

DISTRIBUCIÓN PROBABILÍSTICA DE LOS EXTREMOS GLOBALES DE PRECIPITACIÓN*

Roberto Moncho**, Fernando Belda*** y Vicente Caselles**

RESUMEN

Las precipitaciones máximas mundiales siguen un patrón matemático de distribución temporal, con un índice de precipitación (n) de máxima eficiencia entre el origen convectivo y advectivo. Habitualmente, se estima que la frecuencia de dichas precipitaciones es extraordinariamente baja, según la estadística de cada estación. Sin embargo en la isla de La Réunion se han registrado 6 récords globales desde 1958, lo cual supone una media aproximada de un récord cada 9 años. En este trabajo proponemos un método para estimar la probabilidad de retorno para conjuntos de estaciones, basado en una función potencial de la distribución de probabilidad y de la distribución temporal de la precipitación. Los resultados obtenidos muestran que los récords globales presentan una alta similitud entre sí, con una precipitación equivalente en un minuto de aproximadamente 49 ± 2 mm. Sin embargo, existen algunas diferencias; por ejemplo, el récord de 2007 (4869 mm en 4 días) presenta un valor estimado de 64 mm en un minuto. Finalmente se propone una curva de Intensidad-Duración-Frecuencia para los récords mundiales, estimándose que el retorno esperado para el actual récord es del orden de 100 años, considerando el conjunto de las 18 estaciones que han registrado los récords.

Palabras clave: precipitación global, distribución de probabilidad, récord mundial

Probabilistic distribution of global precipitation extremes

ABSTRACT

The global maximum precipitations behave according to a mathematical pattern of time distribution, with a precipitation index (n) indicating maximum efficiency between the convective and advective origin. Usually, it is estimated that the frequency of said rainfall is extremely low, according to the statistics of each station. However, in the island of La Réunion there have been recorded 6 global records since 1958, which represents a rate of around one record every 9 years. We propose a method for estimating the probability of return for sets of stations, based on a power function of the probability distribution and temporal distribution of rainfall. The results indicate that global records show a high similarity among themselves, with an equivalent precipitation in one minute of approximately 49 ± 2 mm. However, there are some differences. For example, the record of 2007 (4869 mm in 4 days) has an estimated value of 64 mm in one minute. Finally, we introduce a curve of intensity-duration-frequency for world records, estimated that

* Fecha de recepción: 15 de julio de 2010.

Fecha de aceptación: 24 de junio de 2011.

** Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. Universitat de Valencia. E-mail: robert@temps.cat

*** Delegación Territorial en Murcia. Agencia Estatal de Meteorología.

the expected return for the current record is around 100 years, considering the set of the 18 stations that have measure extreme registers.

Keywords: global precipitation, probability distribution, world record

1. INTRODUCCIÓN

Los extremos climáticos suponen un interés especial para la sociedad ya que determinan un nivel de riesgo al que se ve sometida. Tanto los recursos agrícolas como la gestión del territorio urbano se planifican teniendo en cuenta la potencialidad extrema de la precipitación en cada región (Marco, 1999). Sin embargo, existe cierta dificultad para estimar la frecuencia de los extremos de precipitación ya que en general no se ajustan bien a las distribuciones matemáticas habitualmente empleadas, o se refieren únicamente a pequeñas cuencas (Témez, 1978; Etoh *et al.*, 1986).

A nivel mundial, la precipitación extrema sigue un conocido patrón matemático en función de la duración de la lluvia. Por ejemplo Paulhus (1965) y Galmarini (2004) proponen las siguientes expresiones:

$$R = 16,6 \cdot D^{0,475} \quad (1)$$

$$p = 6,75 \cdot d^{0,49} \quad (2)$$

donde la lluvia R está en pulgadas y p en mm, mientras que la duración D está en horas y d en segundos. Las dos expresiones son aproximadamente equivalentes si realizamos el cambio de unidades adecuado.

Gran parte de los registros globales de precipitación extrema se sitúan entorno al Océano Índico y el este de Asia (Jennings, 1950; Paulhus, 1965). Pero también hay dos registros en Europa, concretamente en Curtea-de-Arges (Rumania) y Füssen (sur de Alemania). Sin embargo, el área de mayor intensidad de Europa se encuentra en el litoral del Mediterráneo (Pérez Cueva, 1983; Armengol, 1994; y Martín Vide, 2002). En la Península Ibérica también se han registrado lluvias extraordinarias en el área del Mar Cantábrico (Elías y Ruiz, 1979) como por ejemplo en el País Vasco (López Unzu, 1986) o en Cantabria (Barcena y Pacheco, 1995). Si comparamos la curva de pluviosidad mundial de Paulhus con la curva de los récords de la zona mediterránea peninsular, vemos que para la escala temporal de 9-36h se aproximan entre sí (Armengot 1994), ya que esa es la duración típica de las lluvias eficientes en el este peninsular, en un contexto de Depresión Aislada en Niveles Altos o “Gota Fría” (Moncho, 2009).

