

# EL ÍNDICE $n$ DE LA PRECIPITACIÓN INTENSA

Robert Monjo i Agut

Departament de Física de la Terra i Termodinàmica. Universitat de València.

Fundación para la Investigación del Clima.

[robert@temps.cat](mailto:robert@temps.cat)

## RESUMEN

A menudo se habla de precipitación intensa refiriéndose a la acumulación en una hora o en pocos segundos, incluso realizando comparaciones lineales entre ambas. Sin embargo el comportamiento natural de la precipitación hace que sea necesario hablar de una relación no lineal para referirse a cómo cambia la intensidad de la precipitación con el intervalo de tiempo medido. En ese sentido, este artículo intenta aproximarse a la descripción del índice  $n$ , que caracteriza la intensidad media máxima (IMM), según su comportamiento convectivo (acumulando un máximo de precipitación en poco tiempo,  $n$  cercano a 0) o advectivo (acumulando la precipitación regularmente,  $n$  cercano a 1). El estudio se realiza desde tres perspectivas diferentes: conjunto del planeta, Península Ibérica y Sur de Valencia – Norte de Alicante. El análisis matemático de las precipitaciones máximas mundiales desprende que éstas presentan una máxima eficiencia entre el origen convectivo y advectivo ( $n$  igual a 0,5). A partir del análisis climático del índice  $n$  en la Península Ibérica se pueden distinguir grandes zonas caracterizadas por máximos de lluvia de origen más tormentoso (interior peninsular) y áreas caracterizadas por máximos de lluvia de origen más frontal (suroeste, litoral atlántico y litoral mediterráneo), aunque con gran influencia aún de las tormentas ( $n$  generalmente superior a 0,5). Por último, para el Sur de Valencia – Norte de Alicante, se obtiene que el índice  $n$  es en general cercano a 0,35, exceptuando el caso de Sueca en 2008, con un índice  $n$  inferior a 0,2.

**Palabras clave:** récord de precipitación, distribución de precipitación, clasificación de la precipitación, torrencial.

## 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). Por ello resulta necesario caracterizar tanto los aspectos temporales como los patrones espaciales de la acumulación de precipitación, así como su probabilidad de acontecer.

Si queremos estudiar el comportamiento de la lluvia en el tiempo, debemos fijarnos en cómo se distribuye la intensidad a lo largo del mismo. Usualmente se usa el concepto de intensidad para referirnos a valores medios (Tabla 1), es decir, a una cierta cantidad de precipitación registrada en un tiempo determinado: una hora, un minuto, o bien el paso entre dos oscilaciones del balancín de una estación automática.

**Tabla 1.** Clasificación de la lluvia según la intensidad media en una hora. Agencia Estatal de Meteorología.

Intensidad	Acumulación en una hora
DÉBIL	entre 0,1 y 2 mm
MODERADO	entre 2,1 y 15 mm
FUERTE	entre 15,1 y 30 mm
MUY FUERTE	entre 30,1 y 60 mm
TORRENCIAL	más de 60 mm

En primer lugar hay que tener claro que una estación automática no mide una intensidad instantánea, sino en realidad siempre mide una intensidad media, que en este caso se corresponde a una precipitación acumulada durante un corto período de tiempo (entre dos oscilaciones de balancín). Puesto que diferentes estaciones pueden tener diferentes tiempos de medida, en general no se pueden comparar las intensidades entre sí. Es decir, con una misma precipitación real y en un mismo lugar, dos estaciones pueden medir diferentes intensidades (supuestamente instantáneas). Por ello, no debe confundirse una intensidad medida con una intensidad instantánea (que no se puede medir) ni tampoco debe extrapolarse linealmente a una intensidad media de 1 minuto o 1 hora porque a priori puede crear confusión si se compara con otras estaciones.

¿Y cómo se puede comparar la precipitación? La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) clasifica la precipitación según la intensidad media en una hora. Podemos hablar de lluvia inapreciable, débil, moderada, fuerte, muy fuerte o torrencial, según se supere o no un cierto umbral horario (Tabla 1). Por ejemplo, la lluvia muy fuerte sería entre 30,1 mm hasta 60 mm, registrados en una hora.

Sin embargo, siguiendo el ejemplo podríamos encontrar dos registros de lluvia muy fuerte (p.e. 40 mm en una hora), pero uno podría ser constante (40 mm caídos regularmente durante una hora) y el otro podría ser muy variable (35 mm caídos en 5 minutos, y el resto, repartido hasta completar la hora). Por tanto, la importancia no estaría sólo en que hayan caído 40 mm en una hora, sino que también sería importante cómo habrían caído esos 40 mm, si de forma regular o de forma muy irregular. Y todo ello debe ser analizado huyendo del concepto de intensidad instantánea.

