



Inundaciones y Cambio Climático

Estudios y experiencias a nivel europeo (2018-2025)



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

Inundaciones y Cambio Climático

Estudios y experiencias a nivel europeo
(2018-2025)

Autores

Juan Antonio Ballesteros Cánovas

Gerardo Benito Ferrández



Catálogo de publicaciones del Ministerio: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/servicios/publicaciones/>
Catálogo general de publicaciones oficiales: <https://cpage.mpr.gob.es/>

Título:

Inundaciones y Cambio Climático: Estudios y experiencias a nivel europeo (2018-2025)
Edición 2025

Autores:

Juan Antonio Ballesteros-Cánovas
Gerardo Benito Ferrández
Laboratorio de Hidrología y Cambio Climático, Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC

Coordinadores:

Francisco Javier Sánchez Martínez
Monica Aparicio Martín
Juan Francisco Arrazola Herreros
Dirección General del Agua, MITERD

Fotografía de cubierta

Cauce de alivio en Alcalá de Ebro (Zaragoza) durante la crecida extraordinaria del Río Ebro de febrero de 2024.
Fuente: Proyecto LIFE Ebro Resilience. www.ebroresilience.com

Este informe debe citarse de la siguiente manera:

Ballesteros-Cánovas, J.A. y Benito, G., 2026. *Inundaciones y Cambio Climático: Estudios y experiencias a nivel europeo (2018-2025)*. MITERD, Madrid.

Las opiniones que se expresan en este informe son responsabilidad de los autores y no necesariamente del MITERD o de su personal.



MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

Edita

© SUBSECRETARÍA
Gabinete Técnico

NIPO (en línea en castellano): 665-25-025-4
ISBN: 978-84-18778-72-8

Maquetación:

Museo Nacional de Ciencias Naturales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Prólogo

En la actualidad, existe un amplio consenso científico en cuanto a que el cambio climático producirá efectos en la frecuencia y magnitud de las lluvias extremas. Por tanto, resulta crucial avanzar en el estudio de sus posibles consecuencias en la severidad de las inundaciones. La investigación sobre los futuros cambios en la peligrosidad de las inundaciones supone un reto técnico y científico para los países europeos. Según la Directiva sobre Inundaciones (2007/60/EC), deben considerarse los efectos del cambio climático en la peligrosidad, y reflejarlos en los mapas y planes de gestión de riesgos. Sin embargo, hay gran incertidumbre sobre cómo el clima afectará a las inundaciones, ya que estas responden a factores locales, que no siempre son previsibles a partir de proyecciones regionales de precipitaciones y caudales.

En el año 2018, el Ministerio para la Transición Ecológica publicó el informe “Inundaciones y cambio climático” en el que se revisa el estado de los conocimientos científico-técnicos sobre los efectos del cambio climático en diferentes componentes hidro-climáticos relacionados con la generación de las inundaciones. Este análisis comprende una escala europea, incluyendo el territorio español, y aborda tanto el periodo actual como las proyecciones de cambio realizadas en base a modelos climáticos. Igualmente, se describen las valoraciones realizadas dentro del Grupo Europeo de Inundaciones en relación con la aplicación de la Directiva Marco en lo que respecta a la consideración del cambio climático. Desde la publicación de este informe se ha seguido avanzando en la comprensión de los cambios observados y proyectados en algunas variables climáticas (precipitación máxima diaria, precipitación subdiaria, temperatura, acumulación nival), aunque todavía existe una elevada incertidumbre sobre los efectos concretos en los caudales máximos a escala local.

El objetivo de este documento es **aportar de manera esquemática una actualización de las evidencias científicas relacionadas con el impacto del cambio climático en las inundaciones** desde la publicación de informe anterior en 2018. El documento consta de tres secciones en las que se analiza el estado de los conocimientos científico-técnicos y los resultados de las evaluaciones de los cambios en la peligrosidad de las inundaciones a partir de estudios regionales y locales. La **primera sección presenta una breve actualización del conocimiento sobre el ritmo del calentamiento global** recogidos en el último informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2022). En la **segunda sección se revisan los estudios científicos publicados en los últimos seis años sobre la posible influencia del cambio climático en los patrones espaciales y temporales de las lluvias intensas y las inundaciones**. En esta sección se aporta información sobre los cambios observados, las proyecciones y los registros del pasado, en el contexto global, de europeo y español. La **tercera sección revisa las estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático, así como sus principios básicos, y analiza la vulnerabilidad y la exposición al riesgo en España**. Esta sección concluye con una descripción de las estrategias de adaptación frente al riesgo de inundaciones.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del Convenio establecido entre el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Dirección General del Agua (DGA) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), y en concreto dentro del capítulo asignado al Museo Nacional de Ciencias Naturales (Subvención MNCN-CSIC 20233TE011). Los autores agradecen el apoyo constante de Francisco Javier Sánchez Martínez, Mónica Aparicio Martín y Juan Francisco Arrazola Herreros, de la Dirección General del Agua, por su respaldo técnico y operativo durante la realización de este trabajo. Asimismo, desean hacer extensivo su agradecimiento al conjunto del grupo de investigación en inundaciones de la DGA que ha contribuido, directa o indirectamente, a la revisión y mejora del contenido de este informe. En particular a Antonio Jiménez Álvarez del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, a Esteban Rodríguez Guisado, Carlos Correa Guinea y Alfonso Hernanz Lázaro de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), a María Salazar Guerra de la Oficina Española de Cambio Climático del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), y a Carmen Llasat Botija de la Universidad de Barcelona, por su colaboración científica, intercambio de datos y aportaciones técnicas que han enriquecido el análisis. Finalmente, dedicamos este informe a la memoria de las personas fallecidas y de todas aquellas afectadas por las inundaciones ocurridas los días 29 y 30 de octubre de 2024 en la Comunitat Valenciana y Castilla-La Mancha. Este artículo es una contribución del Laboratorio de Hidrología y Cambio Climático del MNCN:

- www.floodsresearch.com
- Instagram: @hcclab_mncn

Índice

Prólogo	I
Agradecimientos	II
Índice de Figuras	V
Índice de Tablas	VI
Índice de Cuadros Explicativos	VI
Lista de Abreviaturas.....	VII
1. Introducción	1
2. Cambio Global.....	1
3. Revisión de la documentación técnica sobre cambio climático	8
3.1. Documentación revisada	8
3.2. Análisis de los cambios climáticos e hidrológicos observados	9
3.2.1. Evidencias de cambios observados a escala global y de Europa.....	9
Cambios observados en las precipitaciones.....	9
Cambios observados en la cobertura nival	14
Cambios observados en el uso del suelo	16
Cambios observados en los caudales extremos.....	18
3.2.2. Evidencias de cambios observados en España	22
Cambios observados en el régimen de precipitaciones	22
Cambios observados en la cobertura nival	25
Cambios observados en el uso del suelo	27
Cambios observados en los caudales extremos en España	30
3.3. Proyecciones futuras según los modelos de cambio climático.....	35
3.3.1. Proyecciones futuras a escala global y de Europa	35
Proyecciones sobre el régimen de precipitaciones	35
Proyecciones sobre la cobertura nival	36
Proyecciones sobre los cambios en el uso del suelo	38
Proyecciones sobre los caudales extremos en Europa.....	40
3.3.2. Proyecciones futuras para España.....	44
Proyecciones sobre el régimen de precipitaciones	44
Proyecciones sobre la cobertura nival	50
Proyecciones sobre los cambios del uso del suelo en España	51
Cambio en los caudales extremos proyectados España.....	51