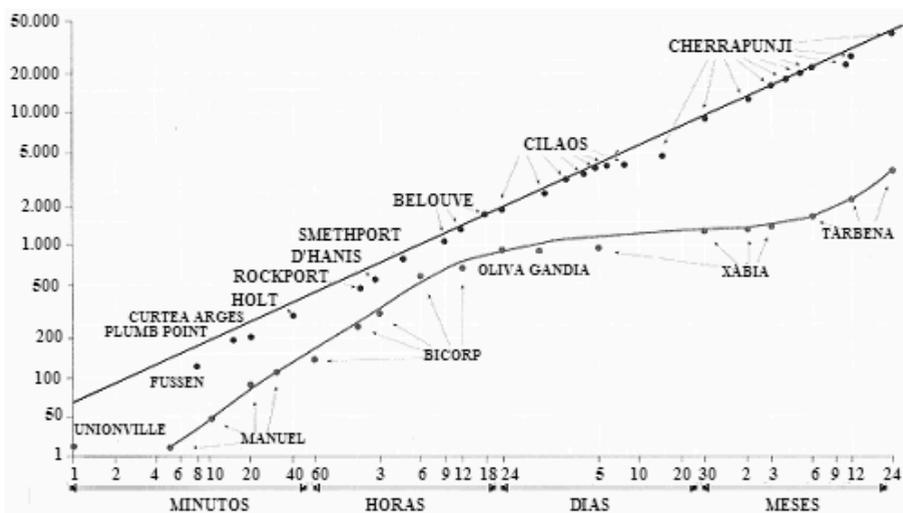


Figura 1. Precipitación en milímetros frente a duración. Los puntos negros representan diferentes récords mundiales según Paulhus (1965), mientras que los puntos azules representan los récords de precipitación de la Comunidad Valenciana. Cortesía de Armengot (1994).

En cuanto a la frecuencia de los extremos globales, cabe destacar que la isla de La Reunión ha registrado 5 récords globales desde 1958, siendo el último de ellos en 2007, con 4869 mm en 4 días (Quetelard *et al.*, 2009). Eso supone una media aproximada de un récord cada 9 años. Sin embargo el período de retorno estimado para cada récord es mucho mayor, ya que en general las estimaciones de la probabilidad del retorno se realizan según la estadística de cada estación meteorológica. En este trabajo proponemos un método para estimar la probabilidad de retorno de las precipitaciones extremas según la estadística de conjuntos de estaciones. En concreto proponemos emplear una función potencial para la distribución temporal de la precipitación y la distribución de la probabilidad.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Datos de precipitación

Para este estudio se han empleado los registros de precipitación extrema de 18 estaciones de diferentes zonas del planeta en los que se han registrado récords globales documentados por Paulhus (1965), Thapliyal-Kulshrestha (1992), Dhar y Arooqui (1973), WMO (1994, 2007), Quetelard *et al.* (2009) y NOAA (2010). En la Tabla 1 se muestran algunos de los récords mundiales vigentes hasta la fecha; de los cuales 6 se corresponden a episodios registrados en la isla de La Reunión y otros 7 en Asia.

Tabla 1. Enumeración de los registros de precipitación extrema documentados a nivel mundial según Paulhus (1965), Dhar y Arooqui (1973), Thapliyal-Kulshrestha (1992), WMO (1994, 2007), Quetelard *et al.* (2009) y NOAA (2010).

Duración	Precipitación (mm)	Estación	Fecha
1 min	38,1	Barot (Guadalupe)	26/11/1970
8 min	126	Füssen (Alemania)	25/05/1920
15 min	198	Plumb Point (Jamaica)	12/05/1916
20 min	206	Curtea-de-Arges (Rumania)	07/07/1889
30 min	280	Sikeshugou (China)	03/07/1974
42 min	305	Holt, Misuri (EEUU)	22/06/1947
60 min	401	Shangai (Mongolia)	03/07/1975
72 min	440	Gaoj, Gansu, (China)	12/08/1985
2 h	489	Yujiawanzi (Mongolia)	19/07/1975
2,5 h	550	Bainaobao (China)	25/06/1972
3 h	600	Duan Jiazhuang (China)	28/07/1977
6 h	840	Muduocaidang (Mongolia)	01/08/1977
9 h	1087	Belouve (La Reunión)	28-89/02/1964
10 h	1400	Muduocaidang, (Mongolia)	01/08/1977
12 h	1340	Belouve (La Reunión)	28-89/02/1964
18,5 h	1689	Belouve (La Reunión)	28-89/02/1964
20 h	1697	Foc-Foc (La Reunión)	7-8/01/1966
22 h	1780	Foc-Foc (La Reunión)	7-8/01/1966
24 h	1870	Cilaos (La Reunión)	15-16/03/1952
2 d	2467	Aurère (La Reunión)	7-8/04/1958
3 d	3929	Commerson (La Reunión)	24-26/02/2007
4 d	4869	Commerson (La Reunión)	24-27/02/2007
8 d	4936	Commerson (La Reunión)	20-27/01/1980
9 d	5342	Commerson (La Reunión)	19-27/01/1980
10 d	5678	Commerson (La Reunión)	18-27/01/1980
11 d	5949	Commerson (La Reunión)	17-27/01/1980
12 d	6051	Commerson (La Reunión)	16-27/01/1980
1 mes	9300	Cherrapunji (India)	07/1861
2 mes	12767	Cherrapunji (India)	06-07/1861

3 mes	16369	Cherrapunji (India)	05-07/1861
4 mes	18738	Cherrapunji (India)	04-07/1861
5 mes	20412	Cherrapunji (India)	04-08/1861
6 mes	22454	Cherrapunji (India)	04-09/1861
1 año	26461	Cherrapunji (India)	08/1860 -09/1861
2 años	40768	Cherrapunji (India)	1860-1861

Las estaciones disponibles varían fuertemente con el tiempo, de tal modo que al inicio del período de estudio (1861) sólo había 2 estaciones, mientras que al final del período (2007) habían 15 activas de las 18 posibles. Esta disponibilidad irregular provoca que la probabilidad de registrar un récord mundial varíe también con el tiempo; de hecho, la mayoría de los récords se registraron entre 1950 y 1980, coincidiendo con el máximo de actividad de las estaciones (Figura 2).