Una forma de clasificar la regularidad o irregularidad de la precipitación respecto al tiempo, consiste en ordenar de mayor a menor la intensidad media máxima para diferentes intervalos de tiempo: 1 minuto, 5 minutos, 30 minutos, 1 hora, etc. Para tiempos pequeños, la intensidad media máxima siempre será mayor o igual que para tiempos mayores. Por lo tanto, el cociente entre dos intensidades medias máximas,  $I_1 / I_2$ , será igual al cociente entre las duraciones cambiadas,  $t_2 / t_1$ , pero elevando a un número  $n$ , evaluado entre 0 y 1:

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^n \quad (1)$$

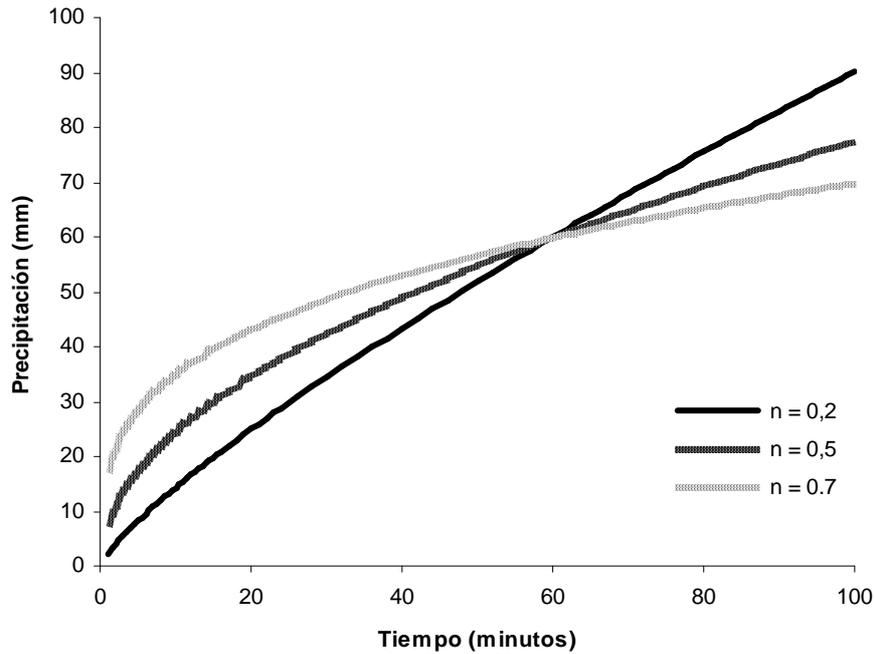
Esa relación entre intensidad y duración se conoce como curva de Intensidad Media Máxima (IMM) y puede resumirse mediante el número  $n$ . Dicho número es un parámetro adimensional, es decir, no tiene dimensiones físicas como en el caso del tiempo (minutos) o la precipitación (milímetros). La ventaja de los números adimensionales es que generalmente permiten clasificaciones válidas para cualquier lugar. En este caso, podemos construir una clasificación independientemente de si llueve mucho, o poco (Tabla 2), es decir, el índice  $n$  no depende ni de la intensidad ni de la duración de la precipitación (Moncho, 2008).

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

$n$	Variabilidad de la intensidad	Interpretación del tipo de precipitación
0,00-0,20	Prácticamente constante	Muy predom. advectiona o estacionaria
0,20-0,40	Débilmente variable	Predom. advectiona
0,40-0,60	Variable	Efectiva
0,60-0,80	Moderadamente variable	Predom. convectiva
0,80-1,00	Fuertemente variable	Muy predom. convectiva

Como ejemplo, podemos escoger la definición de precipitación torrencial y observar los diferentes tipos de precipitación basándonos en el índice  $n$ . Según AEMET, una precipitación torrencial es aquella que supera los 60 mm en una hora (Figura 1), pero esa precipitación se puede acumular de forma constante ( $n$  igual o inferior a 0,2) o se puede acumular de forma rápida, registrando la mayoría de la precipitación en pocos minutos ( $n$  igual o superior a 0,7). De esa forma, podemos hacer extrapolaciones no-lineales de la intensidad de un minuto, o de pocos segundos. Por ejemplo, con un índice normal ( $n = 0,5$ ), una lluvia de 60 mm en una hora se

correspondería con una intensidad media máxima de unos 7,7 mm en un minuto, lo cual haciendo el cambio de unidades es 465 mm/h.



**Figura 1.** Comparación entre diferentes acumulaciones, en función del índice de la precipitación,  $n$ , para el ejemplo de una lluvia de 60 mm en una hora

El índice  $n$  ya ha sido empleado anteriormente para describir la distribución temporal de la precipitación extrema en Europa y América (Bernard, 1932; Chow, 1962; Ponce, 1989; Pizarro *et al.*, 2003). Sin embargo el potencial de este índice es mucho mayor, ya que puede describir el comportamiento de cualquier precipitación, incluso de la precipitación moderada y débil. Eso sí, en este artículo nos centraremos en describir el índice  $n$  de la precipitación intensa.

Es sabido que la precipitación intensa no aparece con la misma frecuencia que la precipitación moderada y débil, y por ello es necesario contabilizar el número de días al año en los que llueve con una cierta intensidad (superando un determinado umbral). Si a dicho número lo dividimos por 365 días o 1 año, entonces se convierte en lo que se conoce como *frecuencia de retorno*. Así, la inversa de dicha frecuencia se llama período de retorno, ya que tiene unidades de tiempo (por ejemplo días o años). Para entender esto podemos escoger una precipitación que se produce en promedio 1 día cada dos años, en ese caso el período de retorno sería de 2 años.

