

¿Está aumentando la frecuencia o la intensidad de las precipitaciones extremas en el Mediterráneo?

Peio ORIA IRIARTE

Delegación de la Agencia Estatal de Meteorología en Navarra
poriai@aemet.es

Resumen: Tomando como base los datos de precipitación diaria en un elevado número de estaciones meteorológicas ubicadas en el litoral mediterráneo y Baleares y que presentan un registro suficientemente completo y homogéneo durante las últimas décadas, se muestran algunos resultados relativos a la distribución de las precipitaciones extremas a escala diaria. Se emplea un enfoque estadístico para el análisis de los datos y se calculan funciones de densidad de probabilidad (PDF) que permiten concluir que los episodios más extremos (en torno a los percentiles 98 y 99) están aumentando su probabilidad de ocurrencia.

Palabras clave: extremos, percentiles, función de densidad de probabilidad, PDF, lluvias torrenciales, temporales mediterráneos.

INTRODUCCIÓN

El clima mediterráneo se caracteriza por una marcada irregularidad de sus precipitaciones, tanto anuales como diarias, lo cual se ve reflejado en una fuerte variabilidad interanual e intranual. Ello trae consigo que precipitaciones máximas diarias puedan superar con creces las medias mensuales, sobre todo en verano y otoño, o incluso la precipitación media de todo un año en uno o dos días consecutivos, especialmente si se produce un acercamiento de una dana (acrónimo de «depresión aislada en niveles altos») por el sur de la Península o se da una situación protagonizada por una borrasca mediterránea. Con frecuencia los días de máximas precipitaciones van asociados a riadas e inundaciones en algunas zonas. Otra singularidad es el alto porcentaje anual de precipitaciones protagonizadas por chubascos y temporales, mayor que en cualquier otra zona de la Península. Por otro lado los valores anuales de escorrentía asociados a precipitaciones fuertes o abundantes son mayores que en otros climas. Lo anterior se explica en buena medida debido a que se trata de una región caracterizada por una compleja orografía, por una gran variabilidad climática y por estar situada en una zona de transición dinámica entre la circulación subtropical y la de climas más templados, además de la influencia y características de una gran masa de agua como es el mar Mediterráneo (MERINO y otros, 2016; HERTIG y otros, 2014).

Los últimos años se ha asistido a eventos extremos de precipitación debido fundamentalmente al efecto que han provocado profundas danas en el entorno del Mediterráneo. Un caso reciente fue protagonizado por la borrasca Gloria en enero de 2020 (CASANOVA y CASTRO, 2020). Si bien es cierto que las precipitaciones extremas y las consecuentes inundaciones en cauces y torrentes son fenómenos intrínsecamente ligados al mundo mediterráneo (LLASAT y otros, 2010), sobre todo en otoño, y siendo los años 80 del pasado siglo especialmente trágicos en este sentido, es posible que la probabilidad de ocurrencia e intensidad de estos fenómenos estén sufriendo algunos cambios.

Algunos estudios apuntan a que la distribución de las precipitaciones diarias observadas por encima del percentil 95 (días muy húmedos) en el Mediterráneo occidental podría mostrar tendencias decrecientes en las últimas décadas, tanto en frecuencia como en intensidad (COHEN y otros, 2014). En otras referencias (SERRANO-NOTIVOLI y otros, 2018; SERRANO-NOTIVOLI y otros, 2017) se han analizado distintos índices definidos por el Equipo Mixto de Expertos sobre Detección e Índices del Cambio Climático (ETCCDI) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC) de la OMM (CCI/CLIVAR/JCOMM: 4.º Informe del grupo de expertos, 2011). Estos indicadores se

usan para la monitorización y el análisis de tendencias de cambio climático (DONAT y otros, 2013). En cualquier caso, en las anteriores y otras referencias consultadas los resultados varían de forma importante según la región considerada, la base de datos y el método o técnica empleada (MERINO y otros, 2016). Por otro lado, en general, no se han explorado las tendencias de percentiles de precipitación en torno al 99 (lo que se denominan eventos de precipitación extrema en el contexto del presente trabajo) y además la mayoría de estudios no cubre los episodios extremos de la década recién finalizada. Otra de las limitaciones proviene de que, en el caso de series de datos en rejilla, puede que el número de estaciones relativas a cada punto de rejilla varíe con el tiempo y que el promedio de extremos en un punto de rejilla pueda reducir o suavizar señales de cambio (MYHRE y otros, 2019).