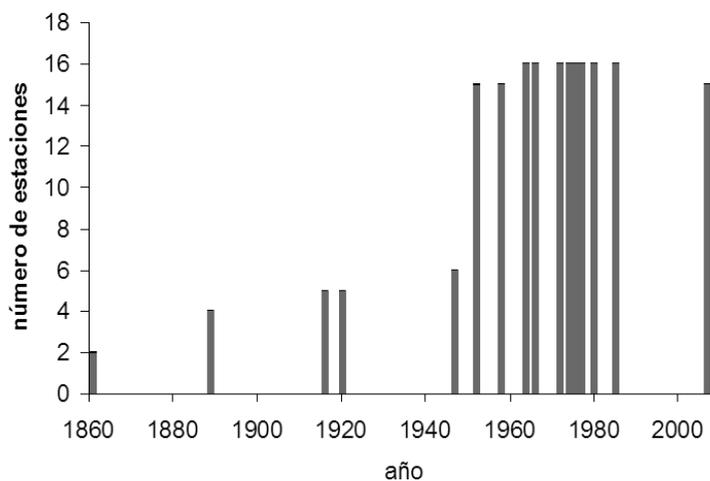


Figura 2. Número de estaciones disponibles en cada uno de los años en los que se registraron los récords, según WMO (2007).

2.2. Distribución potencial de la precipitación

Debido a la escasez de datos propia de la naturaleza de los extremos, es necesario analizar conjuntamente los datos de las diferentes estaciones mundiales en vez de analizarlos por separado. Por lo tanto, hablaremos de una probabilidad conjunta de que en alguna de las estaciones se registre un valor extremo. Así pues, el período de retorno empírico $\rho(P)$ (en años) asociado a la precipitación máxima de un conjunto de N estaciones meteorológicas se define como la inversa de la probabilidad acumulada $\Pi(p \geq P)$ de que en un año se registre

en dicho conjunto una precipitación máxima p que supere un umbral de precipitación P de la misma duración; es decir:

$$r(P) \equiv \frac{1}{\Pi(p \geq P)} \quad (3)$$

La probabilidad acumulada $\Pi(p \geq P)$ se obtiene con la suma normalizada de la frecuencia con la que, en un conjunto de N estaciones, al menos una registre en un año una precipitación p mayor o igual que P . Puesto que en este trabajo se analiza un rango pequeño de probabilidades bajas, podemos suponer que dicha probabilidad acumulada satisface de forma aproximada la Distribución de Probabilidad Potencial o de Pareto, según:

$$\Pi(p \geq P) = \left(\frac{P_1}{P} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (4)$$

donde P_1 y m son dos parámetros ajustables.

Por otro lado, suponiendo que las N estaciones tienen una probabilidad independiente entre sí, entonces para los extremos de precipitación se cumple que la probabilidad acumulada de que en al menos una estación se registre un extremo es la suma de probabilidades de todas las N estaciones. Por ello puede tomarse la probabilidad acumulada media de las N estaciones, de tal modo que la probabilidad acumulada del conjunto será aproximadamente N veces dicha probabilidad media, es decir:

$$\Pi(p \geq P) \approx N \overline{\pi(p \geq P)} = N \cdot \left(\frac{P_1}{P} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (5)$$

donde $\pi(p \geq P)$ es la probabilidad acumulada de que una estación en concreto registre una precipitación p mayor o igual a P . La distribución temporal de la acumulación máxima P puede escribirse según Moncho *et al.* (2009) mediante la siguiente curva:

$$P(t) \approx P_o(t_o) \left(\frac{t}{t_o} \right)^{1-n} \quad (6)$$

donde $P(t)$ es la precipitación máxima de duración t , el factor de escala $P_o(t_o)$ es la precipitación máxima para una duración de referencia t_o , mientras que n es el índice de la precipitación (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de la lluvia según la regularidad de la intensidad respecto al tiempo.

n	Tipo de curva	Variabilidad de la intensidad	Distribución temporal de la precipitación
0,00-0,20	Muy Suave	Prácticamente constante	Muy regular
0,20-0,40	Suave	Débilmente variable	Regular
0,40-0,60	Normal	Variable	Irregular
0,60-0,80	Pronunciada	Moderadamente variable	Muy irregular
0,80-1,00	Muy pronunciada	Fuertemente variable	Casi instantáneo

A partir de la expresión 3, 5 y 6 se llega a que la precipitación máxima P esperada en un conjunto de N estaciones, de una duración t y un periodo de retorno conjunto ρ , entre 1 y 50 años satisface la siguiente expresión:

$$P(N, r, t) \approx P_o(N_o r_o, t_o) \left(\frac{N \cdot r}{N_o \cdot r_o} \right)^m \left(\frac{t}{t_o} \right)^{1-n} \quad (7)$$

donde $P_o(\rho_o, t_o)$ es la precipitación máxima de duración t_o con un período de retorno ρ_o estimado para un conjunto de N_o estaciones. Las variables m y n son parámetros ajustables para cada conjunto de estaciones. Esta expresión se engloba en un conjunto de curvas conocidas como Intensidad-Duración-Frecuencia (Témez, 1978).

Por último, es necesario conocer la probabilidad de la duración total de un episodio de precipitación extrema. Para ello proponemos usar la siguiente función potencial:

$$D(r) \approx K \cdot (r - r_1)^h \quad (8)$$

donde $D(\rho)$ es la duración total de una precipitación cuya intensidad media en un tiempo t_o presenta un período de retorno igual a ρ ; mientras que K , h y ρ_1 son tres parámetros ajustables.

3. RESULTADOS

En primer lugar, se ha analizado la distribución temporal de la precipitación para los 5 episodios récord en los que se disponen registros completos de resolución horaria o diaria (Figura 3), y se ha obtenido que el índice n es cercano a 0,5 en todos ellos; concretamente la media del índice n para 5 episodios es de $0,49 \pm 0,03$ (intervalo de confianza del 95%). Dicho valor es compatible con el obtenido para el conjunto de los récords globales según Paulus (1965) y Galmarini (2004), lo cual indica que el comportamiento de la precipitación extrema mundial tiende a presentar un índice normal de precipitación (Tabla 2). En otras palabras, un récord mundial de cierta duración parece englobar de forma aproximada a los récords de duración inferior, ya que todos satisfacen una misma distribución temporal.