Ahora podemos generalizar la expresión 1 para relacionar la acumulación máxima esperada con su período de retorno, en este caso usaremos otro exponente numérico que nombraremos  $m$ . Por lo tanto podemos escribir nuevamente el cociente de dos intensidades en función del cociente entre las duraciones ( $t_o/t$ ) y los períodos de retorno respectivos ( $p/p_o$ ):

$$\frac{I}{I_o} \approx \left( \frac{p}{p_o} \right)^m \left( \frac{t_o}{t} \right)^n \quad (2)$$

Esta expresión matemática es la forma más sencilla de relacionar la intensidad, la duración y la frecuencia de retorno, y pertenece a un conjunto de curvas conocidas como IDF (Bernard, 1932), por sus iniciales (Intensidad-Duración-Frecuencia).

## 2. Registros máximos globales

Se estudiaron los registros de precipitación extrema de 18 estaciones de diferentes zonas del planeta en los que se habían registrado récords globales documentados por Paulhus (1965), Thapliyal-Kulshrestha (1992), Dhar y Arooqui (1973), WMO (1994, 2007), Cervený *et al.* (2007)

Quetelard *et al.* (2009) y NOAA (2010). De los 19 episodios récords vigentes hasta la fecha, 7 se corresponden a episodios registrados en Asia y 6 en la isla de La Reunión (Tabla 3). En éste último caso, los récords se contabilizan desde 1958, y el último de ellos se produjo en 2007, con 4869 mm en 4 días (Quetelard *et al.*, 2009). Eso supone una media aproximada de un récord cada 9 años.

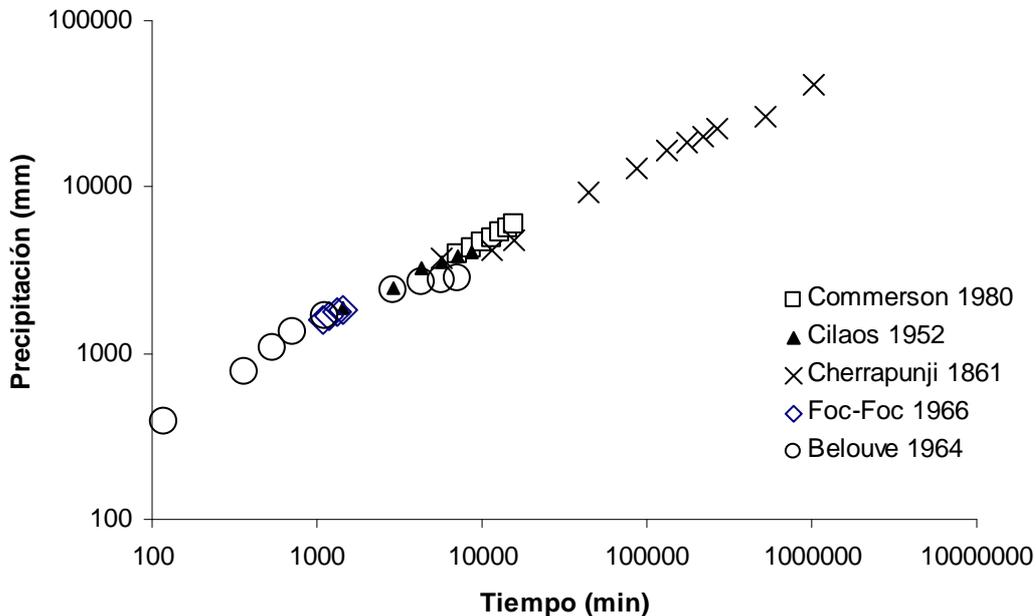
**Tabla 3.** Enumeración de los registros de precipitación extrema documentados a nivel mundial según Paulhus (1965), Dhar y Arooqui (1973), Thapliyal-Kulshrestha (1992), WMO (1994, 2007), Quetelard *et al.* (2009) y NOAA (2010).

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 (China)	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

Se analizó la distribución temporal de la precipitación para los 5 episodios récord en los que se disponen registros completos de resolución horaria o diaria (Figura 2), y se obtuvo que el índice  $n$

es cercano a 0,5 en todos ellos; concretamente la media del índice  $n$  para 5 episodios es de  $0,49 \pm 0,03$ . Dicho valor es compatible con el obtenido para el conjunto de los récords globales según Jennings (1959), Paulhus (1965) y Galmarini (2004), lo cual indica que el comportamiento de la precipitación extrema mundial tiende a presentar un índice normal de precipitación (Tabla 1). 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. 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).

Por otro lado, si nos fijamos en la intensidad media máxima de cada récord (dividiendo la acumulación máxima entre el tiempo), parece razonable que el 1 de agosto de 1977, en Muduocaidang (Mongolia interior, China), se registrasen más de 840 mm en 6h (Tabla 2), 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  $n = 0$ . 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. Por ejemplo, suponiendo un índice bajo de 0,3, según la expresión 1 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.