En cuanto a las proyecciones futuras en un contexto de cambio climático debido al forzamiento antropogénico, varios modelos climáticos ofrecen resultados que muestran reducciones de los extremos de precipitación en buena parte del Mediterráneo. Sin embargo, es frecuente que las proyecciones estén basadas en modelos climáticos globales o en sus regionalizaciones, que no siempre cuentan con suficiente precisión para la proyección de la precipitación extrema. Por tanto, los resultados son dispares y muy dependientes de distintos aspectos, como por ejemplo la estación o época del año considerada, la métrica elegida, la importancia relativa de los extremos respecto a las cantidades totales, la complejidad y escala del modelo climático empleado (global o regional, aproximación multimodelo, *downscaling* estadístico, etc.), diferencias regionales, o la consideración de fenómenos extremos en función de la intensidad de la precipitación en escalas muy cortas (subdiarias) o de la persistencia en escalas de varios días. En la introducción de HERTIG y otros, 2016 y las referencias citadas en la misma puede encontrarse más información. Probablemente sean necesarios nuevos métodos para la proyección de la precipitación extrema. Un ejemplo lo ofrecen las técnicas de aprendizaje automático o *machine learning* (HU, 2019). Pese a las limitaciones anteriores, un reciente estudio que analiza precipitaciones extremas en la península ibérica modelizadas bajo escenarios RCP 8.5 para mediados y finales de siglo, muestra resultados congruentes con un elevado impacto derivado, por un lado, de una gran desertificación por ausencia de lluvias y por otro, de una mayor ocurrencia de precipitaciones torrenciales, especialmente durante otoño e invierno en el Mediterráneo y el valle del Ebro (CARDOSO PEREIRA y otros, 2020).

En cuanto a las situaciones atmosféricas ligadas a eventos de precipitación extrema en el este de la Península, el patrón más importante está caracterizado por la presencia de danas y un transporte de humedad procedente del este (MERINO y otros, 2016). Por otro lado hay indicios de que las danas se producen cada vez con mayor frecuencia en ambos hemisferios a lo largo del periodo 1960-2017 (MUÑOZ y otros, 2019). Además, parece que el aumento de la frecuencia de eventos de bloqueo atmosférico sobre Europa y el Atlántico podría estar asociado con esto último. Dadas las enormes repercusiones e impactos sobre la sociedad que han supuesto los últimos temporales de precipitaciones extremas en el Mediterráneo este es un tema relevante a investigar en el futuro. Desde hace años está siendo así mismo estudiada, no sin cierta controversia, la relación entre el calentamiento ártico y la amplitud y persistencia de determinados patrones atmosféricos en latitudes medias como por ejemplo los patrones de bloqueo (BLACKPORT y SCREEN, 2020; FRANCIS y otros, 2012; SCREEN y otros, 2018).

Otro de los fenómenos atmosféricos relacionados directamente con precipitaciones especialmente intensas y/o persistentes es el de los ríos atmosféricos. Su asociación con eventos extremos de lluvia en la península ibérica ha sido ya abordado en algunas investigaciones (RAMOS y TRIGO, 2015).