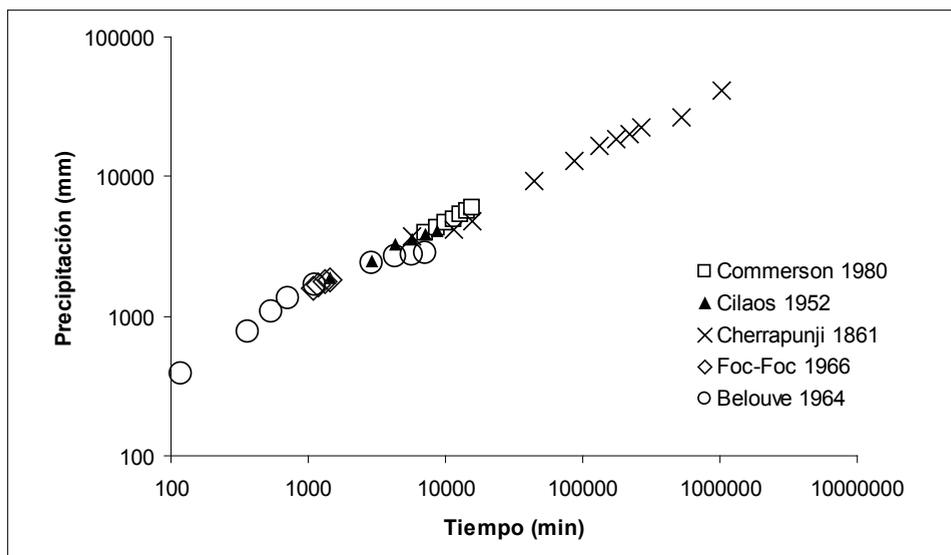


Figura 3. Distribución temporal de cinco récords: con $n = 0,49 \pm 0,02$ ajustada para la precipitación registrada en Foc-Foc (7-8/01/1966, La Reunión); $n = 0,53 \pm 0,02$ para Commerson (16-27/01/1980, La Reunión); $n = 0,45 \pm 0,02$ para Cilaos (15-16/03/1952, Reunión); $n = 0,49 \pm 0,01$ para Cherrapunji (1860-1861, China); y $n = 0,48 \pm 0,2$ para Belouve (24-29/02/1964), según Paulhus (1965) y otros.

Por otro lado, la curva de extremos globales de precipitación propuesta por Jennings (1959), Paulhus (1965) y Galmarini (2004) ha sido actualizada con los registros extremos de 2007, según el ajuste a la expresión 6. Concretamente se ha obtenido que la acumulación máxima global $P(t)$ de duración igual a t , presenta un índice $n = 0,497 \pm 0,010$ y un factor de escala de $P_0(t_0) = 49 \pm 2$ mm correspondiente a una duración de $t_0 = 1$ minuto. Cambiando de unidades a segundos, el factor de escala es 6,4 mm, algo muy similar a lo que obtuvo Galmarini (2004). Sin embargo el récord de 2007 se separa de forma significativa del ajuste (Figura 4), es decir, si suponemos una curva paralela que pasa por el registro de 4869 mm en 4 días (con $n = 0,5$), el factor de escala correspondiente a dicho registro sería de 64 ± 2 mm en un minuto, lo cual es significativamente diferente de $P_0(t_0) = 49 \pm 2$ mm (intervalo de confianza del 95%). Igualmente, suponiendo una distribución temporal con $n = 0,5$ para cada uno de los registros récords, se obtiene un valor de precipitación máxima en un minuto estimada para cada récord (Tabla 3), con lo cual se observa que en todos los casos dicho valor es sensiblemente mayor que el récord oficial de 38,1 mm en Barot, exceptuando los registros de 1 y 2 años, para los cuales la intensidad minutal equivalente es muy similar.

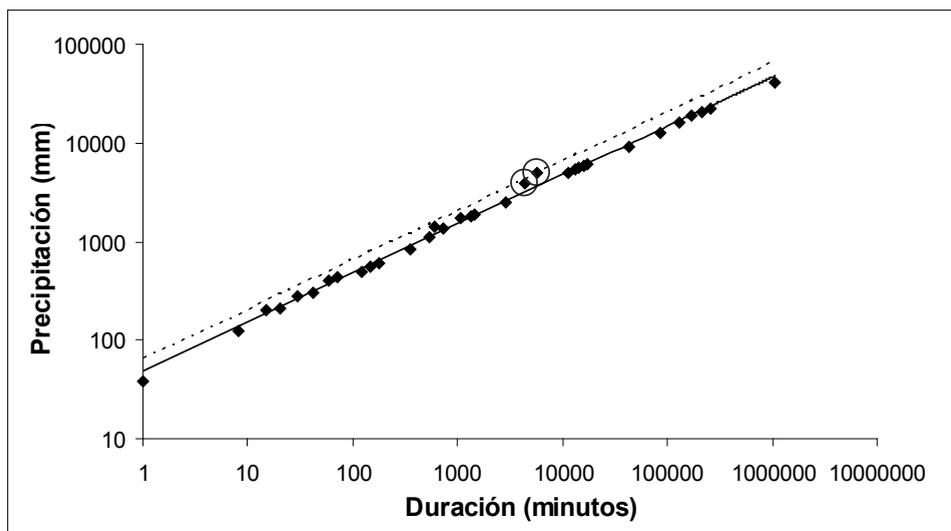


Figura 4. Comparación de todos los récords mundiales de precipitación (puntos) y el registro de 2007 en Commerson (La Reunión) correspondiente a 3929 mm en 3 días y 4869 mm en 4 días (señalados con círculos). La curva ajustada se corresponde, según la expresión 6, con $P_0 = 49 \pm 2$ mm y $n = 0,497 \pm 0,010$, con $R^2 = 0,996$.