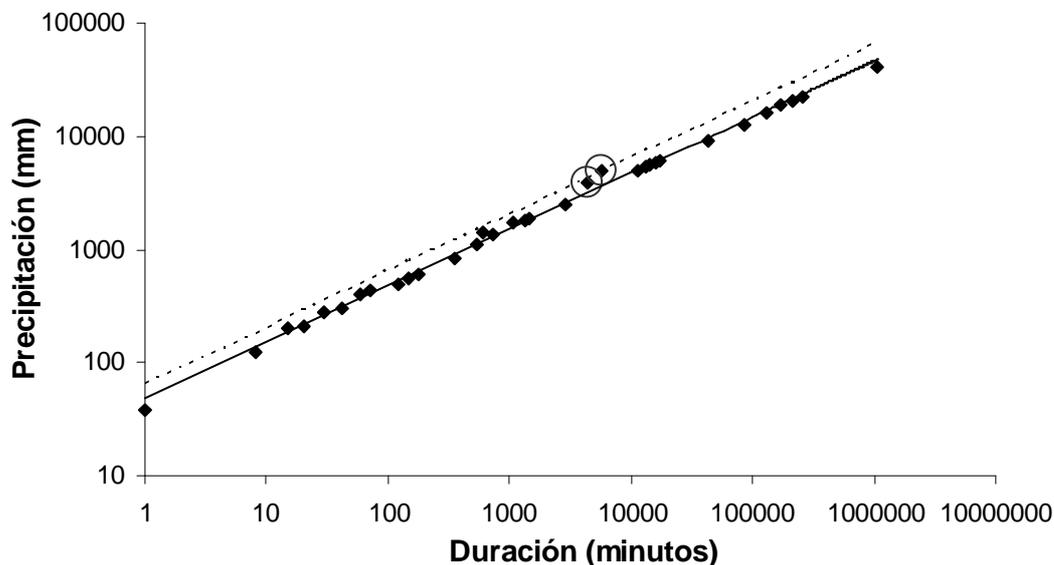


**Figura 2.** Distribución temporal de cinco récords: con  $n = 0,49 \pm 0,02$  ajustada para la precipitación registrada en Foc-Foc (7-8/01/1966, La Reunión);  $n = 0,53 \pm 0,02$  para Commerson (16-27/01/1980, La Reunión);  $n = 0,45 \pm 0,02$  para Cilaos (15-16/03/1952, Reunión);  $n = 0,49 \pm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

El concepto de lluvias extremas se ha relacionado a menudo con tormentas intensas y lluvias persistentes. Según la Figura 2, cabría esperar un índice  $n$  cercano a 1 para precipitaciones de corta duración, de tal modo que acumularse 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. Sin embargo se ha observado un

índice  $n$  muy próximo a 0,5 para las precipitaciones globales más extremas (Figura 2). Dicho valor implica la máxima eficiencia de la precipitación, es decir, aquella que combina perfectamente la génesis convectiva y la advectiva. 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.

Por otro lado, aplicando la expresión 1 para el conjunto de los récords, se actualizó la curva de extremos globales incorporando los registros extremos de 2007. Concretamente se obtuvo que la acumulación máxima global presenta un índice  $n = 0,497 \pm 0,010$  y una intensidad típica 49 mm/min durante un minuto. Sin embargo, el récord de 2007 se separa de forma significativa del ajuste (Figura 3), 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  $64 \pm 2$  mm en un minuto, lo cual es significativamente diferente del valor ajustado para el conjunto de récords. 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 4), 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 3.** Comparación de todos entre los récords mundiales de precipitación (puntos) y el registro de 2007 en Commerson (La Reunión) correspondiente a 3929 mm en 3 días 4869 mm en 4 días (señalado con círculos). La curva ajustada se corresponde, según la expresión 6, con  $P_o = 49 \pm 2$  mm y  $n = 0,497 \pm 0,010$ , con  $R^2 = 0,996$ .

**Tabla 4.** Detalle de los récords según la precipitación máxima en un minuto,  $P_o'$ , 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)	$P_o'$ (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

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.

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 (Tabla 3), 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.

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, ya que ambas probabilidades parecen independientes (Tabla 3). Para comparar las diferentes duraciones, es necesario suponer la aproximación de que todos los récords globales tienen una intensidad similar, del orden de 49 mm en un minuto. De ese modo, las distintas acumulaciones totales de los récords, se entienden como mayoritariamente debidas a la diferente duración.

Además, debido a la independencia entre ambas probabilidades, es necesario referirnos a dos estimaciones diferentes del período de retorno. Por lo tanto, el tiempo de retorno total esperado para una precipitación extrema de cierta duración  $t$ , vendrá dado por la combinación entre el

período de retorno de la intensidad y el período de retorno de la duración (mediante una operación matemática conocida como media geométrica). De ese modo, se estimó el período de retorno para el episodio extremo de 2007 en Commerson (La Reunión), y se obtuvo que es de  $100 \pm 20$  años para el conjunto de las 18 estaciones analizadas (con un valor de  $m = 0,12$ ); es decir, dicho período es aproximadamente de la misma longitud que el período analizado. 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.

### 3. Península Ibérica

Al caracterizar las precipitaciones máximas globales hemos visto que éstas siguen un patrón normal ( $n = 0,5$ ) que combina una máxima eficiencia entre el origen convectivo ( $n$  elevado) y el origen advectivo ( $n$  bajo). La pregunta que nos hicimos a continuación fue sobre qué características generales tendrían las precipitaciones intensas en la Península Ibérica. Para ello se empleó el mismo modelo de distribución temporal de las Intensidades Medias Máximas.