3.4. Registros históricos y paleo de precipitaciones e inundaciones.....	55
3.4.1. Registros de lluvia.....	55
3.4.2. Registros de caudal	56
4. Revisión de la adaptación al cambio climático por parte de Europa	59
4.1. Estrategia Europea de Adaptación al cambio climático.....	59
4.2. Principales líneas metodológicas seguidas para la implementación del segundo ciclo de la Directiva de Inundaciones por los países participantes en el Grupo Europeo	60
4.3. Posibles soluciones resolver las lagunas de conocimiento y desarrollo de herramientas aplicadas	64
4.3.1. Tratamiento del problema de la estacionariedad en las estimaciones de la frecuencia de las inundaciones	65
4.3.2. Mejorar el proceso de incorporación de la ciencia del cambio climático a la práctica de la gestión de los riesgos de inundación.....	65
4.3.3. Utilización de una serie de factores relacionados con el cambio climático y su impacto en el riesgo de inundación: Un ejemplo de enfoque basado en el riesgo.....	66
4.3.4. Utilización de herramientas en línea para proporcionar un portal de información sobre inundaciones y precipitaciones en el marco del cambio climático	66
4.3.5. Servicio de Cambio Climático de Copernicus y almacén de datos	66
5. Estrategias de Adaptación y Mitigación en España	67
5.1. Breve resumen del marco normativo	67
5.2. Principios básicos sobre adaptación y mitigación	72
5.3. Análisis recientes de la vulnerabilidad y exposición en España	74
5.4. Estrategias de adaptación frente al riesgo de inundaciones	75
6. Conclusiones	78
7. Referencias Bibliográficas	81

Índice de Figuras

Figura 1: Cambios en la temperatura de la superficie terrestre global	3
Figura 2: Tendencias lineales en la precipitación diaria total	11
Figura 3: La distribución espacial de las tendencias de la capa de nieve en el hemisferio norte	15
Figura 4: Distribución espacial de la extensión de un bosque, tierras de cultivo y pastos/pastizales (área estable) y cambio (ganancias y pérdidas)	17
Figura 5: Tendencias de las series de inundaciones máximas anuales en Centroeuropa para el periodo 1965-2005	21
Figura 6: Distribución estacional y anual de las magnitudes de las tendencias de precipitación.....	24
Figura 7: Izq.: Índice de concentración de precipitaciones (ICP). Dcha.: tendencia en la costa mediterránea de la península ibérica	24
Figura 8: Infografía sobre la duración media de la cobertura de nieve	26
Figura 9: Evolución temporal de las inundaciones totales registradas en Cataluña y Baleares (España), sur de Francia y Calabria (Italia).....	32
Figura 10: Distribución espacial de eventos de precipitación extrema históricos y futuros	36
Figura 11: Cambios en el número de días de nieve a una altura de 800 m	37
Figura 12: Extensión de la capa de nieve del NH en primavera frente a GSAT	38
Figura 13: Cambios proyectados en tierras de cultivo globales, tierras de pastoreo globales y comparación de celdas de cuadrícula de 0,25.....	39
Figura 14: Simulaciones que muestran tendencias estadísticamente significativas al nivel del 10 % en cada celda de la cuadrícula.....	42
Figura 15: Análisis estacional de los cambios en la precipitación diaria máxima	45
Figura 16: Zonas de cambio significativo en el río Duero, río Guadiana, cuencas internas de Cataluña y Galicia Costa.....	46
Figura 17: Ejemplo de los cambios en la lluvia máxima de T100 en la Demarcación Hidrográfica del Júcar	48
Figura 18: Probabilidad de excedencia de lluvias con intensidad >90 mm/día	49
Figura 19: Registro de inundaciones históricas en el río Tajo (Aranjuez) y el río Segura (Murcia) y río Gardon (sur de Francia) mostrando la variabilidad de la frecuencia de las inundaciones catastróficas	55
Figura 20: Resultado de una encuesta realizada a los EM del Grupo Europeo de inundaciones sobre los tipos de inundacione	57
Figura 21: Resultado de la encuesta a EM preguntados por la capacidad de las proyecciones y modelos climáticos	59

Figura 22: Resultado de la encuesta a EM preguntados por la capacidad de las proyecciones y modelos climáticos para predecir cambios en diferentes tipos de inundaciones..... **60**

Índice de Tablas

Tabla 1: Resumen de indicadores para cada una de las variables analizadas**54**

Tabla 2: Resumen de las directrices europeas existentes sobre factores de ajuste al cambio climático para caudales de diseño de inundaciones fluviales y precipitaciones de diseño .**61**

Tabla 3: Referencias a las inundaciones en la legislación europea y española**69**

Índice de Cuadros Explicativos

1. Escenarios de emisión de cambio climático en AR6	8
2. Principales desafíos para incluir el cambio climático en la gestión del riesgo de inundaciones.....	9
3. Modos de variabilidad climática y teleconexiones	13
4. El efecto de la subida del mar en las inundaciones.....	29
5. Ríos atmosféricos	33
5. Depresiones aisladas en niveles altos (DANA) e inundaciones.....	33

Lista de Abreviaturas

AMO: Oscilación Multidecadal del Atlántico
(AMO – *Atlantic Multidecadal Oscillation*)

AR6: *Sixth Assessment Report*

ARPSI: Áreas con riesgo potencial significativo de inundación

CLC: *Corine Land Cover* (CLC)

CMIP6: *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*

DANA: Depresión Aislada en Niveles Altos

DFO: Observatorio de Inundaciones de Dartmouth

EPRI: Evaluación preliminar del riesgo de inundación (EPRI)

SE: Servicios Ecosistémicos (por sus siglas en inglés *ecosystem services*)

EU: Unión Europea

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GHP: Protocolo de Gases de Efecto Invernadero

HTM: *Holocene thermal maximum*

IDF: *intensity-duration-frequency curve*

IPCC: Panel Intergubernamental del Cambio Climático (por sus siglas en inglés)

IPEBES: Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Biodiversidad (IPBES)

LIA: *Little Ice Age*

LIG: *Last interglacial*

MedECC: *Mediterranean Experts on Climate and environmental Change*

MODIS: *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*

MPWP: *mid-Pliocene Warm Period*

NAO: Oscilación del atlántico norte (NAO, por sus siglas en inglés)

NOAA: *National Oceanic and Atmospheric Administration*

PGRI: Planes de Gestión del Riesgo de Inundación

Qmax: Caudal Máximo

RoS: *Rain-on-snow*

SAC: *Snow area cover.*

SSP: Trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP, por sus siglas en inglés)

SWE: *Snow Water Equivalent*

T5: Periodo de retorno 5 años

TCE: Tribunal de Cuentas Europeo

WeMO: Oscilación del oeste del Mediterráneo (WeMO- *Western Mediterranean Oscillation*)

WRF: *Weather Research and Forecasting*

1. Introducción

Desde 1970, los daños por inundaciones han aumentado en todo el mundo, y España no es una excepción. Hay varios componentes del ciclo hidrológico, como las precipitaciones y el deshielo, que son sensibles al aumento de temperatura debido al cambio climático. Estos cambios pueden tener el efecto de aumentar la magnitud de las inundaciones en algunas regiones, con variaciones en la localización y extensión de la peligrosidad. La investigación de estos cambios futuros representa un importante reto técnico y científico para los países europeos que debe abordarse por los países miembros de la Unión Europea. De acuerdo a la Directiva sobre inundaciones (2007/60/EC), se deben de tener en cuenta los posibles efectos del cambio climático en las inundaciones, e incorporar esta información a los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación, así como a los planes de gestión del riesgo de inundación (PGRI). En la actualidad, existe una gran incertidumbre sobre las tendencias futuras y las proyecciones de cómo afectará el clima a las inundaciones extremas (frecuencia, magnitud y estacionalidad). Esto se debe a que los efectos en las inundaciones representan una respuesta local a un clima cambiante, y que a menudo no pueden interpretarse a partir de proyecciones regionales de cambios en las precipitaciones y de caudales extremos de inundación.

Durante la auditoría del Tribunal de Cuentas Europeo (TCE) en 2018 de los PGRI realizados en el primer ciclo de la Directiva sobre inundaciones, los Estados miembros auditados destacaron sus desafíos en relación con la cuantificación del riesgo de inundación en el marco del cambio climático futuro, teniendo en cuenta las grandes incertidumbres presentes en los actuales marcos de modelización del cambio climático. En concreto, durante el segundo ciclo de aplicación de la Directiva, los informes

realizados por España muestran los posibles impactos del cambio climático en las precipitaciones máximas, pero su cuantificación en la probabilidad de las inundaciones pluviales y fluviales presenta aún grandes incertidumbres. La Directiva sobre inundaciones no exige ejercicios de catalogación para tener en cuenta el impacto del cambio climático en las inundaciones. Sin embargo, sí exige un esfuerzo en el estudio de dichos efectos y en reflejar en lo posible las condiciones meteorológicas futuras o los posibles cambios en la frecuencia y gravedad de las inundaciones debido al cambio climático.