Por otro lado, si se fija el valor de la precipitación máxima en un minuto según el ajuste, $P_0(t_0) = 49 \pm 2$ mm, es posible estimar un índice n extrapolado para cada récord (n' equivalente). En este caso, los récords que se sitúan por arriba del ajuste presentan un índice n' menor (Tabla 3) y por lo tanto tendrían una mayor eficiencia temporal de la acumulación de precipitación. En cualquier caso, para comparar la magnitud de los récords y estimar así la frecuencia asociada, puede fijarse tanto el valor del índice n como el valor de la intensidad minutal. En este trabajo se ha optado por fijar el índice $n = 0,5$, por lo que es posible extrapolar una precipitación equivalente para un minuto (precipitación minutal equivalente).

Tabla 3. Detalle de los récords según la precipitación máxima en un minuto, P_0' , equivalente para un índice normal ($n = 0,5$); e índice n' equivalente para cada récord con una precipitación máxima en un minuto supuesta de 49 mm.

Duración	P_{total} (mm)	P_0' (mm)	n'
8 min	126	45	0,546
15 min	198	51	0,484
20 min	206	46	0,521
30 min	280	51	0,488
42 min	305	47	0,511

60 min	401	52	0,487
72 min	440	52	0,487
2 h	489	45	0,519
2,5 h	550	45	0,517
3 h	600	45	0,518
6 h	840	44	0,517
9 h	1087	47	0,507
10 h	1400	57	0,476
18,5 h	1689	50	0,495
20 h	1697	51	0,500
22 h	1780	49	0,500
24 h	1870	49	0,499
2 d	2467	49	0,508
3 d	3929	46	0,476
4 d	4869	60	0,469
8 d	4936	64	0,507
9 d	5342	46	0,505
10 d	5678	47	0,504
11 d	5949	47	0,504
12 d	6051	47	0,506
1 mes	9300	46	0,509
2 mes	12767	45	0,511
3 mes	16369	43	0,506
4 mes	18738	45	0,507
5 mes	20412	45	0,509
6 mes	22454	44	0,508
1 año	26461	36	0,522
2 año	40768	40	0,515

A partir de los valores de la Tabla 3, se ha estimado la probabilidad acumulada de superarse un cierto umbral de precipitación minatural equivalente, P_o' . Concretamente, la probabilidad acumulada empírica (inversa del período de retorno empírico) se ha obtenido con la suma normalizada de la frecuencia con la que se supera cada valor a lo largo de los 148 años de datos (1861-2009).

De acuerdo con la expresión 7 aplicada para un minuto ($t = t_o = 1$), la relación entre el período de retorno y la precipitación puede linealizarse tomando logaritmos (Figura 5a). Para el conjunto de estaciones globales analizadas ($N = N_o = 18$), se obtiene de forma aproximada que la precipitación minutal equivalente, P_o' , es directamente proporcional a un factor de escala, $34,5 \pm 0,5$ mm, y al período de retorno en años elevado al exponente $m = 0,118 \pm 0,010$ (intervalo de confianza del 95%). En otras palabras, la precipitación máxima global esperada para un minuto y un período de retorno de un año es $34,5 \pm 0,5$ mm. Y de forma general, dado un conjunto de N estaciones independientes con clima extremo similar, la precipitación esperada, $P(N, \rho, t)$, con un retorno de ρ años y una duración de t minutos, viene dada por la siguiente expresión:

$$P(N, \rho, t) \approx 34,5 \text{ mm} \left(\frac{N}{N_o} \frac{\rho}{1 \text{ año}} \right)^{0,12} \left(\frac{t}{1 \text{ min}} \right)^{0,5} \quad (9)$$

donde la precipitación esperada, $P(N, \rho, t)$, viene dada en milímetros, mientras que N_o es igual a 18 estaciones. Según dicha relación, la intensidad registrada en 2007 (equivalente a 64 mm en un minuto) tiene un período de retorno de 190 ± 30 años, para el conjunto de las 18 estaciones analizadas.

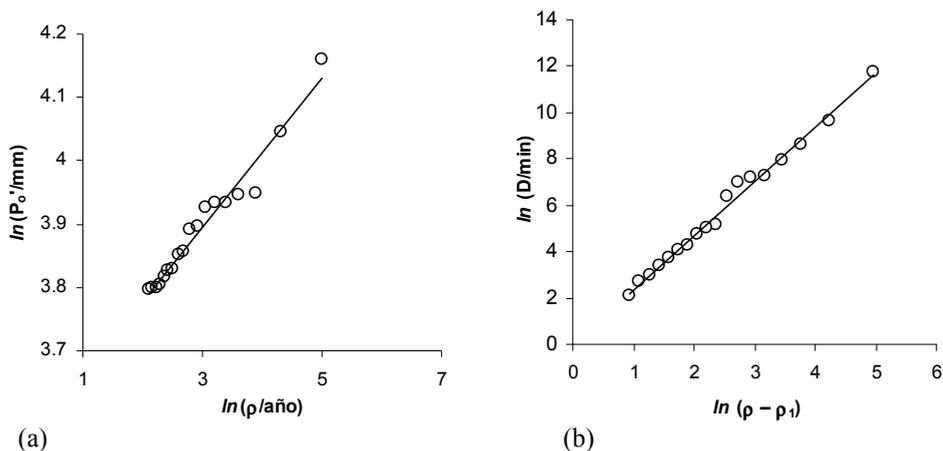


Figura 5. (a) Logaritmo de la precipitación minutal equivalente ($t_o = 1$), frente al logaritmo del período de retorno; y curva potencial ajustada, según la expresión 7, con $P_o(\rho_o) = 34,5 \pm 0,5$ mm con $\rho_o = 1$ año y $m = 0,118 \pm 0,010$ ($R^2 = 0,96$). (b) Logaritmo de la duración de cada récord frente al logaritmo del período de retorno menos $\rho_1 = 5,7 \pm 0,2$ años, y curva potencial ajustada, según expresión 8, con $K = 1,03 \pm 0,12$ minutos y $h = 2,33 \pm 0,10$ ($R^2 = 0,99$)

