

# Precipitaciones máximas en Puerto Madryn. Análisis de caso: Tormenta de abril 2014

María Jesús Chachero

## Resumen

Entre el 7 y el 8 de Abril de 2014, debido a un centro ciclónico de características inusuales, se generó una tormenta en la zona noreste del Chubut, provocando precipitaciones extraordinarias con intensidades máximas, de alta recurrencia.

Se exponen los resultados de un análisis estadístico realizado a precipitaciones máximas diarias de Puerto Madryn, evaluando la recurrencia de la precipitación ocurrida y la nueva relación funcional surgida de la incorporación de ésta a la serie disponible previamente.

Se recomienda emplear esta nueva relación ajustada, para la determinación de eventos de lluvia necesarios en estudios técnico y diseño de obras en la ciudad y áreas de influencia.

**Palabras clave:** Precipitación máxima, Período de retorno, registros pluviométricos.

## Abstract

Between the 7th and 8th of April 2014, a cyclonic center with unusual features generated an extraordinary storm in the northeast of Chubut, causing an intense rainfall with a very low-frequency maximum intensity.

The results of a statistical analysis of the maximum daily rainfall in Puerto Madryn are presented. The return period of the event has been assessed and a new functional relation has been developed including the event in the historical record.

The novel adjusted relationship is provided for the determination of rainfall needed in technical studies and the design of works in the city and surrounding areas.

**Key words:** maximum intensity, rain return, pluviometric records.

Título académico: Ingeniero Hidráulico y Civil – Master en Hidrología General y Aplicada. Cargo: Profesora Adjunta de Hidráulica I y II – Jefe Trabajos Prácticos Hidrología. Institución: Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Dirección postal: Lezana 1035 (9100) Trelew Tel: 2804434210 – Cel: 2804403105. Fax: 2804436259. Correo electrónico: mjchachero@gmail.com.

## Introducción

Las precipitaciones ocurridas entre los días 7 y 8 de abril en Puerto Madryn, estuvieron asociadas a la presencia de un sistema de baja presión en niveles medios de la atmósfera sobre la porción este del sur del Océano Pacífico, entre los 20° y 40° de latitud sur. Este sistema, junto a la presencia de una masa de aire relativamente más húmeda y cálida sobre el centro y noreste de Argentina, la existencia de un sistema de baja presión en superficie sobre la región noroeste de Argentina, y el aporte de humedad por vientos en dirección este sobre la Patagonia, favorecieron las condiciones de inestabilidad atmosférica, provocando la ocurrencia de varias tormentas de diferentes intensidades en el norte de la Patagonia y la región central y este de Argentina. Entre el 7 y el 8 de abril, este sistema se desplazó hacia el noreste de la Patagonia y se desarrolló un sistema de baja presión en superficie sobre dicha región, generando eventos de abundantes precipitaciones.

En este trabajo se plantea una revisión en profundidad de las leyes que asocian precipitaciones a frecuencias o períodos de retorno, incorporando además los nuevos registros que se

han producido.

Al efecto, se recabó información del Servicio Meteorológico Nacional y del Centro Nacional Patagónico, contando con series de precipitación máxima en 24 horas, de 24 años (1991-2014) el primero y 17 años (1998-2014) más dos años (1991 y 1992) el segundo.

Asimismo, para esta tormenta en particular, se cuenta con algunos registros de diferentes duraciones, que también serán analizados a través de las ecuaciones regionales disponibles. La lluvia máxima en 24 horas alcanzó los 116 mm (SMN) sólo superada por la tormenta de 1998, donde el registro fue de 143.9 mm para ese mismo período. También cabe destacar otros registros para diferentes duraciones, como son 16 milímetros en 15 minutos, 41 milímetros en 50 minutos y 100mm en 10 horas.