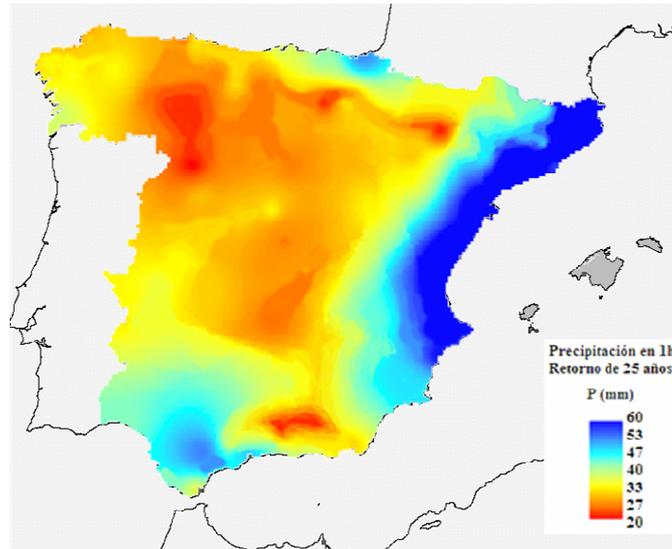
Para esta parte del estudio se tomaron los datos de 67 estaciones de la red de pluviógrafos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2003) y se ajustaron a las curvas de Intensidad Media Máxima (IMM), de tal modo que se obtuvieron los índices  $n$  y  $m$  correspondientes.

Se observó que los promedios de los índices para el conjunto de las estaciones sugieren que la variabilidad de éstos es débil a lo largo del territorio analizado, por lo que en primera aproximación podríamos tomar los dos índices como constantes para todo el territorio. En ese caso, las precipitaciones extremas quedarían caracterizadas principalmente por la intensidad de referencia de cada estación, para un mismo tiempo y período de retorno.

Sin embargo, si nos fijamos en los valores para cada una de las estaciones, el índice  $n$  varía bastante de una estación a otra, por lo que en general no lo consideraremos constante, sino que diremos que depende de las estaciones consideradas. El valor del índice  $m$  presenta muy poca variabilidad entre las localidades consideradas, por lo que podremos considerar que el valor promedio  $m = 0,24 \pm 0,03$  es una constante para nuestro territorio.

Por otro lado, no se observó ningún patrón que establezca que el extremo del régimen pluviométrico tienda a desplazar su tipología hacia la convectividad ( $n$  elevado) o la advectividad ( $n$  bajo), sino que dichas propiedades responden únicamente de la dominación estadística de cada clima local. Por consiguiente, cualquier posible diferencia climática respecto al índice medio  $n_0$ , representa una anomalía, por definición, y por tanto supondrá una variación climática local, en base probablemente al régimen de vientos, ya que ése es el patrón principal de la *advectividad*.

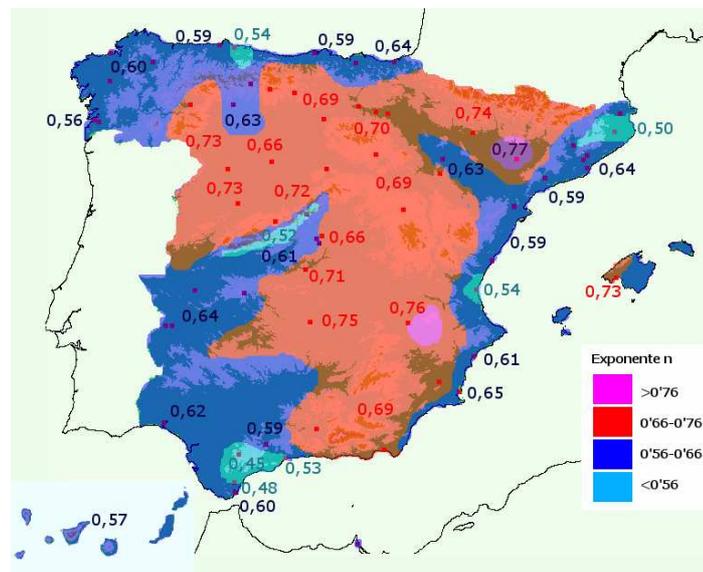
Por lo tanto, ajustando la fórmula 2 a los datos de las 67 estaciones, podemos definir una intensidad media máxima de duración igual a una hora y con un período de retorno de 25 años, que representamos en la Figura 4.



**Figura 4.** Precipitación máxima en una hora con un período de retorno puntual de 25 años, a partir de las curvas IDF de 67 estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología.

En la Península Ibérica podemos distinguir diferentes zonas asociadas a los climas de España, destacando el este y nordeste peninsular con intensidades de referencia cercanas a 60 mm/1h, y en el otro extremo encontramos Sierra Nevada y Zamora con valores cercanos a los 20 mm/1h.

Por otro lado, si representamos geográficamente el índice  $n$  para la Península Ibérica, obtenemos el mapa de la Figura 5.



**Figura 5.** Distribución de los climas con lluvias máximas *persistentes* (azul) y *antipersistentes* (rojo), a partir del exponente  $n$  que ajusta las curvas IDF de 67 estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (2003).

