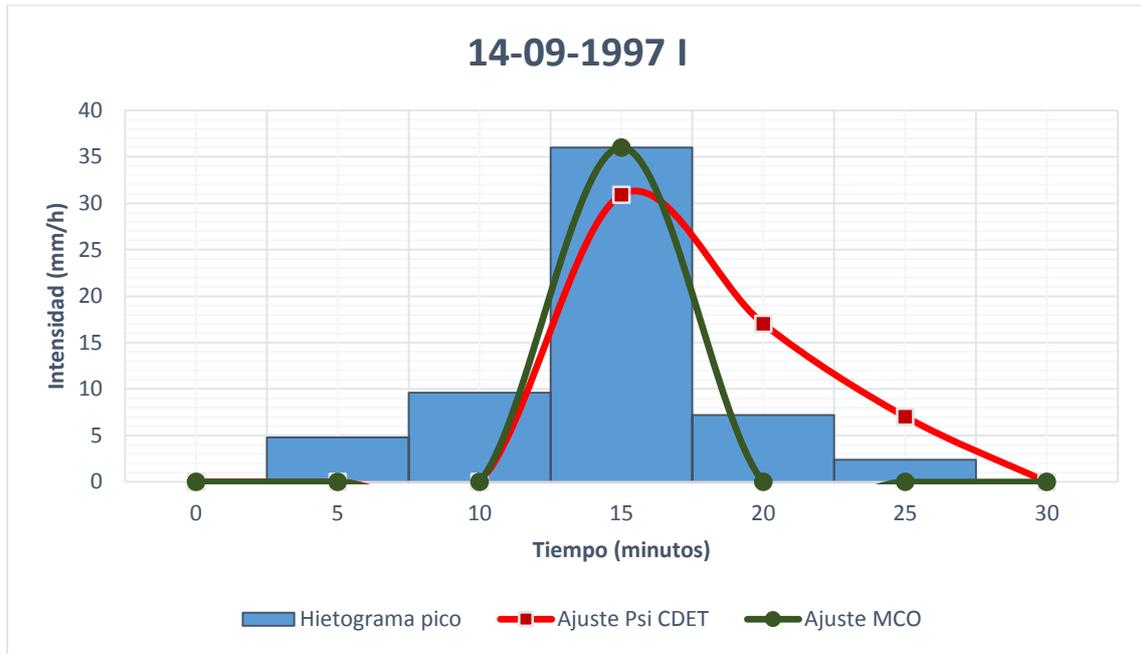


Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
09/09/1996	PSI	80	0.13275	69.20
09/09/1996	MCO	80	0.2686	279.41

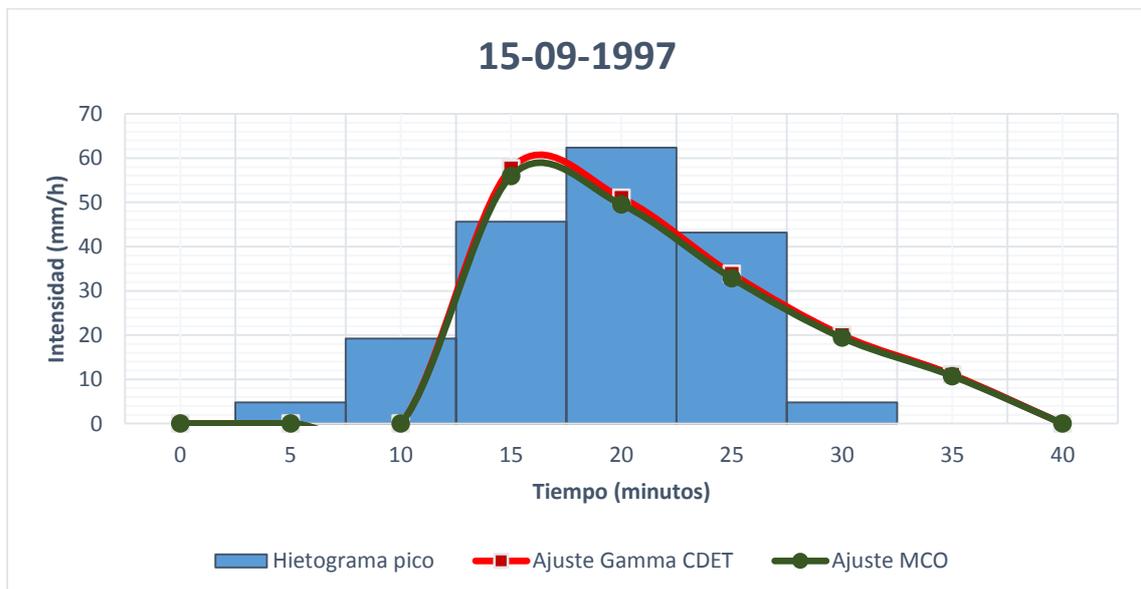


1997

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
14/09/1997	PSI	10	0.09484	32.03
14/09/1997	MCO	10	0.2901	173.20

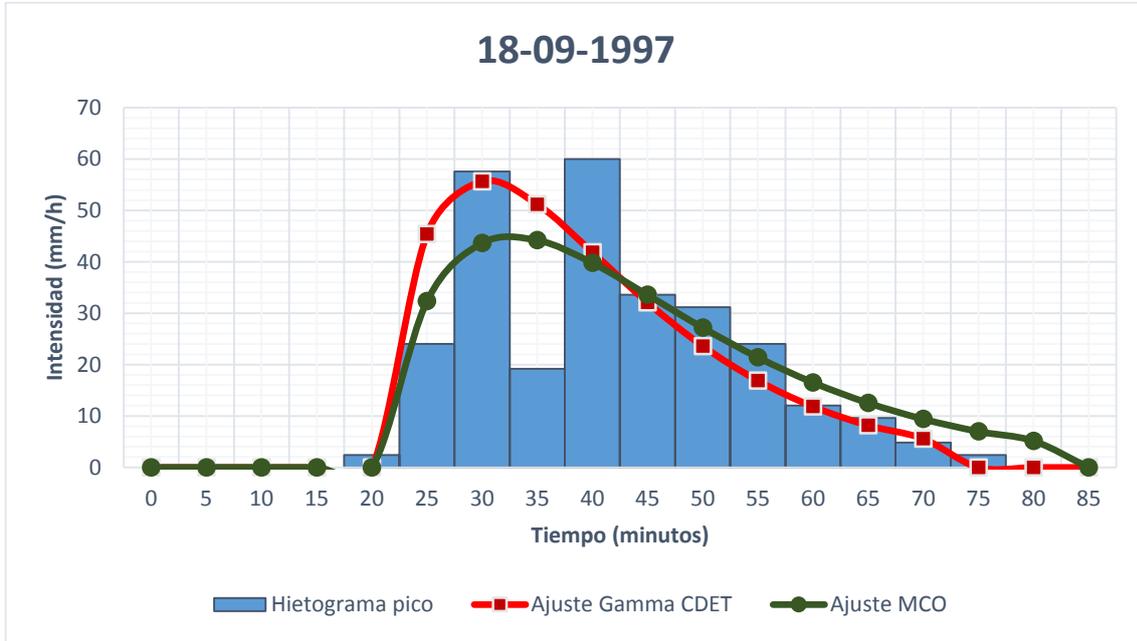


Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
15/09/1997	PSI	10	0.05996	58.79
15/09/1997	MCO	10	0.0600	57.04

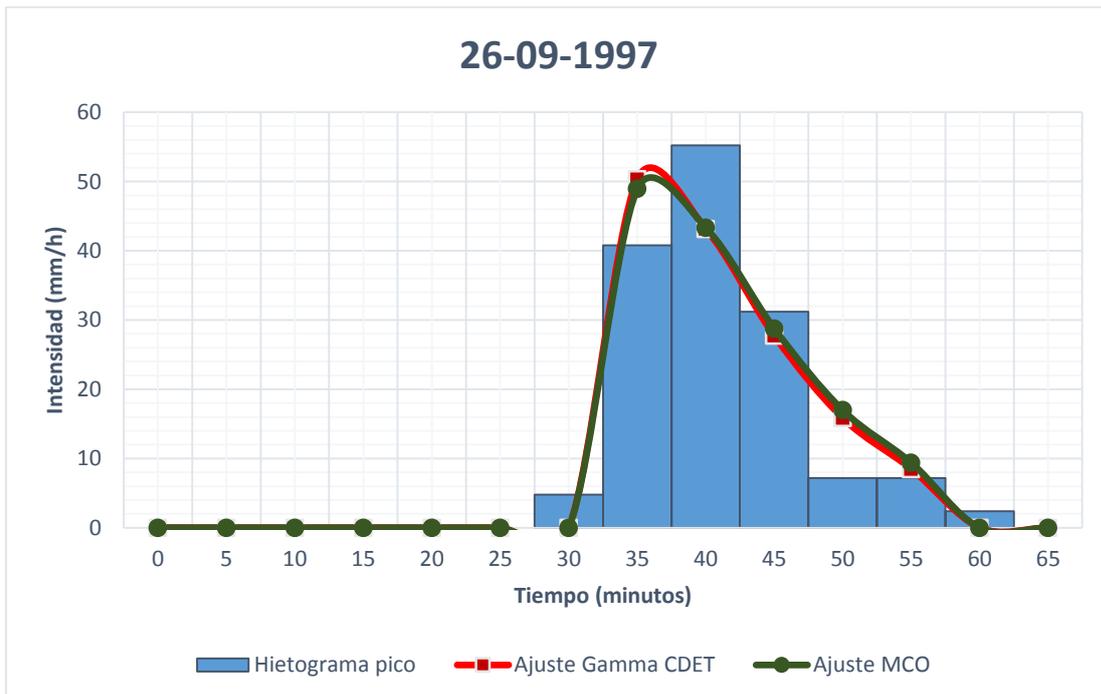


ANEJO – Ajuste de tormentas seleccionadas.
 Miguel Rico Cortés

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
18/09/1997	PSI	20	0.03598	55.67
18/09/1997	MCO	20	0.0289	44.85

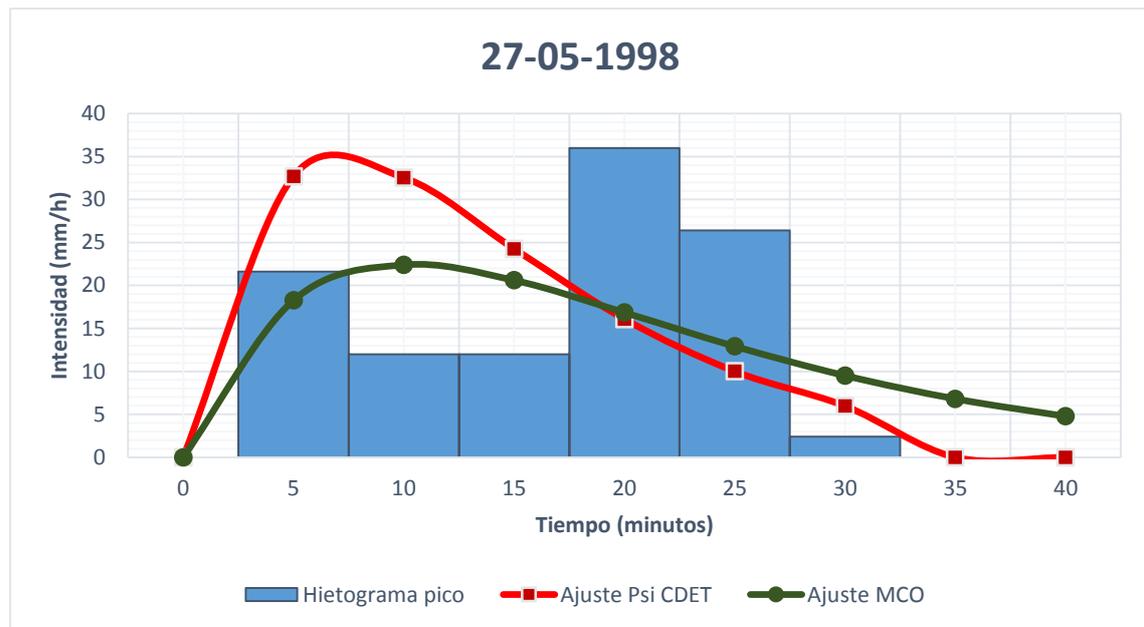


Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
26/09/1997	PSI	30	0.06236	51.00
26/09/1997	MCO	30	0.0600	49.90



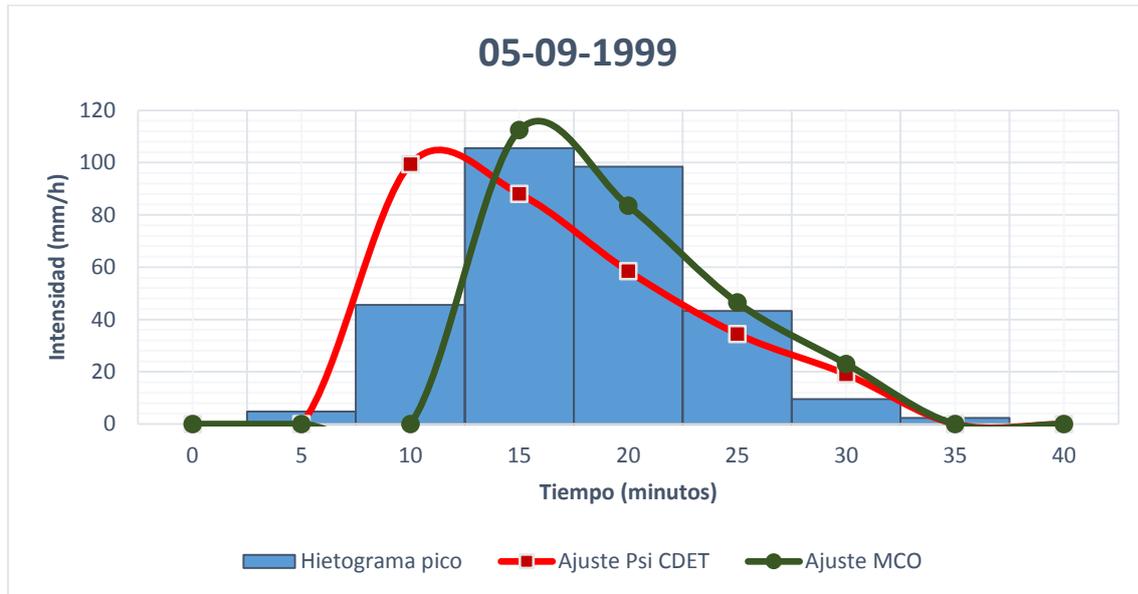
1998

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
27/05/1998	PSI	0	0.05140	34.64
27/05/1998	MCO	0	0.0360	22.41



