



**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES
DE ESPAÑA**

Ciencia para la gestión del riesgo de desastre por lluvias extremas

José Manuel Moreno Rodríguez

Académico Numerario

Informe RAC aprobado en sesión plenaria de 29/10/2025

Contenido

Resumen ejecutivo.....	3
1. Presentación	6
2. Danas, lluvias torrenciales e inundaciones	6
3. El riesgo y sus componentes	12
4. Ciencia para la gestión del riesgo de desastre.....	14
5. Ciencia para el futuro	21
6. Gestión del riesgo, exposición y vulnerabilidad	26
7. Discusión.....	31
Agradecimientos	39
Revisión.....	39
Bibliografía	40
Anexo I.....	46

Resumen ejecutivo

La Real Academia de Ciencias (RAC) celebró durante el curso 2024-2025 tres sesiones científicas dedicadas al estudio de los fenómenos hidrometeorológicos de lluvias extremas, motivadas por la catástrofe provocada por la dana de Valencia de ese año. El presente informe recopila y desarrolla la información expuesta en las distintas ponencias, así como en las discusiones mantenidas con los académicos y el público asistente a las sesiones, con el objetivo de ofrecer una visión general de la información científica que sirve de base para la gestión de este tipo de catástrofes. El texto se ha redactado con el propósito de resultar útil tanto a especialistas como a un público más amplio.

La costa mediterránea española ha sufrido históricamente episodios de lluvias torrenciales e inundaciones catastróficas, con registros históricos que se remontan a la época romana. Estos fenómenos están frecuentemente asociados a las danas (depresiones aisladas en niveles altos). Bajo estas situaciones, en otoño, el aire cálido y húmedo del Mediterráneo favorece la formación de nubes convectivas, y el choque de este aire con las montañas del litoral potencia la aparición de lluvias extremas.

La dana del 29 de octubre de 2024 provocó lluvias torrenciales excepcionales, con un registro de 772 mm en 24 horas y 185 mm en una hora, esta última la cifra más alta jamás registrada en España. La inundación resultante causó 236 muertes y pérdidas económicas superiores a 17.000 millones de euros, equivalentes al 1,163 % del PIB español. Hasta un 22 % del PIB autonómico se concentraba en la zona afectada.

La gestión operativa de las emergencias corresponde a las comunidades autónomas. Los responsables de la emergencia reciben información de distintos organismos. La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) facilita predicciones meteorológicas que se basan en modelos numéricos del Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo (CEPPM), del que forma parte, y tienen una fiabilidad predictiva muy alta hasta un plazo de tres días. Estas permiten anticipar, con varios días de antelación, las situaciones de lluvias torrenciales. No obstante, debido a la pequeña escala y a la rápida evolución de las estructuras convectivas asociadas a las danas, la predicción precisa de estos episodios sigue siendo técnicamente compleja.

Cuando se pronostican fenómenos meteorológicos extremos, la AEMET emite avisos tanto a los responsables de la gestión de emergencias como al público en general. Estos avisos se elaboran conforme al código de la red europea Meteoalerta, en el que el nivel rojo indica máximo peligro. La AEMET actualiza sus predicciones y avisos cuatro veces al día.

Las confederaciones hidrográficas disponen de un Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH), que monitoriza en tiempo real las principales variables hidrológicas. Esta información está disponible para los responsables de la gestión de emergencias y para el público en general. Además, cuando se superan determinados umbrales de peligro, el sistema envía automáticamente notificaciones a los responsables de la emergencia.

El Servicio de Gestión de Emergencias Copernicus de la Comisión Europea dispone del Sistema Europeo de Alerta de Inundaciones (EFAS, *European Flood Awareness System*), que predice el riesgo de inundación fluvial. Además, cuenta con un indicador de riesgo de inundaciones repentinas. Esta información está disponible en su página web oficial. Los organismos de cuenca y de gestión de emergencias pueden estar asociados a este servicio.

España cuenta con el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), que ofrece mapas de peligrosidad y riesgo de inundación, útiles para identificar áreas críticas y apoyar la planificación territorial. Esta información está disponible para el público en la página web oficial del sistema.

Para la prevención del riesgo de inundación, se dispone de modelos hidrológicos e hidráulicos que permiten simular con alta fiabilidad la escorrentía, los caudales y la probabilidad de desbordamiento de los cauces, entre otros parámetros hidrológicos. Estos modelos son fundamentales para la ordenación del territorio, la estimación de daños por inundación y la adopción de medidas preventivas, y han servido de base para la elaboración de planes de prevención del riesgo de inundación, como el PATRICOVA de la Comunidad Valenciana. Su incorporación efectiva a los sistemas de alerta temprana resulta prioritaria para mejorar la gestión del riesgo de inundación.

El cambio climático está intensificando el ciclo hidrológico, incrementando el contenido de humedad atmosférica y favoreciendo la aparición de precipitaciones extremas. Además, la reducción de los gradientes térmicos entre el polo y el ecuador podría estar alterando la intensidad de la corriente en chorro y modificando los patrones de circulación general, factores que influyen en la formación de danas. Por otro lado, el calentamiento del mar Mediterráneo, superior al promedio global, potencia fenómenos extremos como las lluvias torrenciales, cuya frecuencia e intensidad se han incrementado significativamente, según diversos estudios de atribución climática.

La gestión del riesgo de inundación comienza con un conocimiento detallado del peligro meteorológico. Las crecidas en grandes ríos permiten activar medidas preventivas con varios días de antelación, mientras que las inundaciones repentinas, cuyos procesos se desarrollan en cuestión de horas, exigen respuestas inmediatas. La gestión de la emergencia requiere una toma de decisiones rápida y la emisión de avisos claros, con instrucciones precisas ante el riesgo inminente. Frente a fenómenos de difícil predicción y alto riesgo, alertar a la población es esencial, incluso cuando la incertidumbre sea alta.

La ordenación territorial y el planeamiento urbano son fundamentales para reducir la exposición y la vulnerabilidad frente al riesgo de inundación, así como para hacer que los entornos sean más permeables y reduzcan el riesgo. Sin embargo, millones de viviendas y diversas instalaciones críticas —hospitales, residencias de mayores o industrias contaminantes— se han construido, incluso en fechas recientes, en zonas inundables. Como consecuencia, en España hay 2,3 millones de viviendas situadas en zonas con riesgo de inundación. Urge revisar los planes de ordenación urbana, reducir el sellado del suelo y considerar el papel de los vehículos en las inundaciones, adoptando medidas para su protección. Cuando la edificación en estas zonas resulta inevitable, existen técnicas que permiten mitigar el riesgo, como lo demuestra el caso del centro comercial Ikea de Alfafar (Valencia).

La vulnerabilidad social, especialmente en el caso de personas mayores o dependientes, requiere atención prioritaria y la implantación de planes de evacuación eficaces. Las viviendas situadas en plantas bajas, sin acceso a niveles superiores o a azoteas, son un grave peligro para estos colectivos. La localización de residencias de mayores en zonas inundables demanda una intervención urgente para aplicar medidas que reduzcan su exposición y vulnerabilidad ante posibles inundaciones.

La capacidad para afrontar los desastres requiere fortalecer la cultura del riesgo mediante la educación y la información continua de la población expuesta. Es urgente empoderar a la ciudadanía a través de campañas de formación y participación comunitaria, aprovechando las estructuras sociales propias de cada comunidad, con el fin de mantener una sensibilidad permanente frente al riesgo.

La planificación y recuperación tras una catástrofe debe incorporar las previsiones futuras del riesgo de desastres, incluyendo el probable incremento de dicho riesgo como consecuencia del cambio climático. Es fundamental que la recuperación poscatástrofe evite decisiones que generen bloqueos estructurales, comprometiendo la capacidad de mitigación ante eventos futuros.

La gestión de los desastres requiere profesionales capaces de integrar múltiples y complejas informaciones de diversa naturaleza. Por ello, los responsables deben ser personas técnicamente cualificadas y con continuidad en sus funciones, para asegurar la conservación de la memoria institucional. La toma de decisiones debe recaer en entidades técnicas. La disponibilidad de comités científicos asesores ante grandes riesgos merece ser considerada. Las instituciones políticas deben respaldar las decisiones técnicas, facilitando su ejecución.

Tras toda catástrofe deben extraerse lecciones aprendidas sobre qué funcionó correctamente y qué falló durante la emergencia. Aprender de los errores cometidos para reducir los daños en el futuro es obligado. No obstante, estas evaluaciones resultan difíciles en entidades políticas cuyos responsables están sujetos a la lógica electoral. Por ello, se necesitan instituciones cuyos miembros actúen al margen de la legítima contienda política. Las academias científicas y otros foros académicos pueden desempeñar un papel más activo en la evaluación y mejora de la gestión de las emergencias.

1. Presentación

Este informe se basa en las contribuciones realizadas por diversos expertos durante las tres sesiones científicas celebradas en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España (RAC) a lo largo del curso 2024-2025 (Anexo I). Las diversas aportaciones han sido complementadas para hacer un informe coherente de todo lo tratado. Estas sesiones abordaron los fenómenos meteorológicos de lluvias extremas que suelen afectar a nuestra geografía, en particular al litoral mediterráneo, y que generan inundaciones y catástrofes de gran impacto. Las sesiones científicas han estado seguidas de la correspondiente discusión con el público y los académicos, y sus comentarios han sido también recogidos en una sección específica al final del informe. Las reuniones y el presente informe han tenido como principal motivación la catástrofe causada por las inundaciones del 29 de octubre de 2024 en la provincia de Valencia, así como en las de Cuenca, Albacete y Málaga. El enfoque del informe no ha sido tanto analizar en detalle un episodio concreto, sino estudiar los riesgos asociados a los fenómenos de lluvias extremas desde la perspectiva del apoyo científico necesario para predecirlos y, en la medida de lo posible, mitigar sus impactos. En otras palabras, el objetivo ha sido comprender las bases científicas del fenómeno, comenzando por el conocimiento del peligro meteorológico, la predicción de las lluvias que lo generan, el análisis y la predicción de la escorrentía y del flujo de caudales en los cursos de agua, el conocimiento cartográfico del peligro de inundación y las bases socioeconómicas que determinan la exposición y la vulnerabilidad al riesgo de inundación. Dado que el ciclo hidrológico se está acelerando por el cambio climático (IPCC, 2023), se ha valorado también en qué medida este cambio puede afectar a estos fenómenos meteorológicos extremos. Las sesiones han estado abiertas al público en general. El informe tiene una componente técnica, aunque está redactado de forma que sea útil tanto a especialistas como a un público más amplio.

2. Danas, lluvias torrenciales e inundaciones

2.1 Descripción del fenómeno dana

Los fenómenos de lluvias extremas en la costa mediterránea están frecuentemente asociados a lo que se conoce como dana, acrónimo de depresión aislada en niveles altos. Este término ha sustituido al antiguo de “gota fría”. En la bibliografía inglesa se denominan “cut-off low” (depresión aislada, DA) (Llasat et al., 2007). Una dana es un sistema ciclónico cerrado, de baja presión en los niveles superiores de la atmósfera (generalmente en la troposfera media a superior, entre 5.000 y 10.000 m) que se ha aislado del flujo predominante del oeste de la corriente en chorro polar que circunda el globo. Se originan cuando las ondulaciones en forma de ondas Rossby se elongan hacia el ecuador, de manera que llegan a desprenderse de la corriente general, aislándose y generando su propia circulación (Martín León, 2003). Aquí nos interesan aquellas que se posicionan alrededor de la península Ibérica o sobre ella, por ser las más peligrosas. Al dejar el sistema de estar controlado por la circulación atmosférica general, tiende a moverse lentamente o permanecer estacionario durante uno o pocos días, lo que puede favorecer la producción de fuertes lluvias según las condiciones meteorológicas existentes. Debido a su separación de la circulación general, poseen una menor predictibilidad, por lo que una pequeña variación en la predicción del centro de la dana por parte de los modelos numéricos suele producir un cambio muy grande en la localización del máximo de precipitación en

superficie. En los mapas de altura geopotencial se reconocen fácilmente por su contorno cerrado (Fig. 1), con un núcleo central frío que denota el origen polar de la masa de aire que lo formó (Nieto et al., 2005). Este núcleo frío de aire en altitud produce inestabilidad cuando entra en contacto y se superpone a masas de aire cálido y húmedo, generando una alta convección que dará lugar a fuertes tormentas con lluvias intensas que, eventualmente, pueden resultar en inundaciones (Ferreira, 2021). El proceso culmina con la reabsorción del sistema por la circulación general, su disipación o, más raramente, cuando interacciona con aire húmedo inestable, como en el Mediterráneo, en la formación de una borrasca e incluso un ciclón superficial (Pytharoulis et al., 2000).

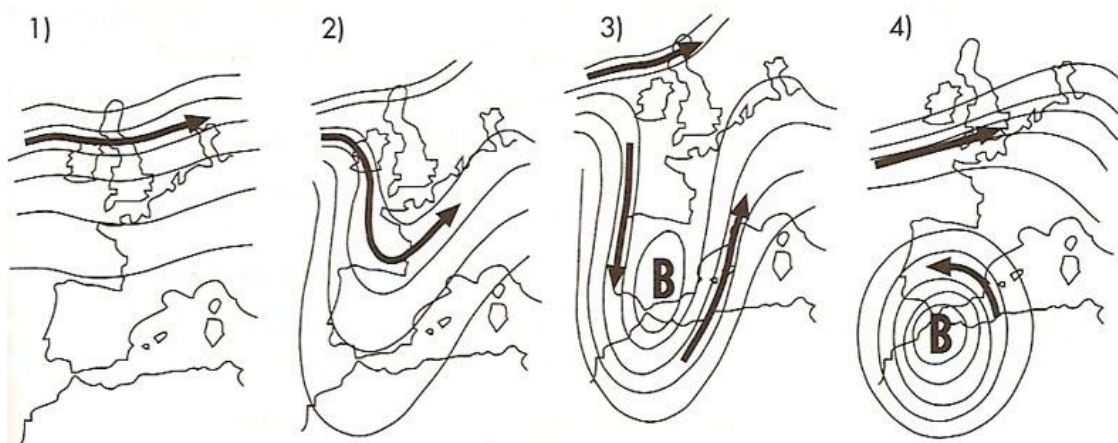


Figura 1. Formación de una dana: 1) circulación general con la corriente en chorro con vientos del oeste; 2) ondulación de la corriente en chorro; 3) elongación Norte-Sur y preformación de la zona de baja presión (B) en altura; 4) estrangulamiento y formación de la dana aislada de la circulación general. De: (Llasat, 1991).

Durante los meses cálidos, las danas en la región Mediterránea presentan picos de incidencia en junio y septiembre (Porcù et al., 2007). En el Levante español, a finales del verano y comienzos del otoño, el mar Mediterráneo presenta temperaturas elevadas. Las danas suponen un gran peligro cuando coinciden con un mar cálido y favorecen la entrada de aire cargado de humedad sobre zonas montañosas. Si el viento fluye del mar hacia la costa, choca con las cadenas montañosas litorales, lo que provoca un ascenso forzado del aire y potencia la convección (Nieto et al., 2005). Además, si la dana permanece estacionaria durante varios días y se produce una realimentación de humedad, las precipitaciones acumuladas pueden llegar a ser extremadamente elevadas. Por todo ello, estos fenómenos meteorológicos se encuentran entre los más catastróficos por lluvias intensas del sur de Europa y el norte de África. En España, la época del año con mayor frecuencia de lluvias torrenciales asociadas a danas es entre septiembre y noviembre, siendo octubre el mes con un mayor porcentaje (Ferreira, 2021).

2.2 Historia reciente de inundaciones en la España mediterránea

Las inundaciones en las zonas costeras mediterráneas han sido una constante desde hace más de 4.500 años (Thorndycraft y Benito, 2006). La reconstrucción con base en el análisis paleohidrológico del teatro romano de Guadix ha permitido documentar eventos de inundación en los siglos I y XII, coincidiendo con los periodos cálidos del Óptimo Climático Romano y el Periodo Medieval Cálido, respectivamente (Díez-Herrero et al., 2024). Aunque hay referencias escritas desde la época romana, es a partir del siglo XIII cuando hay registros bien documentados de eventos catastróficos, lo que ha permitido reconstruir con precisión su recurrencia en el sureste español (López Bermúdez, 1978-1979).

El insigne naturalista Antonio José Cavanilles, en la descripción del barranco de Poyo, nos ha dejado un vivo retrato de lo que ocurre ocasionalmente en estos paisajes mediterráneos: *“...Su profundo y ancho cauce siempre está seco, salvo en las avenidas quando recibe tantas aguas y corre tan furiosamente, que destruye quanto encuentra. En 1775 causó muchas desgracias en Chiva, sorprendiendo á media noche sus vecinos; asoló un número considerable de edificios, esparciendo por mas de dos leguas los tristes despojos y los cadáveres de los pobres que no pudieron evitar la muerte”* (Cavanilles, 1795).

La reconstrucción basada en datos históricos de los últimos 715 años muestra la ocurrencia de 2.467 episodios de inundación en 18 localizaciones analizadas, de los cuales un 25 % fueron catalogados como catastróficos y un 42 % como extraordinarios. Estos datos reflejan la elevada frecuencia y severidad de las inundaciones en la costa mediterránea española, en marcado contraste con el resto del país (Barriendos et al., 2019). La Tabla 1 muestra algunos episodios catastróficos recientes en nuestro país, buena parte de ellos causados por danas. Como se observa, las catástrofes son recurrentes a lo largo de la costa mediterránea e islas Baleares, aunque no solo, pues estos eventos afectan también a otras partes de España.

Las lluvias que se generan por estos episodios son extraordinarias: el récord validado por AEMET es de 817 mm en Oliva (Valencia) en 1987, aunque se han registrado cantidades mayores, pero sin validación oficial. El análisis de la curva de magnitud de la precipitación en 24 horas y la frecuencia para la provincia de Valencia muestra que los eventos de lluvias torrenciales son frecuentes en la región. Cada 25 años cabe esperar un evento máximo de 400 mm, cada 50 años uno de 500 mm y cada 75 años uno de casi 600 mm (Beguería Portugués et al., 2024). Esto es, cualquier persona que viva en la zona experimentará uno o más eventos catastróficos a lo largo de su vida.

Los daños en vidas humanas han llegado a estar próximos al millar de muertos, aunque parece que esa cifra ha ido descendiendo con el tiempo, salvo en 2024, como se comentará más adelante. Los daños en viviendas, infraestructuras, enseres, ganado, cosechas, etc., pueden ser cuantiosos, superando unos pocos miles de millones de euros. El Consorcio de Compensación de Seguros ha llegado a hacer desembolsos que superan los cientos de millones de euros por algún desastre.