Entre los esfuerzos a realizar en el tercer ciclo de implementación de la Directiva para la actualización de los PGRI se encuentra este documento que pretende actualizar el conocimiento y los avances científicos, e ilustrar algunas posibles soluciones que ayuden a la práctica de la gestión de los riesgos de inundación.

2. Cambio Global

La temperatura media de la Tierra aumenta inexorablemente año tras año. Los datos históricos y las observaciones evidencian que el ritmo de dicho aumento, además, no tiene precedentes. Cada año, se rompen récords relacionados con las temperaturas altas, y con la persistencia de periodos de sequía prolongados. En el Mediterráneo occidental, se ha confirmado que las olas de calor de los veranos de 2022 y 2023 alcanzaron anomalías de temperatura de +3,6 °C y +2,9 °C por encima de los niveles preindustriales respectivamente, superando las variaciones climáticas naturales registradas en más de un milenio (Tejedor *et al.*, 2024). Según la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), todos los meses de 2022 se situaron entre los siete más cálidos para ese mes, y los meses de la segunda mitad del año

(junio-diciembre) fueron los más cálidos jamás registrados (NOAA, 2023). En julio, agosto y septiembre, las temperaturas mundiales superaron en más de 1,0 °C la media a largo plazo, la primera vez en los registros de la NOAA que un mes supera ese umbral. El verano de 2023 fue increíblemente cálido con impactos globales, por ejemplo, en los incendios de Canadá. Durante el invierno de 2023/2024 en Europa, se observó un periodo de carestía de nieve en las montañas que no tiene precedente, especialmente en la región sur de Europa. De igual manera, los informes de la World Meteorological Organization confirman que 2023 y 2024 fueron los años más cálidos jamás registrados, con 2024 estableciendo un nuevo récord global de temperatura, y que 2025 también se ubicó entre los años más cálidos de la historia, reflejando una tendencia continua de calentamiento global extremo (WMO, 2025).

Los datos observados indican que el calentamiento no es uniforme en todo el planeta, y que existen zonas geográficas que se calientan más que otras. Además, existe una dependencia del calentamiento con la altura en zonas de montaña (MIR, 2015). Si se tiene en cuenta todos los datos observados, la temperatura media del planeta desde el periodo preindustrial 1850-1900 ha aumentado un total de aproximadamente 1°C, pero desde 1982, el ritmo observado es tres veces superior, unos 0,2°C por década. Este aumento, que podría parecer menor, implica una cantidad elevadísima de energía acumulada en los océanos en forma de calor, lo que tiene impactos irreversibles en todos los sistemas socioeconómicos y ambientales de la Tierra (Fischer *et al.*, 2018).

El último informe publicado en 2022 por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC)¹ incide en que **el aumento de**

1,5°C respecto a los niveles preindustriales es alarmante en relación con los impactos hidro-climáticos extremos en el mundo, y en particular en la región mediterránea (IPCC, 2022). **Este informe muestra evidencias de que la situación podría agravarse significativamente si el calentamiento medio llegase a 2°C.** En el informe se especifican las trayectorias que deberían seguir las emisiones mundiales de **gases de efecto invernadero (GEI)** para hacer frente a la amenaza que supone el cambio climático a nivel mundial y alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible.

Los datos aportados por el IPCC demuestran que el ritmo del calentamiento global estimado teóricamente coincide con el observado (error: $\pm 20\%$), con una tasa media de incremento de aproximadamente 0,2 °C por decenio, como se ha mencionado previamente (Figura 1).

De acuerdo con las reconstrucciones realizadas hasta el momento con los últimos datos empíricos y modelos climáticos disponibles, **no existe un precedente en los últimos 2000 años que se asemeje al aumento de temperatura actual.** Además, se han detectado tendencias relacionadas con la intensidad y la frecuencia de diversos fenómenos climáticos extremos, así como una mayor variabilidad en la ocurrencia de precipitaciones intensas y un aumento de las sequías. Los impactos generados hasta el momento en el sistema clima durarán siglos debido a los efectos de retroalimentación del sistema Tierra y las inercias generadas (Fischer *et al.*, 2018). Los modelos climáticos prevén diferencias notables en las características regionales del clima entre el momento actual y un calentamiento global de entre 1,5 °C y 2 °C. Si el calentamiento se mantiene en un límite de 1,5 °C, se espera que las precipitaciones intensas que están

¹ Órgano internacional para la evaluación del cambio climático adscrito a la ONU. En concreto, se ha consultado el Sexto Informe de evaluación sobre el cambio climático, así como los informes

especiales en *Global Warming of 1.5°C* y *Climate Change and Land* publicados en 2022.

asociadas a la ocurrencia de inundaciones se intensifiquen en muchos lugares del mundo (por ejemplo, en África, Asia, y Norteamérica), incluyendo Europa. En particular, se espera que aumente la coalescencia de eventos extremos que amplifiquen la magnitud de las inundaciones, tales como una marejada ciclónica combinada con lluvias extremas o un aumento del caudal de los ríos por deshielo. Todo ello en un escenario en el que el nivel del mar aumentará y, por tanto, también la posibilidad de inundaciones costeras.

Además, se espera que aumenten los eventos de lluvias intensas durante episodios de sequías prolongadas (Seneviratne *et al.*, 2012), con importantes efectos en el comportamiento hidrológico de las cuencas (Hirabayashi *et al.*, 2008). Si el calentamiento global llega al umbral de +2 °C, la magnitud de los cambios descritos aumentará significativamente. Se prevé que las precipitaciones y las inundaciones asociadas se vuelvan más intensas y frecuentes en Europa y en diversas partes del mundo.

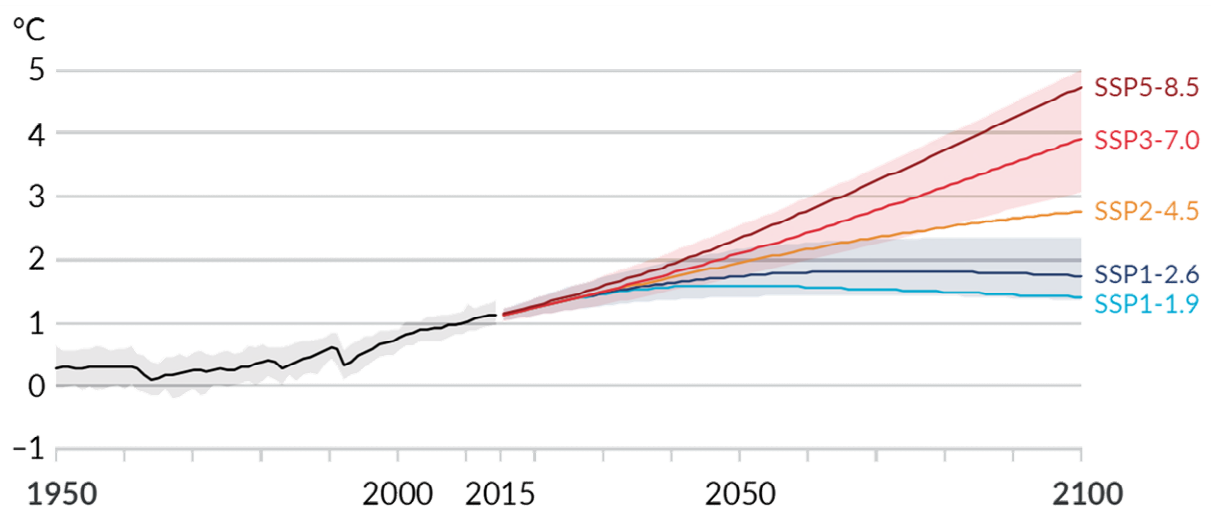


Figura 1: Cambios en la temperatura de la superficie terrestre global con respecto al periodo 1850-1900 para los distintos supuestos definidos en el último informe del IPCC. ([ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf)).

Cambio climático antropogénico

- Desde 1970, la temperatura superficial global ha aumentado más rápido que en cualquier otro período de 50 años en los últimos 2000 años (IPCC, 2021).
- La temperatura superficial global continuará aumentando al menos hasta mediados de siglo en todos los escenarios de emisiones. Los umbrales de 1,5 °C y 2 °C se superarán durante el siglo XXI salvo que se produzcan reducciones drásticas de CO₂ y otros gases de efecto invernadero.
- Su impacto sobre el ciclo hidrológico varía según la región, con un incremento previsto de la variabilidad de la precipitación, expresado en mayor frecuencia de sequías e inundaciones.