En la presente contribución se analiza el comportamiento estadístico de las precipitaciones diarias más extremas registradas en las provincias mediterráneas peninsulares (Málaga, Granada, Almería, Murcia, Alicante, Valencia, Castellón, Tarragona, Barcelona y Girona) así como en las Illes Balears. Para la obtención de los datos y la posterior construcción de las series climatológicas, AEMET cuenta con distintas redes de observación en superficie como son la de estaciones meteorológicas automáticas, la de observatorios sinópticos o la red climatológica secundaria, atendida por colaboradores. En este estudio se han seleccionado inicialmente un total de 219 estaciones pertenecientes a las redes principal y secundaria de AEMET ubicadas en las provincias anteriormente citadas. El criterio empleado para

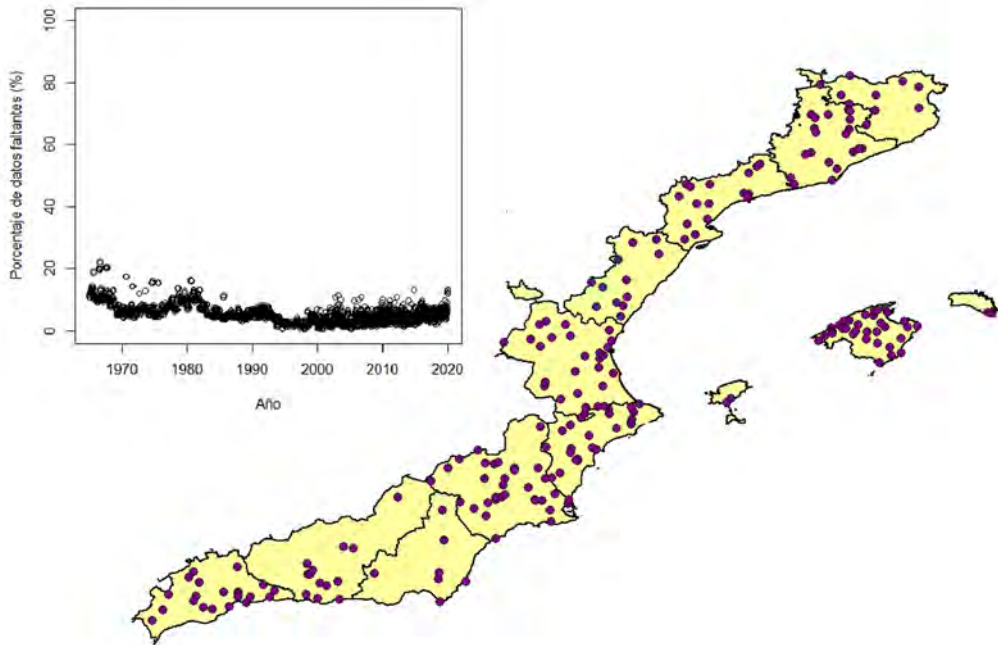


Figura 1. Los puntos morados representan las estaciones empleadas en las provincias mediterráneas. En la parte superior izquierda, el porcentaje de estaciones sin dato para el conjunto de los días del periodo.

la elección de estaciones es que su fecha de inicio en la toma de datos sea anterior o igual a 1965, sigan funcionando en 2020 y posean más de 600 meses con datos. Las series de precipitación diaria para cada una de las estaciones se han sometido a un control de calidad. En primer lugar, se han considerado únicamente series con dato de precipitación en un 90 % de los días del periodo completo (20 119 días). En segundo lugar, la homogeneidad de las estaciones a escala diaria se ha comprobado mediante la aplicación sucesiva de tres test estadísticos siguiendo recomendaciones del Proyecto ECAD (European Climate Assessment & Dataset, <https://www.ecad.eu/>): el test SNH (ALEXANDERSSON, 1986), el test de Buishand (BUISHAND, 1982) y el test de Pettitt (PETTITT, 1979). Las estaciones que se consideran homogéneas son aquellas que rechazan la hipótesis nula en el intervalo de confianza del 95 % en dos de los tres test aplicados. Después del control de calidad, un total de 160 de las 219 estaciones cumplen los criterios anteriores sobre la completitud y la homogeneidad de sus series.