2.3 La dana del 29 de octubre de 2024

La formación de la dana del 29 de octubre de 2024, su predicción, los avisos emitidos y las lluvias torrenciales asociadas han sido descritos con detalle por la AEMET (AEMET, 2024). A continuación, se resumen los principales hitos según dicho informe.

El viernes 25 de octubre se encuentra sobre las Islas Británicas una potente borrasca con un fuerte chorro trasero que la empuja en dirección sur. Esto hace que el día 26 se forme una zona de bajas presiones en dirección sur, que a lo largo del día terminó formando una dana. Al final de ese día, la dana se situó en el centro de la península Ibérica. Durante el día 27 se fue desplazando hacia el sur, hasta situarse en el golfo de Cádiz el día 28. En esa situación, la interacción de la circulación asociada a ella con la cadena montañosa del Atlas dio lugar a la formación de un sistema de bajas presiones de nivel mesoescalar localizado sobre el mar de Alborán. Esto produjo una intensificación del flujo del este en niveles bajos, con un importante aporte de humedad sobre la fachada mediterránea peninsular.

Tabla 1. Episodios recientes de inundación catastrófica en la costa mediterránea asociados a lluvias intensas, algunas de ellas causadas por danas, antes de 2024.

Año	Lugar	Río o barrancos	Lluvia max. l m ⁻²	Muertes	Daños (M €)	
					Globales	CCS
1957	Valencia ciudad	Turía	>361	81 (100 a 300)	2000	nd
1962	Barcelona (Vallés)	Llobregat, Besós	>250	>800	145	nd
1963	Murcia y Almería	Segura, Guadalentín, Almanzora y Adra	nd	300	nd	nd
1973	Granada, Murcia, Almería	Guadalentín (rambla de Nogalte), Almanzora, Adra	>600	162	nd	nd
1982	Valencia (riberas Alta y Baja)	Júcar, Turía (pantanada de Tous)	882	8 - 9	2619	283,01
1987	Gandía, Oliva, Alzira, Orihuela	Júcar, Segura, varios barrancos	817	7	2173	370,5
1989	Málaga	Guadalhorce, Campanillas y otros barrancos	497	8	946	207,35
1997	Alicante ciudad	Varios barrancos	267	4	nd	nd
2012	Sureste (Almería, Murcia, Alicante, Valencia)	Ríos Antas y Guadalentín, varios ríos más y barrancos	245	10	nd	285
2018	San Llorenç (Mallorca)	Torrente de Ses Planes	400	13	42	11
2019	Vega Baja del Segura (Al), Campo de Cartagena (Mu), Almería, Albacete	Segura, Clariano, varias ramblas	>500	7	708	380

CCS= Consorcio de Compensación de Seguros; nd= no disponible. Fuentes: varias según información en la WWW y algunas fuentes específicas (Aupí y Armengot, 2023; Beguería Portugués et al., 2024; Cajade et al., 2022; CCS, 2017; Díez-Herrero et al., 2009; Estrany et al., 2020; Romero-Díaz y Morales, 2021; Santos Burguete et al., 2018).

Durante el martes 29 de octubre continuó acelerándose el flujo del este sobre la costa oriental peninsular. Durante ese día se generaron varios sistemas convectivos de mesoescala (SCM), esto es, conjuntos de tormentas que se organizan a una escala mayor que una tormenta individual, pero menor que los ciclones extratropicales, que afectaron a amplias zonas del este peninsular. La presencia de varias estructuras precipitantes de tipo tren convectivo, esto es, tormentas que se desplazan en línea, una tras otra sobre una misma área, durante un intervalo de tiempo relativamente grande, inmersas en los SCM, afectaron a gran parte de la provincia de Valencia y a las sierras de Alcaraz y Segura, al sur de la provincia de Albacete.

Según los boletines de predicción de AEMET, desde el domingo 20 de octubre se preveía, aunque con incertidumbre, la posible formación de una dana para los días 27 a 29 de octubre. En los días siguientes, las predicciones se fueron afinando: el lunes 21 se mantenía la previsión y se indicaba la posibilidad de lluvias intensas en la fachada oriental. El martes 22 y el miércoles 23 se advertía de precipitaciones localmente fuertes en el litoral mediterráneo. Finalmente, el jueves 24 se concretaban más las zonas afectadas, señalando que las lluvias podrían ser especialmente abundantes en el área mediterránea, en particular en la región del Levante.

El viernes 25 de octubre AEMET emitió la primera nota informativa alertando de posibles lluvias intensas, aunque aún existía gran incertidumbre sobre las zonas más afectadas,

señalando al martes 29 como el día con mayor probabilidad de chubascos fuertes o muy fuertes en la vertiente mediterránea. El sábado 26 se actualizó la información, destacando la llegada de viento de levante, lo que incrementaría la humedad en el este peninsular y favorecería chubascos muy fuertes, persistentes y con posibles rachas de viento intensas, sin descartar localmente la intensidad torrencial. También se advertía que el martes 29 se esperaban los mayores acumulados del episodio, afectando desde el centro peninsular y el este de la meseta sur hasta Alborán y el litoral mediterráneo.

Entre el domingo 27 y el martes 29 de octubre se emitieron varios avisos especiales debido a la previsión de un episodio de lluvias intensas. El domingo se anticipó que el martes 29 sería el día más crítico, con alta probabilidad de precipitaciones intensas en el área mediterránea peninsular, especialmente en la Comunidad Valenciana y Murcia, donde era probable que se superasen los 150 mm en 24 horas. El lunes 28 se actualizó el aviso, ampliando las zonas afectadas al Estrecho, Andalucía Oriental, este de Castilla-La Mancha y, nuevamente, la Comunidad Valenciana y Murcia, previéndose acumulados de más de 120-150 mm en 12-24 horas. El martes 29, se confirmó que sería el día álgido del episodio, elevando las estimaciones a más de 150-180 mm en las mismas regiones y señalando que, aunque en menor grado, también habría lluvias intensas en otras partes de la mitad sur, centro peninsular y noreste.

La AEMET realizó distintos avisos para el día 29 de octubre desde el día 27 del mismo. La mayor parte fueron amarillos o naranjas, salvo los rojos que se indican (Fig. 2). El día 29, a las 7:36 am se subió de nivel naranja a rojo el aviso por precipitaciones acumuladas de 90 y 180 mm en una y doce horas, respectivamente, en el litoral sur de Valencia. Este estaría vigente hasta las 12:00 pm, cuando volvió a naranja. A las 16:24 pm volvió a rojo por previsión de acumulados de más 90 mm en una hora, manteniéndose hasta las 18:00 pm que volvió a naranja hasta final del día. En el interior norte, a las 9:41 am se pasó de nivel naranja a rojo, por acumulados de 90 y 180 mm en una y doce horas, respectivamente. Este estaría vigente hasta las 18:00 pm, que pasaron a nivel naranja hasta final del día. En el litoral norte, donde se encuentra la zona que finalmente resultó más afectada, también a las 9:41 am se subió de nivel naranja a rojo, por acumulados de 90 y 180 mm en una y doce horas, respectivamente, vigentes hasta las 18:00 p.m. A las 17:49 p.m. se prolongaron estos avisos rojos hasta las 20:00 p.m. y a las 19:47 p.m. se prolongó el aviso rojo de acumulación en 12 horas hasta las 22:00 h, con un valor de 200 mm.

La precipitación caída durante este episodio alcanzó niveles extraordinarios en distintas localidades de las provincias de Valencia, Albacete, Cuenca, Murcia, Almería, Granada y Málaga (Fig. 3). El máximo de precipitación se alcanzó en Turís (Valencia), con acumulados de 772 mm en 24 h, la mayor parte de los cuales cayó en 12 h. Amplias zonas de Valencia registraron cantidades de precipitación superiores a los 200-300 mm, así como precipitaciones superiores a los 100 mm en las demás provincias. La torrencialidad fue tal que algunos de los valores registrados en 6 h o 12 h duplicaron los récords anteriores registrados en España.

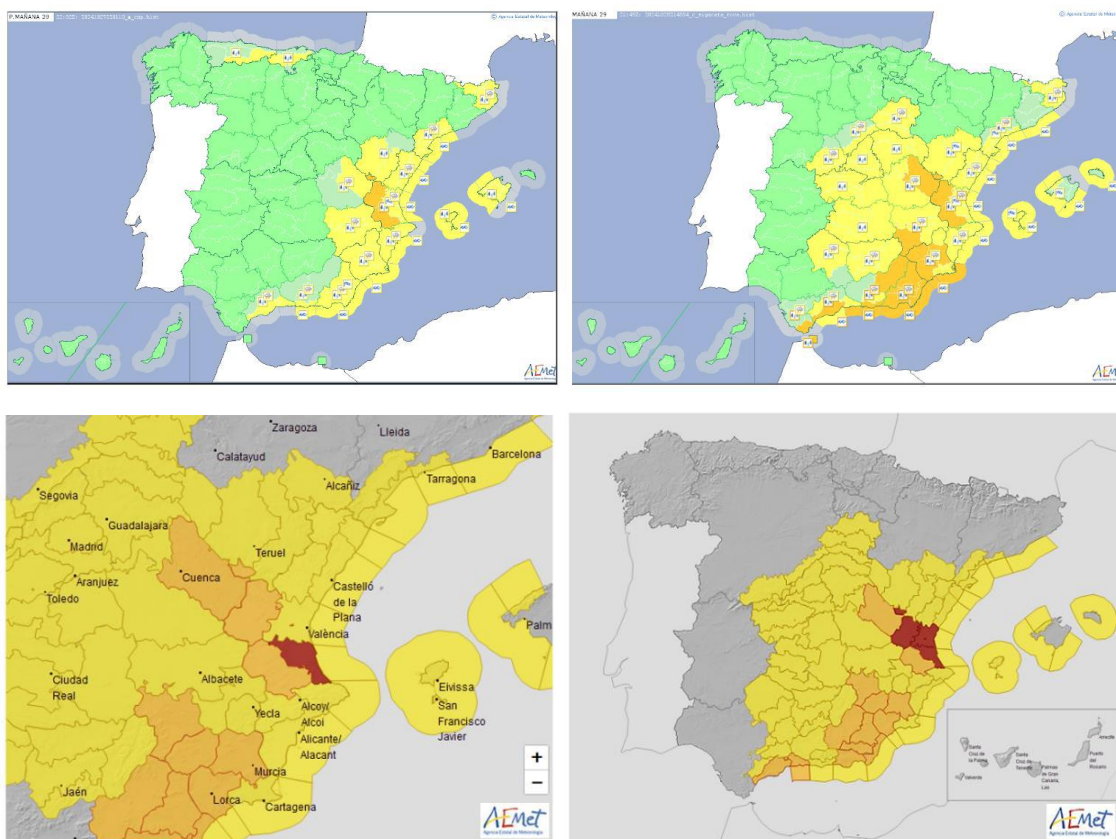


Figura 2. Avisos emitidos por AEMET para el día 29 de octubre de 2024 desde las 23:00 h del día 27 (panel superior izquierdo) o 28 de octubre (panel superior derecho). Avisos para el día 29 de octubre emitidos a las 7:35 (panel inferior izquierdo) y a las 9:41 (panel inferior derecho). Fuente: AEMET 2024.

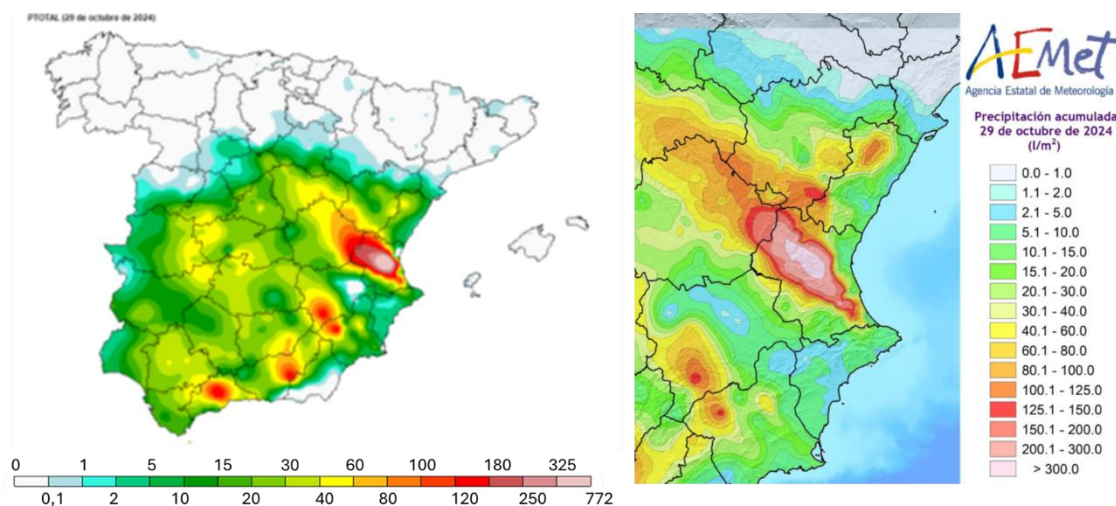


Figura 3. Precipitación acumulada durante el día 29 de octubre de 2024 (en mm). Fuente: AEMET 2024.

2.4 Efectos de la dana del 29 de octubre de 2024

Las inundaciones causadas por la dana del 29 de octubre de 2024 se consideran de las más catastróficas habidas recientemente en España. Produjeron un total de 236 muertes (228 en Valencia, 1 en Cuenca, 6 en Albacete y 1 en Málaga). Se estima que los daños totales superan los 17.000 M€, con afectaciones a unos 4.600 edificios, >70.000 viviendas,

11.300 comercios, >140.000 vehículos, 160 km de carreteras del estado, 1500 km de calles y carreteras no estatales, 99 km de vías férreas, 2.200 ha de polígonos industriales, 3.300 industrias, 220.000 líneas de teléfono fijo, 300.000 de teléfono móvil, 20.584 M€ de crédito expuesto a hogares y empresas. El número de ascensores inutilizados ascendió a unos 10.000. En cuanto al sector agrario, se estima que 50.000 ha fueron afectadas, la mitad de las cuales estaban aseguradas. El Consorcio de Compensación de Seguros recibió unas 243.000 solicitudes, por un importe previsto de 4.500 M€. Globalmente, se calcula que las pérdidas fueron del 1.136% del PIB español, y afectaron a una zona cuya producción equivale al 22% del PIB y al 25% del empleo de la Comunidad Valenciana.

3. El riesgo y sus componentes

El riesgo emerge como consecuencia de la interacción entre tres componentes: peligro¹, exposición y vulnerabilidad (Fig. 4). En el caso de la inundación, el peligro se refiere a los fenómenos meteorológicos que pueden producir lluvias extremas. El peligro tiene dos componentes, probabilidad e intensidad. Es importante conocer con qué frecuencia se presenta un fenómeno adverso, pero también cuál es su intensidad ya que de ello dependerán los impactos. Normalmente estas son las variables más fáciles de conocer pues ambas pueden calcularse a partir de las observaciones meteorológicas, para lo cual se dispone de abundante información y de series temporales suficientemente largas como para calcular los extremos hidrometeorológicos que pueden dar lugar a inundaciones.

No obstante, para el riesgo de inundación hay que tener en cuenta no solo lo que llueve, sino la transformación de la lluvia en escorrentía, lo que depende del tipo de terreno en el que cae, la vegetación que alberga o su rugosidad. Por tanto, el territorio también contribuye. Al final, la escorrentía superficial llegará a los cauces de los arroyos y ríos por los que circulará hasta alcanzar el mar. El volumen de agua, su altura en el cauce, la velocidad que lleva o los materiales que transporta son elementos importantes para determinar el impacto de una inundación (Horst et al., 2023).

Los impactos dependen de las otras dos componentes del riesgo. Por un lado, la exposición, esto es, *“...la presencia de personas, medios de vida, especies o ecosistemas, recursos ambientales, infraestructura o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente por los peligros climáticos...”* (IPCC, 2022). En suma, todos los elementos que son susceptibles de experimentar impactos negativos de los eventos relacionados con el clima u otros peligros.

La tercera componente del riesgo es la vulnerabilidad, esto es, *“...la propensión o predisposición a verse afectado negativamente [por un peligro]. Vulnerabilidad abarca una variedad de conceptos y elementos, incluida la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad para hacerlo frente y adaptarse”* (IPCC, 2022). La vulnerabilidad es una característica intrínseca de lo expuesto. Por ejemplo, un niño o una persona mayor son vulnerables por su propia condición, que hace que les sea más difícil superar un peligro. Una comunidad preparada conoce sus vulnerabilidades y tiene establecidas medidas para disminuirlas ante una emergencia (e.g., dispone de un plan de contingencia con medidas de evacuación, entre otras).

¹ En algunos contextos y disciplinas se usa peligrosidad o amenaza. Siguiendo el informe sobre los riesgos del cambio climático en España (en redacción), se usa peligro en todo el texto.

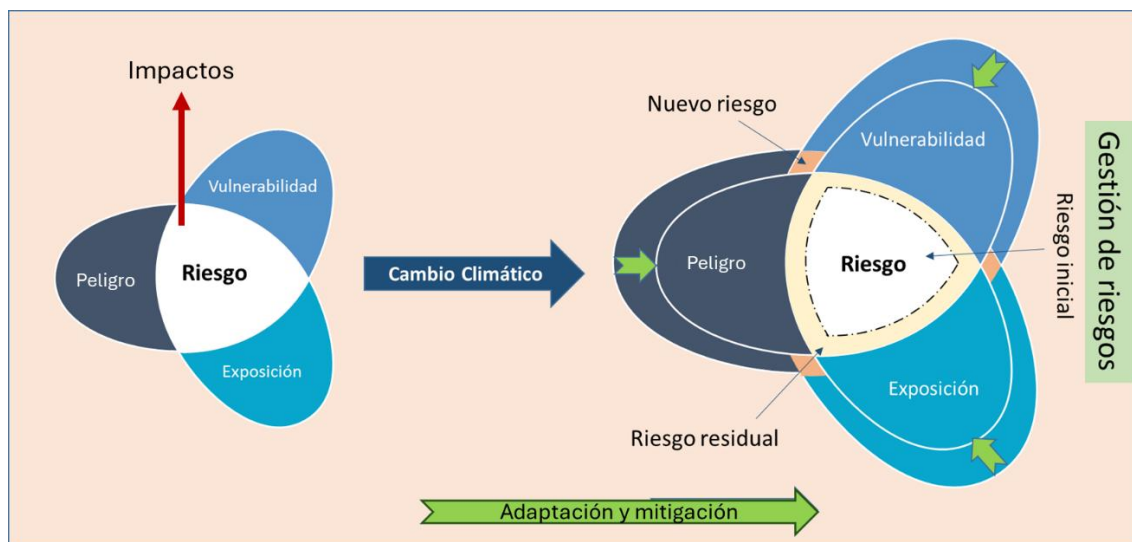


Figura 4. Los riesgos derivados del clima en un contexto de cambio climático. El riesgo emerge de la interacción entre los peligros meteorológicos o climáticos, la exposición y la vulnerabilidad. La materialización del riesgo genera impactos. El cambio climático conlleva riesgos mayores que los existentes o nuevos riesgos. La gestión del riesgo, la adaptación al cambio climático y la mitigación tratan de reducir el riesgo. Con todo, no será posible evitar la totalidad de este, quedando un riesgo residual al que habrá que hacer frente. De: (Moreno et al., 2020)

Las sociedades pueden incrementar su capacidad de afrontar los riesgos mediante medidas de gestión que ayudan a mitigarlos en parte. De igual forma, ante cambios previsibles, como los predichos por el cambio climático, pueden adoptar medidas de adaptación que les hagan menos susceptibles de sufrir daño ante el cambio en el riesgo que se prevé (Fig. 4). Los peligros meteorológicos son ajenos a nuestro control. La lluvia intensa podemos predecirla, pero no controlarla. Lo mismo pasa con una ola de calor, podemos anticiparla y evitar exponernos o tomar medidas para ser menos sensibles. Por el contrario, la exposición y la vulnerabilidad son constructos sociales, por lo que dependen de nosotros, de nuestra gobernanza. Por tanto, el riesgo es, al menos en parte, el resultado de nuestras acciones. Aunque el peligro inicial no podemos controlarlo, sus últimas consecuencias sí, a través de acciones que mitiguen el riesgo mediante su gestión. La mitigación del cambio climático puede reducir también el peligro inicial.