Los cambios descritos y los impactos esperables dependerán de los escenarios de emisión de GEI (Protocolo GHG). Por ejemplo, los escenarios de emisiones bajas o muy bajas (SSP1-1.9 y SSP1-2.6) harán que los impactos sean significativamente más bajos que en el caso de los escenarios de emisiones altas o muy altas (SSP3-7.0 y SSP5-8.5). En el escenario mas moderado (SSP2-4.5), las emisiones se reducirán de forma moderada

pero no lo suficiente para cumplir el umbral del 1.5°C y con alta probabilidad tampoco 2°C. No obstante, si el sistema Tierra se mantiene en escenarios de emisiones bajas o muy bajas hasta finales del siglo XXI, se espera que los fenómenos extremos del nivel del mar y las precipitaciones intensas e inundaciones pluviales se reduzcan, y que se limite el número de regiones susceptibles de sufrir extremos (Figura 1).

Desafíos y prioridades frente al cambio climático

- Hacer La gestión del riesgo de inundación a escala mundial plantea grandes desafíos (UNISDR, 2015), agravados por el calentamiento global, el crecimiento demográfico y la ocupación de zonas inundables.
- Reducir la exposición y vulnerabilidad a las inundaciones y mejorar la evaluación probabilística de la peligrosidad en un contexto de variabilidad climática deben ser prioridades de gestión.

En particular en Europa, **la evidencia científica indica que existe una alta probabilidad de que el riesgo de inundaciones aumente en las próximas décadas debido a los efectos combinados del cambio climático y la evolución socioeconómica** (informe PESETA III del JRC en Ciscar *et al.*, 2018)². De acuerdo con este informe, se estima que las inundaciones de los ríos en toda Europa causan daños anuales cuantificables por valor de 5300 millones de euros/año. Se estima que existen unas 172.000 personas que están **expuestas anualmente** a las inundaciones fluviales en Europa (Dottori *et al.*, 2020) y 100.000 están

expuestas a inundaciones costeras (Vousdoukas *et al.*, 2020). Además, el 12 % de la población europea, es decir, entre 50 y 53 millones de personas, vive en zonas potencialmente propensas a inundaciones fluviales (EFA, 2025).

Se prevé que el riesgo de inundaciones podría triplicarse a finales de siglo si no se toman medidas de mitigación y adaptación concretas. De hecho, las pérdidas anuales podrían aumentar hasta los 17,5 millones de euros/año, con más de 700.000 personas afectadas anualmente por inundaciones. Según la Comisión Europea³, el sur de Europa

² **JRC, Joint Research Centre.** El Centro Común de Investigación de la Comisión Europea proporciona evidencia científica a lo largo de todo el ciclo político. En concreto se ha consultado en el EU Science Hub el informe JRC PESETA III, que

reúne a expertos en economía, biología, física e ingeniería para calcular los impactos físicos y los costes económicos del cambio climático en Europa.

³ **EU (2021).** Closing the climate protection gap - Scoping policy and data gaps

será una de las regiones más afectadas, ya que se prevén mayores frecuencias de inundaciones urbanas y periodos de escasez de agua como resultado del cambio climático.

Por otro lado, las zonas costeras europeas estarán expuestas a inundaciones derivadas de los efectos del cambio climático (Vousdoukas *et al.*, 2020). Se espera que el nivel del mar aumente hasta un metro en 2100, y que esta tendencia continúe durante los siglos venideros. Si no se toman medidas, las pérdidas por inundaciones costeras en Europa alcanzarán hasta unos 10.900 millones de euros al año en un escenario de mitigación moderada (un 30 % más en un escenario de altas emisiones). Las pérdidas a finales de siglo pueden alcanzar valores superiores a 230.000 millones de euros anuales en el escenario más desfavorable. Además, el número de personas expuestas a inundaciones costeras podría aumentar de las 102.000 actuales a 559.000 por año para 2050. Hacia finales de siglo, bajo un análisis de economía estática, esta cifra podría superar los 1,3 y 2,1 millones de personas al año en los escenarios de mitigación moderada (RCP4.5)

y altas emisiones (RCP8.5), respectivamente (Ciscar *et al.*, 2018).

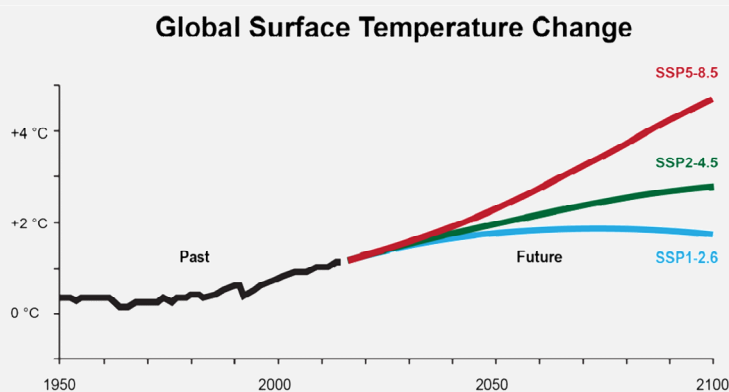
Los informes realizados por el IPCC y la Comisión Europea indican el camino para adaptarse a estos futuros escenarios y las estrategias de mitigación que deberían adoptarse. Sin embargo, la mitigación del cambio climático no podrá evitar por sí sola los efectos más adversos relacionados con las inundaciones. Esto implica que las medidas de adaptación serán importantes para reducir la magnitud del impacto de las inundaciones en el futuro, pero seguirá habiendo un riesgo residual importante. De hecho, si no se aplican las medidas de protección adecuadas contra las inundaciones, y la contratación de seguros no aumenta a niveles similares en todos los Estados miembros, **la brecha en la protección contra las inundaciones podría ampliarse, contribuyendo a generar desigualdades sociales en Europa.** Además, estos informes reconocen la falta de preparación de los Estados miembros para abordar inundaciones devastadoras que podrían agravarse con situaciones sanitarias extremas, como la COVID-19, o los derivados de la propia emergencia.

1. Escenarios de emisión de cambio climático en AR6

Las proyecciones climáticas del Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6, 2023) se basan en los modelos CMIP6 del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas. Respecto a su predecesor CMIP5, el CMIP6 incorpora una representación mejorada de los procesos biofísico-químicos del sistema Tierra (Bock *et al.*, 2020; Vanniere *et al.*, 2019), mayor resolución espacial y temporal, y una simulación más precisa de las trayectorias de las borrascas del Atlántico Norte, que condicionan los patrones de precipitación en Europa (Priestley *et al.*, 2020). Su evaluación frente a observaciones muestra un buen desempeño para la temperatura, con discrepancias menores que en CMIP5 en los patrones regionales de precipitación.

La respuesta climática futura se evalúa en el AR6 a partir de cinco escenarios de trayectorias antropogénicas de emisiones, los denominados Shared Socioeconomic Pathways (SSP): emisiones muy altas (SSP5-8.5) y altas (SSP3-7.0), con concentraciones de CO₂ que se duplican hacia 2100 y 2050 respectivamente; emisiones intermedias (SSP2-4.5), con concentraciones aproximadamente estables hasta mediados de siglo; y emisiones bajas (SSP1-2.6) y muy bajas (SSP1-1.9), coherentes con trayectorias de emisiones netas cero en torno a 2050.

Estos escenarios sustituyen a los Representative Concentration Pathways (RCP) del AR5, que describían únicamente trayectorias de forzamiento radiativo sin supuestos socioeconómicos explícitos. A diferencia de los RCP, los SSP integran trayectorias de emisiones con narrativas socioeconómicas, niveles de mitigación y adaptación, y políticas de control de la contaminación atmosférica. La viabilidad o probabilidad de cada escenario no forma parte de la evaluación climática propiamente dicha.



Proyección de la temperatura para diferentes trayectorias antropogénicas de emisiones SSP (IPCC, 2022).