Con la introducción de los nuevos datos de lluvias máximas ocurridas se obtienen nuevas relaciones funcionales, algo distintas a las hasta hoy existentes en términos de períodos de retornos asociados. La interpretación y uso de las expresiones que resulten, deben hacerse en el marco estricto de las hipótesis del método probabilístico, con sus limitaciones y restricciones.

## Objetivos

Analizar el período de recurrencia asociado a la tormenta de los días 7 y 8 de abril de 2014 y actualizar las ecuaciones de tormenta (Precipitación - Recurrencia) en la ciudad de Puerto Madryn y área de influencia.

## Metodología

El conocimiento de las características de las precipitaciones intensas es de gran importancia para el dimensionamiento de obras hidráulicas tales como canales, vertederos, presas, etc. Las relaciones entre Intensidad - duración - Recurrencia de las precipitaciones, deben ser deducidas a partir de observaciones de precipitaciones ocurridas durante un largo período de tiempo. En este trabajo, por no contar con información de precipitación para diferentes duraciones, sólo se pretende establecer

la recurrencia asociada a la precipitación máxima diaria.

## Recopilación y valoración de antecedentes

Como material base se utilizó la información pluviométrica de la Estación del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), ubicada en el Aeropuerto de Puerto Madryn y de la Estación del Centro Nacional Patagónico (CenPat), distantes aproximadamente 9 km, caracterizando la primera el ambiente de meseta y la segunda la zona de la ribera oceánica.

La información pluviométrica analizada, es la precipitación máxima en 24 horas, correspondiendo a la del SMN, el período 1991-2014 y al CenPat, el período 1998/2014, con información adicional de dos años (1991-1992).

Se procedió a realizar un análisis de correlación a nivel de información mensual entre ambas estaciones, y los resultados fueron altamente satisfactorios. Merece un comentario la validez del empleo de una correlación realizada con valores mensuales para completar una serie de valores diarios. Se procedió de ese modo en un intento de aprovechar al máximo la información disponible. Asimismo, se efectuó la correlación de los máximos diarios anuales de ambas estaciones, en este caso son sólo 19 pares de valores, obteniéndose un coeficiente de correlación  $r = 0,96$ . De este modo, se agregan a la serie del CenPat, los 5 años adicionales de información del SMN, totalizando de este modo, los 24 años ambas series.

## Análisis de la información

Como primera medida, se efectúa un análisis de consistencia de la información, descartando datos erróneos o poco confiables. En el análisis estadístico de lluvias máximas suelen emplearse modelos de series anuales de máximos, con lo que sólo se considera el mayor valor de cada uno de los años con datos, y métodos paramétricos que utilizan diversas leyes de distribución cuyos parámetros son ajustados a partir de los datos. ([1] Ferrer Polo, 1993)

Esta modelación requiere la elección de:

Ley de distribución de la población.

Método de estimación de parámetros.

Para asignar la frecuencia a la información

disponible, se empleó la expresión de Gringorten:

$$F_{exp} = \frac{m - 0,44}{n + 0,12} \tag{1}$$

Siendo m, el número de orden del valor considerado dentro de la serie de n valores.

Dentro de un amplio conjunto de posibilidades, los modelos elegidos en este trabajo se resumen en la tabla 1, ecuaciones (2) a (5).

Para utilizar estos modelos probabilísticos, se deben calcular sus parámetros, que según las diferentes funciones, son los que se indican en la Tabla 1:

En la distribución de Gumbel (2), los parámetros son  $x_0$  y  $\alpha$  que mediante el método de los momentos se determinan con las expresiones (6) y (7):

$$x_0 = \bar{x} - 0.45 \cdot \sigma \tag{6}$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot \sigma \tag{7}$$

Siendo  $\bar{x}$  y  $\sigma$ , la media y el desvío de la va-

riable x.