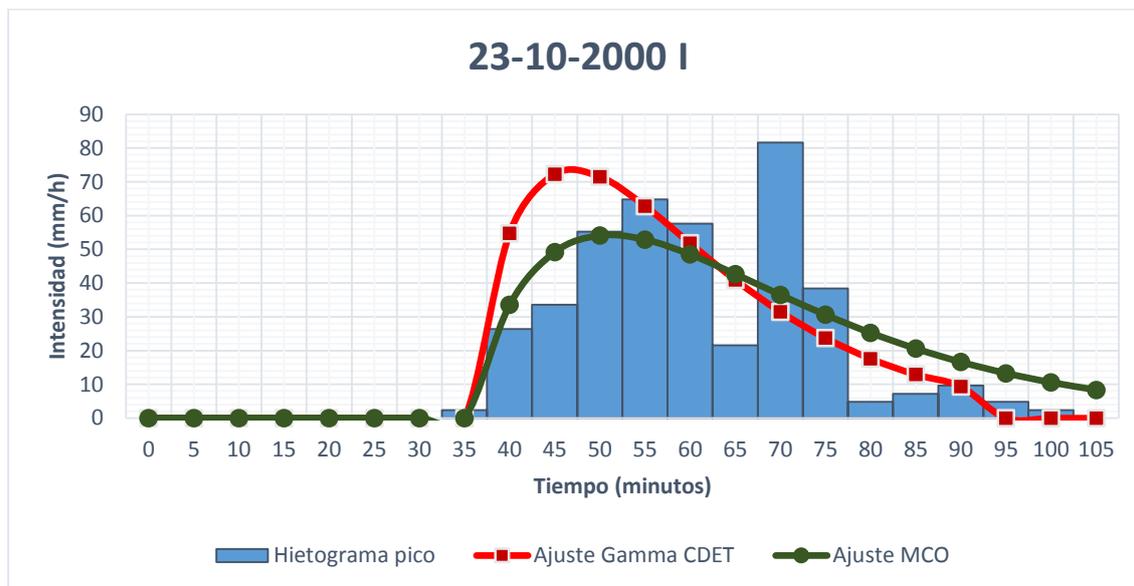
1999

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
05/09/1999	PSI	5	0.05996	101.45
05/09/1999	MCO	10	0.0729	112.50

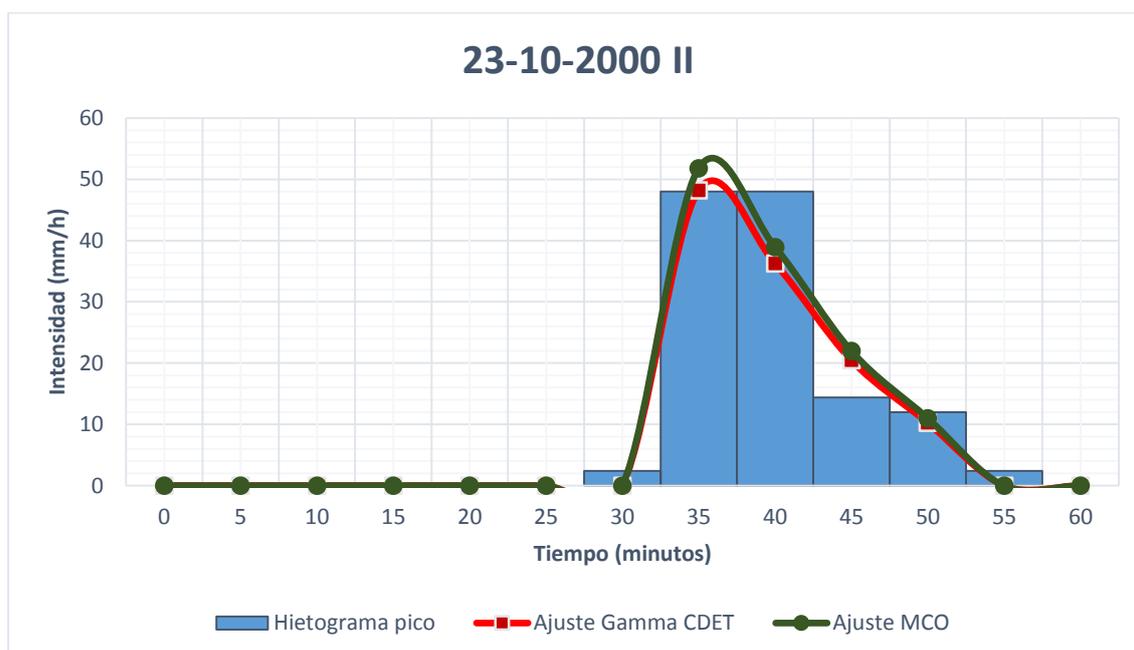


2000

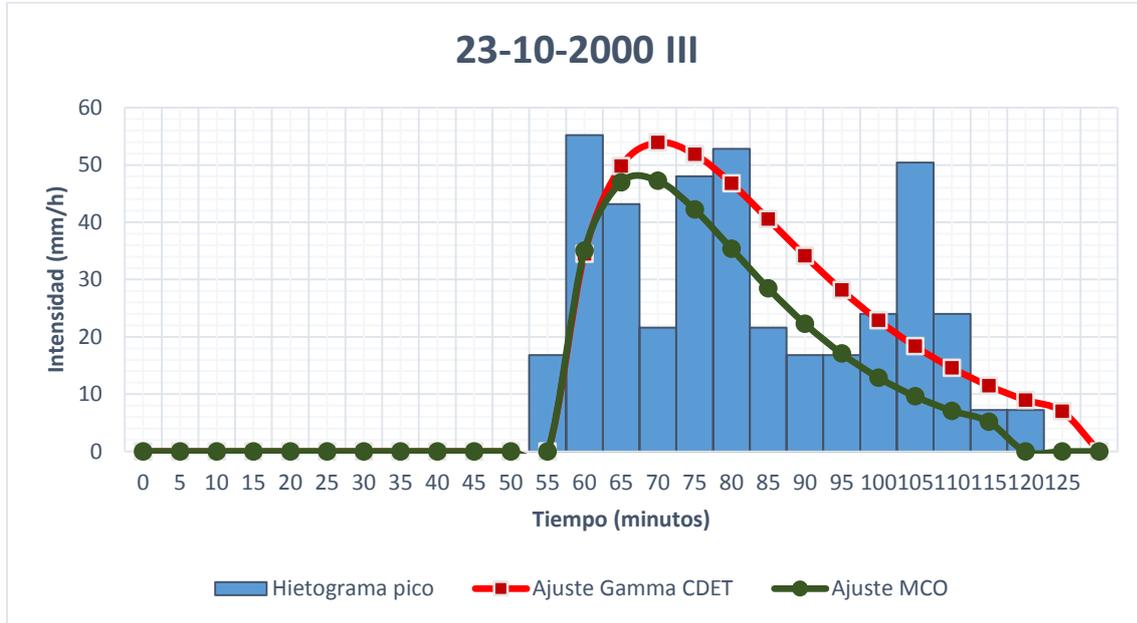
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
23/10/2000	PSI	35	0.03064	73.43
23/10/2000	MCO	35	0.0228	54.25



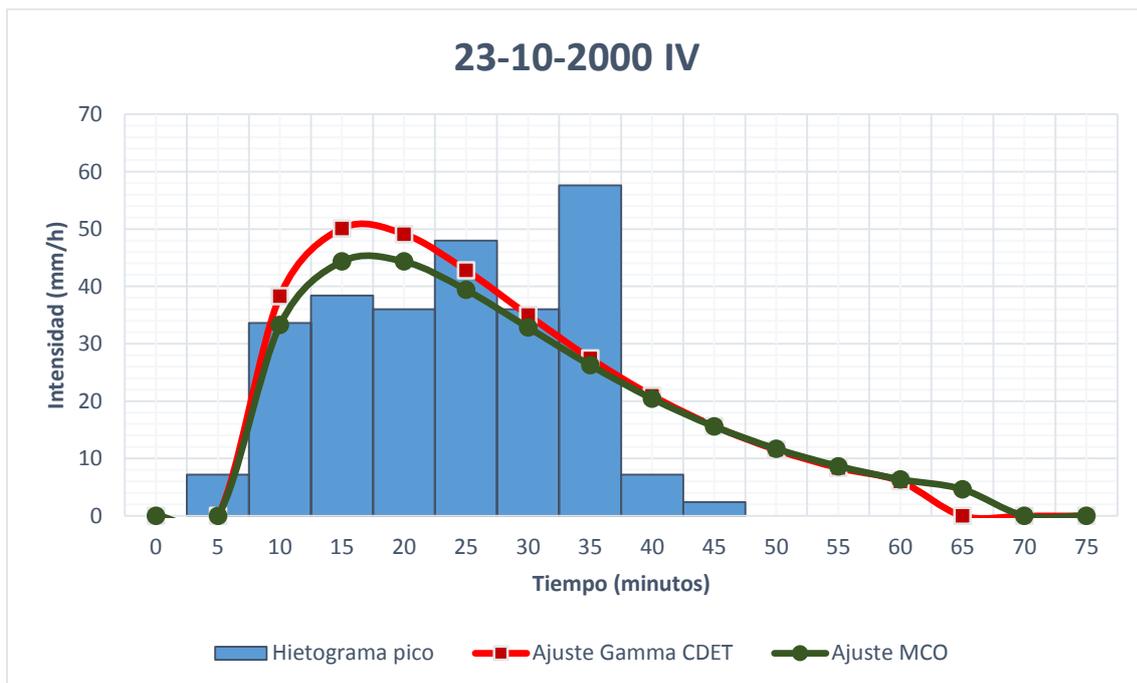
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
24/10/2000	PSI	30	0.07195	48.25
24/10/2000	MCO	30	0.0720	51.81



Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
24/10/2000	PSI	55	0.02398	53.92
24/10/2000	MCO	55	0.0294	48.07

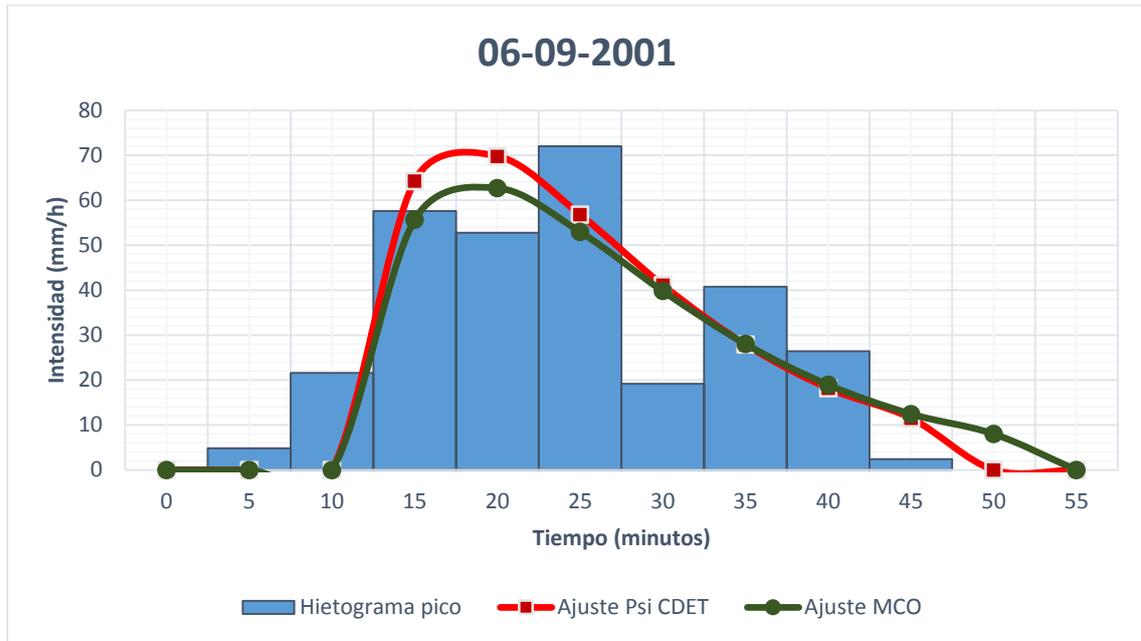


Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
24/10/2000	PSI	5	0.03126	50.70
24/10/2000	MCO	5	0.0298	45.25



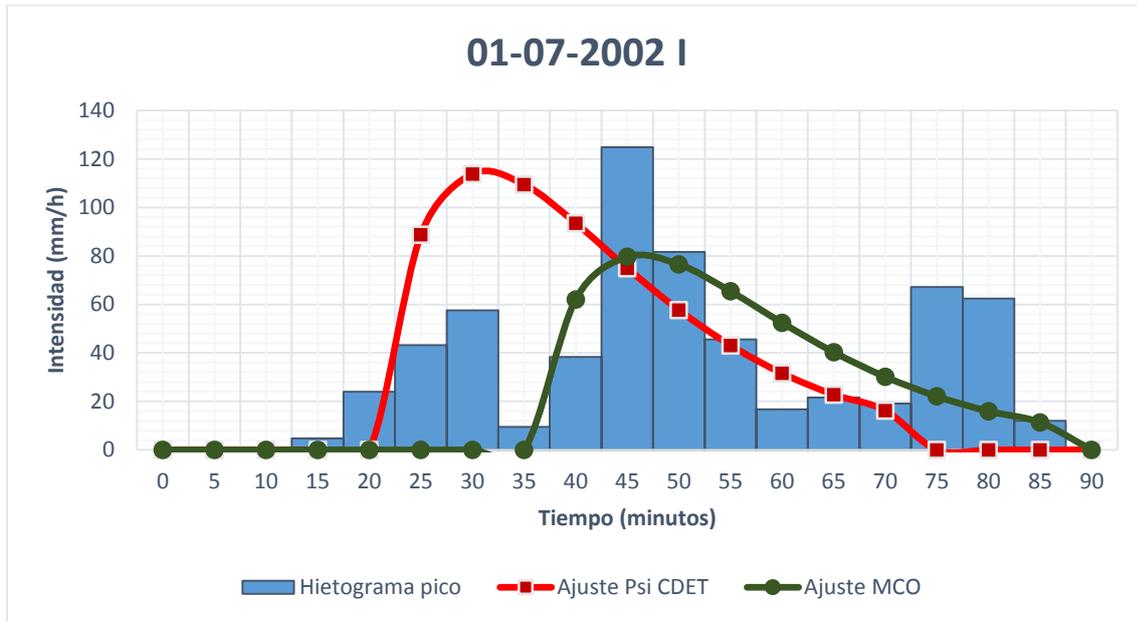
2001

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
06/09/2001	PSI	10	0.04497	71.29
06/09/2001	MCO	10	0.0422	63.35