Por otro lado, podemos separar la probabilidad de que se alcance cierta intensidad minutal y la probabilidad de que un episodio de precipitación extrema tenga cierta duración. Para comparar las diferentes duraciones, es necesario suponer la aproximación de que todos

los récords globales tienen una intensidad minatural similar, del orden de $P_0(t_0) = 49 \pm 2$ mm. De ese modo, las distintas acumulaciones totales de los récords, se entienden como mayoritariamente debidas a la diferente duración. Mientras tanto, la diferente duración puede entenderse en razones de probabilidad, según la expresión 8. En concreto se obtiene que la duración, $D(\rho)$, de un récord global es directamente proporcional a un factor de escala, $K = 1,03 \pm 0,12$ minutos, y a la diferencia entre el período de retorno ρ y $\rho_0 = 5,7 \pm 0,2$ años, elevado a un exponente, $h = 2,33 \pm 0,10$, es decir:

$$D(\rho) \approx 1,03 \text{ min} \cdot (\rho - 5,7 \text{ años})^{2,33} \quad (10)$$

donde $D(\rho)$ es la duración esperada de un récord global de precipitaciones. Dicho ajuste presenta una elevado coeficiente de correlación (Figura 5b).

Cabe destacar que la probabilidad de duración es independiente de la probabilidad de la intensidad minatural, como se muestra en la Tabla 3, por lo tanto es necesario hablar de dos estimaciones diferentes del períodos de retorno. Es decir, el tiempo de retorno esperado para una precipitación extrema P de duración t , vendrá dado por la media geométrica entre el período de retorno de la intensidad (expresión 9) y el período de retorno de la duración (expresión 10). Por lo tanto, se ha estimado de nuevo el período de retorno del episodio extremo de 2007 en Commerson (La Reunión), y se obtiene que es de 100 ± 20 años para el conjunto de las 18 estaciones analizadas, es decir, aproximadamente de la misma longitud que el período analizado.

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El concepto de lluvias extremas se ha relacionado a menudo con tormentas intensas y lluvias persistentes. Según la expresión 6, cabría esperar un índice n cercano a 1 para precipitaciones de corta duración, de tal modo que acumulase el máximo de precipitación en poco tiempo, mientras que para duraciones largas esperaríamos encontrar un índice n cercano a 0, ya que así las acumulaciones son más importantes cuanto mayor es la duración (Figura 6). Sin embargo se ha estimado un índice n muy próximo a 0,5 para las precipitaciones globales más extremas (Figura 3 y 4). Dicho valor implica la máxima eficiencia de la precipitación, es decir, aquella que combina perfectamente la génesis convectiva y la advectiva (Moncho *et al.*, 2009). Por lo tanto podemos pensar que la distribución temporal de un chubasco extraordinario en cualquier punto de la Tierra puede describirse igualmente mediante un índice n cercano a 0,5.

Dichos resultados implican que un récord mundial de cierta duración siempre englobará de forma aproximada a los récords de duración inferior, ya que todos satisfacen una misma distribución temporal. De hecho, según la Tabla 1, los récords de 1 a 6 meses se engloban oficialmente dentro del año récord de Cherrapunji, y muy probablemente, en el mes de julio de 1861, encontraríamos un día con casi 1800 mm, y a su vez, casi 1300 mm en 12h, casi 300 mm en 42 min, etc. Probablemente también, durante algún minuto del

mes de julio de 1861 en Cherrapunji se alcanzó un valor cercano o superior al récord de Barot (38 mm en un minuto).

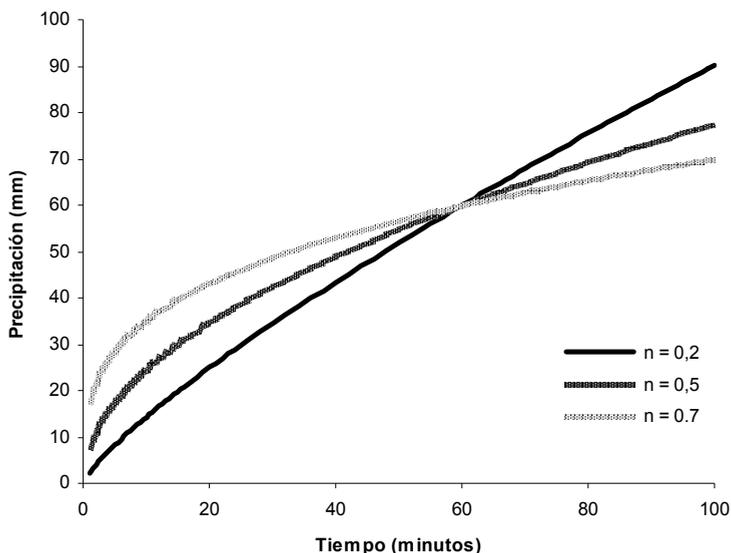


Figura 6. Comparación entre diferentes acumulaciones, en función del índice de la precipitación, n , para el ejemplo de una precipitación de 60 mm en una hora

Por otro lado, muy probablemente los récords medidos no se corresponden con los récords reales, principalmente debido a la escasa distribución de pluviómetros en el mundo, pero también debido a la dificultad que entraña la medida de valores extremos. Por ejemplo, con toda probabilidad, el récord oficial de 38,1 mm en un minuto registrado en Barot (Guadalupe) del 26 de noviembre de 1970 ha podido ser superado por cualquiera de los récords de duración superior (Tabla 3). La razón por la cual sigue vigente dicho récord estaría, entonces, en la dificultad de medir o extrapolar empíricamente un valor tan elevado mediante un pluviógrafo. Por ello se propone usar la metodología de este trabajo para estimar mejor los valores máximos.