Las curvas IDF representan distribuciones temporales de “precipitaciones máximas” en función del período de retorno, curvas que a su vez se relacionan entre sí como curvas IMM; así, cuanto menor es el exponente  $n$  de la IMM asociada, las precipitaciones máximas se obtienen más por persistencia que por intensidad, mientras que para índices  $n$  grandes, las precipitaciones máximas se obtienen más por intensidad que por persistencia. Este juego entre la persistencia y la intensidad de las “precipitaciones máximas” se refleja en el clima, de tal modo que en general podemos distinguir dos grandes grupos:

- A- Los climas cuyas precipitaciones máximas están dominadas por la advección marítima (corriente zonal, meridional y antizonal) presentan un índice  $n$  más bajo, indicando una mayor persistencia de las intensidades más altas. Podemos distinguir aproximadamente tres grupos: mitad oeste (zonal), litoral cantábrico (meridional) y litoral mediterráneo (antizonal). En el litoral mediterráneo encontramos tres zonas con especial persistencia: golfo de Valencia, Gerona y Málaga, las tres dominadas por vientos de levante. En el litoral cantábrico encontramos una zona con índice  $n$  muy bajo, al este de Asturias, que se corresponde con vientos del norte. Y por último, en la franja atlántica encontramos una zona muy importante, el Sistema Central, que presenta una importante persistencia de la lluvia con los vientos del sur de los típicos frentes atlánticos.
- B- Los climas cuyas precipitaciones máximas están dominadas por convección (climas del interior) presentan índices más altos indicando una menor duración de las precipitaciones máximas. En este caso encontramos dos grandes áreas: el interior del este y el interior del norte peninsular. Así mismo cabe destacar que en el sur de los Pirineos, y en el noreste de la Cordillera Subbética encontramos dos zonas con un índice  $n$  muy elevado que posiblemente se deba a la escasa presencia de persistencia pluviométrica, al menos durante las precipitaciones máximas.

Sin embargo, disponemos de pocos datos para poder analizar tanto la coherencia espacial por proximidad y similitud como para poder caracterizar de forma detallada a todas las regiones, donde ahora no hay datos (Pirineos, Sistema Ibérico, etc.).

#### 4. Sur de Valencia – Norte de Alicante

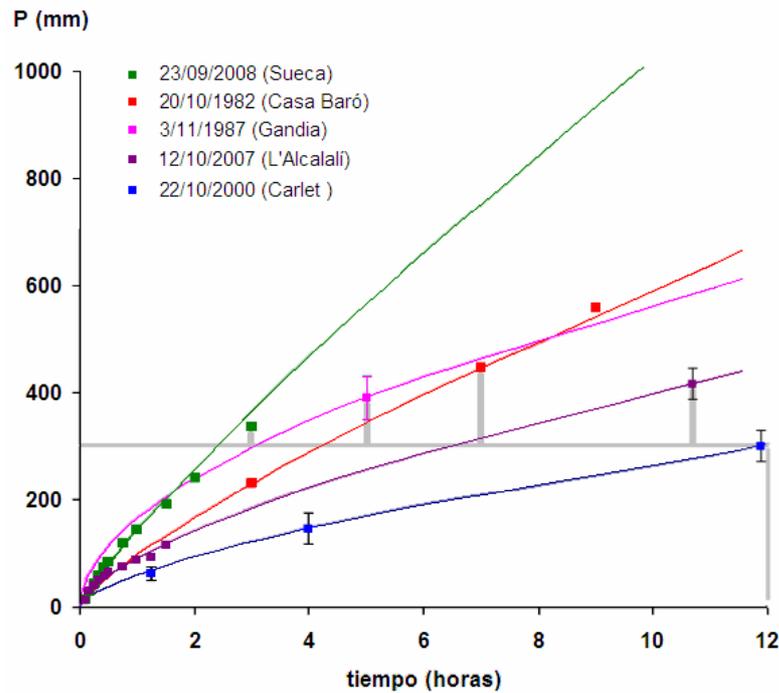
Después de caracterizar el índice  $n$  para la Península Ibérica, nos centramos en estudiar la zona con mayores registros de precipitación extrema, es decir, el litoral mediterráneo. En concreto decidimos estudiar el Sur de Valencia y el Norte de Alicante por aglutinar la mayor parte de los eventos con acumulaciones extremas (Pérez Cueva, 1983; Témez y Mateos, 1993; Armengot, 1994; Creus, 1995; Font Tullot, 2000). Se buscaron los episodios más importantes de los últimos 30 años y se encontró que en al menos 5 episodios se registraron valores que superaron el umbral de 300 mm en 12h (Tabla 5). Las precipitaciones extraordinarias en el País Valenciano presentaron dificultades durante los registros, tanto las relacionadas con la limitada capacidad de los pluviómetros (que se desbordaron en diferentes ocasiones) como por la falta de datos sobre la distribución temporal. Concretamente disponemos de 49 valores, siendo sólo 3 los datos para el registro de Gandía de 1987 y 4 datos para el registro de Casa del Baró de 1982 (Cortes de Pallàs, Valencia).

**Tabla 5.** Precipitaciones máximas ( $P_{max}$ ) que superaron el umbral de 300 mm en 12h, y duración efectiva ( $t_{ef}$ ). Los valores que aparecen en cursiva\* son estimaciones con un error relativo del 10% de la precipitación máxima puntual de dos episodios extremos (Font Tullot, 2000; Témez y Mateos, 1993; y Pérez Cueva y Armengot, 1983).