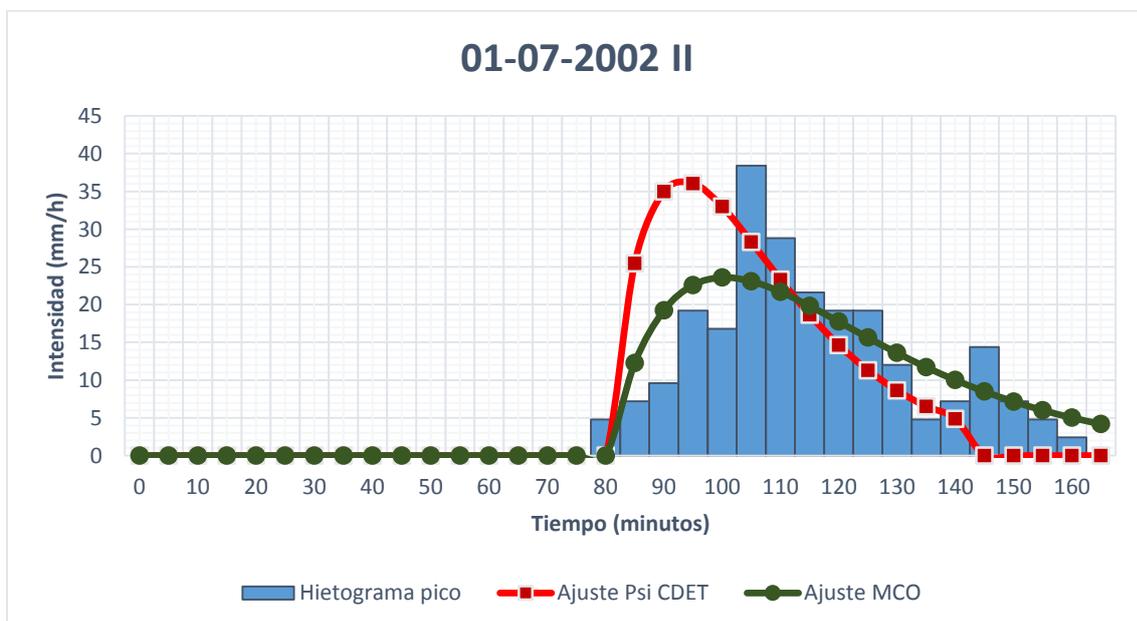


2002

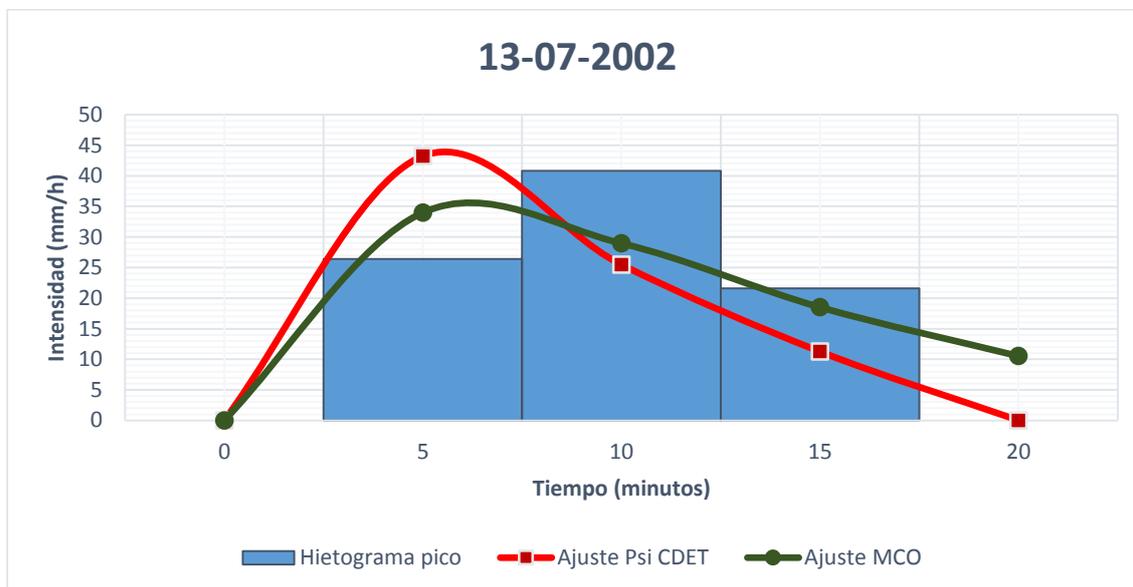
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
01/07/2002	PSI	20	0.03271	114.55
01/07/2002	MCO	35	0.0327	80.15



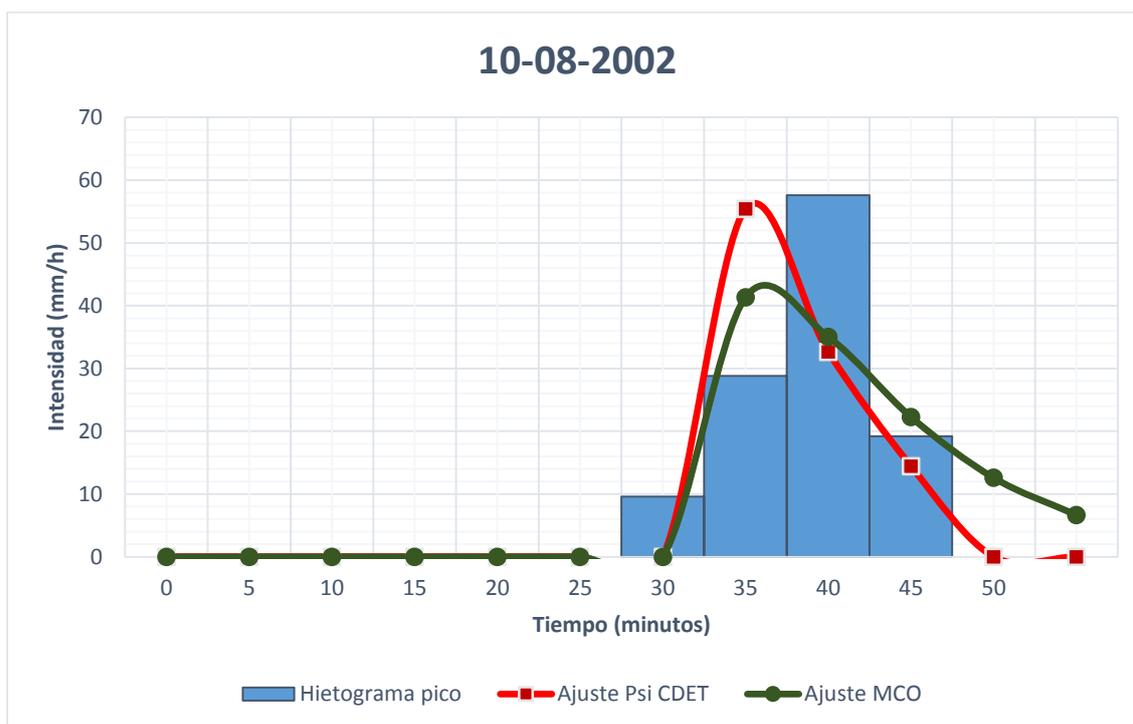
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
01/07/2002	PSI	80	0.02767	36.31
01/07/2002	MCO	80	0.0180	23.60



Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
13/07/2002	PSI	0	0.08994	44.16
13/07/2002	MCO	0	0.0628	34.40

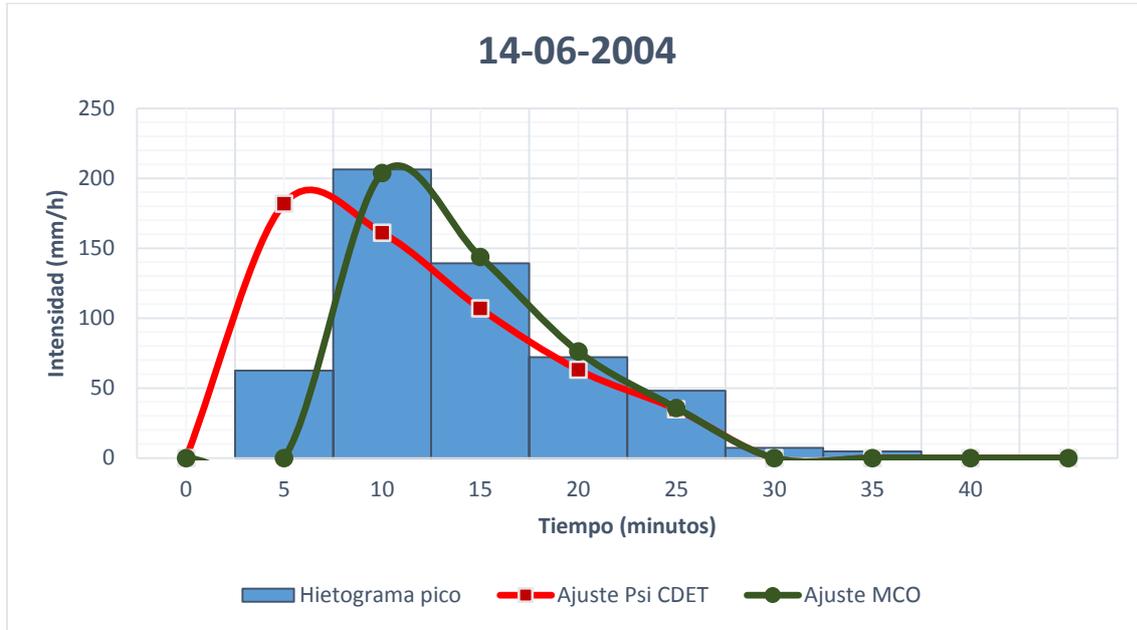


Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
10/08/2002	PSI	30	0.08994	56.63
10/08/2002	MCO	30	0.0632	41.81

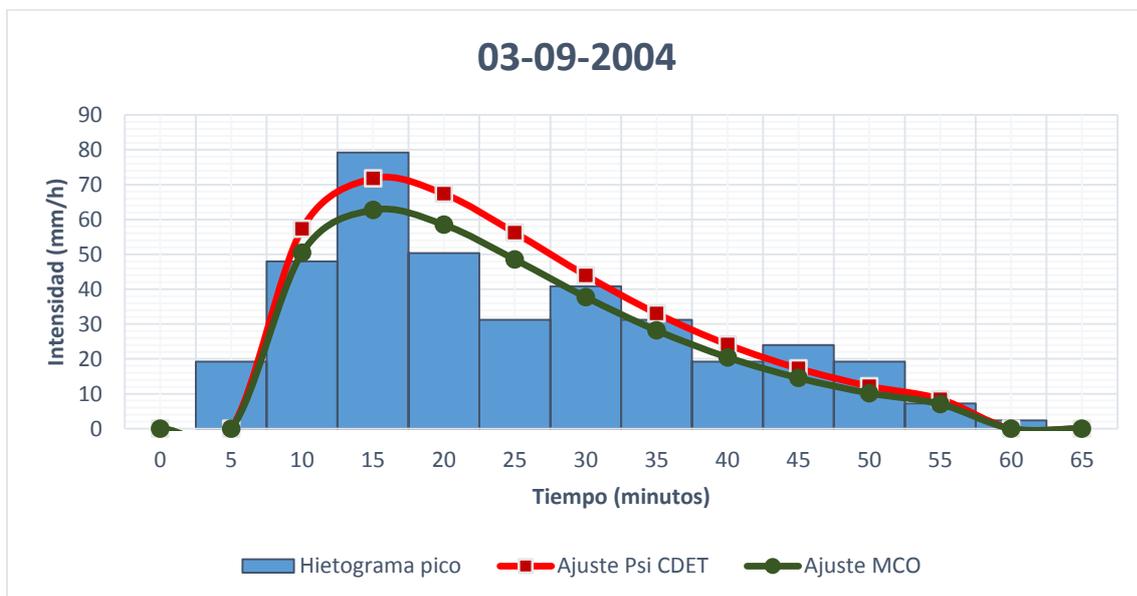


2004

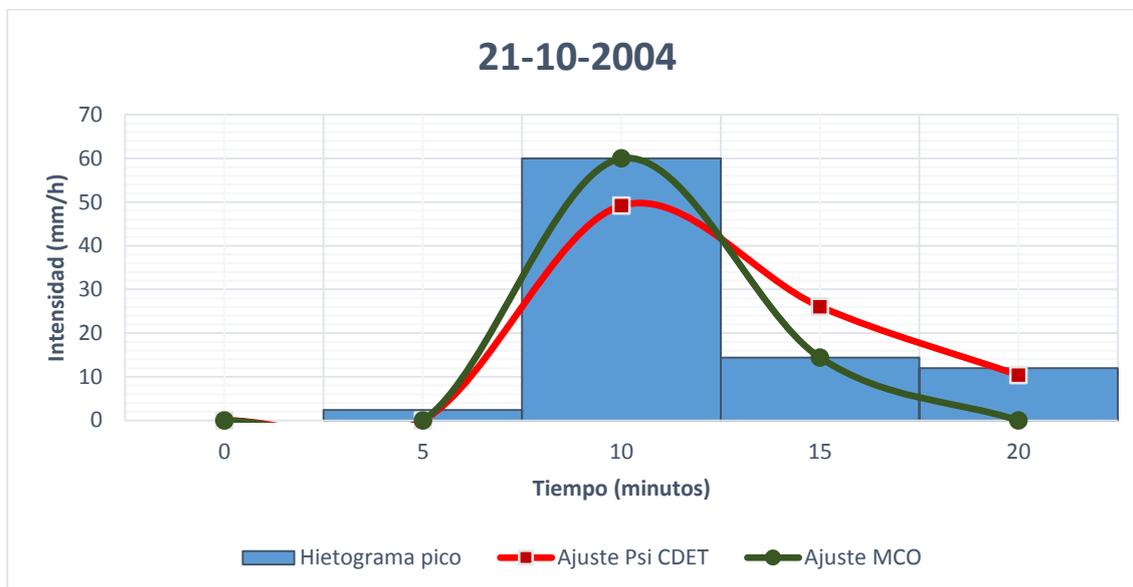
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
14/06/2004	PSI	0	0.05996	185.48
14/06/2004	MCO	5	0.0766	203.86