En la figura 1 se muestra la ubicación de las estaciones que se emplean en el análisis. En la parte izquierda se representa el porcentaje de días con ausencia de dato sobre el total de las estaciones para los 20 119 días del periodo entre el 1 de enero de 1965 y el 31 de enero de 2020. El número de estaciones sin dato está en general por debajo del 10 % excepto en los primeros 5 años en los que hay un mayor número de días con más datos faltantes. La variable precipitación se ha analizado para la suma sobre las 160 estaciones. Debido a la marcada variabilidad de las lluvias mediterráneas se evita llevar a cabo análisis de tendencias particularizados para estaciones individuales ya que los extremos pueden estar muy condicionados por la aleatoriedad de fenómenos convectivos puntuales y aislados o que se produzcan en escalas muy pequeñas. Por citar un ejemplo, una gran parte de las estaciones presentan el percentil 95 de precipitación diaria en torno a 25-30 mm. Esa es la cantidad que puede asociarse a una tormenta puntual (fuerte), de tal modo que la estadística puede verse afectada por este hecho y producirse marcadas diferencias en zonas cercanas. Por ello el presente análisis analiza la precipitación en conjunto y explora el comportamiento de la suma de las precipitaciones en el extremo de la distribución, en torno al percentil 99.

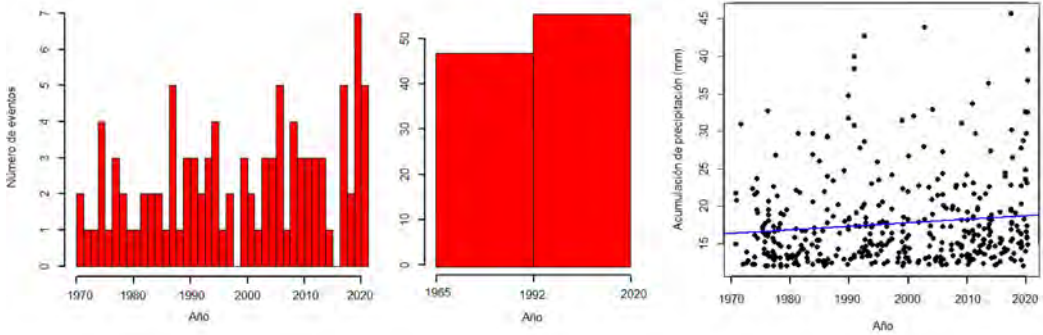


Figura 2. A la izquierda y en el centro, histogramas de precipitación por encima del percentil 99,5 para la precipitación sobre el conjunto de estaciones. A la derecha, la evolución temporal de la precipitación de eventos que superan el percentil 98 junto a una recta de regresión lineal ajustada a los datos.

RESULTADOS

El hecho de contar con un periodo suficientemente largo de datos y un número elevado de estaciones repartidas de forma aproximadamente homogénea (a excepción de casi toda la provincia de Almería y del norte de Castellón, donde no hay estaciones) junto al filtrado que resulta del control de calidad de los datos proporciona, *a priori*, una base fiable para un análisis preliminar de episodios extremos a escala diaria. La variabilidad en la medida de la precipitación relacionada con irregularidades topográficas o variaciones microclimáticas, y que tiene que ver con la ubicación concreta de cada estación, debe quedar camuflada por una densidad de estaciones que caracterizan suficientemente bien los sistemas de precipitación de gran escala espacial (~ 1000 km) y temporal (uno o varios días) y que son precisamente el objeto de este estudio.

En la parte izquierda de la figura 2 se muestra un histograma donde se representa la frecuencia de los episodios que superan el percentil 99,5. Es claro que la mayoría de años registran uno o más eventos. Sin embargo destaca especialmente el número de eventos entre 2015 y 2020 con 3 de los 5 periodos con más eventos. En la parte central de la figura se muestra el histograma con el número de eventos en únicamente dos periodos. El primero de ellos corresponde aproximadamente desde enero de 1965 hasta mediados de 1992 y el segundo desde esta última fecha hasta enero de 2020. En la parte derecha se ilustra la cantidad de precipitación acumulada en las estaciones en los eventos que superan el percentil 98 (dividida por el número de estaciones que presentan dato para el día en cuestión) junto a una recta de regresión lineal ajustada a los datos. La pendiente de la recta se mueve de 16 a 19 mm lo que representa un aumento de casi un 19 % entre 1965 y 2020. El resultado para el p-valor demuestra que la tendencia es estadísticamente significativa en un intervalo de confianza del 95 %. Por tanto no solo ha aumentado la frecuencia de los eventos más extremos sino también la intensidad ya que la cantidad total de precipitación acumulada en los episodios que superan el percentil 98 (así como percentiles superiores) crece considerablemente en el periodo analizado.