Puesto que el riesgo es un constructo social, la gestión del riesgo debe tener en cuenta las diferencias entre los grupos sociales. En toda sociedad hay grupos privilegiados que suelen estar poco expuestos a los riesgos y, además, tienen oportunidades para hacerlos frente; por el contrario, hay también grupos menos favorecidos, normalmente más numerosos, que suelen estar más expuestos y no tienen oportunidades para contrarrestarlos. La edad, el género, la salud, la etnia o la pobreza, entre otros, son factores que segregan a la sociedad por los riesgos a los que están expuestos (Olsson et al., 2014). Una sociedad más justa será aquella que equilibre los niveles de exposición al riesgo de todos los grupos sociales. La gestión del riesgo de desastres es una parte crucial del desarrollo social (Hallegatte et al., 2020).

La gestión del riesgo de desastre (GRD) por inundación o cualquier otro peligro climático o de otra naturaleza es *“la aplicación de políticas y estrategias de reducción del riesgo de desastres para prevenir nuevos riesgos de desastres, reducir el riesgo de desastres existente y gestionar el riesgo residual, contribuyendo al fortalecimiento de la resiliencia y la reducción de las pérdidas por desastres”* (UNDRR, 2017). La GDR comprende una serie

de actividades dirigidas a reducir la probabilidad e impacto de los desastres, e incluye la mitigación, la prevención/preparación, la respuesta y la recuperación. Dentro de la prevención/preparación, la alerta temprana ocupa un papel crucial (Šakić Trogrlić et al., 2022), y es donde las ciencias comprendidas en la RAC tienen un mayor papel, particularmente en lo que se refiere a la meteorología y clima o a la hidrología. Un buen sistema de alerta temprana ha de basarse en el conocimiento, detección, predicción, monitorización, difusión y comunicación efectiva del riesgo (Šakić Trogrlić et al., 2022). Algunos de estos elementos se considerarán más adelante.

4. Ciencia para la gestión del riesgo de desastre

4.1 Información meteorológica general

El peligro meteorológico de lluvia extrema está en la base del conocimiento del riesgo de inundación. La AEMET es la institución nacional responsable de suministrar a los servicios encargados de la emergencia las predicciones sobre los fenómenos meteorológicos adversos. Para ello se basa en una densa red de observaciones que suministran datos que son asimilados y utilizados en los modelos de predicción. Actualmente, se usa el modelo IFS del Centro Europeo para Pronósticos Meteorológicos a Plazo Medio (CEPPM en español o ECMWF de sus siglas en inglés), un organismo que está formado por 23 Estados miembros y 12 Estados colaboradores. Se trata de un modelo global que simula la atmósfera y sus interacciones con la tierra y el océano y es reconocido por su alta precisión. La resolución es de 0.1° en latitud y longitud (aproximadamente 10 km) y el alcance de 10 días o 240 horas. El modelo global se ejecuta cada 6 horas y la actualización de los datos se realiza dos veces al día, utilizando los datos de las 0:00 y las 12:00 UTC, dando comienzo la actualización de los mapas a las 6:00 y 18:00 UTC, respectivamente. Las predicciones del modelo se basan en conjuntos de simulaciones con pequeñas variaciones iniciales, lo que permite tener una aproximación a las incertidumbres de la predicción. Además, se usa el modelo HARMONIE-AROME, que es el resultado de la colaboración de un consorcio en el que participan 26 países. Se trata de un modelo mesoescalar de área limitada que permite modelizar la convección, con una resolución horizontal de 2.5 km y un alcance máximo de 72 horas. Este modelo utiliza como condiciones de contorno las salidas del modelo de alta resolución del IFS del CEPPM. Las simulaciones se efectúan a las 00, 06, 12 y 18 UTC, y están disponibles en la web de AEMET 4 horas más tarde ².

En los últimos 30-40 años, el pronóstico meteorológico ha experimentado una transformación notable, impulsada por los avances en la modelización numérica, la asimilación de datos, las observaciones satelitales y la potencia informática (Magnusson et al., 2022). El modelo del CEPPM ha seguido esta trayectoria desde sus inicios, hace ya 50 años, como muestra la evolución de la capacidad de pronóstico de una de las variables (la altura geopotencial de 500 hPa) que se utiliza frecuentemente como banco de pruebas para la predicción y es crítica para las danas (ECMWF, 2025b) (Fig. 5). Como se ve, la predicción a 3 días vista tiene una fiabilidad predictiva muy alta. Esta va disminuyendo conforme aumenta el periodo para el cual se hace la predicción, pero incluso a 10 días vista la predicción tiene una fiabilidad importante. En las últimas décadas las predicciones se han vuelto más exactas, más duraderas, probabilísticas y han mejorado a la hora de detectar fenómenos extremos. La predicción a 5 días se ha vuelto tan precisa como lo era

² <https://www.aemet.es/es/eltiempo/prediccion/modelosnumericos/ceppm/ayuda>

a 3 días en la década de 1980. Los pronósticos a 10 días ahora tienen una habilidad predictiva significativa que no tenían antes de la década de 2000.

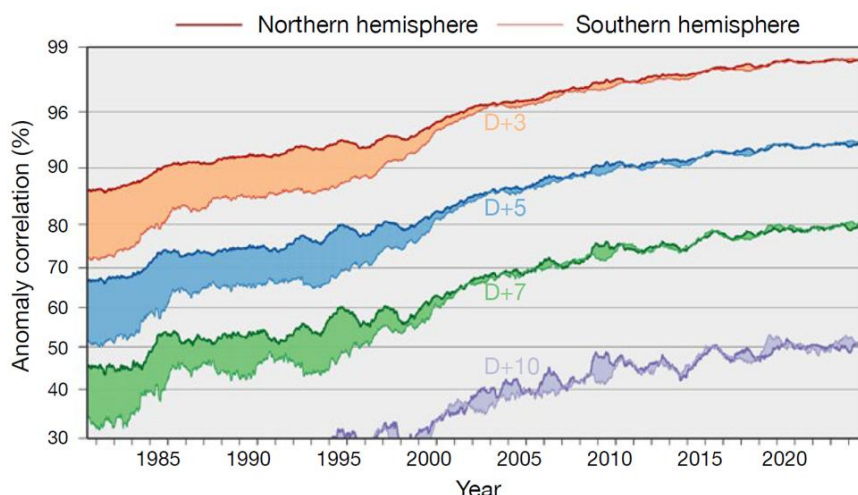


Figura 5. Coeficientes de correlación de las anomalías de los pronósticos de la altura geopotencial 500 hPa de los modelos del ECMWF y las observaciones a 3, 5, 7 y 10 días vista para los hemisferios norte y sur extratropicales, desde el 1 de enero de 1981 al 31 de enero de 2025. Fuente: (ECMWF, 2025b).

En general, el modelo del CEPPM (ECMWF) supera a otros modelos globales, como el GFS americano o el UKMO británico, en múltiples métricas y confiabilidad del pronóstico (Haiden et al., 2024). Recientemente, el CEPPM ha puesto en funcionamiento la versión conjunta del Sistema de Predicción de Inteligencia Artificial (AIFS) para que funcione junto con el Sistema Integrado de Predicción (IFS, de sus siglas en inglés) tradicional basado en la física, aplicando así herramientas de aprendizaje automático a la modelización numérica de la predicción del tiempo. Esto está resultando en un aumento de la precisión, mucha mayor rapidez de procesamiento y ahorros energéticos muy considerables (ECMWF, 2025a).

No obstante, la predicción a largo plazo de procesos convectivos de mesoescala generadores de tormentas y lluvias intensas en unas horas y concentradas en áreas pequeñas sigue siendo un reto. Los modelos globales modernos (como el del CEPPM) a menudo pueden detectar el desarrollo potencial de depresiones aisladas (e.g., dana) o vaguadas con varios días (3-7) de anticipación. Los pronósticos tienden a capturar la formación de la baja a nivel superior y una amplia área geográfica de posibles lluvias torrenciales. Sin embargo, predecir la ubicación exacta, la intensidad y el momento de los impactos asociados (como las inundaciones repentinas) sigue siendo un desafío, debido a la compleja interacción entre la dinámica de los diversos factores meteorológicos y superficiales, entre los cuales se encuentra la orografía. La dificultad de modelizar estos sistemas convectivos de mesoescala es mayor en zonas con orografía compleja, como el este peninsular (Nieto et al., 2005).

Estos procesos se pueden pronosticar con mayor fiabilidad a muy corto plazo (lo que se conoce como predicción inmediata) mediante la modelización numérica, aunque determinar con precisión su inicio, desarrollo y trayectoria sigue siendo técnicamente un desafío debido a su pequeña escala espacial y rápida evolución (Sun et al., 2014). Estudios recientes basados en modelización numérica del tiempo a pequeña escala y su acople a modelos hidrológicos muestran que es posible pronosticar la precipitación y la avenida

relámpago que producen en términos de intensidad máxima, momento y primera ola de descarga, con una anticipación de hasta varias horas (Lovat et al., 2022). La aplicación de métodos de aprendizaje automático muestra que la predicción puede avanzarse 5-6 horas con respecto a las previsiones de los modelos numéricos (Yousefnia et al., 2025). Más aún, el uso de datos de radar y modelos de aprendizaje automático puede anticipar con gran precisión el centro de la célula convectiva con una hora de antelación, lo que permitiría la emisión de alertas en tiempo real (Borghi et al., 2024).

Los predictores operativos de AEMET interpretan las salidas de los modelos numéricos meteorológicos y su posprocesado, realizan una vigilancia continua comparando las salidas de dichos modelos con las observaciones y aplican modelos conceptuales, para posteriormente, decidir o no la emisión de avisos por fenómenos meteorológicos adversos (FMA). AEMET dispone de un sistema de avisos por FMA denominado Meteoalerta³, cuyo objetivo es avisar a las autoridades de protección civil y a la población general de FMA con hasta 72 horas de antelación y hacer su seguimiento y evolución. Este sistema está integrado en el sistema europeo Meteoalarm. Los avisos se clasifican por colores (amarillo, naranja y rojo) según que puedan afectar a la población y bienes materiales en menor o mayor medida, siendo el rojo el nivel más alto. Su clasificación se hace según umbrales específicos para cada tipo de meteoro y según las zonas del país. Por ejemplo, para FMA por lluvias extremas los umbrales generales son: amarillo (≥ 15 mm en 1 hora o ≥ 40 mm en 12 horas; naranja (≥ 30 mm en 1 hora o ≥ 80 mm en 12 horas); rojo (≥ 60 mm en 1 hora o ≥ 120 mm en 12 horas). No obstante, estas cifras varían según la geografía, para adaptarlos a la peligrosidad particular de cada territorio. Así, en el levante peninsular y Baleares los umbrales son más altos. En el caso de la Comunidad Valenciana son: amarillo: ≥ 20 mm en 1 hora o ≥ 60 mm en 12 horas; naranja: ≥ 40 mm en 1 hora o ≥ 100 mm en 12 horas; rojo: ≥ 90 mm en 1 hora o ≥ 180 mm en 12 horas. Los avisos surgen de los resultados de los modelos meteorológicos, y sus umbrales se han establecido previamente por consenso con los implicados en la gestión de las emergencias.

A pesar del nombre del sistema, Meteoalerta no emite alertas, sino avisos, ya que las alertas son responsabilidad de los servicios de gestión de la emergencia. Los avisos se emiten de forma automática a la Red de Alerta Nacional, que forma parte del Sistema Nacional de Protección Civil, a las autoridades de protección civil (el número 112) de las distintas comunidades autónomas y a entidades incluidas en el sistema de difusión y al público en general, por web, aplicaciones, etc.

La mejora en la capacidad predictiva ha sido notable en las últimas décadas, gracias a la modelización numérica, las observaciones satelitales y el aprendizaje automático. En base a sistemas como Meteoalerta, permiten emitir avisos con hasta 72 horas de antelación, clasificados por niveles de riesgo, aunque la emisión de alertas sigue siendo competencia de los servicios de emergencia.

4.2 Información de cuenca

En España, los organismos encargados de las cuencas fluviales (confederaciones hidrográficas y los organismos de cuencas internas) son los responsables de la gestión del agua y del dominio público hidráulico. Esto incluye la monitorización de los cauces y presas ante la eventualidad de un desastre por inundación. Para ello disponen de un sistema

³ https://www.aemet.es/es/lineas_de_interes/meteoalerta

automático de información hidrológica (SAIH) cuyo objetivo es proporcionar información relativa a los niveles y caudales circulantes por los principales ríos y afluentes, el nivel y volumen embalsado en las presas, el caudal desaguado por los aliviaderos, válvulas y compuertas de estas, la precipitación en numerosos puntos y los caudales extraídos por los principales usos del agua en cuenca⁴. Para ello, capta, transmite en tiempo real, procesa y presenta los datos que describen el estado hidrológico e hidráulico de la cuenca hidrográfica, utilizando distintos dispositivos automáticos. Estos transmiten el estado de la variable monitorizada por vía satélite, radio o telefonía móvil a un centro de procesamiento de datos para su validación y puesta a disposición de los organismos interesados y el público en general. El SAIH es una red de telecontrol en tiempo real. Cada sensor envía sus datos al centro de control periódicamente (e.g., en la C. H. del Júcar cada 5 minutos), y son cargados en la base de datos y puestos a disposición pública en tiempo real.

Cada confederación dispone de una red de estaciones pluviométricas, de aforo de los ríos y arroyos y de la cota y agua embalsada en las presas, cuyo número varía de una a otra. Por ejemplo, la C. H. del Júcar (CHJ) tiene 185 estaciones pluviométricas automáticas, 74 estaciones de aforo de caudales de los ríos y arroyos relevantes y 25 estaciones de aforo de presas. Cada estación de aforo de ríos y cauces tiene establecidos previamente unos caudales umbrales que marcan si este es normal (verde), alto (amarillo), muy alto (naranja) o extremo (rojo) (Fig. 6). Todos ellos proveen información cada 5 minutos, que es consultable en su página web⁵.

Aunque la densidad de puntos de observación puede llegar a ser alta, según la cuenca, no se cubren todos los cauces de barrancos y arroyos intermitentes, lo que puede ser relevante en el caso de lluvias torrenciales e inundaciones repentinas en zonas de alta rugosidad del terreno, dada la alta variabilidad local de las lluvias. Con objeto de paliar estas limitaciones, parte de la observación sigue siendo manual, en escalas normalmente emplazadas en puentes, donde se realiza una lectura de la altura del agua por parte de agentes de las distintas autoridades (ayuntamientos o comunidades autónomas).

Ante posibles avenidas, algunas confederaciones (e.g., C.H. Júcar) suministran a los servicios de emergencia una serie de informes automáticos. En concreto, la CHJ facilita avisos por lluvias altas cuando estas superan 30 mm en una hora o 50 mm en cuatro horas mediante el envío automático de correos electrónicos a los responsables de la emergencia. Igualmente, envía avisos por caudales altos, dependiendo del nivel alcanzado en el aforo que se trate y según los umbrales que tiene previamente establecidos. Estos avisos se envían igualmente por correo electrónico tras su validación manual, lo que requiere de 10 a 15 minutos.

⁴ <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/saih.html>

⁵ <https://saih.chj.es>



Figura 6. Ejemplo de la información facilitada a las 11:25 horas del día 8 de agosto por el SAIH de la Confederación Hidrográfica del Júcar sobre el caudal del río Turia (m³ s⁻¹) a su paso por la estación de aforo de Torrealta. Se facilitó información desde las 00 h del día 7 hasta el momento de acceso el día 8, ambos de agosto de 2025.

Algunas confederaciones han acoplado a las lluvias niveles de peligrosidad de posibles crecidas, lo que es importante sobre todo para los ríos largos cuyo caudal puede ser anticipado con tiempo suficiente para alertar de posibles inundaciones. Por ejemplo, la Confederación Hidrográfica del Ebro dispone de un sistema de ayuda a la decisión (SAD⁶) que recoge la información pluviométrica para transformarla en escorrentía con la ayuda de un modelo hidrológico. Esta será luego utilizada por un modelo hidráulico para prever el transporte del agua a lo largo del cauce. Dado que algunos cauces están interrumpidos por embalses, se usa un modelo de gestión de estos para ver cómo afectará al caudal aguas abajo. De esta manera, el SAD calcula los caudales previstos para las próximas 72 horas en las estaciones de aforo de la cuenca, permitiendo así anticiparse a las posibles crecidas.

4.3 Aviso de inundación: el modelo europeo de alerta de inundaciones EFAS

La Comisión Europea, a través de su Sistema de Gestión de Emergencias Copernicus (CEMS, de sus siglas en inglés), dispone de un Sistema Europeo de Alerta de Inundación (EFAS, de sus siglas en inglés)⁷. El objetivo de EFAS es emitir avisos tempranos de inundación para las principales cuencas europeas. Para ello dispone de un modelo hidrológico que, con base en las predicciones meteorológicas de lluvia y en la información de cada cuenca, puede predecir la probabilidad de inundación según cuánto se excedan ciertos umbrales críticos. Las previsiones meteorológicas que se usan provienen de

⁶ https://www.saihebro.com/resources/diptico_sad.pdf

⁷ <https://european-flood.emergency.copernicus.eu/en/about>

distintos proveedores y se basan en modelos probabilísticos del CEPPM, de COSMO-LEPS y del modelo determinista del DWD (Servicio Meteorológico Alemán). Los datos meteorológicos son utilizados por el modelo hidrológico de código abierto LISFLOOD, que tiene una resolución espacial de 1,5 km y temporal de 6 h⁸. El acceso a la información está disponible a través de la interfaz de EFAS, en la que se muestran las previsiones de inundación, con mapas de puntos críticos y de probabilidad de inundación por superación de ciertos umbrales, así como información meteorológica relevante desde el punto de vista hidrológico. Los datos se actualizan dos veces al día.