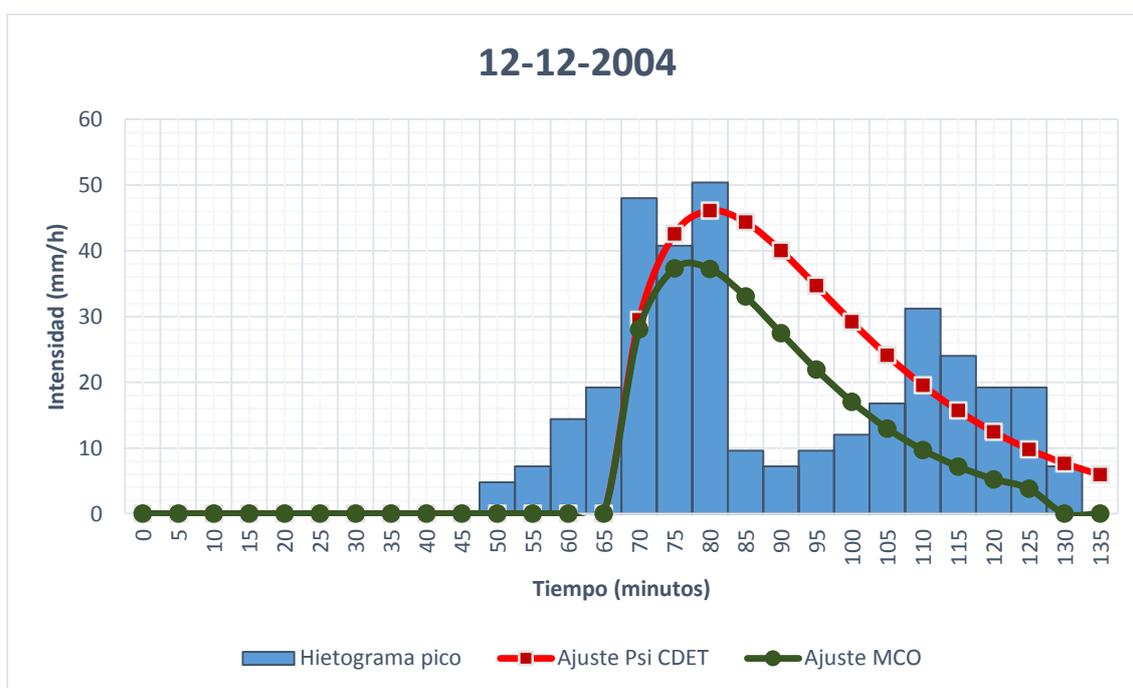
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
03/09/2004	PSI	5	0.03447	71.90
03/09/2004	MCO	5	0.0349	62.81



Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
21/10/2004	PSI	5	0.09775	51.40
21/10/2004	MCO	5	0.1560	86.75

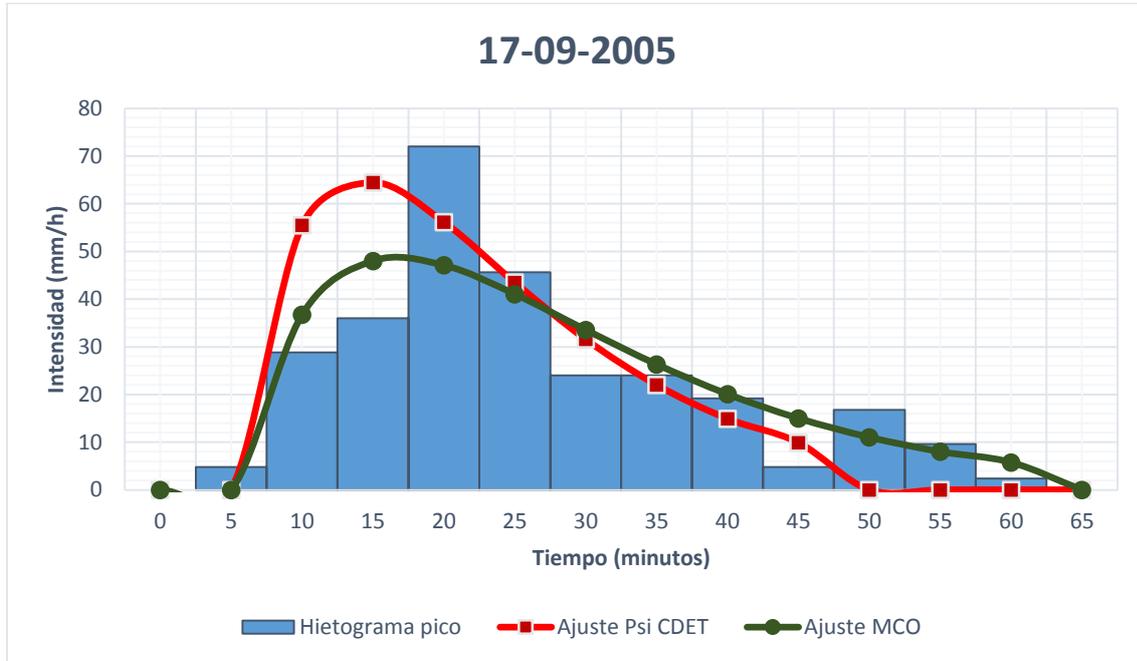


Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
12/12/2004	PSI	65	0.02399	46.13
12/12/2004	MCO	65	0.0300	38.07

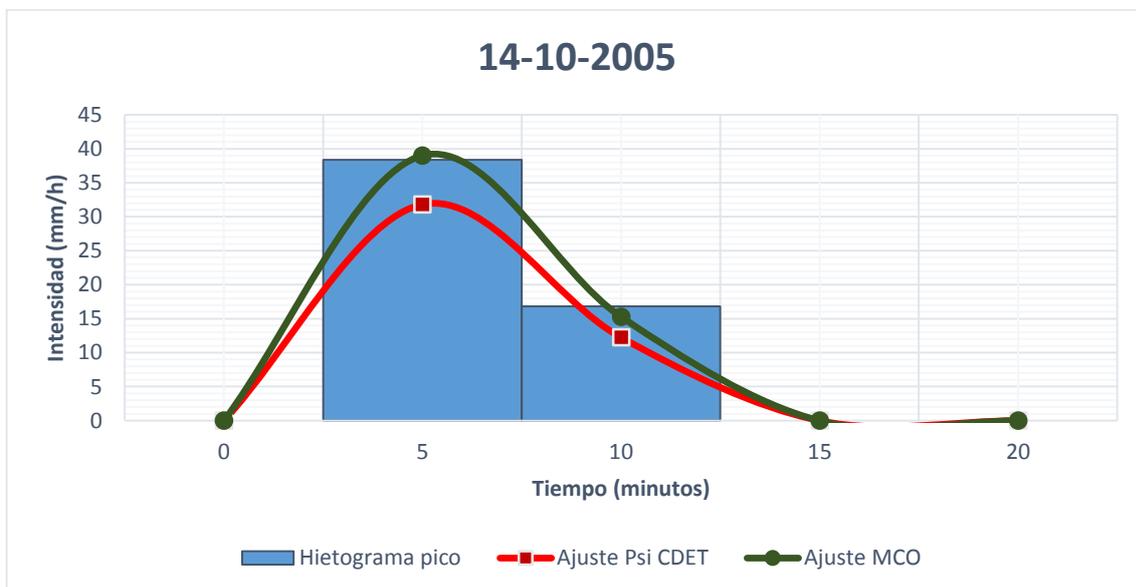


2005

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
17/09/2005	PSI	5	0.03997	64.68
17/09/2005	MCO	5	0.0313	48.60

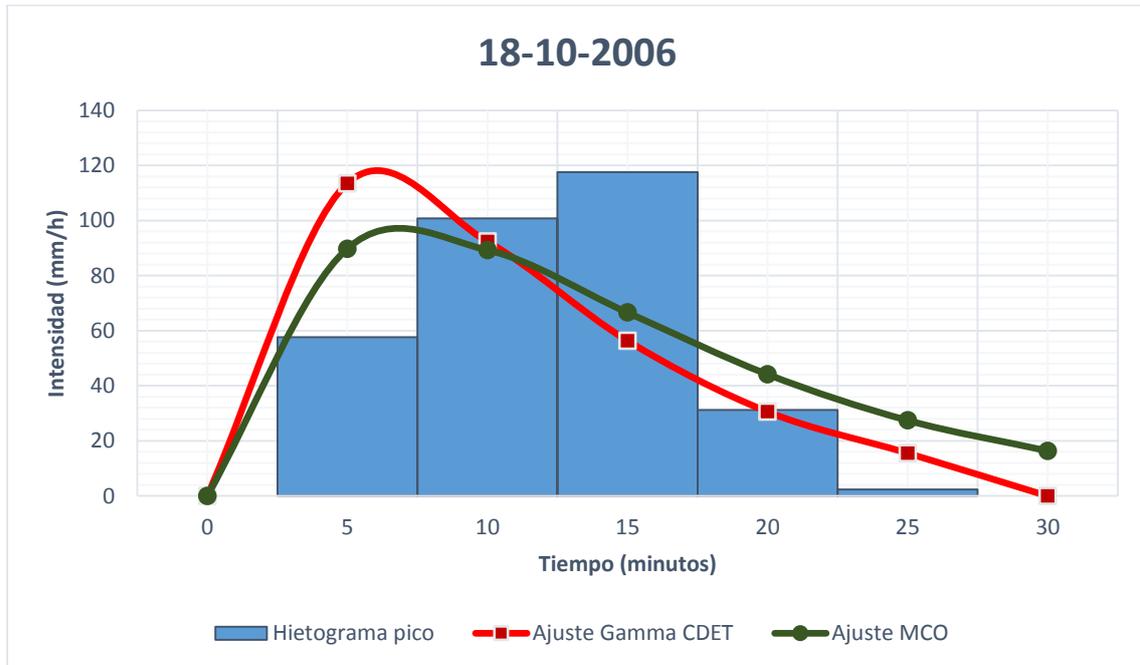


Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
14/10/2005	PSI	0	0.12126	36.89
14/10/2005	MCO	0	0.1199	44.92



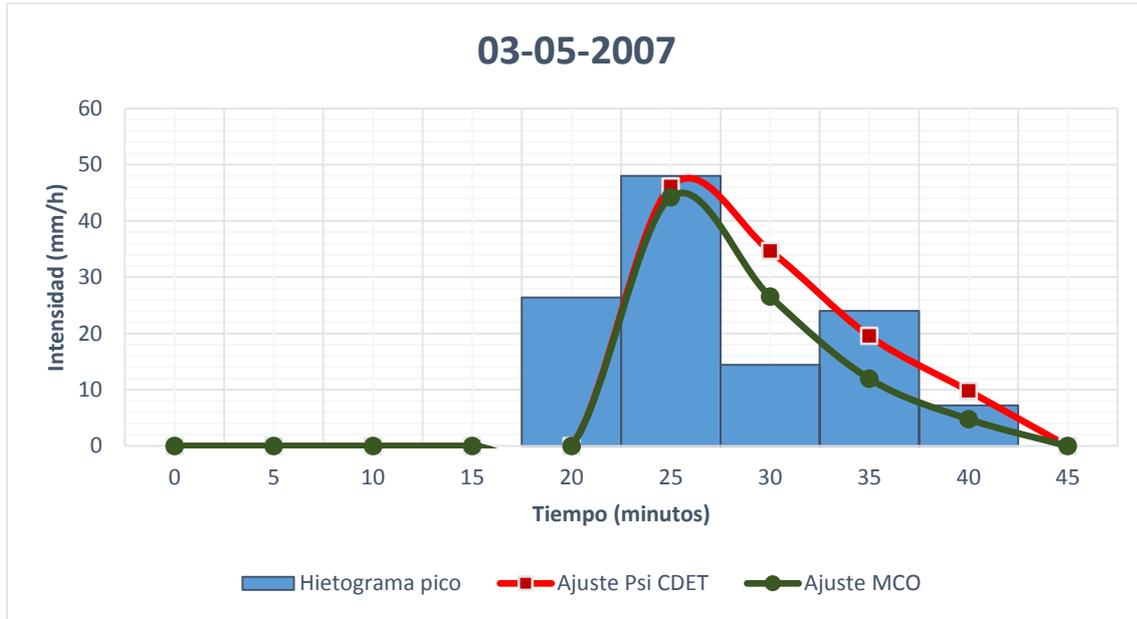
2006

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
18/10/2006	PSI	0	0.06614	114.10
18/10/2006	MCO	0	0.0514	95.10