Fecha	Estación	$P_{max}$ (mm)	Duración (h)
20/10/1982	Casa del Baró	975*	24
03/11/1987	Gandia	1000*	30
22/10/2000	Carlet	438	24
12/10/2007	L'Alcalalí	416	11
23/09/2008	Sueca	337	3

Las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia obtenidas (Figura 4) presentan un índice  $n$  que en general se encuentra entre 0,35 y 0,42, exceptuando el caso de Sueca de 2008, en el que encontramos un  $n = 0,14$ , lo que nos indica que se trataría de una tipología de precipitación totalmente diferente al resto. Otra característica a destacar es que el  $n$  medio obtenido para dicha área de estudio, sin contar el caso de Sueca, es aproximadamente 0,37, el cual es

considerablemente menor al índice  $n$  climático de lluvias extremas de Valencia capital, que se encuentra entorno a 0,54.



**Figura 6.** Ajuste con curvas IMM de los 5 registros más importantes en las cuencas del Sur de Valencia y extremo Norte de Alicante, que han superado el umbral de al menos 300 mm en menos de 12h. De los dichos episodios analizados sólo se disponían 49 datos.

A partir de los datos de la Figura 6 puede estimarse que el valor medio de acumulación máxima en una hora es de unos 80 mm. El índice  $n$  medio teniendo en cuenta el caso de Sueca es de unos  $0,3 \pm 0,1$ . Con eso se estima que para 12 horas, la acumulación media es de unos 450 mm, por lo tanto la intensidad media máxima es el cociente  $450\text{mm}/12\text{h}$ .

Con esos datos podemos escribir una curva representativa de las precipitaciones intensas del País Valenciano. Por lo tanto, tomando el valor del índice del período de retorno,  $m = 0,24$ , que hemos estimado como primera aproximación para la Península Ibérica, obtenemos la siguiente curva:

$$I = 450\text{mm}/12\text{h} \left( \frac{\rho}{6a} \right)^{0,24} \left( \frac{12\text{h}}{t} \right)^{0,30 \pm 0,10} \quad (3)$$

donde  $\rho$  es el período de retorno en años y  $t$  es el tiempo en horas. Puesto que se trata de una intensidad media en un tiempo  $t$ , podemos estimar la acumulación total en dicho tiempo multiplicando simplemente por el tiempo  $t$ . Además, a partir de la expresión 3 obtenemos los retornos para cada uno de los casos de estudio (Tabla 5), en relación a la frecuencia con la que se registran los extremos en el conjunto de las estaciones estudiadas.

**Tabla 6.** Registros históricos y período de retorno asociada a la acumulación de precipitación para un tiempo efectivo ( $t_{ef}$ ).

Fecha	Estación	$I_{1h}$	$n$	$P_{max}$ (mm)	$t_{ef}$ (h)	$\rho_{ef}$ (años)
20/10/1982	Casas del Baró	140	0,37	975	21,8	36
03/11/1987	Gandia	154	0,42	1000	26,3	32
22/10/2000	Carlet	60	0,35	532	28,7	16
12/10/2007	Alcalalí	90	0,35	440	11,5	25
23/09/2008	Sueca	142	0,14	350	2,9	53

En la Tabla 6 encontramos la intensidad media máxima esperada para una hora ( $I_{1h}$ ), el índice  $n$  del evento, la acumulación total ( $P_{max}$ ) y el tiempo efectivo,  $t_{ef}$ , que es la duración que tendría dicha

lluvia si se ajustara perfectamente a la curva matemática. Así por ejemplo en el episodio de 2008, consta que en diferentes estaciones de Sueca se registraron hasta 326 mm en 3 horas (Vázquez, 2008), mientras que en otras estaciones se midieron hasta 365 mm en 8 horas (SAIH, Confederación Hidrográfica del Júcar). En ese caso el tiempo efectivo es ligeramente inferior a la duración real en algunas estaciones.

## 5. Conclusiones

El índice  $n$  es un número adimensional que puede emplearse para describir el comportamiento de la precipitación en función del tiempo. Dicho número está relacionado con las curvas de Intensidad Media Máxima (IMM), y toma valores entre 0 y 1. A grandes rasgos, podemos diferenciar entre 3 tipologías de precipitación: aquella que presenta una acumulación máxima en poco tiempo y luego de forma cada vez más relajada ( $n$  alto), aquella que se acumula de forma constante ( $n$  bajo) y aquella que se acumula de forma normal ( $n$  intermedio). El primer grupo suele relacionarse con las tormentas, que en general alcanzan un máximo de precipitación en poco tiempo, aunque su duración sea prolongada. El segundo caso puede asociarse a la precipitación estratiforme o de frentes, o bien a algún sistema de precipitaciones perfectamente estacionario. Y el último grupo se correspondería con sistemas que combinan la precipitación de origen convectivo y estratiforme.

Después de analizar cada uno de los extremos mundiales de precipitación, se observó que en general satisfacen un índice  $n$  muy cercano a 0,5, lo cual hace pensar que presentan una perfecta eficiencia entre convección y advección. Además, se observa que en cierto modo los récords de duración superior engloban los de duración inferior, ya que la curva de IMM es casi idéntica en todos ellos (la precipitación equivalente en un minuto, que es aproximadamente 50 mm).

Para las 18 estaciones mundiales que han registrado los récords, se estima que cada año puedan superarse los 34 mm en un minuto (nótese que a partir del índice  $n$  podemos calcular para otros tiempos). Hasta la fecha, el valor más elevado que se estima se ha registrado en 2007 en Commerson (La Reunión) es de unos 64 mm en un minuto.