La distribución SQRT-ET<sub>MAX</sub>(3), originalmente propuesta en el contexto de precipitaciones máximas en Japón, ha venido siendo recomendada por la Dirección General de Carreteras de España, para la modelización de las precipitaciones máximas ([2] Ferrer Polo y Ardiles, 1994). La estimación directa de los parámetros de la función SQRT-ET<sub>MAX</sub>(3) no se puede hacer de forma analítica, ya que F(x) carece de primitiva conocida. Por esto, se debe realizar de forma aproximada mediante métodos numéricos. ([3] Sáez Castillo, 2009; [4] Zorraquino Junquera, 2004)

Los parámetros de la distribución de valores extremos generalizada, GEV (4), ajustan el dominio según:

$$\begin{aligned} k < 0 & \quad x > \mu + \frac{\alpha}{k} \\ k > 0 & \quad x < \mu + \frac{\alpha}{k} \end{aligned} \tag{8}$$

En la distribución Log Pearson tipo III (5) el parámetro de posición  $x_0$ , cumple:

$$\begin{aligned} x_0 & \leq x < \infty \\ -\infty & < x_0 < \infty \end{aligned} \tag{9}$$

Mientras que los parámetros de forma (r) y de escala ( $\alpha$ ), están definidos entre 0 e infinito.

Determinando los parámetros mediante el

Distribución	F(x) o f(x)	Parámetros	Métodos de ajuste
Gumbel	$F_{(x)} = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-x_0}{\alpha}\right)\right]$ (2)	$x_0$ Localización $\alpha$ Escala	Momentos Mom.Ponderados Máx.Verosimilit.
SQRT ETMAX (3)	$F_{(x)} = \exp\left[-k \cdot (1 + \sqrt{\alpha \cdot x}) \cdot \exp(-\sqrt{\alpha \cdot x})\right]$ (3)	k Forma $\alpha$ Escala	Máxima Verosimilitud
GEV (Valores extremos generalizados)	$F_{(x)} = \exp\left[-\left(1 - k \frac{x-x_0}{\alpha}\right)^{\frac{1}{k}}\right]$ (4)	$x_0$ Localización k Forma $\alpha$ Escala	Momentos Mom.Ponderados Máx.Verosimilitud
Log-Pearson III (5)	$f_x = \frac{1}{\alpha \cdot \Gamma(r)} \cdot (x-x_0)^{r-1} \cdot \exp\left(-\frac{x-x_0}{\alpha}\right)$ (5)	$x_0$ Localización r Forma $\alpha$ Escala	Momentos

Tabla 1: Definición de Modelos Estadísticos



método de los momentos, resulta:

$$x_0 = \bar{x} \cdot \ln x - \frac{2\sigma_{\ln x}}{C_{\ln x}} \quad (10)$$

$$r = \frac{4}{C_{\ln x}^2} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{C_{\ln x} \cdot \sigma_{\ln x}}{2} \quad (12)$$

Siendo respectivamente  $\bar{x}$ ,  $\sigma_{\ln x}$  y  $C_{\ln x}$  la media, la el desvío y el sesgo del logaritmo natural de la variable  $x$ .

### Pruebas de bondad del ajuste

Las pruebas de bondad de ajuste, son métodos de cálculo, que otorgan elementos de juicio con la finalidad de discernir si una ley de distribución teórica de probabilidades representa adecuadamente la muestra de la población analizada. ([5] Orsolini et al, 2000)

Consisten en comparar gráfica y estadísticamente, si la frecuencia empírica de la serie analizada, se ajusta a una determinada función de probabilidades teórica, seleccionada a priori, con los parámetros estimados con base en los valores muestrales.

Las pruebas estadísticas, tienen por objeto medir la certidumbre que se obtiene al hacer una hipótesis estadística sobre una población, es decir, calificar el hecho de suponer que una variable aleatoria, se distribuya según una cierta función de probabilidades.

En este trabajo se han empleado para este fin, el Análisis gráfico, que consiste en comparar gráficamente la función acumulada de la serie de datos, con la función acumulada teórica. La función teórica que más se apegue visualmente a los datos medidos será la de mejor ajuste.