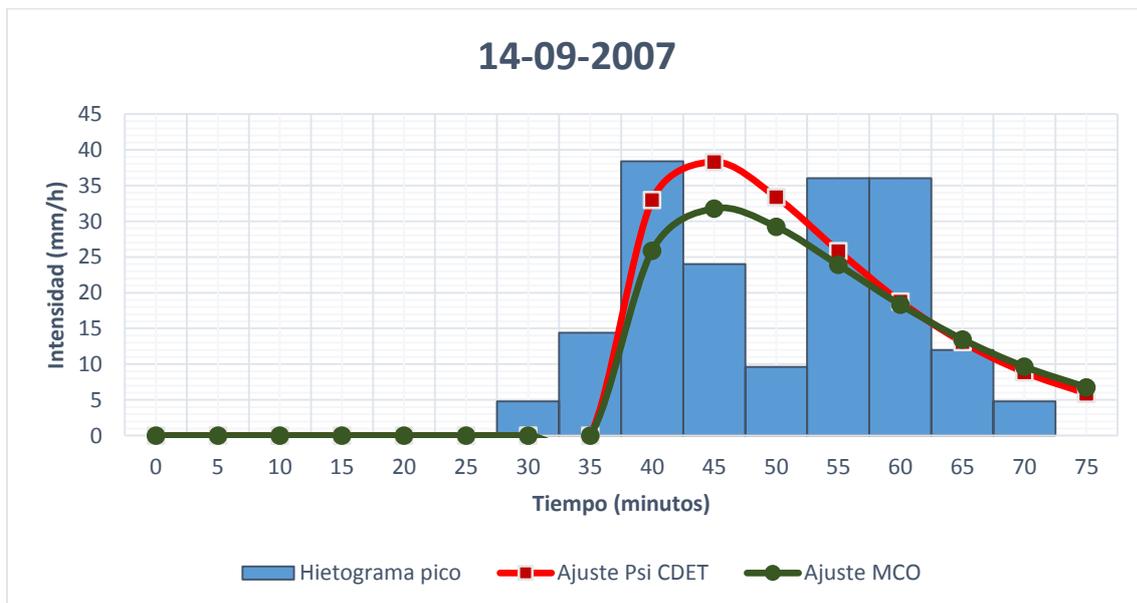


2007

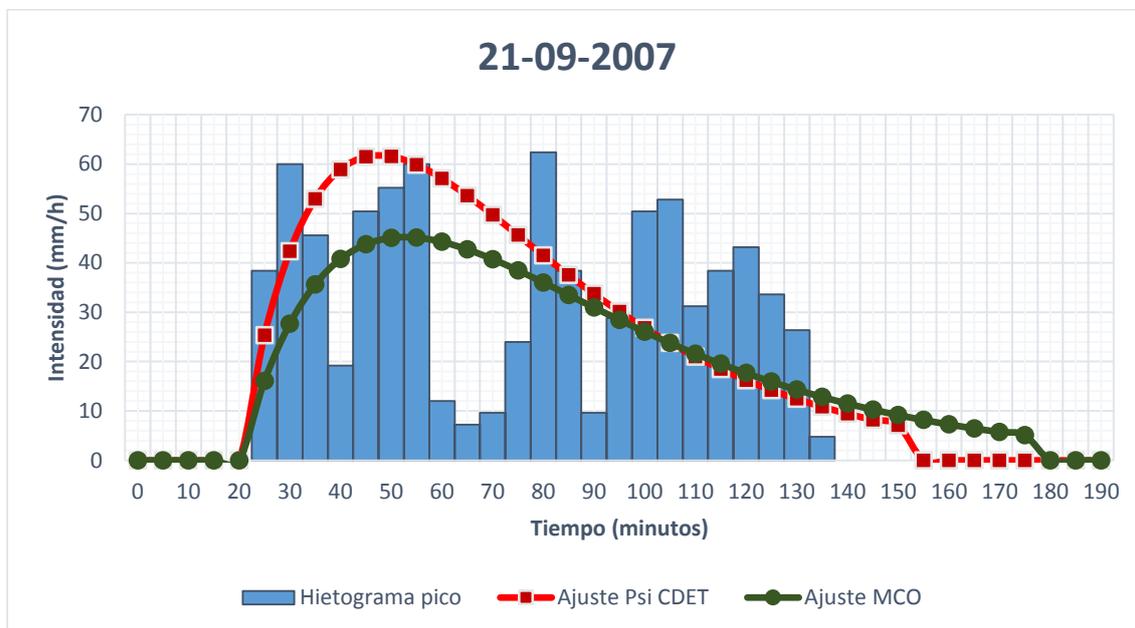
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
03/05/2007	PSI	20	0.07195	46.14
03/05/2007	MCO	20	0.0885	45.03



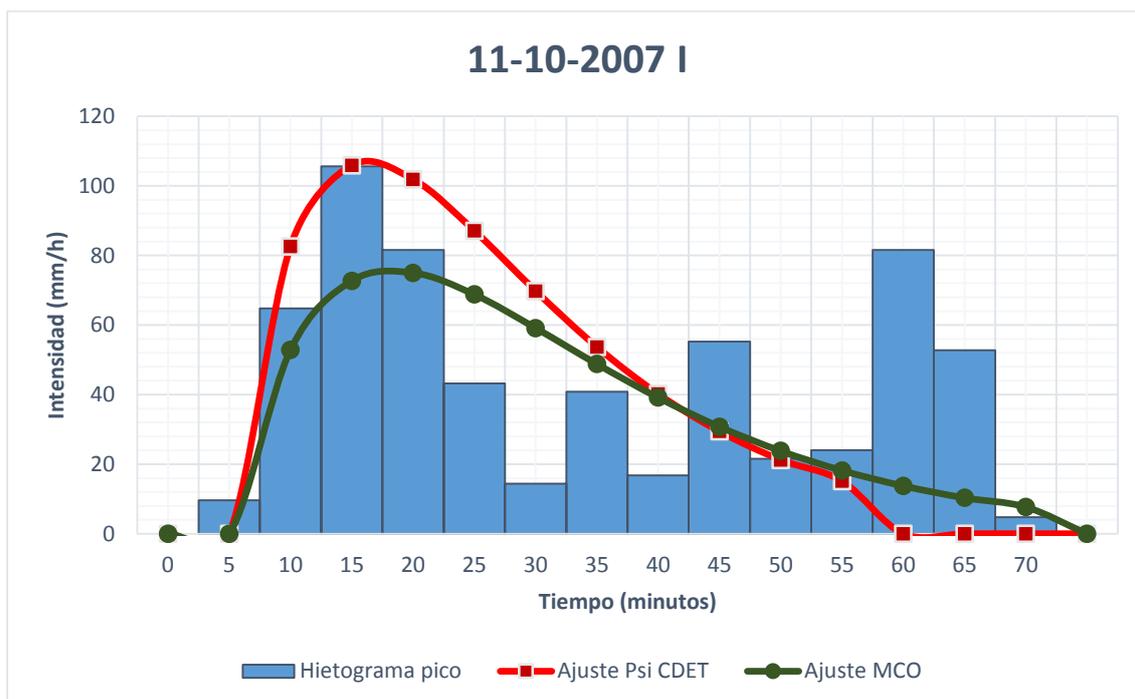
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
14/09/2007	PSI	35	0.03997	38.45
14/09/2007	MCO	35	0.0360	31.77



Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
21/09/2007	PSI	20	0.01332	61.75
21/09/2007	MCO	20	0.0112	45.21



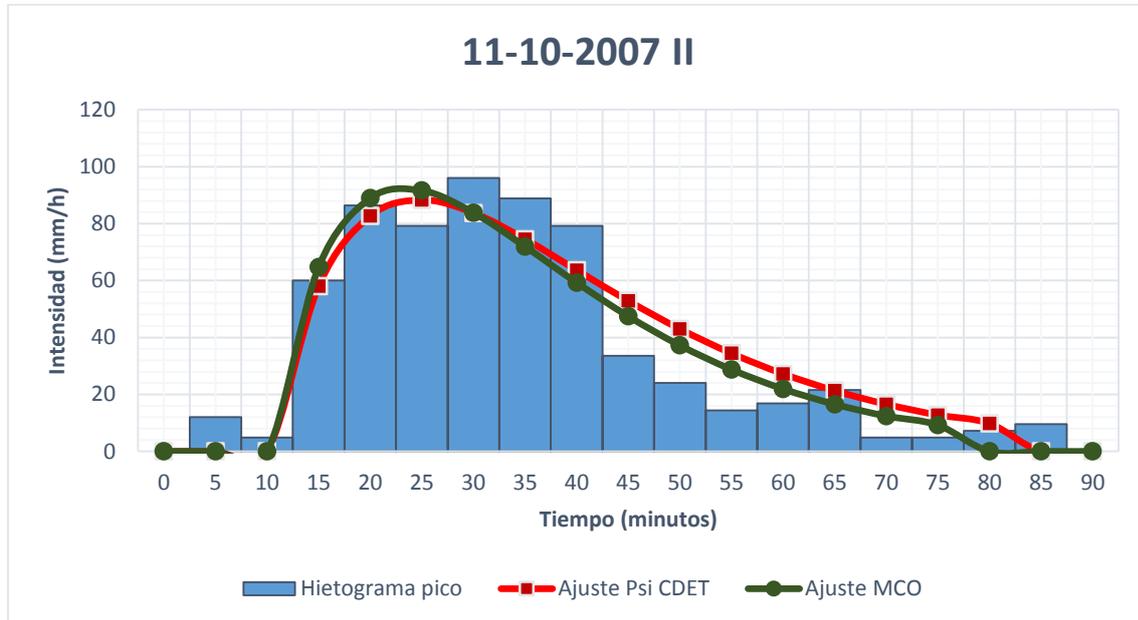
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
11/10/2007	PSI	5	0.03271	106.62
11/10/2007	MCO	5	0.0275	75.54



ANEJO – Ajuste de tormentas seleccionadas.

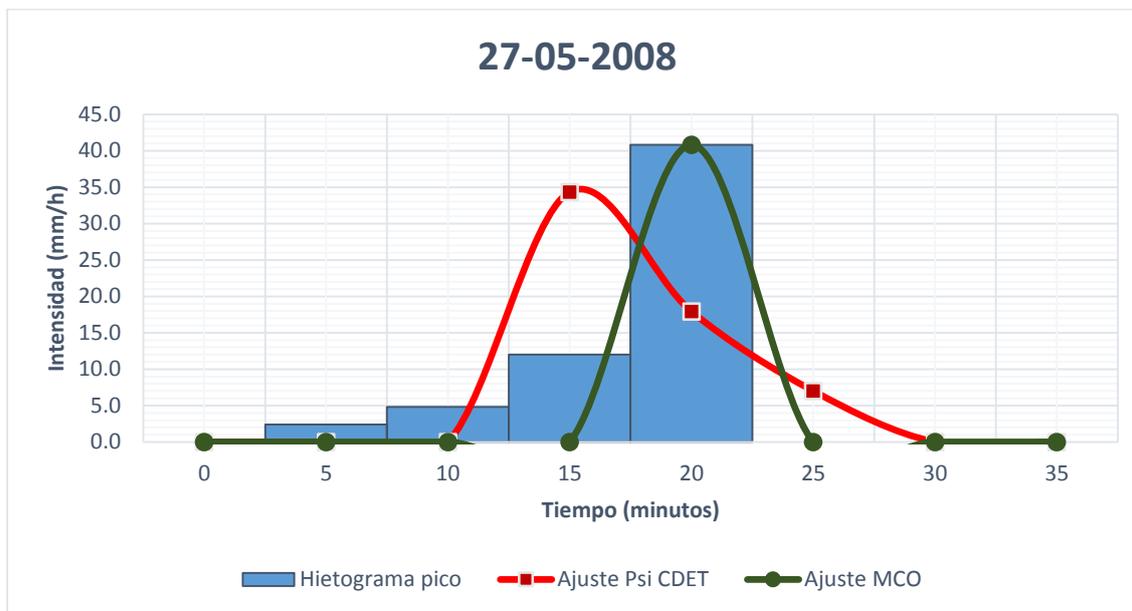
Miguel Rico Cortés

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
11/10/2007	PSI	10	0.02502	88.26
11/10/2007	MCO	10	0.0277	92.31

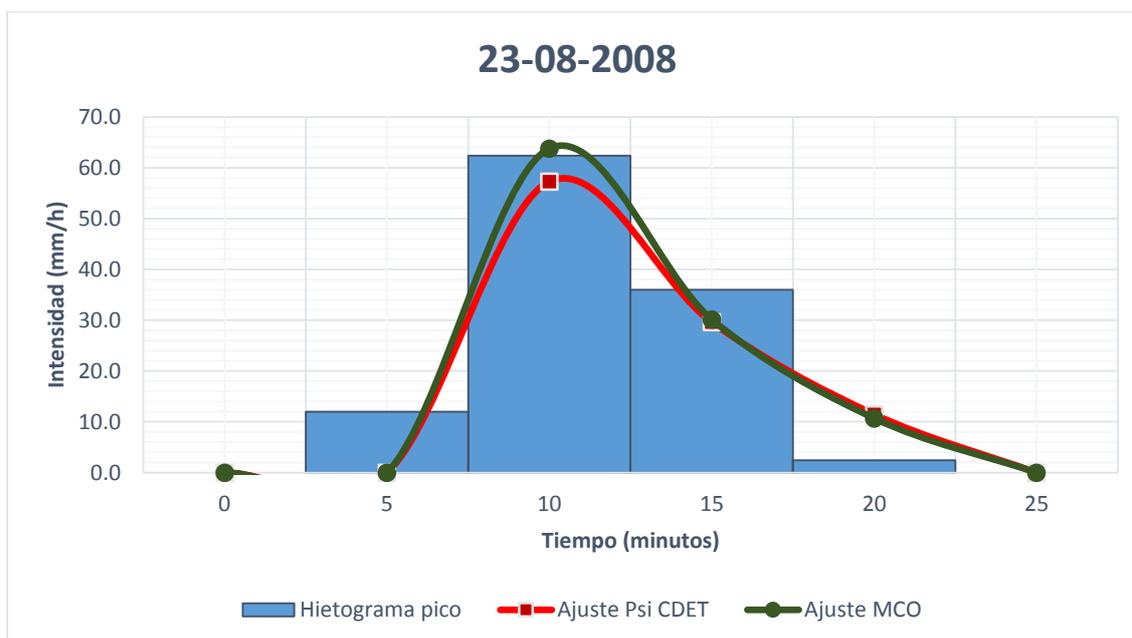


2008

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
27/05/2008	PSI	10	0.09883	36.02
27/05/2008	MCO	15	0.2357	115.36