Para las inundaciones repentinas el sistema provee un indicador de inundación repentina, ERIC, que se genera a partir de predicciones meteorológicas numéricas de alta resolución con un horizonte temporal de hasta 5 días, aunque a partir de 48 horas la fiabilidad es muy baja (Fig. 7). El indicador se genera comparando la escorrentía superficial acumulada prevista sobre la cuenca aguas arriba, con un umbral de referencia para periodos de retorno dados (e.g., 5, 20 años). Se ajusta a cuencas con una superficie de 25 km² a 1.000 km², si bien las notificaciones (ver más adelante) se hacen para cuencas >150 km². Además, EFAS dispone en fase experimental de un producto (TAMIR) cuyo objetivo es pronosticar las áreas potenciales que pueden verse afectadas por inundaciones repentinas debido a lluvias torrenciales que combina datos de precipitación por radar y pronósticos de precipitación basados en modelización numérica.

Los predictores del servicio EFAS del CEMS emiten notificaciones sobre posibles inundaciones futuras. Estas notificaciones se envían a los socios de EFAS y al Centro de Coordinación de la Respuesta a Emergencias de la Comisión Europea. Se emiten tres tipos de notificaciones: formal, informal o de inundación repentina. La notificación por esta última se emite cuando se pronostica que la probabilidad de exceder la magnitud del período de retorno de 5 años del índice de escorrentía superficial ERIC es igual o superior al 30%. Los avisos se emiten para regiones administrativas, no para cuencas hidrográficas.

Son miembros de EFAS cualquier autoridad nacional, regional o local con la obligación legal de prestar servicios de previsión de inundaciones o que tenga un papel en la gestión del riesgo de inundación dentro de su país, así como los servicios de la Comisión Europea. Los socios de EFAS tienen acceso completo a todos los pronósticos y productos en tiempo real de EFAS, a las notificaciones que se emiten y a la interfaz web de EFAS. España participa principalmente a través de la Dirección General del Agua del MITECO, la Dirección General de Protección Civil y Emergencias, las confederaciones hidrográficas y las protecciones civiles regionales.

4.4 Información auxiliar: cartografía del peligro y riesgo de inundación

España dispone de un Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), creado como consecuencia de la Directiva Europea sobre Evaluación y Gestión del Riesgo de Inundaciones. Esta norma obliga a los Estados miembros a elaborar cartografías de peligrosidad y riesgo de inundación. La elaboración de esta cartografía se ha realizado por fases y se revisa cada seis años para incorporar las modificaciones que puedan sufrir los cauces, ya sea por cambios en el planeamiento urbanístico u otras causas. En España existen más de 500.000 km de cauces, de los cuales se han cartografiado unos 30.000 km (Fig. 8). No obstante, no todos ellos son relevantes, por lo que no es necesario ni factible

⁸ <https://ec-jrc.github.io/lisflood/>

cartografiarlos en su totalidad. La cartografía de inundabilidad se elabora para distintos periodos de retorno (PR) (10, 100 y 500 años), equivalentes a es anuales de ocurrencia del 10 %, 1 % y 0,2 %, respectivamente.

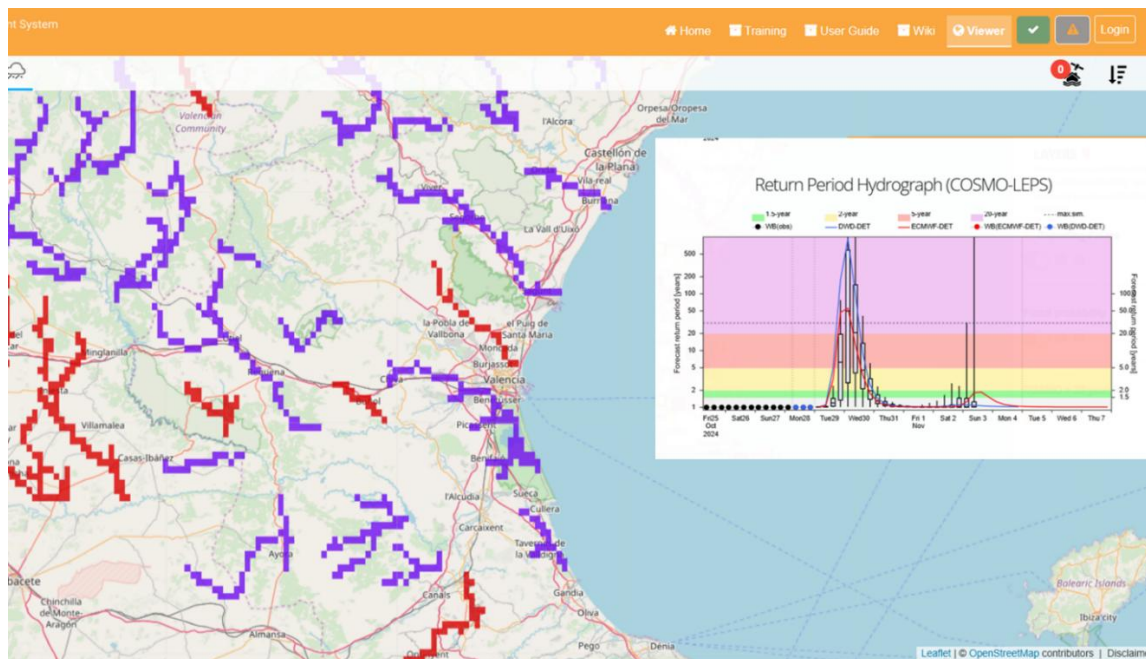


Figura 7. Imagen del visor de EFAS para las 00 h del día 29 de octubre de 2024 en la región de Valencia. Rojo: excede el periodo de retorno de 5 años; lila: excede el periodo de retorno de 20 años. Inserto: pronóstico del periodo de retorno de inundación para Poyo/Chiva/Barranc de Torrent según distintos modelos meteorológicos desde el 24/10/2024. El pico se alcanzaría entre el 29/10 y el 30/10, con excedencias de 20-50 años (línea roja, datos de ECMWF-D) o >500 años (línea azul, datos de DWD-D). Por lo demás, los colores rojo y lila tienen el mismo significado que antes. Fuente: EFAS.

La cartografía de la peligrosidad es la primera fase para poder hacer la cartografía del riesgo de inundación. En base a una evaluación preliminar se han detectado 668 ARPSI (áreas con riesgo potencial significativo de inundación) fluviales, que afectan a unos 8.345 km de cauce fluvial. Más aún, la cartografía del riesgo requiere cruzar estos mapas con otros de exposición y vulnerabilidad de lo expuesto. Para darse cuenta de la relevancia de la cartografía del riesgo, valga decir que hay 1.464 centros escolares, 118 hospitales y centros de salud, 445 residencias y 411 depuradoras en zonas inundables (ver más adelante, epígrafe 7.3).

La cartografía de peligrosidad está disponible en el visor SNCZI del MITECO⁹. Esta es una herramienta fundamental para la planificación urbanística y la gestión de inundaciones por los servicios de protección civil de las CC.AA. Además, es decisiva a la hora de informar los cambios en el planeamiento que afecten a estas zonas. Permite, además, que los ciudadanos y personas jurídicas conozcan la peligrosidad de inundación de una zona determinada antes de comprar o hacerse una vivienda o instalar una industria.

⁹ Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI): <https://sig.miteco.gob.es/snczi/index.html?herramienta=DPHZI>

Longitud de tramos con cartografía disponible

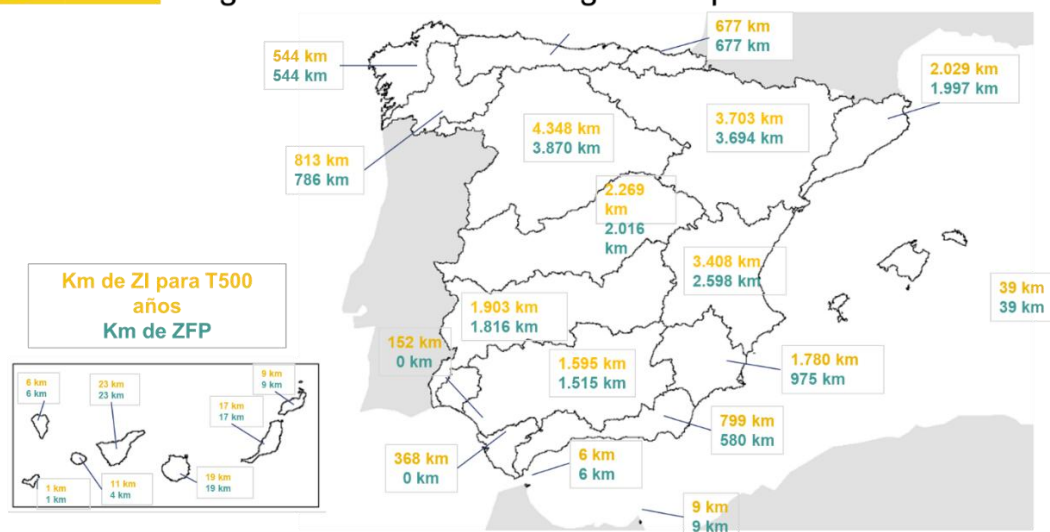


Figura 8. Longitud de tramos (en km) con cartografía de peligrosidad de inundación disponible para un tiempo de retorno de 500 años (T500) (0,2% de probabilidad anual de ocurrencia)(amarillo) y longitud de tramos (en km) de zona de flujo preferente (ZFP)(azul). Fuente: Subdirección General de Protección de las Aguas y Gestión de Riesgos, Dirección General del Agua, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

5. Ciencia para el futuro

5.1 Las lluvias extremas ante el cambio climático

Cada una de las últimas cuatro décadas ha sido sucesivamente más cálida que cualquier década que la precedió desde 1850 (IPCC, 2018). 2024 ha sido el año más cálido registrado, habiendo aumentado la temperatura media superficial en 1,55 °C y la oceánica extrapolar en 0,9 °C, ambas con respecto a las preindustriales (1850-1900 (CCCS, 2025; WMO, 2025). El clima de la Tierra está cambiando y lo hace como consecuencia de la emisión de gases de efecto invernadero producidos por la combustión de hidrocarburos fósiles, entre otras causas (IPCC, 2023).

La intensificación del ciclo del agua impulsada por el cambio climático aumenta las precipitaciones extremas diarias, así como los episodios de lluvias torrenciales. La afección puede ocurrir por diversos mecanismos. Por un lado, el aumento de la temperatura en la tierra y el océano hace que aumente la evapotranspiración y evaporación. La atmósfera aumenta la humedad específica de saturación conforme aumenta la temperatura a una tasa de $\approx 7\%$ por cada 1 °C (Seneviratne et al., 2021). Esto es, el calentamiento global hace que el aire esté más cargado de vapor de agua, agua que, eventualmente, podrá precipitar (EASAC, 2013). Se calcula que, en 2024, el contenido en humedad del aire había aumentado un 4,9 % con respecto a 1991-2020, superando todos los registros anteriores (CCCS, 2024). El valor real puede, no obstante, variar por regiones, debido a cambios en la circulación atmosférica general.

Un segundo efecto del cambio climático tiene que ver con el efecto del calentamiento propio del mar. Un mar más cálido hace más inestable a la atmósfera suprayacente, al impulsar la dinámica del ascenso del aire por el calor latente, amplificando así la respuesta por una mayor humedad (Nie et al., 2018).

Por último, los cambios de temperatura en la superficie modifican los gradientes térmicos desde los polos al ecuador debido al fenómeno de la amplificación ártica. Esto es, los polos se calientan más que las latitudes bajas. Cuanto mayor es el gradiente térmico, mayor es la corriente en chorro y menor su ondulación. Una corriente en chorro debilitada por la disminución del gradiente térmico es más proclive a formar meandros en formas de ondas Rossby, por lo que las vaguadas alcanzan latitudes más meridionales, pudiendo desgajarse de la circulación general y formar depresiones aisladas (e.g., danas), como se indicó anteriormente, que generan situaciones de tiempo extremo (Francis y Vavrus, 2015; Röthlisberger et al., 2019). No obstante, existe incertidumbre sobre el grado de afectación a las danas en España.

Al igual que el resto de los mares y océanos del planeta, el mar Mediterráneo se está calentando, habiendo aumentado su temperatura 0,86 °C desde el periodo preindustrial. Sin embargo, el ritmo de calentamiento ha ido aumentando recientemente y en la actualidad lo hace a un ritmo de 0,03 °C a 0,04 °C por año (MedECC, 2024; Pisano et al., 2020). La tasa de calentamiento es superior a la media de los océanos globales. No solo aumenta la temperatura media, sino que las olas de calor se han hecho más intensas y extensas (Juza y Tintoré, 2021). Sin ir más lejos, junio de 2025 ha superado todos los récords anteriores, con una temperatura media del mar de 23,86 °C. El 88% de la cuenca mediterránea experimentó temperaturas superiores al promedio de dicho mes, más del 60% del área experimentó temperaturas medias mensuales de al menos +1 °C por encima de lo normal y casi el 30% superó los +2 °C. El Mediterráneo occidental ha sido el más afectado, con olas de calor marinas que han alcanzado niveles récord de intensidad, duración y extensión (CMS, 2025).

La temperatura media superficial actual del mar Mediterráneo es de 18,6 °C y, para finales del siglo XXI, va a aumentar no solo en superficie sino en toda la columna de agua. La magnitud del calentamiento superficial depende de los escenarios. Así, para escenarios compatibles con la senda de calentamiento actual (e.g., RCP4.5) se espera un aumento comprendido entre 1,6 y 2,7 °C, mientras que para escenarios intensos en emisiones el aumento estará comprendido entre 2,3 y 2,7 °C (MedECC, 2024). El calentamiento será mayor en el este que en el oeste, con máximos en el mar Egeo y mínimos en el mar de Alborán (Parras-Berrocal et al., 2020; Soto-Navarro et al., 2020).

Las precipitaciones intensas en Europa y en otros continentes están aumentando a escalas temporales subdiarias, y esta magnificación está siendo mayor que la correspondiente a nivel diario. En otras palabras, se está observando un incremento de la precipitación muy intensa en periodos cortos, aumento que es consistente con la mayor cantidad de humedad de la atmósfera (Ayat et al., 2022; Wood y Ludwig, 2020). En la costa mediterránea (e.g., la cuenca del Júcar), la precipitación convectiva es una fuente importante de precipitación, y se genera por un número muy pequeño (3-6%) de los eventos de este tipo. La intensidad de la precipitación a escala subdiaria (e.g., 5 minutos) está aumentando también. Un aumento de la precipitación convectiva en pocos episodios implica un aumento de la torrencialidad, lo que es importante para las inundaciones repentinas (Llasat et al., 2021).

El calentamiento del mar hace que, a finales de verano y principios de otoño, su temperatura sea más alta de lo que era antes del cambio climático, favoreciendo así los fenómenos de lluvias torrenciales en caso de formación de una dana. El análisis de atribución climática realizado sobre el ciclón Daniel, en el Mediterráneo oriental, a

principios de septiembre de 2023, cuyo origen fue una dana, concluyó que el aporte extra de humedad causado por el cambio climático contribuyó en parte a la catástrofe. La precipitación máxima registrada alcanzó los 1.092 mm/24 h en Zagora (Grecia). En total murieron más de 11.300 personas, la mayoría en Libia por la rotura de una presa. En Grecia y partes de Bulgaria y Turquía el cambio climático inducido por el hombre hizo que un evento tan extremo como el observado fuera hasta 10 veces más probable y hasta un 40% más intenso. Un evento tan extremo como el observado sobre Libia se ha vuelto hasta 50 veces más probable y hasta un 50% más intenso en comparación con un clima 1,2 °C más frío, aunque las incertidumbres son grandes (Zachariah et al., 2023). Aunque no se ha hecho un estudio de atribución formal sobre las inundaciones de 2024 de Valencia, el análisis de emergencia realizado muestra que en los últimos 75 años las precipitaciones extremas diarias de septiembre a diciembre en el centro y sureste de España han aumentado significativamente con el calentamiento global, aproximadamente duplicando su probabilidad y aumentando igualmente su intensidad en un 12% (World Weather Attribution, 2024). La comparación del clima pasado con el más reciente muestra que la intensidad de la lluvia ha aumentado un 15%. La probabilidad de la formación de tormentas se ha visto favorecida por el calentamiento regional. La intensificación de la lluvia de la dana ha sido adscrita mayoritariamente al cambio climático (Faranda et al., 2024).

La frecuencia de depresiones aisladas está aumentando ligeramente en ambos hemisferios, incluyendo Europa. Esta tendencia es consistente con el desplazamiento hacia los polos de las corrientes polares, que se asocia con el aumento de las rupturas de ondas Rossby, que es el principal mecanismo de formación de depresiones aisladas, así como con el cambio climático (Muñoz et al., 2020). Estudios bajo escenarios de altas emisiones (escenario SSP5-8,5) con la última versión de modelos generales de clima muestra que, en Europa, la frecuencia de depresiones aisladas aumenta ligeramente en invierno y, particularmente en primavera. Por el contrario, no se prevén cambios importantes en verano u otoño, debido a la inconsistencia entre los modelos, e incluso se prevé una disminución en el Mediterráneo. Se prevé un aumento, tanto de la extensión temporal de las danas de larga duración en verano y otoño, como de la intensidad, que será general en todas las estaciones. El hecho de que no todos los modelos sean capaces de reproducir bien estos procesos hace que la incertidumbre sobre el posible impacto del cambio climático sobre la formación de depresiones aisladas sea alta (Mishra et al., 2025).

Estudios de caso basados en danas de Europa central, usando un número reducido de modelos, muestran que puede aumentar la frecuencia e intensidad de estas, así como el total de precipitación (Thompson et al., 2024). Análisis de daños por inundaciones repentinas en las comunidades de Valencia y Cataluña bajo distintos escenarios de calentamiento y de crecimiento de la población muestran que los daños serán tanto mayores cuanto mayor sea el nivel de calentamiento y de aumento poblacional (Cortès et al., 2019) (Fig. 9).