### Ecuación de lluvia

Como no se dispone de información pluviográfica se aplicará la ecuación regional de lluvia para verificar la frecuencia asociada a algunos eventos medidos de muy fuerte intensidad.

La ecuación regional de lluvia se determinó para la ciudad de Trelew ([6] Chachero, MJ 2012), pero observando las tablas de precipitación asociada a recurrencia de ambas ciudades,

no se encuentran mayores diferencias. Puede suponerse que si las precipitaciones de 24 hs de duración son similares, también lo serán las de menor duración.

El mejor ajuste se ha obtenido para períodos de retorno iguales o menores a 100 años, considerándose que estas ecuaciones son suficientemente adecuadas para los problemas de diseño más usuales.

La ecuación resultante es (13):

$$i = \frac{135.61 * T^{0.3204}}{d^{0.649}} \quad (13)$$

Donde  $i$  es la intensidad en mm/h;  $T$  es la recurrencia en años y  $d$  la duración en minutos. ([7] Monsalve Sáenz, 1999)

### Resultados

Precipitación Máxima diaria:

Los registros del Centro Nacional Patagónico aportan información de las máximas mensuales del período 1983 – 2014.

Obsérvese que los mayores valores se presentan entre octubre y mayo, resultando los meses de invierno, libres de registros extraordinarios.

Los valores de precipitación máxima diaria para cada mes, son los indicados en la tabla 2.

Tabla 2: Precipitación Máxima Diaria (mm)

		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
CenPat	1983-2014	31.6	49.6	47	143.9	77.6	33.1
		1983	1992	1983	1998	1992	1997
		Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
CenPat	1983-2014	25.8	27.1	26.3	63.6	32.8	59.7
		1991	1999	1999	1985	1999	1991

### Determinación de la lluvia diaria máxima

Para el análisis estadístico de lluvia diaria máxima se empleó un modelo de serie anual de máximos, con lo que sólo se considera el mayor valor de precipitación diaria de cada uno de los años con datos, totalizando una serie de 24 valores.

Esta modelación requiere la elección de:  
Ley de distribución de la población.

**Método de estimación de parámetros.**

Dentro de un amplio conjunto de posibilidades, los modelos elegidos en este trabajo son los que se resumen en la tabla 1.

Para asignar la frecuencia a la información disponible, se empleó la expresión de Gringorten (1)

El software aplicado es el CHAC, diseñado por el Centro de Experimentación de Obras Públicas de España (Cedex) y disponible en Internet.

En las tablas 3 y 4 se resumen los resultados de los diferentes ajustes para ambas estaciones

**Tabla 3: Precipitación Máxima Diaria (mm) según diferentes Funciones de Distribución (CenPat)**

T	Gumbel			SQ_RT	GEV			LPIII
	Mom	ML	PWM		Mom	ML	PWM	
2	32	34	34	32	32	30	30	30
5	54	50	55	48	54	48	47	49
10	70	60	69	60	70	65	64	67
25	94	74	86	77	94	98	94	97
50	114	84	99	91	114	132	125	129
100	136	94	112	107	136	178	165	167
200	161	104	124	1233	161	140	217	216
500	197	117	141	145	197	357	311	296
1000	229	127	154	163	229	481	409	382

**Tabla 4: Precipitación Máxima Diaria (mm) según diferentes Funciones de Distribución (SMN)**

T	Gumbel			SQ_RT	GEV			LPIII
	Mom	ML	PWM		Mom	ML	PWM	
2	36	36	36	34	34	33	33	33
5	59	53	57	52	55	52	52	53
10	75	64	71	66	72	69	69	70
25	95	79	89	86	95	97	96	98
50	110	89	102	102	115	124	121	124
100	124	100	115	119	136	157	152	154
200	139	111	127	137	160	198	189	189
500	158	125	144	163	195	268	251	243
1000	172	135	157	184	225	336	309	297