Si nos fijamos en la intensidad media máxima de cada récord (dividiendo la acumulación máxima de expresión 6 entre el tiempo), parece razonable que el 1 de agosto de 1977, en Muduoaidang (Inner Mongolia, China), se registrasen más de 840 mm en 6h (Tabla 1), ya que se tiene constancia de que en el mismo día se recogieron 1400 mm en 10h, y en ambos casos suponen una intensidad media máxima de 2,333 mm/min, lo cual sólo es posible con índice $n = 0$:

$$I(t) = I_o(t_o) \left(\frac{t_o}{t} \right)^n \rightarrow 2,333 = 2,333 \left(\frac{6}{10} \right)^0 \quad (11)$$

donde $I(t)$ es la intensidad media máxima en $t = 10\text{h}$ mientras que $I_0(t_0)$ es la intensidad media máxima en $t_0 = 6\text{h}$, que se define como la precipitación máxima dividida entre su duración. Teniendo en cuenta que es estadísticamente imposible que n sea 0, cabe esperar que en 6h se registraran más de 840 mm. Tal como se ha estimado en este trabajo, el índice n de las precipitaciones extremas es cercano a 0,5, y en cualquier caso, la precipitación extrema suele tener un índice entre 0,4 y 0,7, siendo ocasionalmente cercano a 0,3 (Moncho, 2009 y Moncho *et al.*, 2009); por ejemplo, suponiendo un índice bajo de 0,3, según la expresión 6 se habrían registrado unos 980 mm en 6h, ó bien unos 1080 mm suponiendo que $n = 0,5$. Es decir, este método puede usarse para validar la coherencia de los registros extremos y estimar así con una mayor probabilidad cuáles han debido ser los valores máximos en cada caso.

Si nos fijamos en el récord de Commerson (La Reunión) del 24-27 de febrero de 2007 y asumiendo que también responde a un índice $n = 0,5$, es posible que durante algún minuto se haya registrado una precipitación cercana o superior a 60 mm, lo cual supondría el 'récord absoluto' de todos los registros extremos de precipitación. En cualquier caso, incluso asumiendo que sólo cayeron unos 49 mm en un minuto, con un índice n de unos 0,47, la curva asociada a dicho extremo sigue estando por encima de cualquier otro valor, por lo tanto supone un umbral que aún no se ha superado oficialmente.

En cuanto al período de retorno, se ha estimado de dos formas diferentes: una considerando la intensidad minutal equivalente y otra considerando la duración. Por lo tanto, el período de retorno total debe englobar tanto la probabilidad de que se supere cierta intensidad minutal equivalente como la probabilidad de que se supere cierta duración. Es decir, el período de retorno total implica una probabilidad condicionada, y por lo tanto deber ser una función del producto de las dos probabilidades. Sin embargo, las dos estimaciones por separado del período de retorno presuponen que toda la probabilidad recae sobre una de las dos magnitudes, por lo que el período de retorno total puede aproximarse según la media geométrica entre ambos cálculos.

Finalmente se ha estimado que el período de retorno total del extremo de 2007 es del orden de 100 años. Dicho resultado es independiente de si se toma o no en consideración el valor de 2007 para la estimación de la distribución de probabilidad conjunta de las estaciones. Por lo tanto, los resultados implican que el extremo de 2007 se engloba de forma adecuada en las características climáticas del conjunto de las 18 estaciones analizadas, ya que la longitud del período de estudio es de unos 150 años.

5. CONCLUSIONES

La curva global de los extremos de precipitación, es un patrón matemático que también se satisface de forma aproximada en la distribución temporal de cada uno de los eventos de precipitación extrema. Concretamente el índice n de la precipitación extrema es muy cercano a 0,5 en todos ellos, lo cual implica una máxima eficiencia en la combinación entre el origen convectivo y advectivo de la precipitación. Además, de compartir casi la misma n , también presentan mucha similitud en la precipitación equivalente en un minuto, que es aproximadamente 49 ± 2 mm.

El hecho de tener una distribución temporal similar, implica que los récords parecen estar anidados entre sí. Por lo tanto, es una buena aproximación suponer que los récords de mayor duración engloban a los de menor duración. Sin embargo existen pequeñas diferencias en la precipitación minatural equivalente, que puede explicarse por una diferente probabilidad de retorno. Por ello, se ha propuesto una curva de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para el conjunto de los récords, según:

$$P(N, \rho, t) \approx 34,5 \left(\frac{N}{N_0} \frac{\rho}{1 \text{ año}} \right)^{0,12} \left(\frac{t}{1 \text{ min}} \right)^{0,5} \quad (12)$$

donde $P(N, \rho, t)$ es la precipitación esperada, en milímetros, con una duración de t minutos, para un período de retorno de ρ años estimado sobre un conjunto de N estaciones; mientras que N_0 es igual a 18 estaciones. Es decir, para un período de retorno de un año, y una duración de un minuto, cabe esperar que en alguna de las 18 estaciones se registre una precipitación cercana a 34,5 mm.