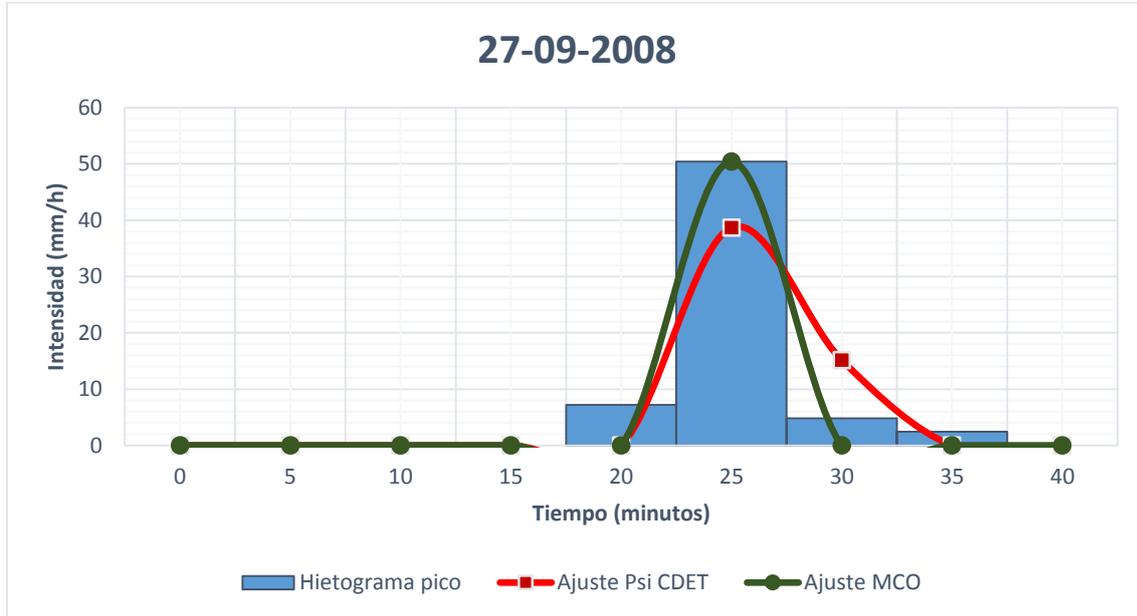


Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
23/08/2008	PSI	5	0.09958	60.29
23/08/2008	MCO	5	0.1062	68.84

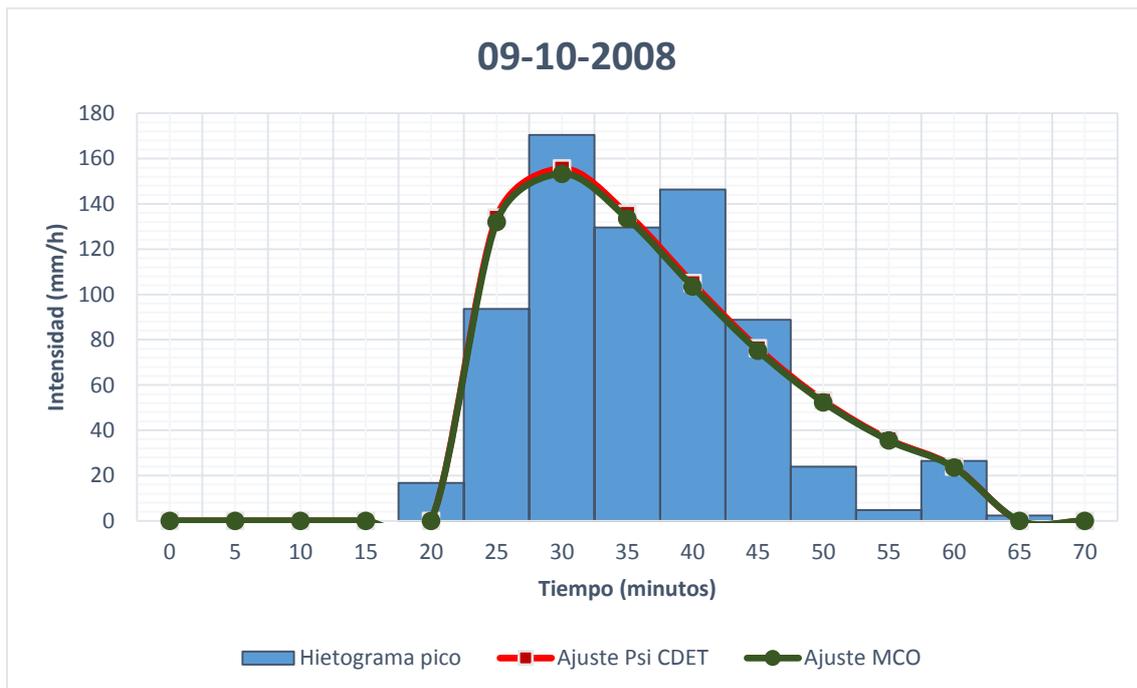


ANEJO – Ajuste de tormentas seleccionadas.
 Miguel Rico Cortés

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
27/09/2008	PSI	20	0.11992	44.56
27/09/2008	MCO	20	0.2963	258.22

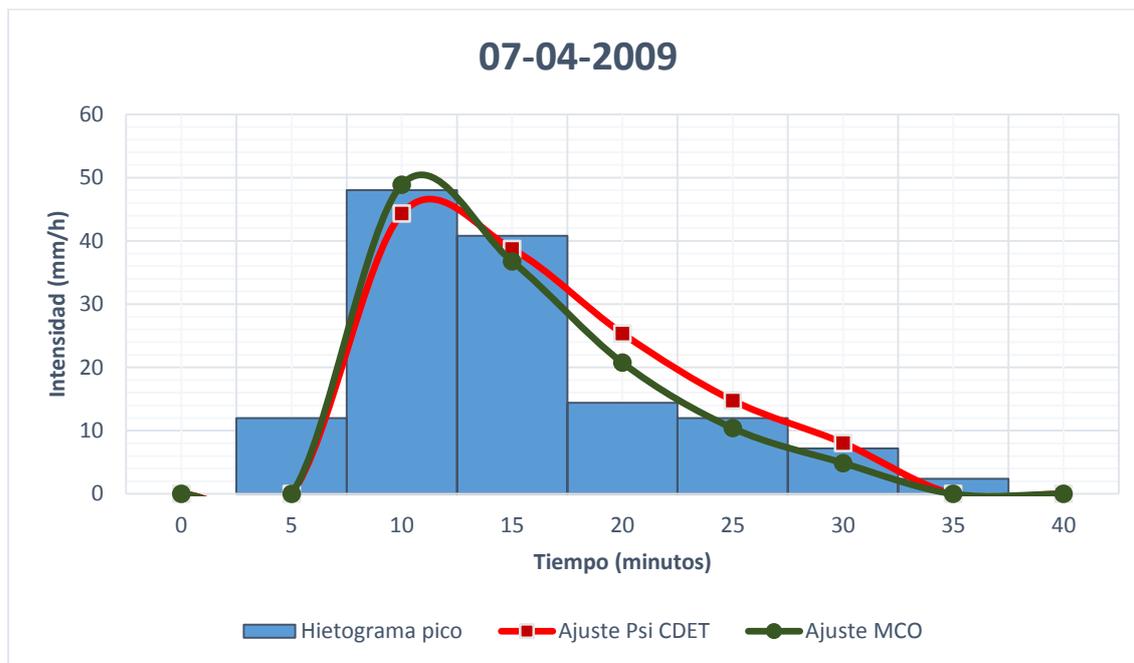


Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
09/10/2008	PSI	20	0.03997	156.14
09/10/2008	MCO	20	0.0400	153.85

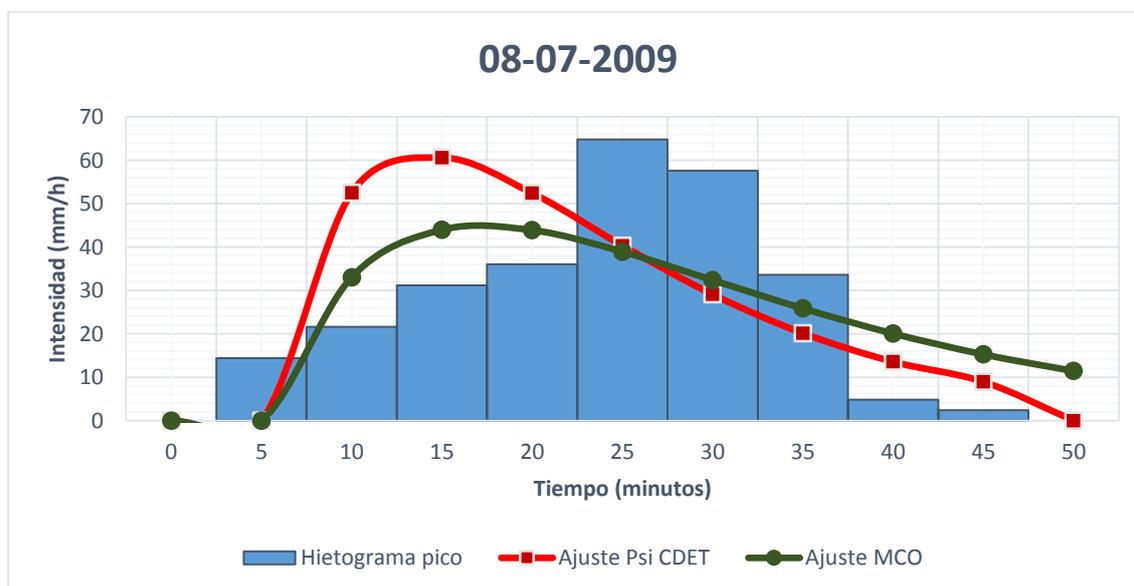


2009

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
07/04/2009	PSI	5	0.06094	45.07
07/04/2009	MCO	5	0.0720	48.91

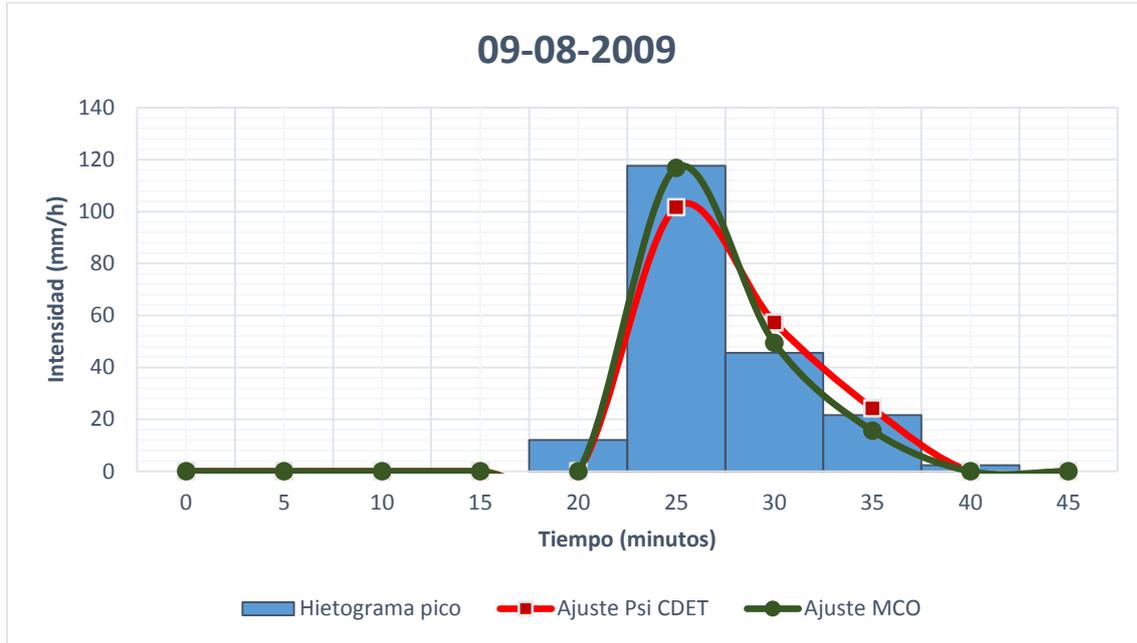


Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
08/07/2009	PSI	5	0.04048	60.88
08/07/2009	MCO	5	0.0300	44.82