Los resultados anteriores pueden presentarse conjuntamente calculando la función de densidad de probabilidad (PDF). En la parte izquierda de la figura 3 se muestra una PDF teórica (MYHRE y otros, 2019). Si se supone que se tienen dos PDF para distintos periodos, uno de referencia y otro para el que se quieren observar los cambios (los dos periodos deben tener la misma duración), para una cierta cantidad de precipitación el desplazamiento entre las dos funciones se puede descomponer entre un aumento de la intensidad (línea azul horizontal) y un incremento en la frecuencia (línea verde vertical). El aumento de la precipitación total por encima de un cierto umbral se observa en el área sombreada en amarillo que combina ambos incrementos. En la parte derecha de la figura se representan las PDF

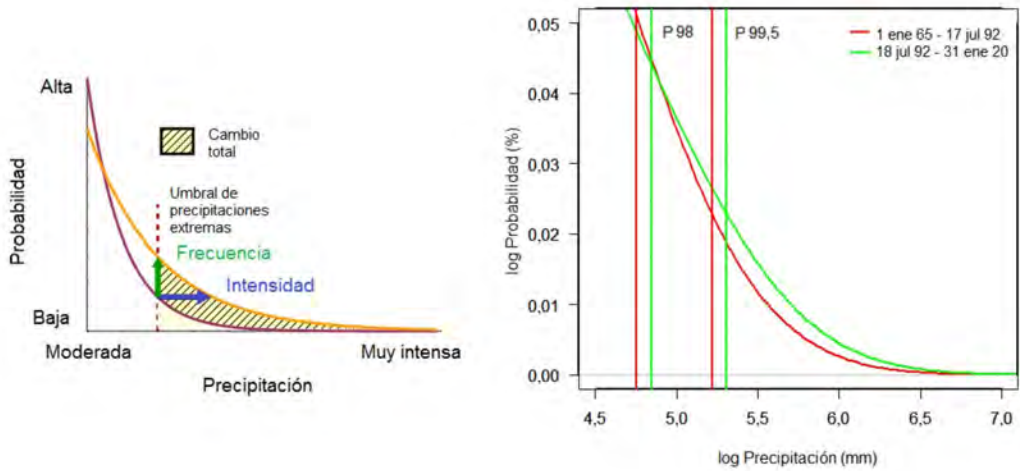


Figura 3. A la izquierda, ilustración esquemática de la función de densidad de probabilidad (PDF) de la precipitación diaria acumulada (adaptada de MYHRE y otros, 2019).

A la derecha, PDF para la suma de las precipitaciones registradas en las estaciones analizadas; se muestran los percentiles 98 y 99,5 para los dos periodos, inicial (en rojo) y final (en verde).

de la suma de las precipitaciones en las 160 estaciones escogidas para dos intervalos temporales que comprenden la primera (rojo) y segunda mitad (verde) del periodo analizado (la división temporal se ha hecho por días del periodo, abarcando cada una de las mitades 10 058 días). Se han tomado logaritmos de la probabilidad y la precipitación para que la visualización sea más clara y únicamente se muestra el extremo de las PDF. Las líneas verticales marcan los percentiles 98 y 99,5 en cada uno de los dos periodos. El aumento del área bajo la curva verde (segundo periodo) para precipitaciones superiores al percentil 98 es notable y puede interpretarse como el incremento de la probabilidad de ocurrencia y de la precipitación acumulada en eventos extremos sobre el conjunto del Mediterráneo español respecto al primer periodo (se vuelve a insistir en que este tipo de eventos no se asocian a fenómenos de reducida escala espacial sino que afectan a un porcentaje elevado de estaciones).