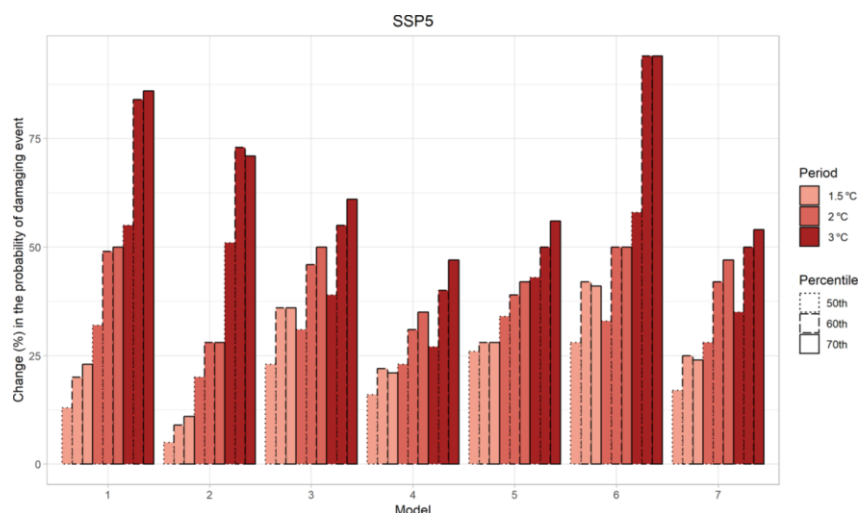


Figura 9: Cambio en la probabilidad de que se produzca una inundación con daños moderados a graves (percentiles 50, 60, 70 respecto a los daños producidos en cada episodio de inundaciones) respecto al periodo 1976-2005 para 7 modelos climáticos (1 a 7), tres escenarios de aumento de temperatura (1,5 °C, 2 °C y 3 °C) y un escenario socioeconómico (SSP5, intenso en emisiones) en la Comunidad de Valencia. De: (Cortès et al., 2019).

5.2 Herramientas para la modelización de la peligrosidad y el riesgo de inundación

La Directiva 2007/60/EC sobre la Evaluación y Gestión del Riesgo de Inundación establece en su artículo 1 que: “ *El objetivo de la presente Directiva es establecer un marco para la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, destinado a **reducir las consecuencias negativas** para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica, asociadas a las inundaciones en la Comunidad [Europea]...*”. Esto requiere evaluar los distintos factores del riesgo. El primero es el peligro o peligrosidad que, a su vez, tiene dos componentes, frecuencia e intensidad. Como la lluvia está en la base del problema de las avenidas y las inundaciones repentinas que causan, se requerirán modelos e información de este meteoro, así como otros que, a partir de ello, calculen la escorrentía y los caudales en los cauces, lo que permitirá poder calcular los flujos de agua y sedimento, su velocidad y cota máxima. Todo ello es importante a efectos del cálculo de daños. La aplicación de un modelo de este tipo (TETIS) (Francés et al., 2007; Vélez et al., 2009), al barranco del Poyo, que fue la zona más afectada por las inundaciones de 2024 en Valencia, sería útil para establecer las necesidades futuras para alertar a la población y guiar la prevención y restauración a efectos de disminuir los futuros daños.

Este tipo de modelos, con bases físicas, distribuidos en el espacio e integrales, permite calcular los principales parámetros relacionados con la avenida, así como sus impactos y pérdidas sobre la población, agricultura, etc. Las inundaciones de Valencia de 2024 fueron extraordinarias, no tanto por la lluvia acumulada a nivel diario, aunque también fue de lo más alto registrado, sino, muy particularmente, por la lluvia a nivel subdiario. Según AEMET, la lluvia diaria registrada en Turís (772 mm) fue el segundo valor máximo registrado. Sin embargo, el registro horario de 185 mm fue récord, duplicando el umbral de aviso rojo y multiplicando por tres lo que AEMET considera como lluvia torrencial. Igualmente, las 5 h de duración de la tormenta fue récord. Todo esto generó caudales que, en el cruce con la carretera V31, bordeando ya La Albufera, pudieron alcanzar $4.500\text{--}5.000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$, superando lo calculado para un periodo de retorno de 500 años. Las simulaciones de TETIS en la estación de aforo del barranco del Poyo arrojaron un caudal de unos $2.500\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ (Fig. 10). Teniendo en cuenta que hay que sumar un flujo de sedimentos del 10 al 30% en el momento

del pico, esto resulta en un caudal entre 2.700 y 3.500 m³ s⁻¹, lo que correspondería a un periodo de retorno de 1.000 a 5.000 años (Salazar-Galán et al., 2021).

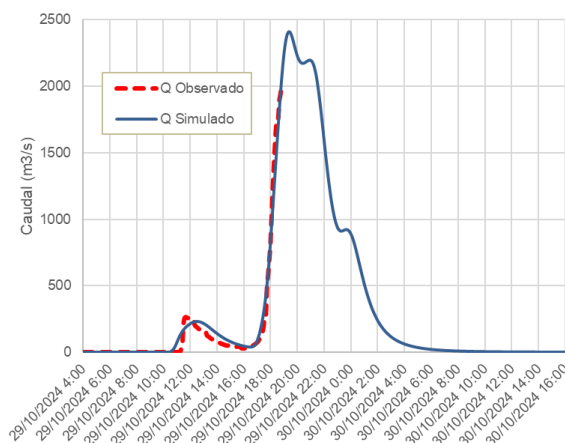


Figura 10. Caudal en la estación de aforo del barranco del Poyo del 20 al 30 de octubre de 2024 en periodos de 5 minutos. Rojo: observado hasta que la estación de aforo fue destruida; azul: simulado. Fuente: F. Francés, IIAMA, UPV, Valencia.

Modelos como TETIS permiten calcular los hidrogramas tipo para diferentes periodos de retorno (PR=10, 50, 100, ...500 años). Estos se introducen en modelos hidráulicos (p. ej., IBER) (Bladé et al., 2014) que simulan el movimiento del agua en el terreno, lo que permite calcular la extensión de la zona inundada y parámetros como la profundidad del agua (calado), la velocidad y la energía del flujo. La combinación con escenarios de cambio climático permite ajustar los resultados a condiciones de futuro según distintos supuestos. Por ejemplo, la aplicación a la rambla de la Viuda (Castellón) usando 12 modelos de circulación regional (RCM) del proyecto EURO-CORDEX (<https://www.euro-cordex.net/>)¹⁰ muestra que, para un periodo de retorno de 100 años, la precipitación a plazo medio (mediados de siglo) y largo (finales de siglo) aumenta un 14% a 19%, respectivamente. El caudal, sin embargo, lo hace en un 53% y 58%, respectivamente (Beneyto et al., 2024). Esto muestra la no linealidad entre lluvia y escorrentía, relación que varía para distintos niveles de precipitación. A bajos niveles, la escorrentía puede ser menor, pues gran parte del agua es absorbida por el suelo. A altos niveles, sin embargo, la mayor parte escurre como flujo superficial (Beven, 2012).

Finalmente, estos modelos pueden utilizarse para calcular el riesgo, esto es, las consecuencias potenciales de la inundación. Ello requiere de información detallada en el espacio de los elementos expuestos (casas, industrias, explotaciones agrarias, etc.), cuyos daños pueden calcularse en función de la magnitud de la crecida. Cuanto más completa sea la información, más ajustados podrán ser los cálculos del riesgo. Por ejemplo, la inclusión de los vehículos añade un daño muy importante (Bocanegra y Francés, 2021), como se ha podido comprobar en las inundaciones de Valencia de 2024. La aplicación de este modelo al barranco del Poyo/Pozalet en 2006 arrojó un daño estimado por inundación de 15 M€/año, excluyendo coches, gastos de limpieza e infraestructuras (Francés, 2006). Más aún, su aplicación a medidas preventivas para minimizar los daños sobre la base de un periodo de retorno de 500 años resultó en que una inversión de 147 M€ reduciría los

¹⁰ Accedido el 15 de febrero de 2024

daños en 11 M€/año, dejando un daño marginal de 4 M€/año, lo que implica una alta eficiencia de la inversión realizada (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2006).

En resumen, es posible disponer de herramientas que permitan planificar las medidas de prevención, medidas que, además, pueden ser enormemente eficientes. Existen un variado conjunto de modelos, algunos de ellos de software libre, que pueden usarse para planificar o predecir las avenidas (Díez-Herrero et al., 2009). La inclusión del cambio climático para la prevención del futuro es fundamental, pues basarse en un clima estacionario carece de sentido en la actualidad (López y Francés, 2013; Milly et al., 2008). La experiencia de las inundaciones de Valencia de 2024 indica también que hay que ampliar el tipo de elementos de riesgo, como es el caso de los vehículos. No solo por los elevados daños sino porque pueden afectar a los flujos de agua y bloquear las zonas de desagüe, favorecer la entrada de agua a los edificios o bloquear el paso del agua y aumentar los niveles de inundación, entre otros efectos (Mei et al., 2023; Mignot et al., 2020). La aplicación de este tipo de modelos a la alerta temprana es una tarea urgente.

6. Gestión del riesgo, exposición y vulnerabilidad

La gestión del riesgo de desastre requiere, en primer lugar, conocer en detalle el desastre, empezando por el peligro meteorológico que lo desencadena. Esto es crítico porque las características del desastre determinan en gran medida la forma de abordar la gestión, empezando por la alerta temprana. Por ejemplo, una inundación causada por una crecida, que normalmente se da en grandes ríos y superficies, tiene unas dinámicas de caudales y ondas pico que son predecibles hasta con días de antelación. Esto permite alertar a la población con tiempo y adoptar medidas de mitigación. Así, cuando la crecida del río Tajo del 20 de marzo de 2025 amenazaba el hospital de paraplégicos, que está ubicado en el límite de la zona inundable con un periodo de retorno (PR) de 500 años, la UME instaló con anterioridad a la llegada del posible pico de caudal una barrera de protección contra la inundación, protegiéndolo así de haberse llegado a alcanzar los caudales críticos. Por tanto, la alerta temprana unida a la cartografía del peligro de inundación sirvió para proteger los bienes y vidas de un centro habitado por personas extremadamente vulnerables.

La situación es muy diferente ante inundaciones por avenidas causadas por lluvias torrenciales. Estas suelen darse en cuencas con alta rugosidad del relieve y de pequeño tamaño (e.g., la cuenca del barranco del Poyo drena 369 km²), por lo que el riesgo va a estar muy concentrado en el espacio. Dado el pequeño tamaño de las cuencas, el tiempo de respuesta desde que comienzan las lluvias hasta que la avenida adquiere dimensiones peligrosas apenas es de unas horas. Consecuentemente, la alerta temprana en este tipo de inundaciones tiene que ser verdaderamente temprana. Un retraso de fracciones de hora convertirá esta herramienta en inútil, no digamos ya si el retraso es de horas. Conocer cómo se gesta el desastre requiere estar preparado para evitar cualquier pérdida de tiempo en la toma de decisiones.

Las alertas tienen que ser simples y directas, con instrucciones claras y ejecutables, pensadas para el receptor, no para el emisor, y deben emitirse usando todas las fuentes disponibles (UNDRR, 2022). En el caso de poblaciones con distintos idiomas, como es frecuente en la costa mediterránea al tener una alta población flotante de turistas, los mensajes deben emitirse en aquellos idiomas que permitan alcanzar al máximo de los grupos en riesgo. En otras palabras, deben ser prácticos, al margen de cualquier otra

consideración. Como la inundación puede aparecer de forma súbita, el tiempo de espera de la advertencia puede ser de minutos a horas. Ponerse a redactar desde cero un aviso aumenta el riesgo de retraso y de cometer errores en el lenguaje que lo pueden hacer poco claro. Por ello es conveniente disponer de plantillas preelaboradas que permiten a las autoridades completar detalles en tiempo real (ubicación, tiempo, gravedad) y enviar alertas casi al instante (UNDRR, 2023).

Pero hay más; conocer el peligro que genera el desastre conlleva conocer las posibles limitaciones que pueden existir en la predicción. Precisamente, los fenómenos de mesoescala que dan lugar a procesos convectivos generadores de tormentas son difíciles de pronosticar debido a problemas de escala y resolución, a la sensibilidad a las condiciones de partida, a interacciones con las topografías complejas o a la propia representación física de los procesos en los modelos, entre otros (Schumacher y Rasmussen, 2020). Los gestores de la emergencia deben conocer estas limitaciones porque, aunque la globalidad del fenómeno de lluvias extremas pueda ser pronosticada con acierto, incluso con varios días de anticipación, los aspectos principales del peligro pueden presentar variaciones espaciotemporales que modifiquen sustancialmente el posible riesgo y consecuentes daños, como ocurrió con la dana de Valencia (Gascón et al., 2025). Por ejemplo, pequeñas variaciones en la ubicación del centro de una dana o en la ruta que sigue un ciclón tropical pueden tener grandes efectos sobre el riesgo de desastre. Y aunque las predicciones a muy corto plazo pueden mejorar los pronósticos, puede que siga habiendo importantes incertidumbres a la hora de movilizarse para mitigar el riesgo.

Por ello, hay que adoptar medidas preventivas tan rápido como sea posible, a pesar incluso de no disponer de un pronóstico tan exacto como sería deseable, sabiendo que, de no materializarse el peligro tal como se preveía, las medidas simplemente habrán significado molestias a la ciudadanía y algún pequeño perjuicio, pero que, de no haberse adoptado y la peligrosidad haberse manifestado en su peor escenario, podrían haber supuesto daños mayores. Las personas son más proclives a lamentar la inacción que la acción, salvo que se ponga en riesgo su vida (Ommer et al., 2024).

La ordenación del territorio y el planeamiento urbano son dos de los principales instrumentos de planificación con los que cuentan las administraciones para controlar la exposición y la vulnerabilidad ante el riesgo de desastre. Por exposición nos referimos a componentes físicas (e.g., viviendas, puentes, carreteras, etc.), sociales (número de personas, sexo, edades, condición sanitaria, grupo social, etc.), económicas (industrias, comercio, agricultura, ganadería, etc.), o ambientales (zonas protegidas, depuradoras, residuos, productos tóxicos, etc.). Por tanto, la lista para hacer una evaluación del riesgo es grande. La manera más frecuente de determinar la exposición es cruzar la cartografía de riesgo (ver 4.4) con los mapas de los elementos a considerar como expuestos (Lugeri et al., 2006).

A pesar de que los instrumentos de planeamiento fijan límites precisos para la invasión de las zonas inundables, lo cierto es que en España muchas personas e importantes bienes y actividades se encuentran en áreas susceptibles de sufrir inundación. Así, en los últimos 40 años se han realizado construcciones en cauces (i.e., barrancos, ramblas, etc.), en las desembocaduras de los ríos, en zonas inundables e incluso algunos cauces han pasado a ser parte del callejero urbano. Se estima que el 9% del parque de viviendas de España, equivalente a 2,3 millones, están ubicadas en zonas con riesgo de inundación. De estas, un 7,9% están en zonas con un periodo de retorno de 100 o más años. Las provincias más

expuestas al riesgo de inundación en España son Valladolid, Murcia, Sevilla y Gerona con porcentajes superiores al 20% de exposición de las viviendas registradas (base catastral) (Ungría y Still, 2024).

La ocupación de las zonas inundables es tal que en algunas ciudades se llega a ocupar la zona de flujo preferente (ZFP) (e.g., Gerona, 6,7%, 4.000 viviendas; Gandía (Valencia), 1,1%, 800 viviendas; Denia (Alicante), 9,8%, 4.300 viviendas; Murcia, 19,8%, 41.000 viviendas). El promedio de ocupación de estas ciudades para zonas de inundación con periodo de retorno de 100 años es un 26,5% y de 500 años un 44,6% (Rodríguez et al., 2025). La exposición a las inundaciones de la población española asciende a 3.263.000 habitantes (el 6,9 % de la población total), y la pérdida económica potencial en toda España se estima en al menos 122.132 millones de euros (Cánovas-García y Vargas Molina, 2025).

Estas cifras se suman a lo mencionado anteriormente (véase el punto 4.1) sobre la exposición de escuelas, hospitales, centros de salud, residencias, estaciones depuradoras, instalaciones industriales potencialmente contaminantes —unas 350 en toda España— y empresas de diversos sectores. Sin ir más lejos, se estima que el 22 % del PIB de la Comunidad Valenciana se encontraba en la zona afectada por la DANA de 2024.

Sirvan estos ejemplos para señalar que las ciudades españolas, particularmente en el litoral mediterráneo, pueden tener amplios porcentajes del territorio afectable por inundación ocupado por viviendas. La situación no ha sido siempre así, pues el porcentaje que se ha construido en los últimos años ha ido aumentando (Fig. 11). Durante el boom inmobiliario reciente se estima que se han construido 358.000 viviendas en zonas inundables. Normalmente, las primeras construcciones en una zona de riesgo suelen asentarse en las áreas más seguras. Conforme el terreno se va acabando, las últimas terminan invadiendo las zonas inundables (Morales et al., 2021).

La última componente del riesgo es la vulnerabilidad, que tiene tres partes: susceptibilidad, capacidad de afrontamiento y capacidad de adaptación. La primera indica cómo de sensible es el elemento expuesto a sufrir daño por el agente causante del desastre, en este caso la inundación. No es lo mismo una vivienda de una sola altura, probablemente vieja y construida con malos materiales, que una de construcción reciente, con varias alturas y buena calidad de construcción. Pero hay más, el diseño de la construcción puede ser determinante en caso de inundación, como lo ejemplifica el centro comercial de Ikea en la zona de la dana. Ikea, por diversas consideraciones relacionadas con el terreno y la hidrología de la zona, construyó su centro comercial sobre pilotes de 4 m de altura, situando su primera planta y el aparcamiento en ese nivel, y por encima el resto del centro. Esto obligó al Ayuntamiento de Alfafar a modificar su plan de actuación integrada, ya que los requisitos de la nueva construcción eran incompatibles con el ordenamiento existente en aquel momento. De esta manera, la inundación por la dana no afectó a este centro comercial. Vivir en un edificio de varias alturas de construcción reciente puede ser seguro, salvo si tienes limitaciones de movilidad y los ascensores no se han construido pensando que la sala de máquinas puede inundarse y quedar inutilizada durante meses, obligando así a las personas a no poder salir de sus domicilios. Por tanto, un edificio en una zona inundable puede tener vulnerabilidades distintas, según que se haya tenido en cuenta o no la inundación.