2. Principales desafíos para incorporar el cambio climático en la gestión del riesgo de inundaciones

Según la EU (2021b), los principales desafíos son:

Incertidumbre en las proyecciones. Las proyecciones climáticas incorporan incertidumbres asociadas a los modelos, los escenarios de emisiones y la variabilidad natural. Aunque pueden reducirse mediante mejoras metodológicas, nunca desaparecen por completo, lo que dificulta la toma de decisiones robustas a largo plazo.

Escala local y fenómenos extremos. Los modelos climáticos tienen limitaciones para reproducir precipitaciones extremas a pequeña escala, especialmente las asociadas a inundaciones súbitas (flash floods), lo que complica la planificación territorial y la gestión preventiva.

Herramientas de apoyo a la decisión. Es necesario desarrollar enfoques de planificación robusta que incorporen explícitamente la incertidumbre y operen bajo múltiples escenarios climáticos, en lugar de depender de una única proyección.

Factores de ajuste regionalizados. Se requieren factores de ajuste climático regionalizados que permitan estimar de forma práctica y consistente los cambios proyectados en los caudales de inundación.

Cambios antropogénicos en las cuencas. Las alteraciones humanas del territorio —cambio de uso del suelo, urbanización, impermeabilización— influyen significativamente en los extremos hidrológicos y pueden superar el efecto del propio cambio climático en determinadas cuencas.

En síntesis, incorporar el cambio climático en la gestión del riesgo de inundaciones exige afrontar la incertidumbre inherente a las proyecciones locales, actualizar normativas y planes diseñados con datos históricos, y mejorar la coordinación entre planificación hidrológica, ordenación del territorio y gestión urbana. A ello se suma la necesidad de reducir la ocupación de zonas inundables y avanzar desde enfoques estructurales hacia estrategias preventivas basadas en soluciones naturales (Cervigón y del Moral Ituarte, 2020).

3. Revisión de la documentación técnica sobre cambio climático

3.1. Documentación revisada

El presente informe ha actualizado la revisión bibliográfica efectuada para elaborar el informe *Inundaciones y cambio climático* publicado por el Ministerio para la Transición Ecológica en 2018. Con el objeto de ser consistente, la revisión bibliográfica se ha llevado a cabo siguiendo una metodología análoga, fundamentalmente centrada en el periodo temporal 2018-2025. En concreto se ha revisado la información publicada en diferentes trabajos internacionales sobre los efectos del cambio climático en las inundaciones por diferentes organismos públicos, privados y grupos de investigación. Estos son:

- **IPCC** (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático). Órgano internacional para la evaluación del cambio climático adscrito a la ONU. En concreto, se ha consultado el Sexto Informe de evaluación sobre el cambio climático, así como los informes especiales en *Global Warming of 1.5°C* y *Climate Change and Land* (IPCC, 2018).
- **Joint Research Centre (JRC)**. El Centro Común de Investigación de la Comisión Europea aporta evidencia científica a lo largo de cada ciclo político. Se han consultado las publicadas en el EU Science Hub (https://joint-research-centre.ec.europa.eu/index_en)
- **International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR)**. Grupo Internacional de Investigaciones Hidroambientales, con varias revistas de investigación.
- **Publicaciones y plataformas científicas diversas**. Carbon Brief es una plataforma ubicada en UK que se centra en cubrir los últimos desarrollos y avances en ciencia climática, y en particular en la ciencia de atribución de eventos extremos (*attribution science*). También se ha consultados documentos de *Greenpeace Research Laboratories Technical Report*⁴, y de proyectos como INTERREG SUDOE.
- **Oficina Española del Cambio Climático (OECC)**. Dirección General dependiente de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España para desarrollar políticas relacionadas con el cambio climático. En concreto se han consultado, el proyecto ECCE (Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático), y la publicación “Impactos y Riesgos derivados del Cambio Climático en España -2021” (Sanz & Galán, 2020) y su actualización en 2025 (Losada *et al.*, 2025).
- **Comisión Europea (EU)**. *Directorate-General for Environment*. Oficina Europea para el Medio Ambiente. Estudios consultados: Publications Office of the European Union, 2021. Además, se revisó las siguientes plataformas, grupos de trabajo y organismos, con relación a los informes realizados desde 2018. En concreto destacan las siguientes:
 - **European Exchange Circle on Flood Mapping (Grupo EXCIMAP)**. Grupo europeo para el intercambio de información sobre metodologías de realización de mapas de inundación.
 - **Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)**. Facilita información climática general meteorológica y climática, general y regional, y proyecciones de cambio

⁴<https://es.greenpeace.org/es/wp-content/uploads/sites/3/2023/07/exeter.pdf>

climático bajo diferentes escenarios de emisión, entre otros servicios.

- **AdapteCCa.es:** Plataforma sobre Adaptación al Cambio Climático en España y visor de escenarios de cambio climático. En la elaboración de este visor colaboran la AEMET, el CSIC, en el marco del Grupo de Trabajo de Escenarios-PNACC, la Fundación Biodiversidad y la Oficina Española de Cambio Climático. Los escenarios generados mediante métodos dinámicos son importados desde el proyecto internacional EURO-CORDEX.
- **Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).** Proporciona apoyo técnico en distintas áreas de conocimiento relacionadas con el cambio climático. Destaca su último informe sobre el impacto del cambio climático en las precipitaciones máximas en España, donde se analiza su influencia en los cuantiles de lluvia diaria y subdiaria, permitiendo identificar cambios sobre el factor de torrencialidad (CEDEX, 2018).

Tal y como ocurriera con el informe previo, la cantidad de evidencia descrita para el periodo de estudio (2018-2025) no es elevada, y se circunscribe a un número limitado de informes, destacando los generados por el IPCC. Estos informes, por lo general, tienden a describir las situaciones generales previstas en relación con el impacto del cambio climático en los eventos extremos de inundaciones. En general, estos informes muestran los cambios observados, las proyecciones esperadas de impactos por riesgos de inundaciones, así como las potenciales medidas para su mitigación y adaptación. Se tienen cada vez más en cuenta los efectos de los eventos combinados o en cascada y el impacto de las inundaciones durante periodos prolongados de sequía. No obstante, los trabajos de detalle a escala de cuencas hidrográficas que puedan servir como punto de partida para la gestión son escasos. Los estudios sobre los impactos

de las inundaciones usando escenarios futuros se circunscriben a algunas cuencas piloto.

Por otro lado, se ha llevado a cabo una identificación de evidencia científica basada en la publicación científico-técnica de distintos investigadores que no necesariamente tienen que estar representados en los informes descritos anteriormente por diversas razones. Para ello, se ha realizado una búsqueda sistemática de artículos publicados desde 2018 en los buscadores *Google Scholar* y *Scopus* mediante las palabras clave: “*floods*”, “*climate change*”, “*extreme events*”, “*global warming*”, “*flood risk*”, “*climate adaptation*”, “*climate projection*” y “*extreme precipitation*”, a escala global, europea y española. Inicialmente, la búsqueda generó un ingente número de registros. El análisis final se ha basado en aquellos artículos publicados en revistas científicas de relevancia.

3.2. Análisis de los cambios climáticos e hidrológicos observados

3.2.1. Evidencias de cambios observados a escala global y de Europa

Cambios observados en las precipitaciones

La detección de cambios en la distribución e intensidad de los fenómenos de precipitación es crucial para estudiar los eventos extremos de naturaleza hidrológica como las inundaciones. A priori, se asume que, en un clima más cálido, los episodios de precipitación intensa se verán intensificados debido a los procesos termodinámicos descritos por la relación Clausius-Clapeyron, que implican que una atmósfera más cálida retiene una mayor cantidad de humedad potencialmente precipitarle (Norris *et al.*, 2019). Aunque dichas premisas puedan ser aplicables a escala global, aún existen incertidumbres significativas cuando se analizan estos cambios a nivel local (Christensen & Kjellström, 2020). La fuente de incertidumbres se debe a la falta de datos observados (Carvalho, 2019) y a la dificultad que conlleva la modelización de la

precipitación, donde los efectos termodinámicos a escala local juegan un importante papel (Seager *et al.* 2010; Gimeno *et al.*, 2022). Además, la precipitación está condicionada por una alta variabilidad espacial y temporal (interanual e interdecadal) por lo que una falta de series de datos larga influye en la cuantificación de dichos cambios (Spinoni *et al.* 2019).