**Pruebas de bondad del ajuste**

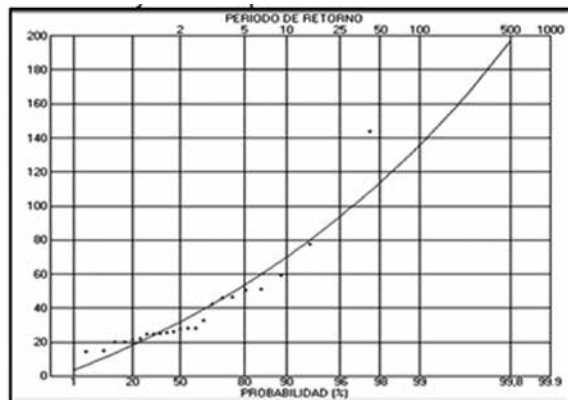
Se observa que para recurrencias bajas la diferencia entre una y otra función no es demasiado importante, mostrándose significativa para períodos de retorno mayores a 100 años. Es por esto que se debe seleccionar la de mejor ajuste. En este trabajo se empleó el Análisis gráfico para este fin.

Consiste en dibujar las funciones junto con los puntos medidos. La que más se apegue visualmente a los datos medidos será la de mejor ajuste.

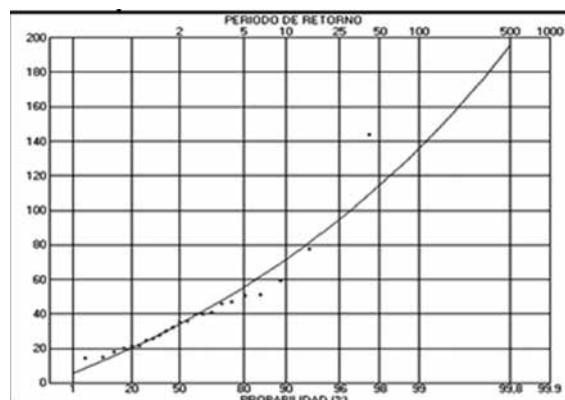
Con este criterio se seleccionaron las funciones de Valores extremos Generalizados, GEV (4), ajustando los parámetros por el método de los momentos, que resultaron las más significativas para ambas estaciones y sus resultados apare-

cen grisados en las tablas (3) y (4). Los resultados se observan en los gráficos (1) y (2).

**Gráfico 1: Ajuste Precip.Máx.Diaria.GEV – CenPat**



**Gráfico 2: Ajuste Prec. Máx. Diaria. GEV – SMN**



**Incorporación de la tormenta de Abril de 2014**

Con la incorporación a los registros de ambas estaciones, de la tormenta en estudio (abril 2014), las nuevas relaciones funcionales resultan las indicadas en las tablas (5) y (6).

**Tabla 5: Precip. Máx. Diaria (mm) según diferentes Funciones de Distribución considerando tormenta abril 2014(CenPat)**

T	Gumbel			SQ_RT	GEV			LPIII
	Mom	ML	PWM		Mom	ML	PWM	
2	36	35	36	33	34	31	31	31
5	61	53	59	51	57	51	51	53
10	78	65	74	64	75	72	69	72
25	99	80	93	84	99	111	102	105
50	114	91	107	100	119	154	134	138
100	130	102	121	117	141	213	178	178
200	145	113	135	135	164	295	231	228
500	166	128	153	161	198	454	328	309
1000	181	139	167	181	227	629	428	394

**Tabla 6: Precip. Máx. Diaria (mm) según diferentes Funciones de Distribución considerando**



tormenta abril 2014(SMN)

T	Gumbel			SQ_RT	GEV			LPIII
	Mom	ML	PWM		Mom	ML	PWM	
2	38	38	38	35	36	34	34	34
5	63	57	62	56	60	56	56	57
10	80	70	77	71	78	76	75	76
25	102	86	97	93	102	110	106	108
50	117	97	112	111	122	145	135	137
100	133	109	126	130	143	189	171	171
200	149	121	140	151	166	246	215	211
500	169	137	160	180	199	347	288	272
1000	185	148	174	203	227	448	359	332

**Pruebas de bondad del ajuste**

En este caso, ya las diferencias son más notorias, aún para recurrencias bajas. Se selecciona el mejor ajuste, por el método gráfico.