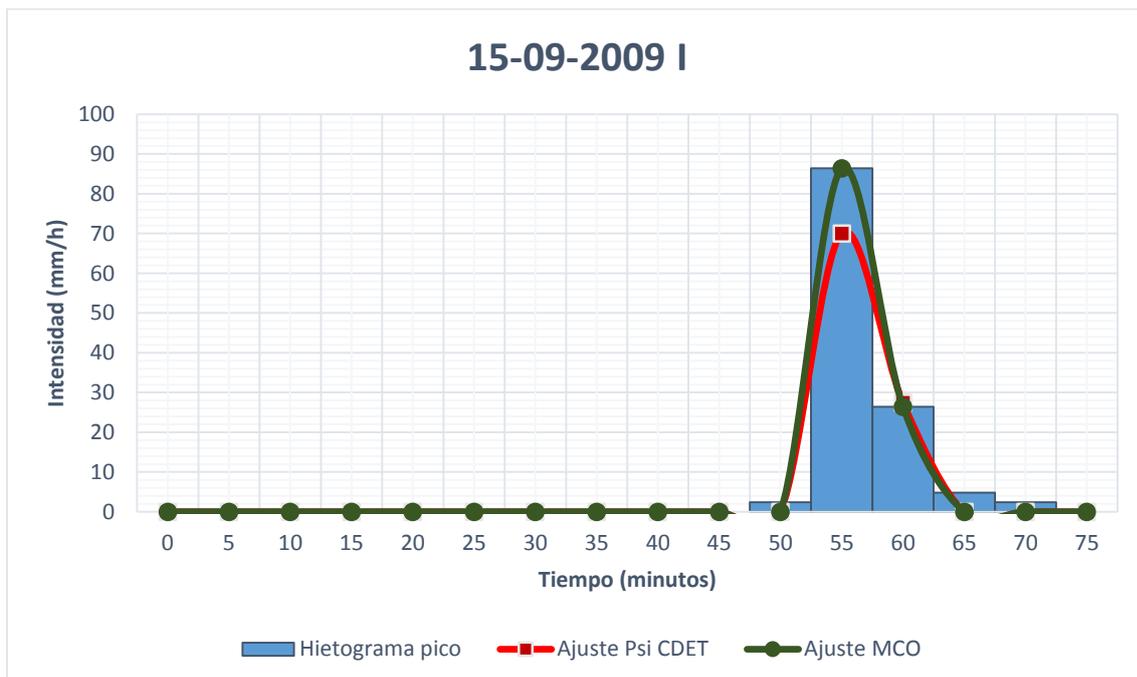


ANEJO – Ajuste de tormentas seleccionadas.
 Miguel Rico Cortés

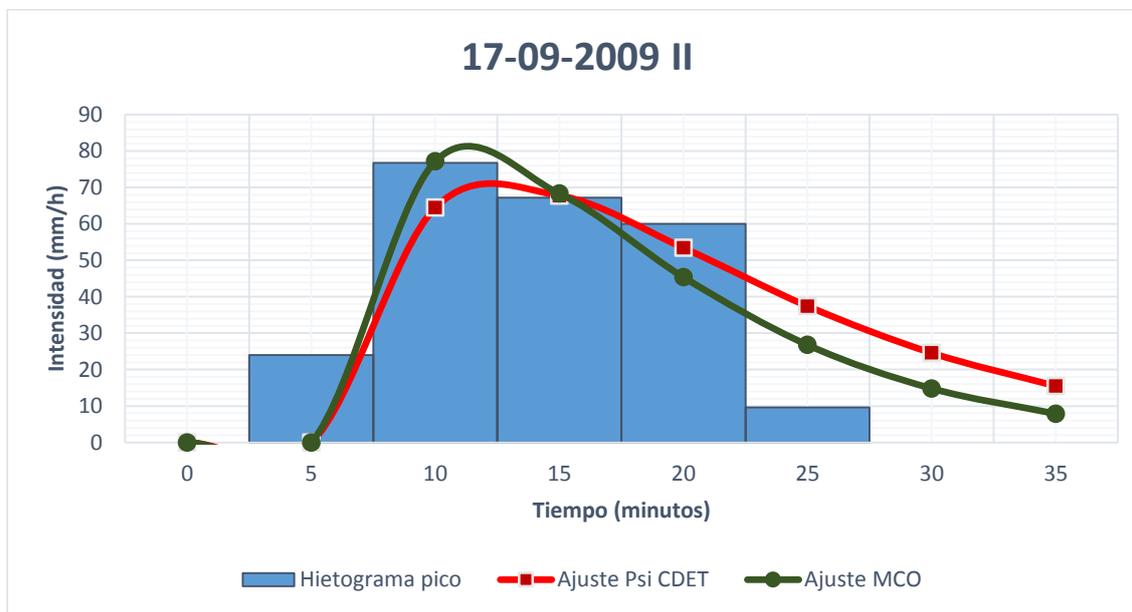
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
09/08/2009	PSI	20	0.09319	104.83
09/08/2009	MCO	20	0.1144	130.81



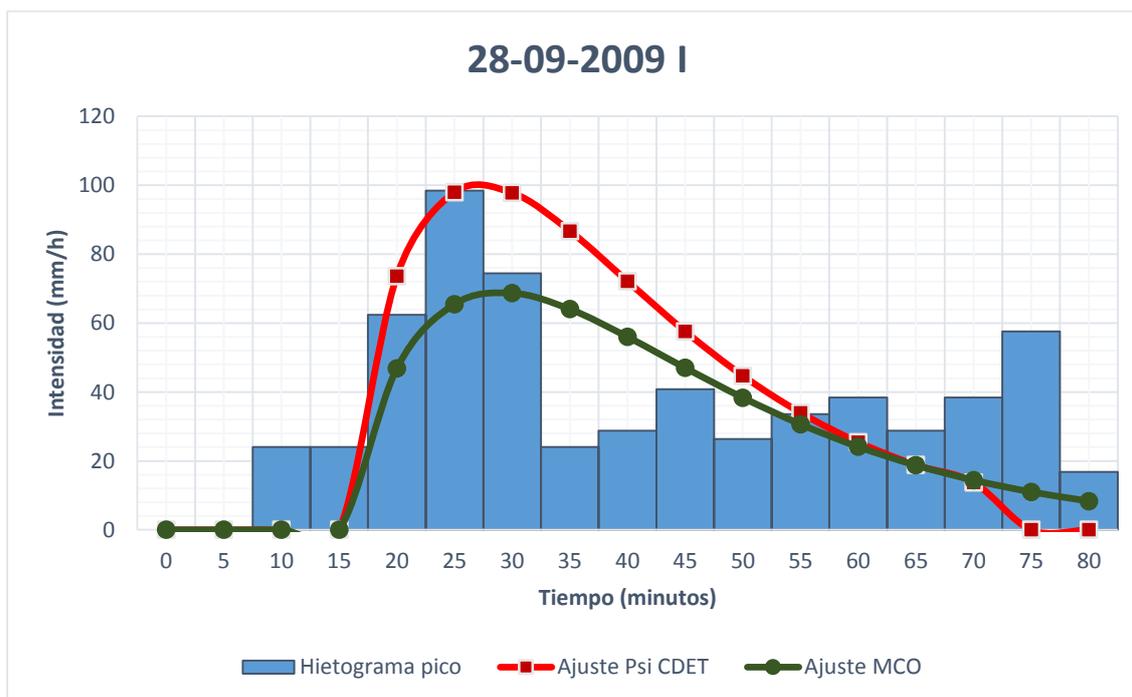
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
15/09/2009	PSI	50	0.11992	80.68
15/09/2009	MCO	50	0.1382	110.74



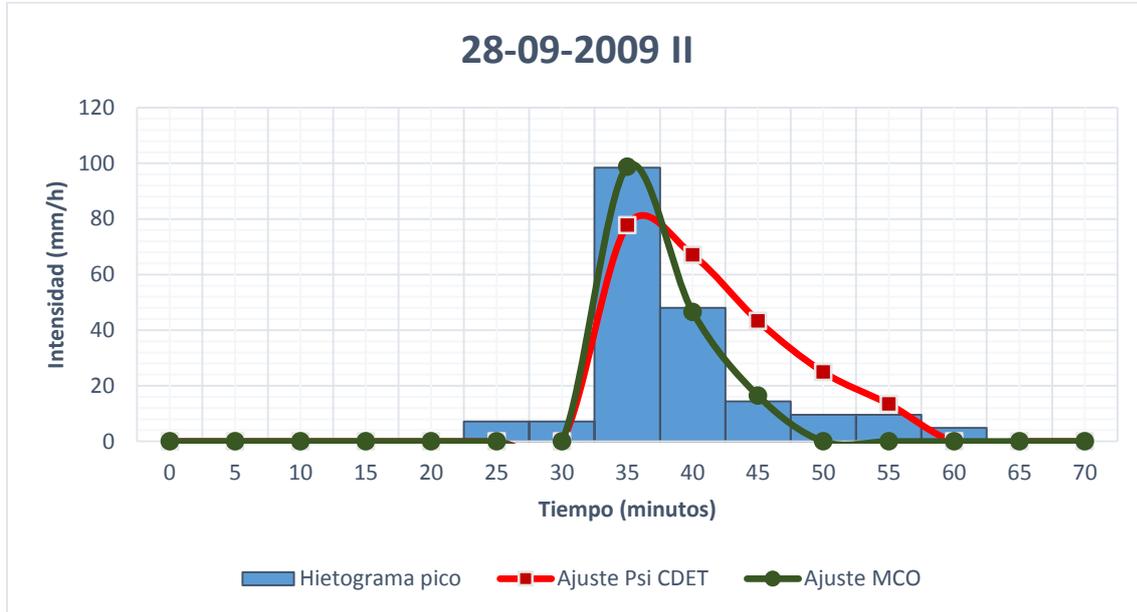
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
17/09/2009	PSI	5	0.04733	70.16
17/09/2009	MCO	5	0.0600	78.73



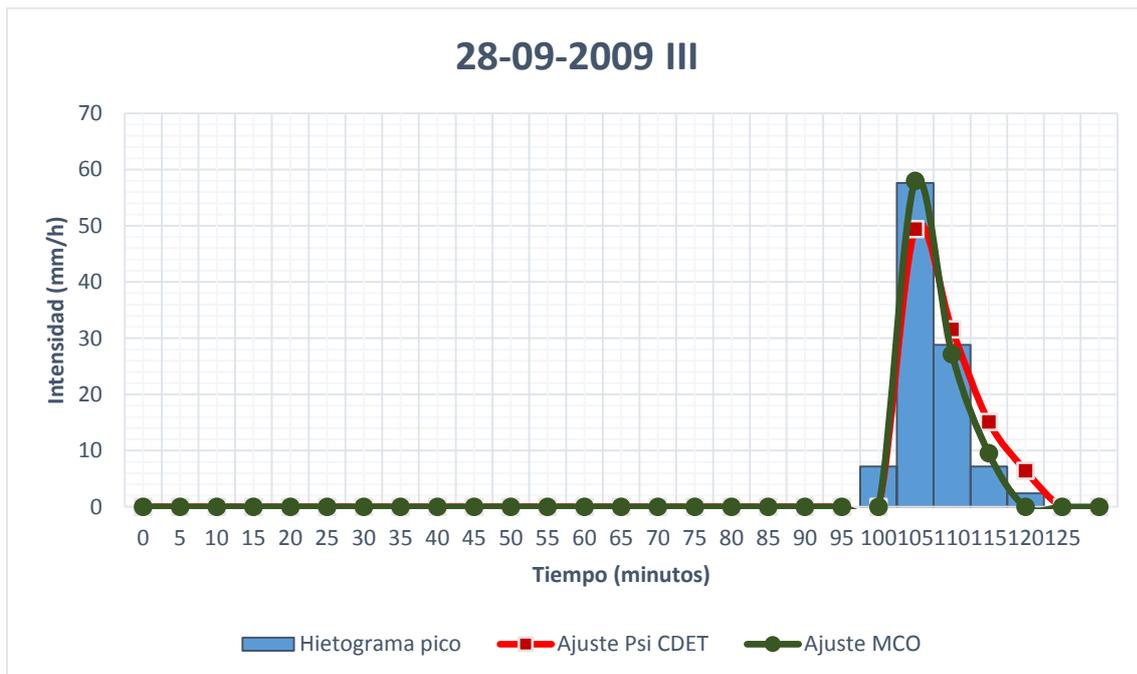
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
28/09/2009	PSI	15	99.89	
28/09/2009	MCO	15	0.0263	68.84



Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
28/09/2009	PSI	30	0.06192	78.87
28/09/2009	MCO	30	0.1063	106.64

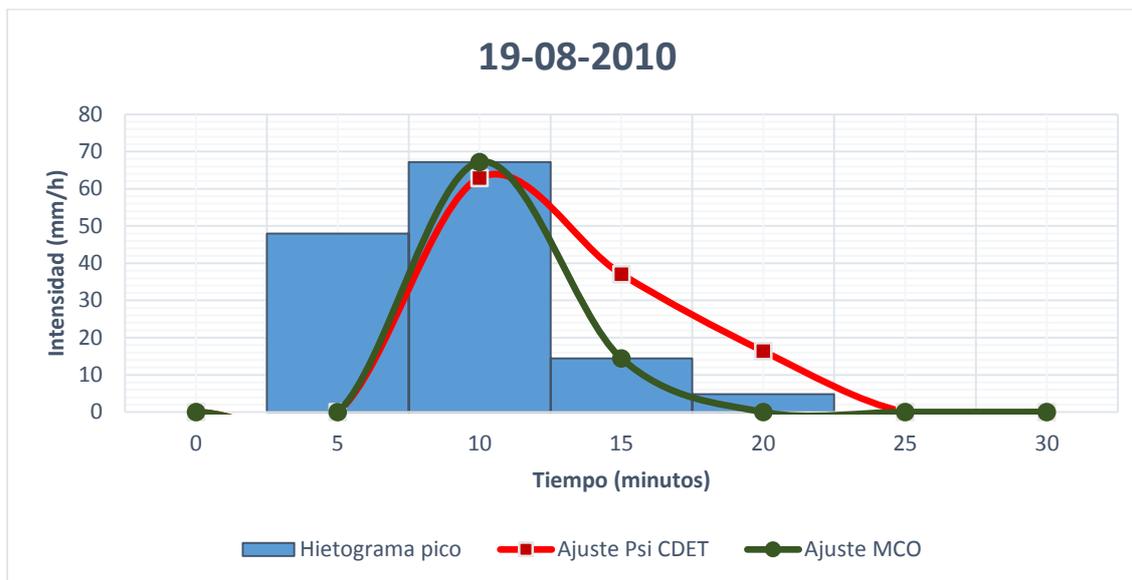


Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
29/09/2009	PSI	100	0.08398	49.90
29/09/2009	MCO	100	0.1068	62.75