A **escala global**, numerosos estudios observacionales y de modelización indican un aumento en la frecuencia e intensidad de los fenómenos extremos de precipitación (Ali & Mishra, 2018; Donat *et al.*, 2019; Papalexiou & Montanari, 2019; Kendon *et al.*, 2019; Zobel *et al.*, 2018). Aunque existe heterogeneidad en los métodos y bases de datos empleadas, la señal general apunta hacia una tendencia positiva en múltiples regiones. Los análisis basados en la base de datos HadEX3 (Dunn *et al.*, 2020) confirman un incremento de la precipitación intensa en las últimas décadas, especialmente en eventos diarios y subdiarios, atribuible al calentamiento global (Figura 2).

El aumento de los extremos está vinculado al incremento del contenido de vapor de agua en la atmósfera, lo que es coherente con el aumento de la retención de humedad en el aire a medida que aumenta la temperatura (relación Clausius-Clapeyron), lo que genera incrementos en las precipitaciones extremas sub-diarias de alrededor de alrededor del 7 % por cada °C de calentamiento (Fowler *et al.*, 2021; Haslinger *et al.*, 2025). Las tasas empíricas halladas suelen situarse en torno al 6–7 %/°C, si bien se registran zonas con respuestas sub-CC (< 6 %/°C) y otras con respuestas super-CC, que pueden doblar los valores habituales, superando incluso el 12–14 %/°C (Lenderink *et al.*, 2017; Treppiedi *et al.*, 2025), debido a realimentaciones locales y a la intensificación de la convección (Llasat *et al.*, 2021; Da Silva & Haerter, 2025). Gimeno *et al.* (2020) muestran aumentos de hasta +1,1 % por década en regiones tropicales, mientras que Findell *et al.* (2019) estiman incrementos del 2–3 % en próximas décadas. Asimismo,

Ren *et al.* (2023) detectan un aumento significativo del agua precipitable en las últimas décadas, correlacionado con eventos hidrológicos extremos.

Carvalho (2019) destaca que las tendencias de precipitación están moduladas por cambios en la circulación atmosférica a gran escala y por teleconexiones como ENSO, la Oscilación Decenal del Pacífico y la Oscilación Multidecadal del Atlántico, lo que explica la distribución espacial heterogénea observada, especialmente en el hemisferio occidental.

Estudios recientes muestran que los eventos horarios han aumentado incluso por encima de lo esperado según la relación Clausius-Clapeyron (Guerreiro *et al.*, 2018), particularmente en regiones tropicales. Fowler *et al.* (2021) subrayan que esta intensificación está asociada a procesos convectivos, aunque la atribución precisa al cambio climático se ve modulada por cambios en la estratificación térmica y en la circulación atmosférica.

A **escala europea**, se identifica un claro contraste regional, con incrementos de precipitación en el norte y centro del continente y descensos en el sur, particularmente en la cuenca mediterránea (Cramer *et al.*, 2018; MedECC, 2020). El informe MAR1 del **Mediterranean Experts on Climate and Environmental Change** confirma una tendencia significativa hacia condiciones más secas en el Mediterráneo, con disminuciones en la precipitación anual y mayor frecuencia de sequías meteorológicas e hidrológicas (MedECC, 2020). Al mismo tiempo, se observa un aumento en la intensidad de episodios de precipitación extrema, incluso en regiones donde el total anual disminuye. Los trabajos coordinados por **MedCLIVAR** señalan que esta mayor variabilidad intraanual y el incremento de extremos pluviométricos intensifican tanto el riesgo de sequías prolongadas como el de inundaciones súbitas (Lionello *et al.*, 2012; MedCLIVAR, 2015; Comité CLIVAR-España, 2024). Estas tendencias son consistentes con las

proyecciones climáticas y se atribuyen principalmente al forzamiento antropogénico del sistema climático (IPCC, 2021).

Otros estudios siguen apuntando a un cambio en el patrón de precipitaciones relacionado con el cambio climático en Europa. Combinando datos observados (base de datos E-OBS) y simulaciones históricas (26 modelos de circulación global del CMIP6 y 25 del CMIP5), Tabari *et al.* (2020) han detectado cambios significativos en la precipitación a escala del continente europeo, con notables diferencias según la latitud de la región. En el sur de Europa existe una mayor discrepancia entre las observaciones y los modelos debido a la dificultad que estos últimos tienen para representar eventos convectivos y la existencia de una red escasa de estaciones.

De acuerdo con estos autores, y basados en los modelos CMIP6, en promedio en Europa, se han observado aumentos en las anomalías de las precipitaciones extremas (percentil 99,5 %) de ~26 %, 26 %, 22 % y 24 % en invierno, primavera, verano y otoño, respectivamente. Hosseinzadehtalaei (2020) emplearon diversas fuentes de datos climáticos y productos de precipitación basados en información recogida por satélites (base de datos CMORPH -Joyce *et al.*, 2004- y MSWEP

- Beck *et al.*, 2017). Estos autores identificaron un aumento en la ocurrencia de eventos extremos en toda Europa, especialmente en aquellos de corta duración lo que implica que los valores que definen las curvas de intensidad-duración-frecuencia, necesarias para modelizar procesos hidrológicos, pueden aumentar en las próximas décadas. Recientemente, Christidis & Stott (2022) usaron un ensamble de nueve modelos climáticos basados en observaciones CMIP6 para detectar el impacto de la influencia humana en un patrón de estaciones más secas en la cuenca mediterránea, y más húmedas en el resto del continente europeo. Aunque estas tendencias tienden a ser más fuertes en invierno que en verano, se observa que la variabilidad aumenta en todas las estaciones. Este estudio también detectó que los extremos de precipitación aumentan de manera generalizada en el continente europeo con excepción en la cuenca mediterránea, donde los extremos de bajas precipitaciones son más frecuentes. Por otro lado, Vicente-Serrano *et al.* (2021) analizaron datos observados de precipitación desde 1891 a 2014, así como simulaciones de los modelos CMIP5 y CMIP6, para identificar tendencias en el régimen de precipitación. En general, estos modelos tienden a sobreestimar periodos de escasa

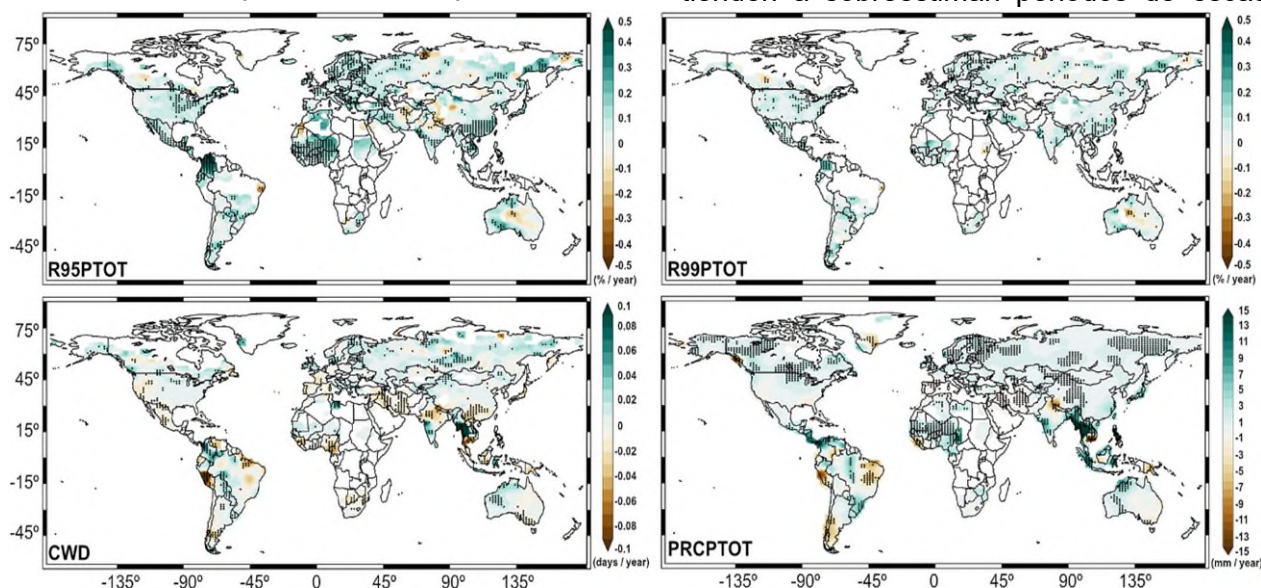


Figura 2: Tendencias lineales en la precipitación diaria total que excede los umbrales percentiles del 95 % (R95PTOT), del 99 % (R99PTOT), los días húmedos consecutivos (CWD) y la precipitación total (PRCTOT) para el periodo 1970-2018. Dunn *et al.* (2020).

precipitación en regiones subtropicales de latitudes medias, mientras que subestiman los aumentos de precipitación observados en el hemisferio norte, particularmente en Europa del norte y central. Mas recientemente,

Vicente-Serrano *et al.* (2025) han observado que existe una gran variabilidad en las precipitaciones observadas en la región mediterránea, no econtrando una tendencia común significativa.