Con este criterio se seleccionaron las funciones de Valores extremos Generalizados, GEV (4), ajustando los parámetros por el método de los momentos, que resultaron las más significativas para ambas estaciones y sus resultados aparecen grisados en las tablas (5) y (6). Los resultados se observan en los gráficos (3) y (4)

Gráfico 3: Ajuste Precip. Máx.Diaria. GEV – CenPat

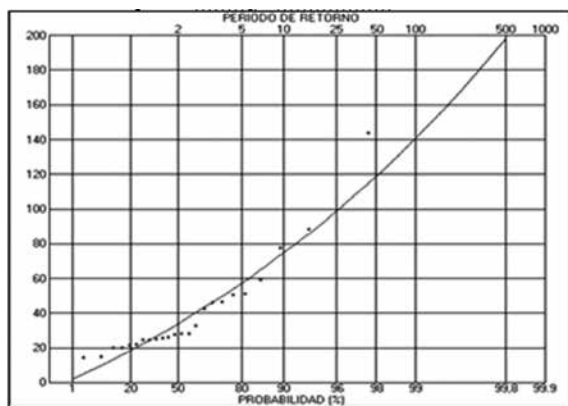
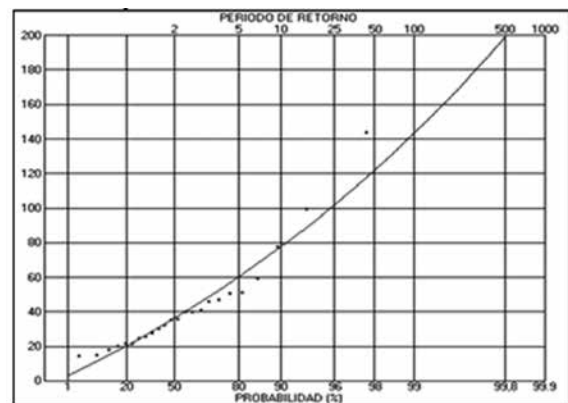


Gráfico 4: Ajuste Prec. Máx. Diaria. GEV – SMN



**Análisis de resultados**

**Precipitación Máxima Diaria y Recurrencia**

**Asociada**

Se analiza separadamente la frecuencia esperada para la tormenta de abril de 2014, antes de que la misma sucediera y luego se incorpora la información a los registros a fin de modificar las relaciones funcionales que vinculan precipitaciones y recurrencias.

En todos los casos la función que brindó un mejor ajuste fue la de Valores Extremos Generalizados, con ajuste de parámetros a través del método de los momentos.

Dicha función se expresa según se vio en (4)

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

Siendo los parámetros  $x_0$  localización;  $\alpha$  escala y  $k$  forma

Calculados los parámetros mediante el programa CHAC, resulta para el análisis del tiempo de recurrencia esperado, de la tormenta de abril, según se empleen los datos del CenPat o del SMN:

CenPat:

$x_0$	25,77
alfa	16,5
beta	-0,154

Aplicando la expresión (4) resulta  $F = 98.12 \%$  Y teniendo en cuenta que

$$T = \frac{1}{1 - F_{(x)}}$$

Resulta

$T = 53$  años.

SMN

$X_0$	27,92
Alfa	16,37
Beta	-0,149

Aplicando la expresión (4) resulta  $F = 98.09$  resultando  $T = 53$  años.