Para demostrar que el resultado anterior es consistente frente al número variable de estaciones que disponen de dato diario se realiza la siguiente prueba: para cada día se disminuye el número de estaciones que cuentan con dato diario en un 20 % adicional a las que realmente presentan ausencia de datos. Esto se lleva a cabo retirando ese 20 % de estaciones de manera aleatoria y un total de 100 veces. Se repiten los cálculos anteriores para la PDF de la media del *ensemble* (conjunto) anterior y se compara el resultado mostrado en la figura 3 con las nuevas PDF correspondientes a los dos periodos. La diferencia en el logaritmo de la probabilidad para los percentiles 99,5 es aproximadamente del 0,5 % para ambos periodos (no se muestra) lo que prueba que la estadística es suficientemente independiente y robusta frente al número de estaciones con dato faltante.

Para tratar de visualizar las posibles diferencias regionales en el comportamiento de las PDF el resultado mostrado en la figura 3 se particulariza tomando un subgrupo de estaciones que pertenecen a distintas provincias (subgrupo 1: Girona y Barcelona; subgrupo 2: Tarragona y Castellón; subgrupo 3: Valencia, Alicante y Murcia; subgrupo 4: Almería, Granada y Málaga; subgrupo 5: Baleares). Las gráficas se muestran en la figura 4. Cataluña y Andalucía son las zonas donde el aumento de la precipitación por encima del percentil 98 es mayor. Sin embargo, en todas las zonas se observa una tendencia creciente por encima del percentil 99,5.

En la tabla 1 se listan las 25 fechas con acumulaciones superiores al percentil 99,9 de precipitación diaria. Es significativo que entre los 25 días entre 1965 y 2020 se encuentren 5 días correspondientes

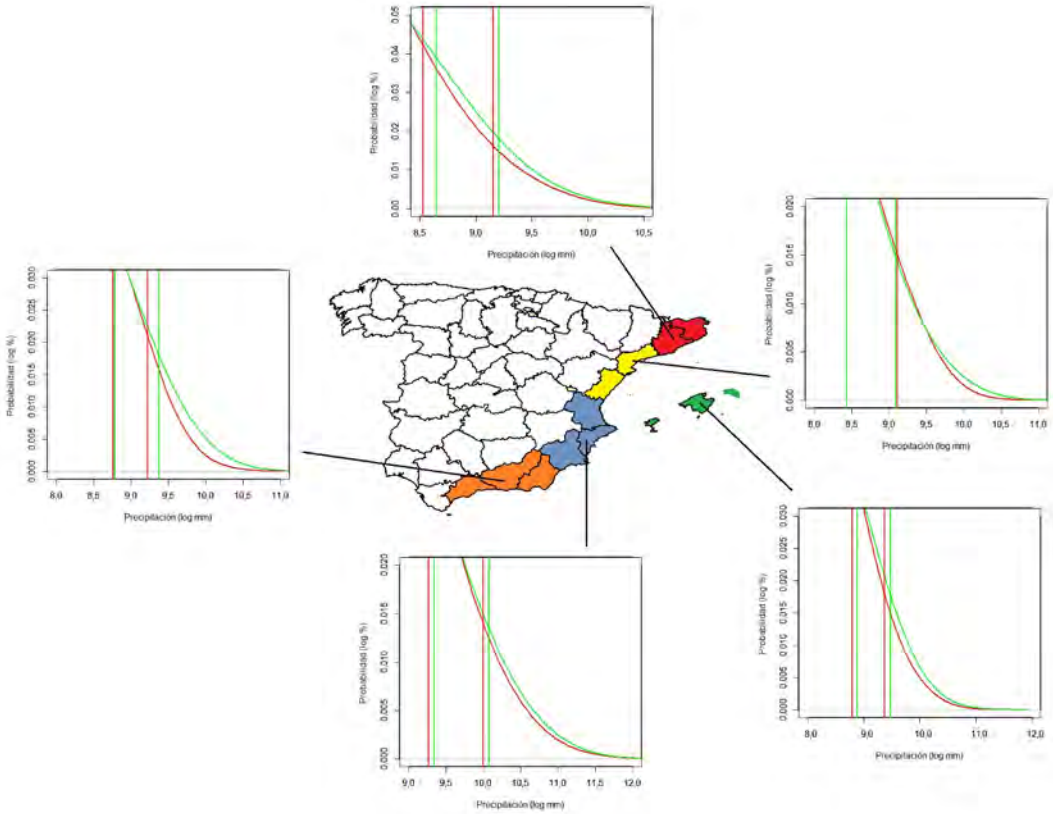


Figura 4. PDF en el primer y segundo periodo particularizadas por zonas.