Cambios detectados en la precipitación

A escala global:

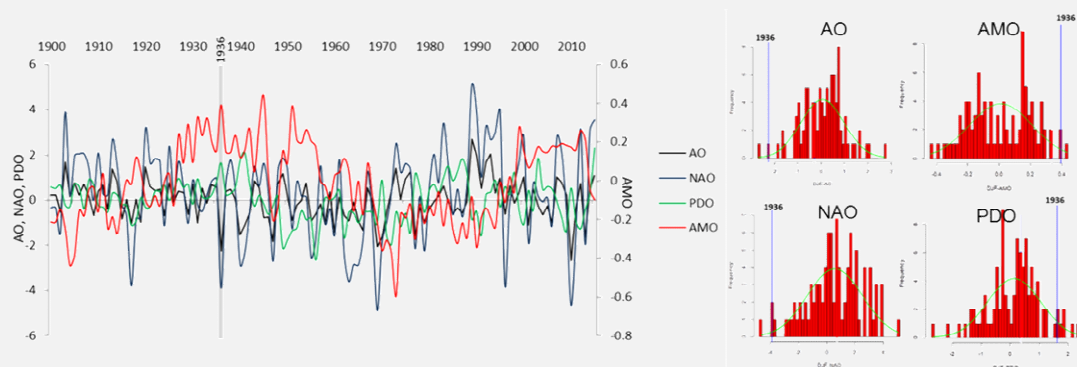
- Las observaciones y los modelos climáticos coinciden en señalar un aumento de la frecuencia e intensidad de los eventos extremos de precipitación, con marcada heterogeneidad regional, especialmente en lluvias intensas diarias y subdiarias.
- El calentamiento global incrementa el contenido de vapor de agua atmosférico, favoreciendo mayores tasas de precipitación en regiones tropicales, en interacción con modificaciones en la circulación atmosférica y modos de variabilidad climática (ENSO, PDO, AMO).
- La magnitud de los eventos de corta duración (horarios y convectivos) ha aumentado por encima de lo esperado según la relación de Clausius-Clapeyron, superando la variabilidad natural y reforzando la señal del forzamiento antropogénico.

En Europa:

- Se observa un patrón claro de aumento de precipitaciones en el norte y centro del continente y disminución en el sur, con condiciones más secas, mayor frecuencia de sequías e incremento de extremos de baja precipitación en la cuenca mediterránea.
- La precipitación extrema aumenta incluso donde el total anual disminuye, lo que incrementa simultáneamente el riesgo de inundaciones súbitas y de sequías prolongadas.
- En el sur de Europa persiste una mayor discrepancia entre observaciones y modelos, atribuible a las limitaciones de estos para representar situaciones convectivas y a la densidad insuficiente de la red de estaciones.
- En la región mediterránea la variabilidad es elevada y no se identifica una tendencia clara.

3. Modos de variabilidad climática y teleconexiones

Los modos climáticos son oscilaciones naturales que influyen en la variabilidad del clima a escala mundial, modulando las precipitaciones, la temperatura, la presión superficial, el viento y la temperatura del mar entre otros (De Viron *et al.*, 2013). Existen varios modos climáticos, dependiendo de la localización geográfica, la escala temporal y los mecanismos de interacción atmósfera-océano implicados. El ENSO o El Niño-Oscilación del Sur es el modo climático más conocido relacionado con las fases recurrentes cálidas (el Niño) / fases frías (la Niña) (3-7 años) de la temperatura superficial del mar en el Pacífico tropical. La PDO, conocida como la Oscilación Decadal del Pacífico es similar a el ENSO, pero se produce en el Pacífico norte y en periodos más largos (de 20 a 30 años). Durante las fases cálidas de PDO, la costa oeste de Norteamérica tiende a recibir cantidades mayores de precipitaciones líquidas. De igual manera, en el Atlántico opera la oscilación multidecadal del Atlántico, conocida como AMO. Por su parte, la NAO, conocida como la Oscilación del Atlántico Norte, es la diferencia de presión en superficie normalizada entre la latitud subtropical del Atlántico (región de las Azores) y las altitudes septentrionales (Islandia), que determina la intensidad y dirección de los vientos a través del Atlántico en el hemisferio norte. La NAO condiciona el paso de depresiones en Europa y España. Las fases negativas (positivas) indican una menor (mayor) diferencia entre el alta de las Azores y la baja de Islandia, y por tanto dirigen vientos del oeste más fuertes (y probabilidad de lluvias) hacia el sur (norte) de Europa. Existe una alta diversidad entre los escenarios obtenidos con los distintos modelos climáticos de CMIP6, pero en general se sugiere una amplificación del impacto de eventos intensos asociado al ENSO y a la PDO en las próximas décadas. En estudios recientes utilizando modelos climáticos (CMIP5) se sugieren que la NAO tenderá hacia valores positivos (Gillett y Fyfe, 2013; Stephenson *et al.*, 2006). Se ha llegado a una conclusión similar utilizando CMIP6, pero con una señal ligeramente más fuerte (Fuentes-Franco *et al.*, 2023). Las simulaciones analizadas en este estudio indicaron un patrón de desplazamiento hacia el norte de la NAO junto con un aumento de su amplitud (Fuentes-Franco *et al.*, 2023). Usando un modelo de la Tierra y la Química Atmosférica, Bacer (2016) concluyó que el patrón negativo a la NAO podría aumentar, pero su amplitud podría disminuir.



Evolución histórica de los principales modos climáticos que afectan al patrón hidrológico de eventos en Europa. Se resalta el invierno de 1936 como un año peculiar con inundaciones generalizadas, donde coincidió la yuxtaposición de valores muy negativos de la NAO(AO) con valores positivos de la AMO y PDO (Ballesteros-Cánovas *et al.*, 2019).

Cambios observados en la cobertura nival

La cobertura nival es un componente importante del ciclo del agua que afecta directamente a la generación de eventos de crecida y a la cantidad y calidad de los recursos hídricos. Desde un punto de vista hidrológico, la nieve retiene agua en estado sólido en una proporción, lo que se denomina el **equivalente en agua de nieve (SWE)**. Además, la cobertura nival desempeña un papel clave en diferentes sistemas ecológicos y socioeconómicos en las montañas. El calentamiento climático afecta directamente tanto a la extensión y cantidad de nieve que cae cada año, como a su estacionalidad. Sin embargo, la elevada variabilidad espacio-temporal de la cobertura nival hace que sean imprescindibles las observaciones de nieve para aportar escenarios más fiables de cambio de este parámetro en relación con el calentamiento climático.

La mayoría de los estudios realizados en los últimos años a escala global muestran una clara tendencia negativa tanto de la profundidad del manto nivoso como de la duración del mismo sobre el terreno. Estos cambios se deben a la transición de un régimen de precipitación sólida a líquida, así como al aumento de la fusión de la nieve, que es más frecuente, intensa y temprana como resultado del aumento de las temperaturas durante el invierno y la primavera (Beniston *et al.*, 2018).