El episodio que presenta una mayor precipitación minatural equivalente se corresponde con el registrado en Commerson, entre el 24 y 27 de febrero de 2007, con una estimación de 64 mm en un minuto. Por lo tanto, dicho valor representa el umbral máximo conocido hasta la fecha. Además es posible trazar una curva extrema asociada a dicho récord, con índice $n = 0,5$, según:

$$P(t) \approx 64 \left(\frac{t}{1 \text{ min}} \right)^{0,5} \quad (13)$$

Por otro lado, el período de retorno de una precipitación extrema depende no sólo de la intensidad sino también de la duración. Concretamente para los extremos globales se ha estimado que la duración esperada $D(\rho)$, en minutos, puede escribirse en función del período de retorno ρ , según:

$$D(\rho) \approx 1,03 \text{ min} \cdot (\rho - 5,7 \text{ años})^{2,33} \quad (14)$$

Por lo tanto, el período de retorno total de un episodio extrema se puede aproximar como la media geométrica del período estimado por la intensidad (expresión 13) y período estimado por la duración (expresión 14). Como ejemplo, para el episodio de 2007 se obtiene que el período de retorno total es de 100 ± 20 años, por lo que puede englobarse fácilmente dentro de la estadística extrema de las 18 estaciones analizadas.

6. AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue iniciado en una colaboración entre la Delegación Territorial en Valencia de la Agencia Estatal de Meteorología y el Departament de Física de la Terra i Termodinàmica

mica de la Universitat de València dentro del marco de prácticas de un curso de postgrado del ADEIT (Fundació Universitat-Empresa) en 2007, que sirvió como tema de introducción a la investigación orientado para la futura obtención de la tesis doctoral. Cabe agradecer también la colaboración de José Ángel Núñez y Rafael Armengot (AEMET), especialmente en la cesión de material complementario para este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- ARMENGOT-SERRANO R. (1994): “Las precipitaciones extraordinarias”. In: Pérez Cueva, A. (Ed.) *Atlas climàtic de la Comunitat Valenciana*. Conselleria d’Obres Públiques, Urbanisme i Transports. Generalitat Valenciana, Col.lecció Territori, N° 4, 98-99.
- BARCENA ODRIOZOLA, P.; PACHECO IBARS, S. (1995): “Precipitaciones excepcionales en Cantabria. Distribución espacial y consecuencias”. In CREUS NOVAU, J. (Ed.). *Situaciones de riesgo climático en España*. Jaca: Instituto Pirenaico de Ecología, p. 117-128.
- CERVENY, R.S.; LAWRIEMORE J.; EDWARDS, R.; LANDSEA C. (2007): “Extreme Weather Records: Compilation, Adjudication and Publication. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 88 (6): 853-860.
- DHAR, O.N.; AROOQUI, S.M.T. (1973): “A study of rainfalls recorded at the Cherrapunji observatory”. *Hydrological Sciences Journal*, 18 (4), pp. 441-450.
- ELÍAS, F.; RUIZ, L. (1979): *Precipitaciones máximas en España*. ICONA, Madrid.
- ETOH, T; A. MUROTA y M. NAKANISHI (1986): “SQRT-Exponential Type Distribution of Maximum, Hydrologic Frequency Modelling”, In SHING, V.P. (Ed.): *Proceedings of the International Symposium on Flood Frequency and Risk Analyses*. State University, Reidel Pub. Com. Louisiana, U.S.A., pp. 253-264.
- GALMARINI, S.; STEYN, D. G.; AINSLIE, B. (2004): “The scaling law relating world point-rainfall records to duration”. *International Journal of Climatology*, 24, pp. 533-546.
- JENNINGS, A. H. (1950): “World’s greatest observed point rainfall”. *Monthly Weather Review*, 78, pp. 4-5.
- LÓPEZ UNZU, F. (1986): *Hidrología torrencial del País Vasco*. Vitoria: Gobierno Vasco.
- MARCO, J. (1999): “Análisis Hidrológico y sus implicaciones en la planificación de una defensa integral frente a las inundaciones de la Ribera del Júcar”, In CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR (Ed.): *Estrategias de actuación en la zona inundable de la Ribera del Júcar*, Volumen I, Ponencias Técnicas, Alzira.
- MARTÍN VIDE, J. (2002). “Las lluvias máximas diarias”. In AYALA-CARCEDO, F.J. y OLCINA CANTOS, J. (Eds.). *Riesgos naturales*. Barcelona: Ariel, pp. 913-920.

- MONCHO R.; BELDA F.; CASELLES V. (2009): "Climatic study of the exponent n of the IDF curves of the Iberian Peninsula". *Tethys* 6, pp. 3-14.
- MONCHO, R (2009): *Distribución espacio-temporal de la precipitación intensa. Aplicación para el sur de Valencia y norte de Alicante*. Premio Estatal de Meteorología Eduard Fonserè. 1ª Edición. ACAM y AEMET.
- NOAA (2010): World record point precipitation measurements. *Tsunamiready, NOAA*.
(http://tsunamiready.noaa.gov/oh/hdsc/record_precip/record_precip_world.html)
- PAULHUS, J.L.H. (1965): "Indian Ocean and Taiwan rainfalls set new records". *Monthly Weather Review*, 93(5), pp. 331-335.
- PÉREZ CUEVA, A.J. (1983): "Precipitaciones extraordinarias en España peninsular". *Agricultura y Sociedad*, 28, pp. 189-203.
- QUETELARD, H.; BESSEMOULIN, P.; CERVENY, R.S.; PETERSON, T.C.; BURTON, A.; BOODHOO, Y. (2009): "Extreme Weather: World-Record Rainfalls During Tropical Cyclone Gamede". *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 90, Issue 5, pp. 603-608.
- TÉMEZ, J. (1978): *Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Dirección General de Carreteras. Madrid, p. 111.
- WMO (1994): *Guide to Hydrological Practises*, 5th edition, No. 168.
- WMO (2007): *Global Weather & Climate Extremes* (<http://wmo.asu.edu/>).