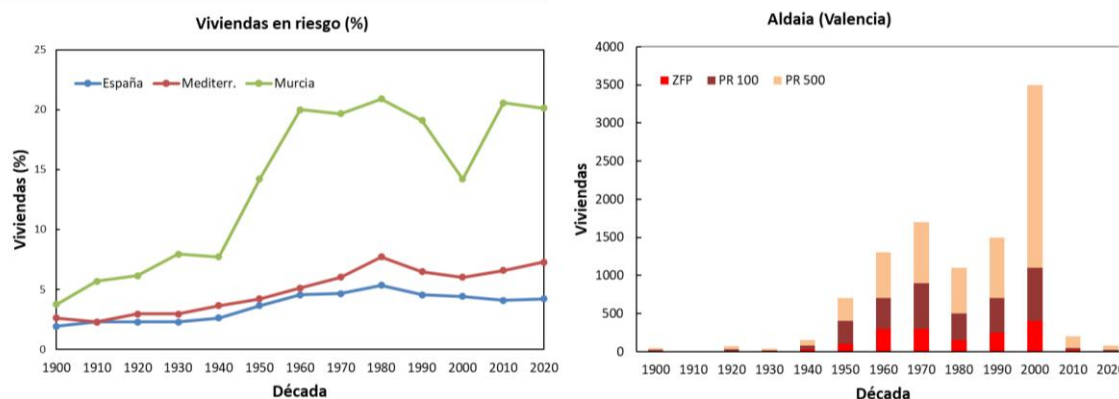


Figura 11. Izquierda: porcentaje de viviendas construidas en España, en la zona mediterránea y en la Región de Murcia en zona inundable durante las últimas décadas. Derecha: número de viviendas construidas en el municipio de Aldaia (Valencia) en la zona de flujo preferente (rojo, riadas peligrosas)(ZFP), en zonas con periodo de retorno de 100 años (granate) o de 500 años (naranja). Fuente: (Olcina Cantos et al., 2025; Rodríguez et al., 2025).

A nivel social, la susceptibilidad se refiere a la distinta capacidad de soportar daño por parte de las personas según su edad, condición, estatus social, etc. El conocimiento de la vulnerabilidad social es crítico en toda evaluación del riesgo de desastre. La evaluación precisa de los más vulnerables y su ubicación es fundamental para minimizar las muertes por desastres, ya que la alerta temprana y las actuaciones más urgentes deben contemplar a este colectivo. El no hacerlo puede tener consecuencias letales.

Esto se vio bien en las muertes ocurridas durante la dana inundación de 2024 en Valencia. En varios municipios afectados había personas mayores, algunas de ellas dependientes y, consiguientemente, sin capacidad para evadirse del riesgo inminente, viviendo en las plantas bajas y sin conexión a plantas superiores. El paradigma del desastre evitable por una buena planificación urbanística lo encontramos en la residencia de ancianos Centro Residencial Savia (Paiporta, Valencia), situada a unos 5 km del barranco del Poyo. Durante la dana murieron seis personas porque no pudieron ser evacuadas a tiempo de la planta baja, que es donde tenían sus actividades principales. La edad es un factor crítico, como lo muestra que casi la mitad de las personas fallecidas en la inundación de Valencia tenían 70 o más años.

La capacidad de afrontamiento hace referencia a “... la capacidad de las personas, organizaciones y sistemas, utilizando las habilidades y los recursos disponibles, para enfrentar y gestionar condiciones adversas, emergencias o desastres a corto plazo...” (IPCC, 2022). La capacidad de afrontamiento tiene una dimensión individual (e.g., disponer de una mochila para la emergencia, tener un plan de contingencias para el vehículo aparcado en el garaje subterráneo, etc.), comunitaria (e.g., sistema de alerta temprana local, grupos de voluntarios para asistir en la emergencia, etc.), e institucional (e.g., sistemas de alerta temprana, planes para evacuar en caso de emergencia, etc.). La capacidad de afrontamiento a todos los niveles es fundamental para reducir el riesgo. En una zona de riesgos el empoderamiento desde el nivel individual al comunitario es una garantía de poder afrontar el desastre. Esto pasa por disponer de información, formación y capacitación para, a cada nivel, estar preparado para antes, durante y después de la emergencia. La capacidad de afrontamiento se construye, empezando por la escuela. Cuando se vive en un lugar de riesgo, la formación desde la infancia será la garantía de que, en el futuro, todos puedan interpretar los avisos y mensajes emitidos por los responsables

de la gestión del riesgo, y sepan claramente lo que tienen y no tienen que hacer ante la emergencia. La preparación frente al desastre debe incorporarse al currículo escolar (Morote Seguido y Olcina Cantos, 2021; UN/ISDR, 2007).

Un elemento expuesto de gran trascendencia para las familias son los vehículos (Fig. 12). Además, como se ha comentado, pueden contribuir a magnificar el desastre por inundación, y complicar en exceso las tareas de recuperación. Parece obligado pensar que el planeamiento debe considerar a los vehículos. Los planes de emergencia deben disponer de planes de contingencia para saber qué hacer con ellos, incluyendo el establecimiento de rutas hacia zonas de evacuación previamente establecidas y conocidas por las personas que habitan en la zona de riesgo.

Finalmente, la capacidad de adaptación se refiere a “... *la capacidad de los sistemas, instituciones, las personas y otros organismos para adaptarse a daños potenciales, aprovechar las oportunidades o responder a las consecuencias* [de los daños por desastres]...” (IPCC, 2022). Se trata, por tanto, de la inclusión del riesgo de desastre en la mirada a largo plazo por parte de las personas y, principalmente, las instituciones. Los principales elementos de actuación son: planeamiento urbanístico, gobernanza institucional y planificación económica. El planeamiento urbanístico debe tener en cuenta el riesgo de desastre para construir y planificar viviendas resistentes al mismo. Los ejemplos señalados anteriormente son ilustrativos. Tras el desastre es obligado revisar lo que se decidió en su día para no cometer errores que magnifican el riesgo. Los ejemplos son numerosos y escapan a este trabajo, pero uno es obvio: las nuevas construcciones deben revisarse para asegurarse que, como poco, los ascensores tengan sus máquinas fuera de la exposición al agua. La gobernanza institucional, a través de la revisión periódica de los planeamientos y la puesta en marcha de planes de adaptación contra el cambio climático y la nueva dimensión de los peligros que conlleva es importante, en tanto que este puede afectar al riesgo de desastre. Como se ha aludido, el hecho de que más de la quinta parte de la economía de un territorio de la entidad de Valencia esté situada en zonas de riesgo requiere una reflexión.

Lamentablemente, el planeamiento urbanístico no suele estar actualizado, ni incluir el cambio climático y sus impactos sobre el riesgo de inundación. Los planeamientos del 58,4% del total de municipios existentes en España son anteriores a 2008, año de la Ley del Suelo que obliga a elaborar mapas de riesgo. Además, un 34% tiene planeamientos anteriores al año 2000, esto es, anterior a los principios de sostenibilidad fijados en la Estrategia Territorial Europea (1999) para implantar un desarrollo territorial sostenible. Solo un 24,6% de los municipios han revisado su planeamiento municipal entre 2009 y 2024. En total, solo 672 municipios (un 8,3%) han revisado sus planeamientos con posterioridad a la modificación de la Ley del Suelo (2015) en la que aparecen guías para la elaboración de cartografías de riesgo. La situación de los municipios mediterráneos es similar. Un 62% de ellos tiene planeamientos anteriores al año 2000, un 31,5% lo tiene con posterioridad al año 2008 y solo un 14% lo tiene con posterioridad al año 2015 (Olcina Cantos et al., 2025). Valgan estas cifras para dejar claro que la incorporación del riesgo al planeamiento urbanístico sigue siendo una asignatura pendiente.



Figura 12. Detalle de la afección a vehículos por la inundación de Valencia de 2024. Fuente: El País.

La planificación económica debe tener en cuenta el riesgo para no concentrar ciertas actividades en las zonas en peligro y diversificarlas para reducir los impactos. De nuevo, concentrar el 22% de la actividad económica de Valencia en una zona inundable contradice este principio básico. Finalmente, la recuperación tras el desastre debe tener una mirada de futuro teniendo en cuenta que las actuaciones de ahora no supongan bloqueos que comprometan futuras actuaciones que puedan mitigar el desastre. Por ejemplo, los planes de construcción en zonas inundables que no estén alineados con la evaluación del riesgo más actualizada no deben proseguir, puesto que adaptar las construcciones luego a las nuevas necesidades puede ser mucho más costoso o incluso ser imposible. La inclusión del cambio climático en la recuperación y en el planeamiento es obligado.

7. Discusión

El análisis detallado del comportamiento de la dana de Valencia sugiere que hay procesos atmosféricos ligados al cambio climático que probablemente están afectando a este tipo de fenómenos. Entre los factores identificados destaca la ampliación de las células de Hadley hacia el Norte, las incursiones de aire tropical desde el sur y la cuasi resonancia entre el chorro polar y el subtropical (Mishra et al., 2025). La ruta normal de formación de estos fenómenos parece que está cambiando (Rivera, 2025). Esto lleva a plantear la necesidad de realizar investigaciones específicas sobre cómo el cambio climático puede estar afectando a la formación de estos fenómenos atmosféricos y cuáles son los mecanismos que están implicados.

Aunque los modelos actuales han ido ganando en precisión, tanto que fenómenos como las danas pueden ser previstos con días de anticipación, la escala espacial y temporal a la que ocurren es demasiado pequeña como para que pueda ser bien resuelta por los modelos de predicción operativa. Incluso cuando se acoplan a los modelos globales otros de área limitada y de mayor resolución, pequeñas variaciones espaciales en la ubicación del centro del sistema terminan afectando grandemente a los impactos (Gascón et al., 2025). El ejemplo de las inundaciones de septiembre de 2023 es ilustrativo. Los pronósticos y avisos de la AEMET fueron cambiando conforme se fue desplazando el centro de la dana (AEMET, 2023). Por ello, aunque la generalidad del fenómeno sí es predecible,

sus detalles pueden no serlo hasta pocas horas antes de que ocurra el desastre, por lo que el pronóstico puede tener limitaciones. En estas circunstancias cobra mayor importancia el papel del predictor experto, que analiza de forma continua los datos procedentes de los modelos, los interpreta y realiza un proceso de vigilancia continuo basándose en las diferentes fuentes de información de observación (estaciones de superficie, radar, rayos, satélite, etc.).

Al margen de que es esperable que nuevas investigaciones puedan avanzar en la predicción de estos fenómenos, el conocimiento que deben tener los gestores de la emergencia sobre las limitaciones de la ciencia a la hora de lanzar las alertas es importante, sabiendo que es mejor alertar pronto y errar que no hacerlo. La experiencia en fenómenos adversos de gran impacto (e.g., tornados) demuestra que las alertas salvan vidas y que cada minuto de anticipación cuenta (Simmons y Sutter, 2008). Esto requiere actualizar la forma de actuar de los servicios de emergencia ante fenómenos que, por su naturaleza, son y seguirán siendo difíciles de predecir.

Por otro lado, los cambios en la circulación atmosférica general que el cambio climático está produciendo nos alertan sobre la posible afectación a nuestra capacidad de predicción. El cambio climático influye cada vez más en la predicción meteorológica operativa, tanto de forma directa (a través de cambios en las condiciones atmosféricas y oceánicas) como indirecta (a través de su impacto en el desarrollo de los modelos, la calibración y las necesidades de los usuarios). Se necesitan mejoras en la precisión de los pronósticos, una mayor resolución espacial y temporal, y una mejor descripción de la incertidumbre, para aprovechar todo el potencial de los pronósticos como facilitadores de un nuevo nivel de toma de decisiones informada sobre el tiempo y el clima (WMO, 2021).

Las disciplinas fundamentales para el pronóstico de desastres por inundación, como la meteorología, la hidrología y la hidráulica, así como aquellas vinculadas a la gestión del riesgo, como la comunicación, la logística y la coordinación operativa, son altamente complejas y requieren formación especializada. Tras la inundación de Valencia, algunos de los máximos responsables de la toma de decisiones admitieron públicamente no tener conocimientos técnicos en la materia, ni estar familiarizados con las herramientas disponibles para alertar a la población.

Que la dirección de una emergencia pueda recaer en personas sin la capacitación adecuada resulta inadmisibles, especialmente en un país como España, que cuenta con profesionales altamente cualificados en todas las disciplinas científicas que se dan cita en las catástrofes que sufrimos. Esta situación pone de manifiesto la urgente necesidad de profesionalizar y tecnificar la gestión de las emergencias.

Los avisos emitidos por la AEMET o las confederaciones hidrográficas se basan exclusivamente en datos científicos y técnicos debidamente validados. Por tanto, es imprescindible que la dirección de la emergencia esté en manos de técnicos expertos en el tipo de riesgo específico de su responsabilidad, ya sea inundaciones, incendios forestales, erupciones volcánicas u otros. Cuando lo que está en juego son vidas humanas y activos de gran valor económico, es esencial garantizar que quienes lideran la respuesta a estos procesos sean profesionales de carrera con las máximas cualificaciones, que formen parte de entidades persistentes que mantengan la memoria histórica. La dimensión política debe acompañar y facilitar la toma de decisiones, valorando sus implicaciones y

asegurando su implementación. Sin embargo, las decisiones operativas deben basarse en criterios técnicos, y ser lideradas por personas expertas y debidamente acreditadas.

Más aún, la exitosa gestión de alguna emergencia reciente, como la erupción del volcán de Tajogaite, en La Palma, en septiembre de 2021, muestra que disponer del apoyo de un comité científico asesor puede ser enormemente útil para disponer en todo momento del mejor asesoramiento científico y técnico; todo ello sin minusvalorar el que proveen otras instituciones a través de sus representantes en los comités de dirección de la emergencia. Las tareas de un comité de esta naturaleza que asista a los comités de dirección deben estar acotadas y restringidas exclusivamente al asesoramiento. En situaciones donde podemos encontrarnos con contextos que superen lo conocido debido al cambio del clima, disponer de este asesoramiento por parte de personas de reconocida solvencia científica y técnica puede ayudar a mejorar la gestión del desastre.

Las instituciones encargadas de proveer servicios a los gestores de la emergencia suelen disponer de visores a los que la ciudadanía acude para consultar lo que estima conveniente. Frecuentemente, en un extraordinario ejercicio de transparencia, muchos de estos visores son muy completos, ofreciendo al usuario multitud de opciones que, de no ser experto, difícilmente podrá valorar con rigor. Dado que el acceso a esta información es generalizado (e.g., tras las inundaciones de Valencia, el acceso al visor del Sistema Nacional de Zonas Inundables del MITECO ha pasado de registrar miles de visitas a millones), es importante transmitir la información más relevante de la manera más sencilla posible, para que las personas no expertas puedan entenderla fácilmente. Todo ello en beneficio de su mayor empoderamiento personal, lo que solo es posible mediante el acceso y comprensión de la información disponible. Esto no quita que las instituciones puedan y deban tener otras informaciones más completas, con todos los detalles de los modelos, procesos de cálculo, etc., para el personal especializado, con acceso que puede ser más restringido, y donde se ejerciten todas las garantías de transparencia sobre el proceso del que se informa. Simplicidad y claridad son características que toda comunicación al público debe tener, por lo que es importante revisar los protocolos de comunicación actuales para garantizar que así sea.

La tecnología actual y los sistemas de información y monitorización de caudales (e.g., SAIH) están altamente desarrollados, lo que permite pasar de la predicción de la lluvia a la de caudales en los ríos y barrancos. Existen ya modelos que se usan a nivel europeo y mundial de forma operativa. No obstante, las avenidas propias de las lluvias torrenciales necesitan sus propios modelos, de los que también existen ejemplos. La importancia de las inundaciones repentinas causadas por las danas u otros fenómenos meteorológicos extremos hace imperativo acelerar la puesta en marcha del proceso de cálculo del peligro de inundación y del correspondiente riesgo de inundación, para hacerlo operativo en un tiempo lo más corto posible. Esta es una prioridad que no admite demora pues, como se ha dicho, estos fenómenos están en ascenso y su ocurrencia hoy no es óbice para que vuelvan a ocurrir mañana.

La comunicación es fundamental para empoderar a la ciudadanía para que se proteja y adopte las medidas necesarias para disminuir su exposición y vulnerabilidad al riesgo existente donde vive, trabaja o estudia. A veces, la terminología científica, que necesariamente tiene que ser precisa, se traslada a la opinión pública sin considerar las dificultades de comprensión que puede tener para el no experto. Por ejemplo, hablar de periodos de retorno es complejo de entender y fácil de malinterpretar. Probablemente,

transformar ese concepto en probabilidades facilitaría la comprensión. No obstante, los expertos en comunicación deben valorar qué transmitir y cómo hacerlo, para asegurarnos que se consigue la mayor comprensión por parte de los no expertos.

La necesidad de disponer de pronósticos precisos es difícil en los fenómenos de mesoescala, como ya se ha comentado. La incorporación de técnicas de inteligencia artificial para disminuir el tiempo de procesado y aumentar la precisión de la predicción es prometedora. Aunque su aplicación a la predicción rutinaria ya la viene haciendo el CEPPM, ampliarlo a los fenómenos extremos que son propios de las inundaciones repentinas tiene limitaciones pues, al ser fenómenos extremos por naturaleza, no se dispondrá de una base de datos grande. Más aún, el cambio de clima actual puede llevarnos por caminos desconocidos. No obstante, es probable que se pueda mejorar la resolución espacial con la ayuda de estas nuevas tecnologías, lo cual es muy importante. En todo caso, la urgente necesidad de mejorar la previsión de estos fenómenos hace que esta línea de investigación debe ser prioritaria.

Las sesiones de la RAC han puesto de relieve que la gestión de la emergencia adolece de enormes e importantísimas carencias, como se ha puesto de manifiesto en las inundaciones de Valencia de 2024. La no emisión de la alerta temprana fue responsable de muchas de las pérdidas de vidas humanas. De poco sirve una información científica de apoyo solvente hasta donde permite la ciencia si luego no se sabe qué hacer con ella. Por consiguiente, mientras seguimos avanzando en la ciencia que informa el posible desastre, hay que dejar constancia de que es necesario un análisis profundo de la gestión de la emergencia por las ciencias que son competentes en esas materias.

Como se ha indicado, un asunto crucial de la gestión de la emergencia es la emisión de la alerta temprana. Toda la información científica auxiliar y de base está destinada a informar a la población con la mayor celeridad y exactitud del peligro inminente. Hasta la emisión de la alerta, buena parte de los esfuerzos de muchas instituciones están dedicados a establecer las condiciones de contorno que terminan en los avisos y alertas a la población y al resto de agentes implicados. Con la emisión de la alerta culminan los esfuerzos de muchas instituciones, esfuerzos que deben estar perfectamente coordinados para conseguir el éxito de informar a la población para que actúe y se proteja. El engranaje de la preparación y transmisión de la información que culmina en la alerta temprana debe ser revisado y actualizado ante la magnitud de los fallos observados en la inundación de 2024 en Valencia.