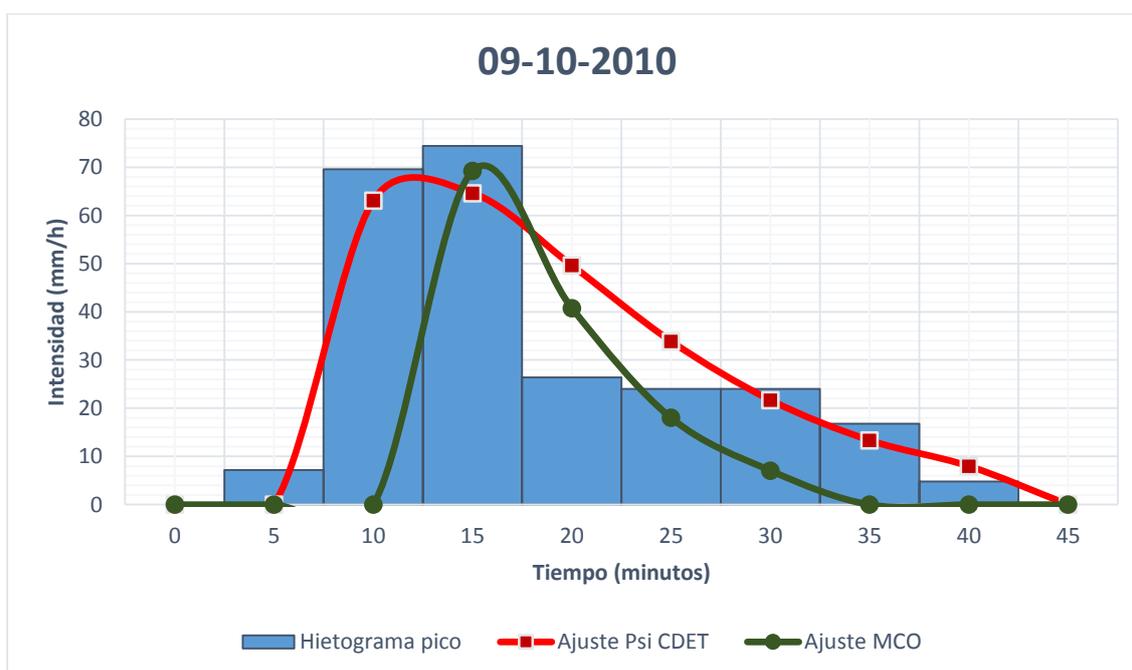


2010

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
19/08/2010	PSI	5	0.08994	64.29
19/08/2010	MCO	5	0.1643	103.30

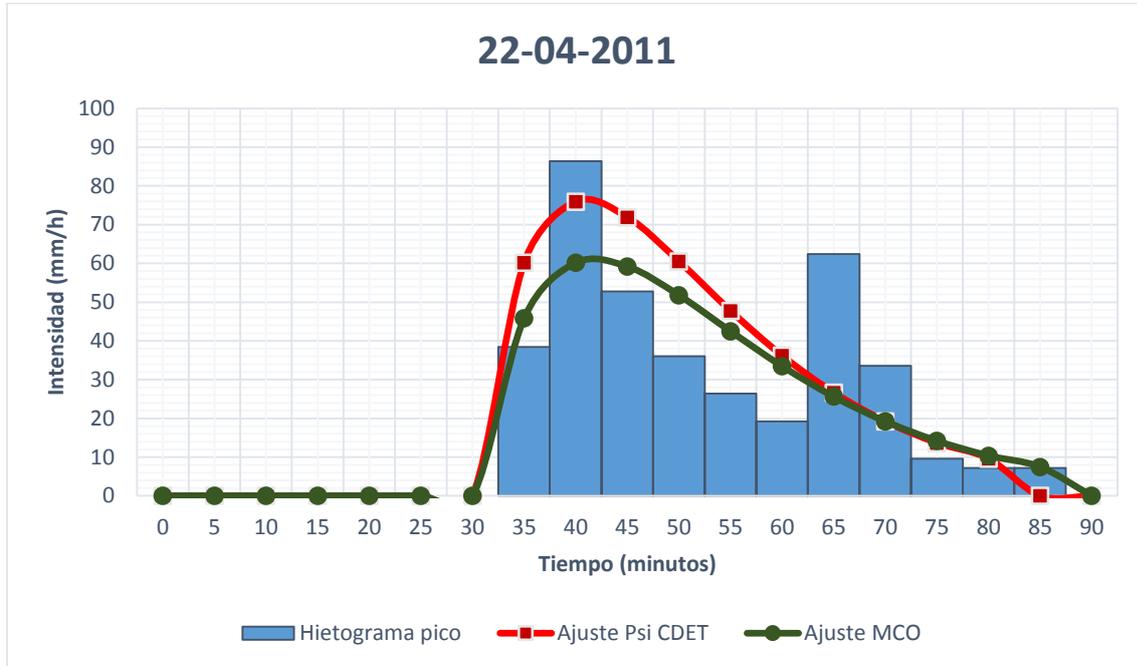


Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
09/10/2010	PSI	5	0.04923	67.72
09/10/2010	MCO	10	0.0899	70.73

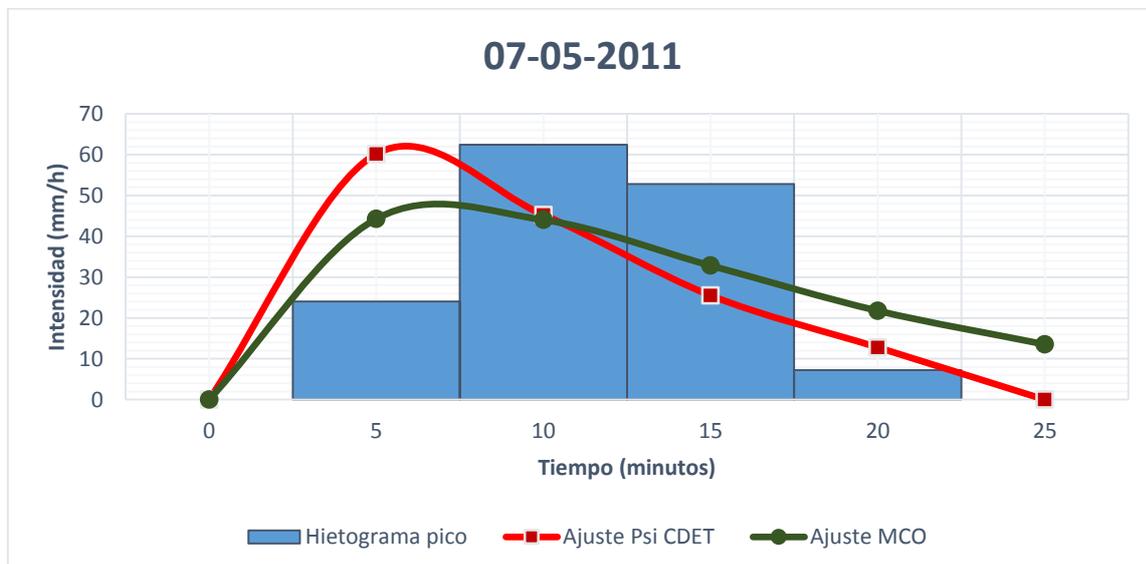


2011

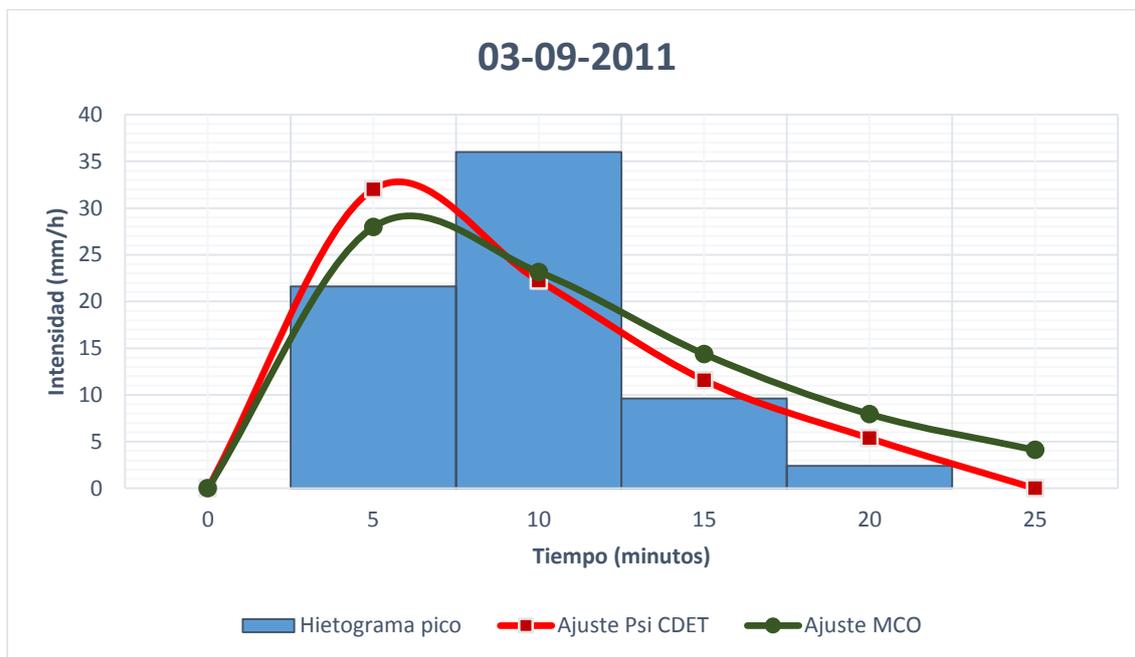
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
22/04/2011	PSI	30	0.03384	76.20
22/04/2011	MCO	30	0.0310	60.98



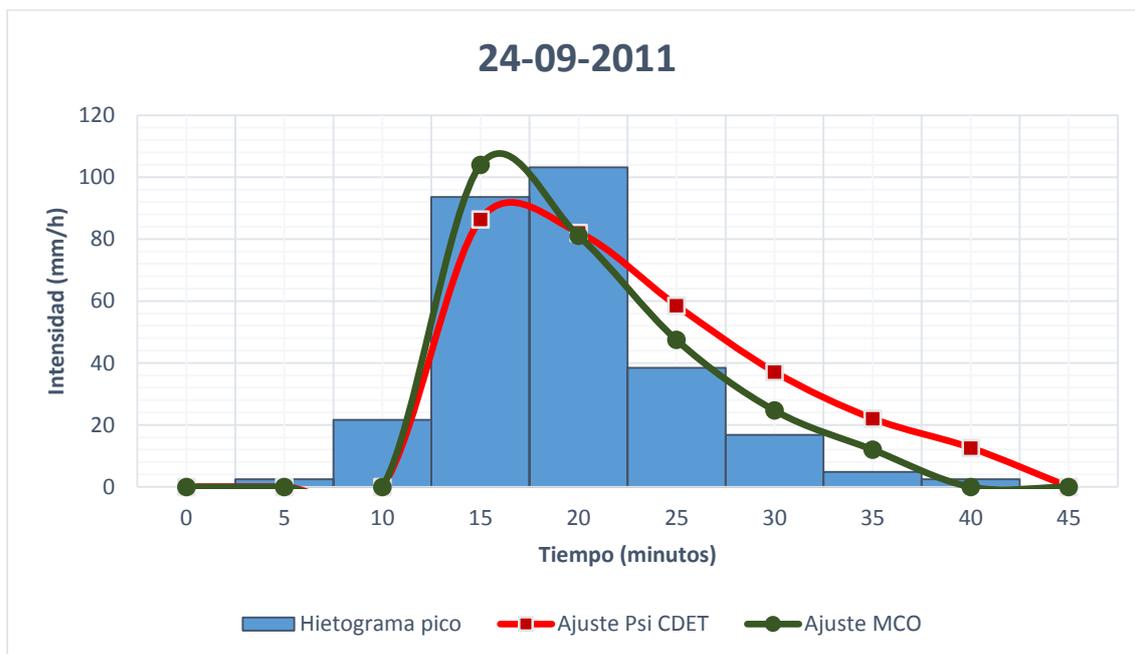
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
07/05/2011	PSI	0	0.07195	60.17
07/05/2011	MCO	0	0.0514	46.89



Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
03/09/2011	PSI	0	0.07781	32.06
03/09/2011	MCO	0	0.0649	28.17



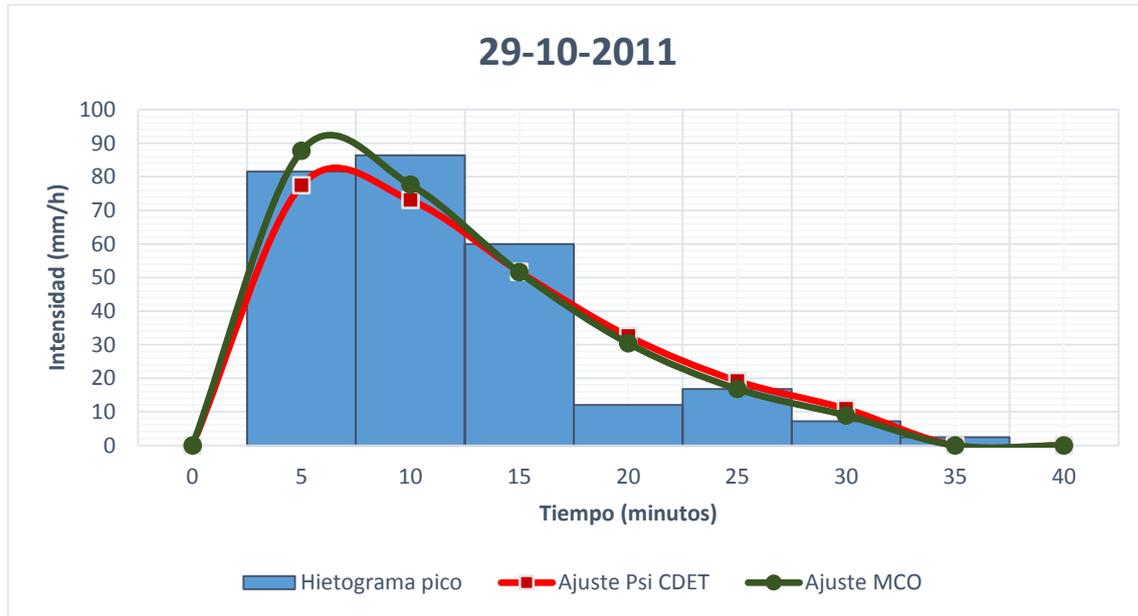
Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
24/09/2011	PSI	10	0.05474	89.86
24/09/2011	MCO	10	0.0693	104.17



ANEJO – Ajuste de tormentas seleccionadas.

Miguel Rico Cortés

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
29/10/2011	PSI	0	0.05527	80.40
29/10/2011	MCO	0	0.0600	89.46



2012

Fecha	Metodología de ajuste	TR (min)	α (min ⁻¹)	i_0 (mm/h)
28/09/2012	PSI	25	0.06341	66.65
28/09/2012	MCO	25	0.0720	75.74