al periodo entre septiembre de 2019 y enero de 2020. De hecho, la borrasca Gloria, que afectó al litoral mediterráneo y Baleares a finales de enero de 2020, cuenta con 3 de esos días y, en ese sentido, podría considerarse la borrasca mediterránea con una precipitación asociada más extrema. También destaca el elevado número de eventos en lo que va del siglo XXI y la década entre 2010 y 2020 así como la ocurrencia de prácticamente todos ellos entre los meses de septiembre y enero, lo cual no es sorprendente, dentro de un contexto de clima mediterráneo. Así mismo se ha comprobado que prácticamente todos los episodios están asociados a la aproximación de danas por el sur de la Península. Por otro lado el aporte húmedo de origen subtropical y procedente del este es casi siempre un denominador común.

CONCLUSIONES

Las tendencias encontradas en los extremos de las distribuciones de precipitación apuntan a un aumento en frecuencia e intensificación de las situaciones que provocan lluvias muy fuertes o torrenciales y de extensión significativa en el conjunto del Mediterráneo español. El temporal Gloria, acaecido en enero de 2020 (así como su encaje en el contexto histórico de grandes temporales mediterráneos) supone un magnífico ejemplo de un episodio de elevado impacto. Analizados los datos haciendo uso de un método estadístico suficientemente fiable y riguroso se puede afirmar que nunca antes hubo una borrasca con tanta precipitación sobre el conjunto de las estaciones

seleccionadas durante tres días seguidos y nunca antes hubo tres temporales tan intensos y seguidos en el tiempo como los de septiembre y octubre de 2019 además de Gloria (entiéndase que hay que referirse al pasado reciente para el que se dispone de registro instrumental). El papel del cambio climático y su posible relación con el incremento del número de eventos extremos de precipitación en el Mediterráneo es un tema central a investigar en el futuro. En el caso de las regiones francesas recientes estudios revelan tendencias en aumento de este tipo de eventos durante las últimas décadas. Un mayor conocimiento sobre los sistemas que generan las intensas precipitaciones y su relación con alteraciones de otros fenómenos a escala global, como la frecuencia de determinados patrones atmosféricos (bloques, ondas de Rossby, patrones de circulación de determinados números de onda, etc.) parecen clave de cara a la adopción de estrategias de adaptación en multitud de sectores para hacer frente a los impactos de un clima cambiante.

Fecha	Acumulación (mm)	Porcentaje de estaciones sin dato (%)	Ranking
10/10/1966	4826	9	20
06/10/1971	5218	2	12
18/05/1977	4704	4	24
14/01/1980	4710	4	23
29/09/1986	5033	4	15
30/09/1986	5502	4	9
04/10/1987	4893	2	18
03/11/1987	6053	5	6
04/11/1987	6315	5	4
04/09/1989	6782	2	3
11/09/1996	5007	2	17
02/12/1998	5054	5	14
23/10/2000	6994	1	2
07/05/2002	5239	2	11
11/10/2007	4867	8	19
28/09/2009	5310	5	10
03/05/2010	4703	4	25
28/09/2012	5813	1	7
18/12/2016	7264	2	1
19/01/2017	4781	4	21
12/09/2019	5137	6	13
22/10/2019	4714	4	22
19/01/2020	5682	12	8
20/01/2020	6308	12	5
21/01/2020	5032	11	16

Tabla 1. Episodios con acumulaciones superiores al percentil 99,9 de precipitación diaria en el conjunto de estaciones. Se muestra la fecha, la acumulación, el porcentaje de estaciones sin dato y el ranking de los días con mayor precipitación.