La recuperación tras un desastre abre una oportunidad para corregir los errores que haya habido en el planeamiento urbanístico o territorial previo, a fin de mitigar un futuro desastre. Por eso, tras el desastre debe haber una evaluación de los planeamientos y, en tanto se determinan los posibles fallos, debe haber una moratoria de acciones que pueden comprometer el futuro desastre. Esto afecta de manera particular a decisiones que pueden originar situaciones de bloqueo de difícil solución en el futuro, particularmente las ligadas a la construcción de viviendas o infraestructuras. Lamentablemente, tras las inundaciones de 2024 en Valencia se ha podido constatar cómo algunos ayuntamientos desempolvaban planes de construcción pasados, para ponerlos en marcha de forma inminente. Es probable que algunos de estos planes no contemplen adecuadamente las medidas de mitigación del riesgo que son de obligado cumplimiento por la normativa actual. Esto es especialmente relevante en lo que respecta a la necesidad de que cualquier construcción contemple no solo el peligro de inundación, que también, sino el riesgo de inundación.

La naturaleza del territorio juega un papel crucial en el proceso de conversión de la lluvia en caudales de los cauces que lo drenan. El suelo sellado no absorbe el agua de lluvia, sino que lo canaliza con rapidez hacia los cauces, maximizando el caudal y disminuyendo el tiempo de su formación. Por el contrario, un territorio forestal es más esponjoso, y ralentiza y minimiza, hasta cierto punto, la escorrentía. Por eso es importante usar las herramientas de planificación hidrológico forestal para controlar la escorrentía. Sin embargo, la ayuda que el bosque provee ante la lluvia se desvanece e incluso aumenta el peligro en el caso de incendio. Las lluvias intensas posteriores a un incendio pueden provocar pérdidas de suelo equivalentes a más de un siglo de formación, alterando así su naturaleza durante largos períodos de tiempo (Pausas et al., 2008). Consecuentemente, las medidas de ordenación territorial deben hacerse de forma integrada, contemplando todos los peligros.

La naturaleza del fenómeno que causa el desastre es crítica a la hora de organizar la respuesta, particularmente la emisión de la alerta temprana. Mientras que en las grandes cuencas (e.g., Tajo, Ebro, Guadiana) la crecida tiene una dinámica muy predecible y con tiempos de alerta de hasta días, en las del litoral mediterráneo los márgenes para alertar son de apenas horas. Bajo estas circunstancias, el aviso de lluvia es determinante. Tras la emisión del aviso, los comités de dirección de la lucha contra la emergencia deben movilizarse urgentemente. La emisión, en su caso, de alertas debe ser inmediata, incluso en situaciones de gran incertidumbre. De poco sirve la ciencia si, pese a su precisión (con las incertidumbres inherentes que pueda tener), sus resultados no se traducen en una acción rápida y coordinada. Por ello, es imperativo que toda la cadena operativa, desde el aviso meteorológico hasta la emisión de la alerta por parte de las instituciones responsables y la activación de la respuesta, esté perfectamente engranada y funcione eficazmente.

En las catástrofes, la falta de información de la ciudadanía termina siendo letal. Conocer de antemano a qué riesgos se está expuesto es crucial. Entre las muchas formas de fomentar el conocimiento de los riesgos a los que se expone la ciudadanía, se plantea la posibilidad de que los seguros de hogar contemplen un pequeño recargo para aquellos inmuebles que están ubicados en zonas inundables. Con ello no se busca un castigo económico, sino un recordatorio constante de que se reside en una zona de riesgo y que, por tanto, es necesario estar preparado para afrontarlo. Es importante tener en cuenta que el litoral mediterráneo constituye la segunda residencia no solo de muchos españoles, sino también de ciudadanos de otros países que pueden desconocer los riesgos que acechan al lugar donde fijarán su residencia. Más aún, muchas zonas expuestas a inundaciones han sido pobladas por personas migrantes, tanto de otras regiones de España como del extranjero, sin conocimiento previo de las características del entorno. Con esta idea se pretende abrir el debate sobre las múltiples estrategias que se necesitan para hacer llegar a la ciudadanía información relevante sobre los riesgos que afectan a sus activos. El objetivo es que, al conocerlos, la población se empodere, adopte medidas para su protección y exija a las administraciones competentes que hagan lo propio.

Abundando en el tema anterior, la información sobre si un inmueble se encuentra en zona inundable es algo que debe incorporarse a los registros de la propiedad. Los promotores están obligados a incluir el riesgo de inundación en sus planes. Por otro lado, los ciudadanos pueden obtener esta información y solicitar su certificación a los organismos de cuenca. No obstante, es necesario ir más allá: al igual que el notario informa sobre la existencia de cargas económicas sobre el inmueble que se va a adquirir, una carga

importante es precisamente el riesgo de inundación. En consecuencia, debe abrirse este debate para garantizar que nadie adquiera un inmueble en una zona inundable sin haber sido debidamente informado.

Entronizar una cultura del riesgo sigue siendo una asignatura pendiente en España. En general, los riesgos se ignoran y, cuando se materializan, es frecuente que la opinión pública lamente no haber estado preparada para afrontarlos. Urge preparar a la ciudadanía en todos los niveles. La Ley de Cambio Climático obliga a incluir información sobre este tema en los currículos escolares. Dado que la manifestación más grave del cambio climático es su impacto sobre los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, la conexión con los desastres que estos originan resulta evidente. Es necesario acelerar la comunicación entre la comunidad científica y el profesorado de primaria y secundaria, con el fin de formar a los más jóvenes en el conocimiento de los riesgos en general, no solo los meteorológicos y climáticos. Por otro lado, las comunidades están organizadas en grupos que pueden ser útiles para fomentar la transmisión de la información y la formación sobre estos temas. Cada comunidad tiene sus propias peculiaridades y, en función de ellas, existen distintas vías para acceder a los diferentes grupos sociales. Por ejemplo, en Valencia existen las juntas falleras, a través de las cuales pueden desarrollarse iniciativas de información y formación que contribuyan a transformar rápidamente la cultura del riesgo. Los científicos sociales conocen bien estos procesos, y es urgente incorporarlos al debate y a la acción correspondiente.

Entre los componentes paisajísticos que pueden afectar al proceso de inundación se encuentra la vegetación de los cauces y riberas (Gurnell, 2014). La vegetación puede contribuir a laminar el flujo del agua, retener sedimentos, disminuir la erosión del cauce y facilitar su desborde en zonas de más vegetación que, normalmente, se encuentran en entornos no urbanos y, por tanto, de menor impacto. En muchas zonas del litoral mediterráneo la vegetación actual está dominada por la caña común (*Arundo donax* L.), que es una especie invasora que expulsa a las nativas y forma un tipo de vegetación que se comporta de manera distinta frente a las crecidas que la natural. Se ha extendido entre el público la idea de que los cauces están sucios, por lo que es necesario limpiarlos. Sin embargo, los cauces naturales son lo contrario de lo que la gente considera un cauce limpio, ya que son rugosos en los bordes, con zonas amplias de desborde y con diferentes tipos de vegetación. Un cauce limpio acelera el flujo del agua y contribuye a aumentar su erosión (Gurnell, 2014). La vegetación autóctona está compuesta por un rico conjunto de especies de ribera y sotos como los olmos (*Ulmus*), chopos (*Populus*), fresnos (*Fraxinus*), sauces (*Salix*), tarayes o tamariscos (*Tamarix*) o adelfas (*Nerium oleander*), entre otras especies arbóreas, además de un estrato arbustivo y herbáceo muy variado¹¹. Por otro lado, disponer de un ecosistema ripario natural, con toda su riqueza vegetal y animal, es un gran activo natural, habida cuenta de que se encuentran gravemente amenazados. Tras el desastre, se impone la regeneración y restauración de las riberas para llevarlas a su estado natural y hacer que nos ayuden en los procesos de inundación, al tiempo que nos proveen otros importantes servicios ecosistémicos.

Vivimos en un mundo hiperconectado y constantemente vigilado por una multitud de cámaras distribuidas en carreteras, comercios, gasolineras y otros espacios públicos. Aunque España cuenta con un buen nivel de monitorización de caudales a través de los

¹¹ <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/delimitacion-y-restauracion-del-dominio-publico-hidraulico/caracterizacion-vegetacion-ribera.html>

Sistemas automáticos de información hidrológica (SAIH), gestionados por las confederaciones hidrográficas, no todos los barrancos están monitorizados en los puntos críticos que pueden activarse durante una inundación. La experiencia vivida en Valencia demuestra que disponer de información visual adicional, aunque no esté procesada ni validada, podría haber facilitado la toma de decisiones por parte de los gestores de la emergencia. De hecho, la vigilancia de los barrancos se activó según lo previsto, siendo realizada por agentes de la Generalitat Valenciana hasta el mediodía del día crítico. Sin embargo, posteriormente se interrumpió y los agentes regresaron a sus bases. En paralelo, los propios ciudadanos comenzaron a transmitir en tiempo real, mediante sus teléfonos móviles, imágenes del comportamiento cambiante de los cauces.

Esta situación plantea la conveniencia de establecer una red de observación complementaria, más densa y basada en cámaras u otros instrumentos visuales. Aunque estas herramientas no proporcionen información de primer nivel técnico, pueden resultar valiosas en contextos de emergencia. Esta red podría ser *ad hoc*, es decir, desplegarse temporalmente ante la activación de una alerta y desmantelarse una vez superada la situación, dado que la necesidad de este tipo de información es puntual, pero crítica.

Con todo, como se ha dicho, la información disponible a través de las predicciones meteorológicas y los SAIH de las confederaciones hidrográficas debería llevarnos a escalar los avisos actuales basados en lluvia a otros basados en probabilidad de inundación. Los modelos EFAS y su versión global (GLOFAS), del sistema Copernicus de la UE, marcan el camino. Las peculiaridades del litoral mediterráneo requerirán una inversión significativa, pero las herramientas y el conocimiento están disponibles. Ante un clima embravecido, es prioritario que pongamos en marcha un plan de predicción y alerta de inundación en el plazo más breve posible.

La normativa sobre inundaciones se focaliza principalmente en los centros urbanos, dado que concentran el mayor riesgo. Sin embargo, también es fundamental conocer lo que ocurre en el resto del territorio, ya que con frecuencia se desarrollan proyectos urbanísticos ligados al turismo que deben ser tenidos en cuenta. En este sentido, cabe destacar que los planes regionales frente a la inundación, como el Plan de Acción Territorial sobre Prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA), han funcionado muy bien. Han servido para informar miles de actuaciones urbanísticas y han obligado a realizar numerosas modificaciones en los planes presentados. No obstante, aunque el plan funciona eficazmente hacia el futuro, por razones de no retroactividad no puede aplicarse a situaciones anteriores a su aprobación. Aun así, deberíamos buscar formas de analizar las realidades actuales que se originaron antes del PATRICOVA. Por ejemplo, dicho plan establece que las viviendas de planta baja deben estar conectadas interiormente con los pisos superiores, para permitir el acceso en caso de inundación, o contar con acceso a las azoteas. Sin embargo, durante las inundaciones de Valencia se ha constatado que en muchos casos esto no se cumplía, lo que ha provocado víctimas mortales. Esta situación nos obliga a analizar críticamente la realidad actual, pues hacerlo puede salvar vidas.

Dada la conexión entre los fenómenos meteorológicos y climáticos con el cambio climático, al margen de su mayor o menor predictibilidad, y considerando la naturaleza cambiante del clima, cabe preguntarse si los modelos actuales del clima futuro están realmente actualizados. Ciertamente, una persona poco informada podría pensar que los modelos no se actualizan y que, debido a los cambios que genera el propio clima, se corre

el riesgo de perder fiabilidad. Sin embargo, la investigación sobre el clima es una de las más activas del mundo. Los modelos se han ido haciendo cada vez más complejos, incorporando nuevas variables que, con el tiempo, hemos aprendido que son cruciales para el funcionamiento del sistema Tierra y del clima. Por ejemplo, los primeros modelos no incorporaban el ciclo del carbono. Hoy en día, no es concebible modelizar el clima global sin disponer de información sobre este y otros ciclos biogeoquímicos relevantes. El Programa Mundial de Investigación del Clima coordina un proyecto en el que participan consorcios de modelizadores de todo el mundo, con el objetivo de actualizar periódicamente los modelos y las condiciones de contorno y realizar bancos de pruebas para evaluar su fiabilidad (Naik et al., 2025). En este sentido, puede afirmarse que la mayor fuente de incertidumbre de cara al futuro son nuestras propias acciones. La economía no es predecible en el largo plazo, por lo que no podemos saber con certeza cuáles serán las emisiones futuras de gases de efecto invernadero, entre otras variables relevantes que determinan el clima.

Tras toda catástrofe es imprescindible realizar un análisis detallado para aprender de los errores cometidos. Inevitablemente, en todas ellas se producen fallos, aunque no todos tienen la misma relevancia. Aunque nuestro interés como científicos es abordarlos todos, los ciudadanos, particularmente los que han sufrido las terribles consecuencias de las inundaciones de Valencia, querrán, y deben, saber dónde estuvo la principal falla y cómo debe corregirse. La experiencia demuestra que las comisiones de tipo político suelen ser poco útiles, ya que la dinámica impuesta por las mayorías resulta determinante. Instituciones más neutrales, como las reales academias, pueden desempeñar un papel más activo en la detección de posibles fallos y en la revisión de protocolos que hayan resultado deficientes.

El análisis de los aspectos científicos de los desastres por lluvias extremas realizado durante las tres jornadas de la RAC demuestra que, en general, y pese a las incertidumbres inherentes a la predicción de fenómenos altamente complejos, la ciencia que sirvió de apoyo a la toma de decisiones por parte de los responsables de la gestión de la emergencia durante las inundaciones de Valencia fue consistente con lo que ocurrió (Gascón et al., 2025). Con tiempo suficiente se emitieron avisos, incluidos los de nivel rojo, que deberían haber movilizadado a los gestores de la emergencia. Además, los canales de actualización de la información operaron con normalidad, de modo que los responsables tuvieron a su disposición datos relevantes y actualizados para guiar sus acciones. Sin embargo, la traslación al público del peligro emergente a partir de la información científica no se realizó ni a tiempo ni con la precisión necesaria. La población desconocía cómo debía actuar, lo que llevó a que se adoptaran comportamientos incluso contrarios a su propia supervivencia. La alerta temprana no se emitió, y cuando finalmente se alertó a la población, ya era demasiado tarde. Aunque ya se han señalado algunas formas de abordar esta deficiencia, corresponde a los expertos en gestión de desastres y comunicación estudiar las causas de este fallo y extraer las lecciones necesarias para evitar que vuelva a ocurrir.

Agradecimientos

A Félix Francés García (Universidad Politécnica de Valencia), María Carmen Llasat Botija (Universidad de Barcelona), Jorge Olcina Cantos (Universidad de Alicante), Miguel Polo Cebellán (Confederación Hidrográfica del Júcar), María José Rallo del Olmo (Agencia Estatal de Meteorología), Peter Salamon (Joint Research Centre, European Commission), Francisco Javier Sánchez Martínez (Dirección General del Agua, MITECO), José Miguel Viñas (METEORED) por su contribución en las jornadas de la RAC sobre la materia de este informe, así como por haberme facilitado sus materiales y comentado un primer borrador del texto. A los académicos Inmaculada Ortiz Uribe y Antonio Cendrero Uceda por ayudarme en la preparación y desarrollo de la Conferencia General. A los revisores por mejorar con sus comentarios este texto.

Revisión

Editor de revisión: Antonio Cendrero Uceda (Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España)

Revisores: Gerardo de Benito (Museo Nacional de Ciencias Naturales, C.S.I.C.), Antonio Gómez Sal (Universidad de Alcalá), José Manuel Gutiérrez (Universidad de Cantabria) y un revisor anónimo.

Bibliografía

- AEMET, 2023. Informe sobre el episodio meteorológico de precipitaciones intensas ocasionadas por una DANA durante los días 2, 3 y 4 de septiembre de 2023, Agencia Estatal de Meteorología, Madrid.
- AEMET, 2024. Informe sobre el episodio meteorológico de precipitaciones torrenciales y persistentes ocasionadas por una DANA el día 29 de octubre de 2024, Agencia Estatal de Meteorología, Madrid.
- Aupí, V. y Armengot, R., 2023. Radiografía del máximo de lluvia en 24 hs: 882 mm en casa del Barón-Muela de Cortes en octubre de 1982. En: aemetblog (Editor). AEMET, Madrid.
- Ayat, H., Evans, J.P., Sherwood, S.C. y Soderholm, J., 2022. Intensification of subhourly heavy rainfall. *Science*, 378(6620): 655-659.
- Barriendos, M., Gil-Guirado, S., Pino, D., Tuset, J., Pérez-Morales, A., Alberola, A., Costa, J., Balasch, J.C., Castelltort, X., Mazón, J. y Ruiz-Bellet, J.L., 2019. Climatic and social factors behind the Spanish Mediterranean flood event chronologies from documentary sources (14th–20th centuries). *Global and Planetary Change*, 182: 102997.
- Beguiría Portugués, S., Vicente Serrano, S.M., Azorín Molina, C. y González Hidalgo, J.C., 2024. Las lecciones no aprendidas de la dana, El País, Madrid.
- Beneyto, C., Aranda, J.A. y Francés, F., 2024. On the Use of Weather Generators for the Estimation of Low-Frequency Floods under a Changing Climate. *Water*, 16(7): 1059.
- Beven, K.J., 2012. *Rainfall-runoff modelling: the primer*. John Wiley & Sons.
- Bocanegra, R.A. y Francés, F., 2021. Assessing the risk of vehicle instability due to flooding. *Journal of Flood Risk Management*, 14(4): e12738.
- Borghi, N., Guariso, G. y Sangiorgio, M., 2024. Forecasting Convective Storms Trajectory and Intensity by Neural Networks. *Forecasting*, 6(2): 326-342.
- Cajade, P.R., Manzano, D.M., Vilares, P.L. y Gil, F.E., 2022. The cut-off lows of 2012 and 2019 in the south-east of the Iberian Peninsula. *Consorsseguros revista digital*, 16(Spring): 1-14.
- Cánovas-García, F. y Vargas Molina, J., 2025. An exploration of exposure to river flood risk in Spain using the National Floodplain Mapping System. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 16(1): 2421405.
- Cavanilles, A.J., 1795. *Observaciones sobre la historia natural, geografía, agricultura, población y frutos del Reyno de Valencia*. Imprenta Real, Madrid.
- CCCS, 2024. The 2024 Annual Climate Summary - Global Climate Highlights 2024, Copernicus Climate Change Services.
- CCCS, 2025. Climate indicators. Copernicus Climate Change Service.
- CCS, 2017. Consorcio de Compensación de Seguros: La cobertura de inundación, Jornada técnica: Aspectos clave en la reducción del riesgo de inundación, Confederación Hidrográfica del Júcar - Murcia.
- CMS, 2025. June 2025 Marks Third Warmest June on Record Globally. Record High-Intensity Marine Heatwaves Impact 62% of the Mediterranean Sea. Copernicus Marine Service.
- Confederación Hidrográfica del Júcar, 2006. Proyecto de adecuación ambiental y drenaje de la cuenca del Poyo vertiente a la Albufera.