Con esto se concluye que la tormenta de abril de 2014, tenía una recurrencia asociada de 53 años.



Una vez que se incorporan los registros a la serie de datos anterior, se calculan las nuevas relaciones funcionales, resultando los siguientes parámetros para las estaciones del CenPat y del SMN:

**CenPat:**

xo	27,22
alfa	18,3
beta	-0,123

**SMN**

xo	29,42
alfa	18,88
beta	-0,112

A modo de ejemplo, se calcula nuevamente la recurrencia asociada a la precipitación de abril de 2014, resultando ahora del orden de los 41 años contando con la información del CenPat y de 45 años con la del SMN.

### Ecuación de lluvia

Como no se dispone de información pluviográfica se aplicará la ecuación regional de lluvia para verificar la frecuencia asociada a algunos eventos medidos de muy fuerte intensidad.

La ecuación resultante es (13)

$$i = \frac{135.61 * T^{0.3204}}{d^{0.649}}$$

Donde i es la intensidad en mm/h; T es la recurrencia en años y d la duración en minutos. ([7] Monsalve Sáenz, 1999)

Los eventos registrados son los siguientes: 16 milímetros en 15 minutos, 41 milímetros en 50 minutos y 100 mm en 10 horas. Esto significa una intensidad de 64 mm/hora para el primero, 49.2 mm/h para el segundo y 10 mm/h para el tercero.

Teniendo en cuenta las duraciones de cada uno, resultan períodos de recurrencia asociados de 24 años, 119 años y 125 años respectivamente.

Es de hacer notar, que un aguacero de 10 hs de duración, con un período de recurrencia de 125 años es un evento fuertemente extraordinario.

### Conclusiones

En el análisis de resultados se concluyó que la tormenta de abril de 2014, tenía una recurrencia asociada de 53 años. Cuando la misma se incorpora a los registros, dicha tormenta se asocia a una recurrencia mucho menor, del orden de 41 a 45 años.

La actualización de las ecuaciones de tormentas para Puerto Madryn y su zona de influencia, efectuada con la incorporación de los datos de la tormenta extraordinaria de abril de 2014 modifica sensiblemente los parámetros de las funciones de ajuste, disminuyendo las recurrencias o períodos de retorno de los pares de valores P-d de una tormenta sintética dada.

Estas nuevas relaciones ajustadas, son las que se recomienda utilizar en la determinación de tormentas de diseño para obras en la ciudad y áreas de influencia.

### Referencias

- [1] FERRER POLO, Francisco(1993). *Recomendaciones para el cálculo hidrometeorológico de avenidas*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Gabinete de Formación y Documentación. Madrid, España.
- [2] FERRER POLO, Francisco y ARDILES, Liana(1994). *Ingeniería Civil 95*. Análisis estadístico de las series anuales de máximas lluvias diarias en España. Madrid, España.
- [3] SÁEZ CASTILLO, A. (2009). *Informe Técnico. Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universidad de Jaén*. Modelización estocástica de precipitaciones máximas para el cálculo de eventos extremos a partir de los períodos de retorno.
- [4] ZORRAQUINO JUNQUERA, Carlos (2004). *Revista de Obras Públicas 3447*. El modelo SQRT-ETMAX. Madrid, España.
- [5] ORSOLINI, Hugo, ZIMMERMANN, Erik, BASILE, Pedro (2000). *Hidrología: Procesos y Métodos*. UNR Editora. Rosario
- [6] CHACHERO, María Jesús(2012). *Cuadernos del Curiham 18*. Estudio de Precipitaciones en la ciudad de Trelew, Análisis Estadístico y Ecuación de Lluvia.FCEIA (UNR) Rosario, Santa Fe. ISSN 1514-2906.
- [7] MONSALVE SÁENZ, Germán(1999).

*Hidrología en la Ingeniería.* Alfaomega. Santafé de Bogotá. Colombia.