En la Península Ibérica se estudiaron 67 pluviógrafos y se obtuvo un índice  $n$  tal que en la mayoría de los casos era superior a 0,5. Esto nos indica que el carácter de las precipitaciones máximas en nuestro territorio es principalmente convectivo. No obstante, se observa cierta diferencia entre las zonas dominadas por la advección marítima y las zonas que se ven menos afectadas por éstas:

- Los climas cuyas precipitaciones máximas están dominadas por la advección marítima presentan un índice  $n$  más bajo (de 0,45 a 0,66), indicando una mayor persistencia de las intensidades más altas. Podemos distinguir aproximadamente tres grupos: mitad oeste (zonal), litoral cantábrico (lateral) y litoral mediterráneo (antizonal).
- Los climas cuyas precipitaciones máximas están dominadas por convección (climas del interior) presentan índices más altos (de 0,67 a 0,77) indicando una menor extensión temporal de las precipitaciones máximas.

Por lo tanto, por las características climáticas del índice  $n$  asociado a la extremidad pluviométrica local, cualquier diferencia significativa respecto al índice medio  $n_{med}$  será entendida como una anomalía, es decir, una variabilidad interna o bien variación climática local, si persistiese durante muchas décadas.

En cuanto al análisis específico de la zona del Sur de Valencia y Norte de Alicante y se observó que la curva de Intensidad Media Máxima se ajusta bastante bien de forma conjunta para los últimos episodios que superaron los 300 mm en 12h, exceptuando el caso de Sueca del 23 de septiembre de 2008. Ese episodio presentó una elevada persistencia ( $n$  inferior a 0,2), mientras que el resto de episodios presentaron un índice  $n$  entre 0,3 y 0,5.

## 6. Agradecimientos

Este estudio fue llevado a cabo gracias a la colaboración entre la Delegación Territorial en Valencia de la Agencia Estatal de Meteorología y el Departament de Física de la Terra i Termodinàmica de la Universitat de València. Durante el estudio, Roberto Moncho fue beneficiario de la beca Iñaki Goenaga de la Fundación Centros Tecnológicos en AZTI-Tecnalia y del Premio Estatal de Meteorología Eduard Fontserè, concedido por la Asociación Catalana de Meteorología y la Agencia Estatal de Meteorología. Cabe agradecer también la colaboración y apoyo de Fernando Belda, José Ángel Núñez y Rafael Armengot (AEMET), y a Vicente Caselles (UV), por la codirección del trabajo que constituye una parte de la tesis.

## 7. Bibliografía

- AEMET (2003): Estructura temporal de la precipitación, AEMET, Madrid, 1 disco compacto; 12 cm. D. L. M. 53200-03. ISBN 84-8320-258-1.
- 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.
- BERNARD, M.M. (1932): “Formulas for rainfall intensities of long durations”. Trans. ASCE, 96: 592-624.
- CERVENY, R.S.; LAWRIE J.; EDWARDS, R.; LANDSEA C. (2007): “Extreme Weather Records: Compilation, Adjudication and Publication”. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 88 (6): 853-860.
- CHOW, V. T. (1962): Hydrologic determination of waterway areas for drainage structures in small drainage basins. Bulletin No. 462, Engrg. Experimental Station, Univ. of Illinois, Urbana, Ill.
- CREUS NOVAU, J. (1995): *Situaciones de riesgo climático en España*. Instituto Pirenaico de Ecología, pp. 117-128.
- DHAR, O.N.; AROOQUI, S.M.T. (1973): “A study of rainfalls recorded at the Cherrapunji observatory”. *Hydrological Sciences Journal*, 18 (4): 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.
- FONT TULLOT, I. (2000): “Climatología de España y Portugal”. Ediciones Universidad de Salamanca, segunda edición, 422 pp. Primera edición en 1983, Instituto Nacional de Meteorología, Madrid, 296 pp.
- GALMARINI, S.; STEYN, D. G.; AINSLIE, B. (2004): “The scaling law relating world point-rainfall records to duration”. *International Journal of Climatology*, 24: 533-546.
- JENNINGS, A. H. (1950): “World’s greatest observed point rainfall”. *Monthly Weather Review*, 78, pp. 4-5.

- 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*, Ponencias Técnicas, 1, Alzira.
- 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 (2009): “Distribución espacio-temporal de la precipitación intensa. Aplicación para el sur de Valencia y norte de Alicante”. Premio Estatal de Meteorología Eduard Fontserè. 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](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): 331-335.
- PÉREZ CUEVA, A.J. (1983): “Precipitaciones extraordinarias en España peninsular”. *Agricultura y Sociedad*, 28: 189-203.
- PIZARRO, R.; ABARZA A.; FARIÁS, C.; JORDÁN C. (2003): “Construcción de Curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) en zonas semiáridas de Chile Central”. *Actas del XII Congreso Forestal Mundial*, Québec (Canadá).
- PONCE, V.M. (1989). “Engineering Hydrology. Principles and Practices”, Prentice Hall, primera edición. New Jersey, USA, 640 pp.
- 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*, 90 (5): 603–608.
- THAPLIYAL V and KULSHERSTHA M. (1992): “Which is the rainiest place in the world”, *Mausam*, 43(3): 331-332.
- 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/>).
- VÁZQUEZ, R. (2008): “23 september 2008, abundant rainfall in the Peninsula Iberian”. *Eumetrain Wiki*, ZentralAnstalt für Meteorologie und Geodynamik (web).