- Cortès, M., Turco, M., Ward, P., Sánchez-Espigares, J.A., Alfieri, L. y Llasat, M.C., 2019. Changes in flood damage with global warming on the eastern coast of Spain. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19(12): 2855-2877.
- Díez-Herrero, A., Laín-Huerta, L. y Llorente-Isidro, M., 2009. *A Handbook on Flood Hazard Mapping Methodologies*. Spanish Geological Survey, Madrid, 190 pp.
- Díez-Herrero, A., Mateos, R.M., Vázquez-Tarrío, D., López-Marcos, A. y Brao-González, F.J., 2024. One catastrophic flood every millennium: Synchronicity of extreme floods and global warm periods in the multi-archive record of the Roman theatre of Guadix (Granada, SE Spain). *Global and Planetary Change*, 233: 104363.
- EASAC, 2013. Trends in extreme weather events in Europe: implications for national and European Union adaptation strategies, European Academies Science Advisory Council, Halle, Germany.
- ECMWF, 2025a. ECMWF's ensemble AI forecasts become operational. European Centre for Medium Range Weather Forecasts.
- ECMWF, 2025b. Fifty years of Earth system modelling at ECMWF, European Centre for Medium Range Weather Forecast, Reading, UK.
- Estrany, J., Ruiz-Pérez, M., Mutzner, R., Fortesa, J., Nacher-Rodríguez, B., Tomàs-Burguera, M., García-Comendador, J., Peña, X., Calvo-Cases, A. y Vallés-Morán, F.J., 2020. Hydrogeomorphological analysis and modelling for a comprehensive understanding of flash-flood damage processes: the 9 October 2018 event in northeastern Mallorca. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20(8): 2195-2220.
- Faranda, D., Alvarez-Castro, M.C., Ginesta, M., Coppola, E. y Pons, F.M.E., 2024. Heavy precipitations in October 2024 South-Eastern Spain DANA mostly strengthened by human-driven climate change, Institut Pierre Simon Laplace, CNRS.
- Ferreira, R.N., 2021. Cut-Off Lows and Extreme Precipitation in Eastern Spain: Current and Future Climate. *Atmosphere*, 12(7): 835.
- Francés, F., 2006. Estudio de inundabilidad y análisis de las actuaciones propuestas en la Rambla del Poyo y Barranco del Pozolet (Valencia). Estudio dirigido por F. Francés para la Confederación Hidrográfica del Júcar, Instituto de Investigación en Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA).
- Francés, F., Vélez, J.I. y Vélez, J.J., 2007. Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332(1): 226-240.
- Francis, J.A. y Vavrus, S.J., 2015. Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming. *Environmental Research Letters*, 10(1): 014005.
- Gascón, E., Magnusson, L., Hewson, T., Rey, J. y Rodríguez, J., 2025. Extreme precipitation in Spain's Valencia region. *ECMWF Newsletter*, 183: 2-3.
- Gurnell, A., 2014. Plants as river system engineers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(1): 4-25.
- Haiden, T., Janousek, M., Vitart, F., Tanguy, M., Prates, F. y Chevallier, M., 2024. Evaluation of ECMWF forecasts. *ECMWF Technical Memoranda*, 918: 1-60.
- Hallegatte, S., Vogt-Schilb, A., Rozenberg, J., Bangalore, M. y Beaudet, C., 2020. From Poverty to Disaster and Back: a Review of the Literature. *Economics of Disasters and Climate Change*, 4(1): 223-247.
- Horst, M.W., Farnum, A. y Stephenson, A., 2023. Hydrologic versus Hydraulic Rainfall-Runoff Modeling of New Jersey Watersheds. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 149(1): 05022003.

- IPCC, 2018. Summary for Policymakers. En: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.O. Pörtner et al. (Eds.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- IPCC, 2022. Annex II: Glossary [Möller, V., R. van Diemen, J.B.R. Matthews, C. Méndez, S. Semenov, J.S. Fuglestedt, A. Reisinger (eds.)]. En: H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor et al. (Eds.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, , Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2897–2930, .
- IPCC, 2023. Summary for Policymakers. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland
- Juza, M. y Tintoré, J., 2021. Multivariate Sub-Regional Ocean Indicators in the Mediterranean Sea: From Event Detection to Climate Change Estimations. *Frontiers in Marine Science*, Volume 8 - 2021.
- Llasat, M.C., 1991. *La Gota Fría*, 6. Ediciones Técnicas Marcombo (colec. Boixareu Universitaria), Barcelona.
- Llasat, M.C., del Moral Méndez, A., Cortés Simó, M. y Rigo, T., 2021. Convective precipitation trends in the Spanish Mediterranean region. *Atmospheric Research*, 2021, vol. 257, p. 105581.
- Llasat, M.C., Martín, F. y Barrera, A., 2007. From the concept of “Kaltlufttropfen” (cold air pool) to the cut-off low. The case of September 1971 in Spain as an example of their role in heavy rainfalls. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 96(1): 43-60.
- López Bermúdez, F., 1978-1979. Inundaciones catastróficas, precipitaciones torrenciales y erosión en la provincia de Murcia. *Papeles del Departamento de Geografía*, 8: 49-91.
- López, J. y Francés, F., 2013. Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17: 3189-3203.
- Lovat, A., Vincendon, B. y Ducrocq, V., 2022. Hydrometeorological evaluation of two nowcasting systems for Mediterranean heavy precipitation events with operational considerations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26(10): 2697-2714.
- Lugeri, N., Genovese, E., Lavallo, C. y De Roo, A., 2006. Flood risk in Europe: analysis of exposure in 13 Countries. European Commission Directorate-General Joint Research Centre, EUR22525 EN.
- Magnusson, L., Ackerley, D., Bouteloup, Y., Chen, J.-H., Doyle, J., Earnshaw, P., Kwon, Y.C., Köhler, M., Lang, S.T.K., Lim, Y.-J., Matsueda, M., Matsunobu, T., McTaggart-Cowan, R., Reinecke, A., Yamaguchi, M. y Zhou, L., 2022. Skill of Medium-Range Forecast Models Using the Same Initial Conditions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(9): E2050-E2068.
- Martín León, F., 2003. *Las gotas frías/DANAS- Ideas y conceptos básicos*, Instituto Nacional de Meteorología, Madrid.
- MedECC, 2024. Summary for Policymakers. En: S. Djoundourian, P. Lionello, M.C. Llasat et al. (Eds.), *Climate and Environmental Coastal Risks in the Mediterranean*, Marseille, France, pp. 28.

- Mei, C., Liu, J., Shi, H., Wang, H., Wang, J., Dong, L., Song, T. y Zhang, H., 2023. Exploring impact of street layout on urban flood risk of people and vehicles under extreme rainfall based on numerical experiments. *Science China Technological Sciences*, 66(9): 2561-2574.
- Mignot, E., Camusson, L. y Riviere, N., 2020. Measuring the flow intrusion towards building areas during urban floods: Impact of the obstacles located in the streets and on the facade. *Journal of Hydrology*, 583: 124607.
- Milly, P.C.D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R.M., Kundzewicz, Z.W., Lettenmaier, D.P. y Stouffer, R.J., 2008. Stationarity Is Dead: Whither Water Management? *Science*, 319(5863): 573-574.
- Mishra, A.N., Maraun, D., Schiemann, R., Hodges, K., Zappa, G. y Ossó, A., 2025. Long-lasting intense cut-off lows to become more frequent in the Northern Hemisphere. *Communications Earth & Environment*, 6(1): 115.
- Morales, A.P., Guirado, S.G. y García, A.Q., 2021. ¿Somos todos iguales ante una inundación?: Análisis de la vulnerabilidad social en el litoral mediterráneo español. *BAGE. Boletín de la Asociación Española de Geografía*(88): 6.
- Moreno, J.M., Barros, V., Calvo, E., Laguna-Defior, C., Marengo, J.A. y Oswald Spring, U. (Eds.), 2020. Marco conceptual y contexto regional. Adaptación frente a los Riesgos del Cambio Climático en los Países Iberoamericanos - Informe RIOCCADAPT. McGraw Hill, Madrid.
- Morote Seguido, Á.F. y Olcina Cantos, J., 2021. La enseñanza del riesgo de inundación en Bachillerato mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG). El ejemplo del PATRICOVA en la Comunidad Valenciana (España). *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 41(2): 431-461.
- Muñoz, C., Schultz, D. y Vaughan, G., 2020. A Midlatitude Climatology and Interannual Variability of 200- and 500-hPa Cut-Off Lows. *Journal of Climate*, 33(6): 2201-2222.
- Naik, V., Durack, P.J., Nicholls, Z., Buontempo, C., Dunne, J.P., Hewitt, H.T., Macintosh, C. y O'Rourke, E., 2025. Climate models need more frequent releases of input data—here's how to do it. *Nature*, 644(8078): 874-875.
- Nie, J., Sobel, A.H., Shaevitz, D.A. y Wang, S., 2018. Dynamic amplification of extreme precipitation sensitivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(38): 9467-9472.
- Nieto, R., Gimeno, L., de la Torre, L., Ribera, P., Gallego, D., García-Herrera, R., García, J.A., Nuñez, M., Redaño, A. y Lorente, J., 2005. Climatological Features of Cutoff Low Systems in the Northern Hemisphere. *Journal of Climate*, 18(16): 3085-3103.
- Olcina Cantos, J., Perles Roselló, M.J., Martín Vide, J.P., Gonzalez López, S. y Espejo Gil, F., 2025. Eventos extremos y gestión integral del riesgo. En: J. Romero y A. Camarasa (Eds.), *Cambio climático y territorio en el mediterráneo ibérico. Efectos, estrategias y políticas* Tirant lo Blanch, Valencia, pp. 213-254.
- Olsson, L., Opondo, M., Tschakert, P., Agrawal, A., Eriksen, S.H., Ma, S., Perch, L.N. y Zakieldeem, S.A. (Eds.), 2014. Livelihoods and poverty. . *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, , 793-832. pp.
- Ommer, J., Kalas, M., Neumann, J., Blackburn, S. y Cloke, H.L., 2024. Turning regret into future disaster preparedness with no-regrets. *EGUsphere*, 2024: 1-15.

- Parras-Berrocal, I.M., Vazquez, R., Cabos, W., Sein, D., Mañanes, R., Perez-Sanz, J. y Izquierdo, A., 2020. The climate change signal in the Mediterranean Sea in a regionally coupled atmosphere–ocean model. *Ocean Sci.*, 16(3): 743-765.
- Pausas, J.G., Llovet, J., Rodrigo, A. y Vallejo, R., 2008. Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin?—A review. *International Journal of Wildland Fire*, 17(6): 713-723.
- Pisano, A., Marullo, S., Artale, V., Falcini, F., Yang, C., Leonelli, F.E., Santoleri, R. y Buongiorno Nardelli, B., 2020. New Evidence of Mediterranean Climate Change and Variability from Sea Surface Temperature Observations. *Remote Sensing*, 12(1): 132.
- Porcù, F., Carrassi, A., Medaglia, C.M., Prodi, F. y Mugnai, A., 2007. A study on cut-off low vertical structure and precipitation in the Mediterranean region. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 96(1): 121-140.
- Pytharoulis, I., Craig, G.C. y Ballard, S.P., 2000. The hurricane-like Mediterranean cyclone of January 1995. *Meteorological Applications*, 7(3): 261-279.
- Rivera, A., 2025. DANAS. Letrame Editorial, Madrid.
- Rodríguez, P., Sánchez, R. y Oliveres, V., 2025. La España inundable, El Diario.es.
- Romero-Díaz, M.A. y Morales, A.P., 2021. Before, during and after the Dana of September 2019 in the region of Murcia (Spain), as reported in the written press. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 47(1): 163-182.
- Röthlisberger, M., Frossard, L., Bosart, L.F., Keyser, D. y Martius, O., 2019. Recurrent Synoptic-Scale Rossby Wave Patterns and Their Effect on the Persistence of Cold and Hot Spells. *Journal of Climate*, 32(11): 3207-3226.
- Šakić Trogrlić, R., Van Den Homberg, M., Budimir, M., McQuistan, C., Sneddon, A. y Golding, B., 2022. Early warning systems and their role in disaster risk reduction. En: B. Golding (Ed.), *Towards the “perfect” weather warning: bridging disciplinary gaps through partnership and communication*. Springer International Publishing Cham, Swirzerland, pp. 11-46.
- Salazar-Galán, S., García-Bartual, R., Salinas, J.L. y Francés, F., 2021. A process-based flood frequency analysis within a trivariate statistical framework. Application to a semi-arid Mediterranean case study. *Journal of Hydrology*, 603, 127081.
- Santos Burguete, C., Jansà Clar, A., Armengot Serrano, R., Simarro Grande, J., Callado i Pallarés, A. y Compte Rovirola, M., 2018. El episodio de Oliva-Gandía de 3-4 de noviembre de 1987: récord nacional de precipitación en 24 horas, Sexto Simposio Nacional de Predicción, Madrid.
- Schumacher, R.S. y Rasmussen, K.L., 2020. The formation, character and changing nature of mesoscale convective systems. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(6): 300-314.
- Seneviratne, S.I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Luca, A.D., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J. y Lewis, S., 2021. Weather and climate extreme events in a changing climate. En: V.P. Masson-Delmotte, A. Zhai, S.L. Pirani y C. Connors (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, , pp. 1513-1766.
- Simmons, K.M. y Sutter, D., 2008. Tornado Warnings, Lead Times, and Tornado Casualties: An Empirical Investigation. *Weather and Forecasting*, 23(2): 246-258.

- Soto-Navarro, J., Jordá, G., Amores, A., Cabos, W., Somot, S., Sevault, F., Macías, D., Djurdjevic, V., Sannino, G., Li, L. y Sein, D., 2020. Evolution of Mediterranean Sea water properties under climate change scenarios in the Med-CORDEX ensemble. *Climate Dynamics*, 54(3): 2135-2165.
- Sun, J., Xue, M., Wilson, J.W., Zawadzki, I., Ballard, S.P., Onvlee-Hooimeyer, J., Joe, P., Barker, D.M., Li, P.-W., Golding, B., Xu, M. y Pinto, J., 2014. Use of NWP for Nowcasting Convective Precipitation: Recent Progress and Challenges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(3): 409-426.
- Thompson, V., Coumou, D., Galfi, V.M., Happé, T., Kew, S., Pinto, I., Philip, S., de Vries, H. y van der Wiel, K., 2024. Changing dynamics of Western European summertime cut-off lows: A case study of the July 2021 flood event. *Atmospheric Science Letters*, 25(10): e1260.
- Thorndycraft, V.R. y Benito, G., 2006. The Holocene fluvial chronology of Spain: evidence from a newly compiled radiocarbon database. *Quaternary Science Reviews*, 25(3): 223-234.
- UN/ISDR, 2007. Towards a Culture of Prevention: Disaster Risk Reduction Begins at School, United Nations International Strategy for Disaster Reduction.
- UNDRR, 2017. The Sendai Framework Terminology on Disaster Risk Reduction. "Disaster risk management". . United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
- UNDRR, 2022. Global status of multi-hazard early warning systems 2022 - Target G, United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
- UNDRR, 2023. Words into action, United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
- Ungría, C. y Still, D., 2024. Mapa de riesgos del parque de viviendas de España 2024, ST Analytics, Grupo Sociedad de Tasación.
- Vélez, J.J., Puricelli, M., López Unzu, F. y Francés, F., 2009. Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in a regional framework. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13(2): 229-246.
- WMO, 2021. Future of weather and climate forecasting. WMO No. 1263, World Meteorological Organization, Geneva.
- WMO, 2025. WMO confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Wood, R.R. y Ludwig, R., 2020. Analyzing Internal Variability and Forced Response of Subdaily and Daily Extreme Precipitation Over Europe. *Geophysical Research Letters*, 47(17): e2020GL089300.
- World Weather Attribution, 2024. Extreme downpours increasing in southeastern Spain as fossil fuel emissions heat the climate.
- Yousefnia, K.V., Bülle, T. y Metzl, C., 2025. Increasing NWP Thunderstorm Predictability Using Ensemble Data and Machine Learning. *arXiv preprint arXiv:2502.13316*.
- Zachariah, M., Kotroni, V., Kostas, L., Barnes, C., Kimutai, J., Kew, S. et al., 2023. Interplay of climate change-exacerbated rainfall, exposure and vulnerability led to widespread impacts in the Mediterranean region, Grantham Institute for Climate Change.

Anexo I

Programas de las sesiones científicas realizadas durante el curso 2024/2025 sobre los fenómenos hidrometeorológicos extremos

I. DE LAS GOTAS FRÍAS DE AYER A LAS DANAS DE HOY Y MAÑANA

CONFERENCIAS PLENARIAS DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES DE ESPAÑA

Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España (RAC)
Madrid, C/ Valverde 22, 12 de diciembre de 2024

18:00 **José Miguel Viñas** (Meteored y Asociación Meteorológica Española)

19:00 Debate

19:45 Final de la sesión

II. CIENCIA PARA LA GESTIÓN Y MITIGACIÓN DEL RIESGO DE DESASTRE POR LLUVIAS EXTREMAS

Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España (RAC)
Madrid, C/ Valverde 22, 23 de abril de 2025

18:00 **José M. Moreno** (académico de la RAC): Presentación de la sesión.

18:10 **María José Rallo del Olmo** (presidenta de la Agencia Estatal de Meteorología): *Datos y predicciones para la gestión de la emergencia por lluvias extremas.*

18:25 **Miguel Polo Cebellán** (presidente de la Confederación Hidrográfica del Júcar): *Datos y herramientas para la gestión de la emergencia por lluvias extremas.*

18:40 **Peter Salomon** (responsable del Sistema Europeo de Alerta de Inundación, EFAS): *El Sistema Europeo de Alerta de Inundación ante la emergencia por lluvias extremas.*

19:55 **Francisco Javier Sánchez Martínez** (subdirector general de Protección de las Aguas y Gestión de Riesgos): *El Sistema Español de Cartografía de Zonas Inundables.*

19:10 Discusión general

20.45 Final de la sesión

III. FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS EXTREMOS: DE LA PREDICCIÓN A MITIGACIÓN DE SUS IMPACTOS EN UN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

CONFERENCIA GENERAL DE LA RAC, 5 de junio de 2025

Moderadores : José Manuel Moreno e Inmaculada Ortiz Uribe

Presentación de vídeos de 15 minutos seguidos de 30 min de debate con cada ponente.

1. **María del Carmen Llasat Botija.**- *Fenómenos hidrometeorológicos extremos: Predicción y perspectivas ante el cambio climático.*
2. **Félix Francés García.**- *Herramientas avanzadas para la estimación y predicción de la peligrosidad y riesgo de inundación: aplicación en la rambla del Poyo.*
3. **Jorge Olcina Campos.**- *Prevención y mitigación de las inundaciones relámpago: Opciones basadas en la naturaleza.*