REFERENCIAS

- ALEXANDERSSON, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climate*. 6: 661.
- BLACKPORT, R. y SCREEN, J. A. (2020). Insignificant effect of Arctic amplification on the amplitude of midlatitude atmospheric waves. *Science Advances*.
- BUIHAND, T. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*. 58: 11.
- CARDOSO, S., MARTINHO, M.-A., CARVALHO, A. C. y ROCHA, A. (2020). Extreme precipitation events under climate change in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*. 40: 1255-1278.
- CASANOVA, C. y CASTRO, P. (2020). El comportamiento climático del comienzo del año 2020 y los impactos de la Borrasca Gloria en la Península Ibérica y Baleares. Conferencia: 10.^a Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica.
- CCI/CLIVAR/JCOMM: Informe de la cuarta sesión del Equipo Mixto de Expertos sobre Detección e Índices del Cambio Climático (ETCCDI), (2011). Pacific Climate Impacts Consortium, University of Victoria, Victoria, Canada, 23-25.
- COHEN, J., SCREEN, J., FURTADO, J. y otros (2014). Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geosciences* 7, 627-637.
- DONAT, M. G., ALEXANDER, L. V. y YANG, H. (2013). Global Land-Based Datasets for Monitoring Climatic Extremes. *BAMS*.
- FRANCIS, J. A. y VAVRUS, S. J. (2012). Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in midlatitudes. *Geophysical Research Letters*. Vol. 39, L06801.
- HERTIG, E., SEUBERT, S., PAXIAN, A., VOGT, G., PAETH, H. y JACOBET, J. (2014). Statistical modelling of extreme precipitation indices for the Mediterranean area under future climate change. *International Journal of Climatology*. 34: 1132-1156.
- HU, H. (2019). Extreme Precipitation Projections in a Changing Climate. Dissertation.
- LLASAT, M. C., LLASAT-BOTIJA, M., PRAT, M. A., PORCU, F., PRICE, C., MUGNAI, A., LAGOUVARDOS, K., KOTRONI, V., KATSANOS, D., MICHAELIDES, S., YAIR, Y., SAVVIDOU, K. y NICOLAIDES, K. (2010). High-impact floods and flash floods in Mediterranean countries: The FLASH preliminary database. *Advances in Geosciences*, 23, 47-55.
- MERINO, A., FERNÁNDEZ-VAQUERO, M., LÓPEZ, L., FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, S., HERMIDA, L., SÁNCHEZ, J. L. y GARCÍA-ORTEGA, E. (2016). Large-scale patterns of daily precipitation extremes on the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*. 36: 3873-3891.
- MUÑOZ, C., SCHULTZ, D. M. y VAUGHAN, G. (2019). A Midlatitude Climatology and Interannual Variability of 200- and 500-hPa Cut-Off Lows. *Journal of Climate* 33(6).
- MYHRE, G., ALTERSKJÆR, K., STJERN, C. W. y otros (2019). Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Scientific Reports*, 9, 16063.
- PETTITT, A. (1979). A non-parametric approach to the change point problem. *Journal of Applied Statistics*. 28: 126.
- RAMOS, A. M. y TRIGO, R. M. (2015). Daily Precipitation Extreme Events in the Iberian Peninsula and Its Association with Atmospheric Rivers. *American Meteorological Society*.
- SCREEN, J. A., DESER, C., SMITH, D. M., ZHANG, X., BLACKPORT, R., KUSHNER, P. J., OUDAR, T., MCCUSKER, K. E. y SUN, L. (2018). Consistency and discrepancy in the atmospheric response to Arctic sea-ice loss across climate model. *Nature Geoscience, Perspective*.
- SERRANO-NOTIVOLI, R., BEGUERÍA, S., SAZ, M. A. y DE LUIS, M. (2018). Recent trends reveal decreasing intensity of daily precipitation in Spain. *International Journal of Climatology*, 38: 4211-4224.
- SERRANO-NOTIVOLI, R., BEGUERÍA, S., SAZ, M. A., LONGARES, L. A., y DE LUIS, M. (2017). SPREAD: a high-resolution daily gridded precipitation dataset for Spain – an extreme events frequency and intensity overview. *Earth System Science Data*, 9, 721-738.