La extensión de la capa de nieve ha sido monitorizada a través de satélites por medio de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) y del programa Copernicus de la Unión Europea. En particular, la monitorización de la nieve en Europa se realiza principalmente a través del programa Copernicus Programme, mediante las misiones Sentinel-1 y Sentinel-2, que permiten el seguimiento de la extensión, características y evolución del manto nivoso mediante sensores radar y ópticos de alta resolución. Los datos existentes muestran una clara

reducción desde el año 1967, pero con importantes variaciones en función de la latitud y altitud (Bormann *et al.*, 2018). En particular, los descensos más pronunciados se han detectado en la época de primavera, debido al aumento de temperatura en este periodo. Además, debido al aumento de las temperaturas en latitudes altas y zonas de montaña, en lo que se conoce como la dependencia del calentamiento con la altura (MIR *et al.*, 2015), el retroceso del manto nivoso es mayor en estas zonas. Se estima que la capa de nieve en el hemisferio norte disminuye su duración de 5 a 6 días por década (Figura 3). En Norte América, la tasa de reducción de la cobertura nival es de aproximadamente 4800 km²/año (datos desde 1972-2020, EPA, 2021). Basado en productos derivados de imágenes de satélite (MODIS), la reducción de días de nieve en los Alpes es importante y llega hasta un número de 17 días/década (evaluado en las últimas dos décadas) (Fugazza *et al.*, 2021). Se han obtenido resultados similares en los Andes (Saavedra *et al.*, 2018) y en el Himalaya (Desinayak *et al.*, 2022), con excepciones en la región del Karakorum. Una reducción de la cobertura nival implica una reducción del SWE y, por lo tanto, una disminución del caudal correspondiente a esta componente del ciclo hidrológico. Musselman *et al.* (2021) encontraron que, en muchas regiones montañosas de América del Norte, las tendencias de deshielo invernal (snowmelt) son mucho más frecuentes y pronunciadas que las tendencias de disminución del equivalente de agua de nieve (SWE), lo que indica que la reducción de recursos hídricos nivosos a escala continental puede estar “oculta” si solo se consideran las tendencias de SWE. Estas reducciones de disponibilidad de agua no podrán ser compensadas por un hipotético aumento de las precipitaciones líquidas, allá donde puedan producirse (Shrestha *et al.*, 2021). Por otro lado, el aumento de temperatura a finales de la época invernal puede conducir a **eventos de lluvia sobre nieve**, conocidos como *rain-on-snow*

(RoS). Cuando esto ocurre, pueden originarse inundaciones debido al aporte inmediato de una elevada cantidad de agua de precipitación, que discurre libremente y que tiende a derretir el manto nivoso. Un estudio reciente a escala global indica que estos eventos de inundación son altamente

sensibles al calentamiento climático, mostrando una gran variabilidad geográfica (López-Moreno *et al.*, 2021). Este estudio indica que los caudales podrían aumentar debido a una fusión más rápida causada por aportes de energía mayores y capas de nieve más débiles y cálidas en el futuro.

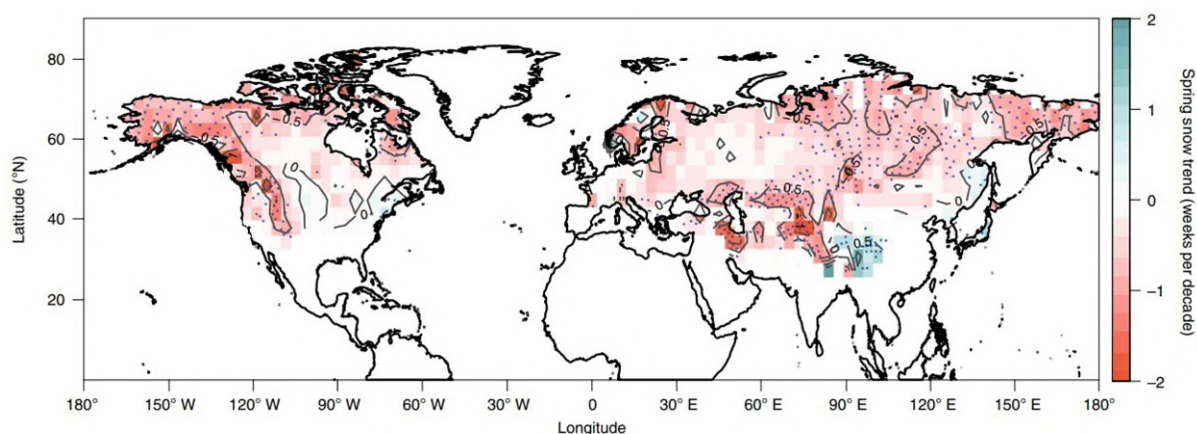


Figura 3: La distribución espacial de las tendencias de la capa de nieve en el hemisferio norte para el periodo 1972-2017 de NOAA-SCE. Las áreas punteadas marcan una significación estadística al nivel del 95 %.

Cambios recientes en la cobertura nival

- Los datos muestran una tendencia negativa clara en la profundidad y duración del manto nivoso, con reducciones de hasta 5-6 días por década en el hemisferio norte, pese a la alta variabilidad existente.
- Los descensos más pronunciados se registran en primavera, como consecuencia del mayor calentamiento en esta estación.
- La reducción del manto de nieve y del agua equivalente no quedará compensada por el previsible aumento de la precipitación.
- El calentamiento a finales del invierno ha intensificado las inundaciones por deshielo anticipado y por lluvia sobre nieve en las últimas décadas.

Cambios observados en el uso del suelo

La tipología del uso del suelo en una cuenca juega un papel fundamental en la transformación de la lluvia caída en escorrentía, así como en la generación de caudales sólidos. Las transformaciones de usos del suelo hacia tipologías de zonas urbanas son responsables del aumento de la respuesta hídrica de las cuencas ante eventos torrenciales, con un aumento de la peligrosidad. Además, estos cambios de usos del suelo provocan un impacto en los servicios ecosistémicos, tales como la calidad de agua, la capacidad de recarga de acuíferos y la tasa de pérdida de suelo por erosión hídrica.

En las últimas décadas, los cambios de usos de suelo se han intensificado en el mundo, generalmente hacia situaciones de una mayor degradación del suelo. En términos generales, los registros existentes se basan en observaciones de imágenes de satélite y fotografía aérea, donde se aprecian, de manera relativa, las tipologías genéricas de usos del suelo como tierras de cultivo, forestales o urbanos. Entre los productos globales que identifican y cuantifican los cambios de el uso del suelo se encuentran los datos FROM-GLC (observación y el monitoreo con una resolución global de 30 m, Yu *et al.*, 2022), los datos anuales a escala de 300 m desde 1992 hasta 2015, y los datos derivados del sensor MODIS de cobertura terrestre global (Friedl *et al.*, 2010), entre otros. Recientemente, el modelo GLASS-GLC ha permitido evaluar el cambio en la cobertura del suelo a largo plazo con una resolución espacial de 5 km y una cobertura temporal de 1982 a 2015 (Liu *et al.*, 2020). Recientemente, Winkler *et al.*, (2021) combinaron diversas fuentes de datos de alta resolución y modelos estadísticos para cuantificar cambios anuales en el uso del

suelo desde 1960 hasta 2019 a una resolución global de 1 km (Figura 4). A esta escala, los resultados de este estudio sugieren que el 17% de la superficie total de la Tierra ha cambiado al menos una vez de tipología de uso de suelo desde 1960. Por lo general, las tendencias globales indican una pérdida neta de área forestal global (0,8 millones de km²) y un aumento de la agricultura global (es decir, tierras de cultivo y pastos/pastizales) de 1,0 y 0,9 millones de km², respectivamente. Esta situación sugiere tendencias hacia un incremento de la susceptibilidad de generar mayores escorrentías para una tormenta dada. Sin embargo, las tendencias observadas son desiguales, y muestran diferentes trayectorias a escala regional. Por lo general, las tendencias de deforestación son más claras en los países del sur global, y, además, se observan un mayor aumento de las áreas de tierras de cultivo. En el caso del cambio de pastos/pastizales, las diferencia entre el norte y el sur son menores. Estas tendencias son coherentes con otros estudios realizados en los últimos años (Bryan *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2019; Feng *et al.*, 2016). La ratio de cambio de uso de suelo no ha sido constante durante estas décadas. De hecho, se identifican dos fases bien diferenciadas con (i) una aceleración del cambio entre 1960 y 2004, y (ii) una desaceleración de los cambios observados entre 2005 y 2019. Estas tendencias deben considerarse a escala global, y podrían tener un impacto especialmente notable en cuencas fluviales de tamaño medio y grande. A su vez, los estudios detallados de los cambios de uso de suelo relacionados con la vegetación de ribera no aportaron resultados precisos, ya que este tipo de suelo muestra estados transitorios y una mayor dinámica temporal (Brown *et al.*, 2022).

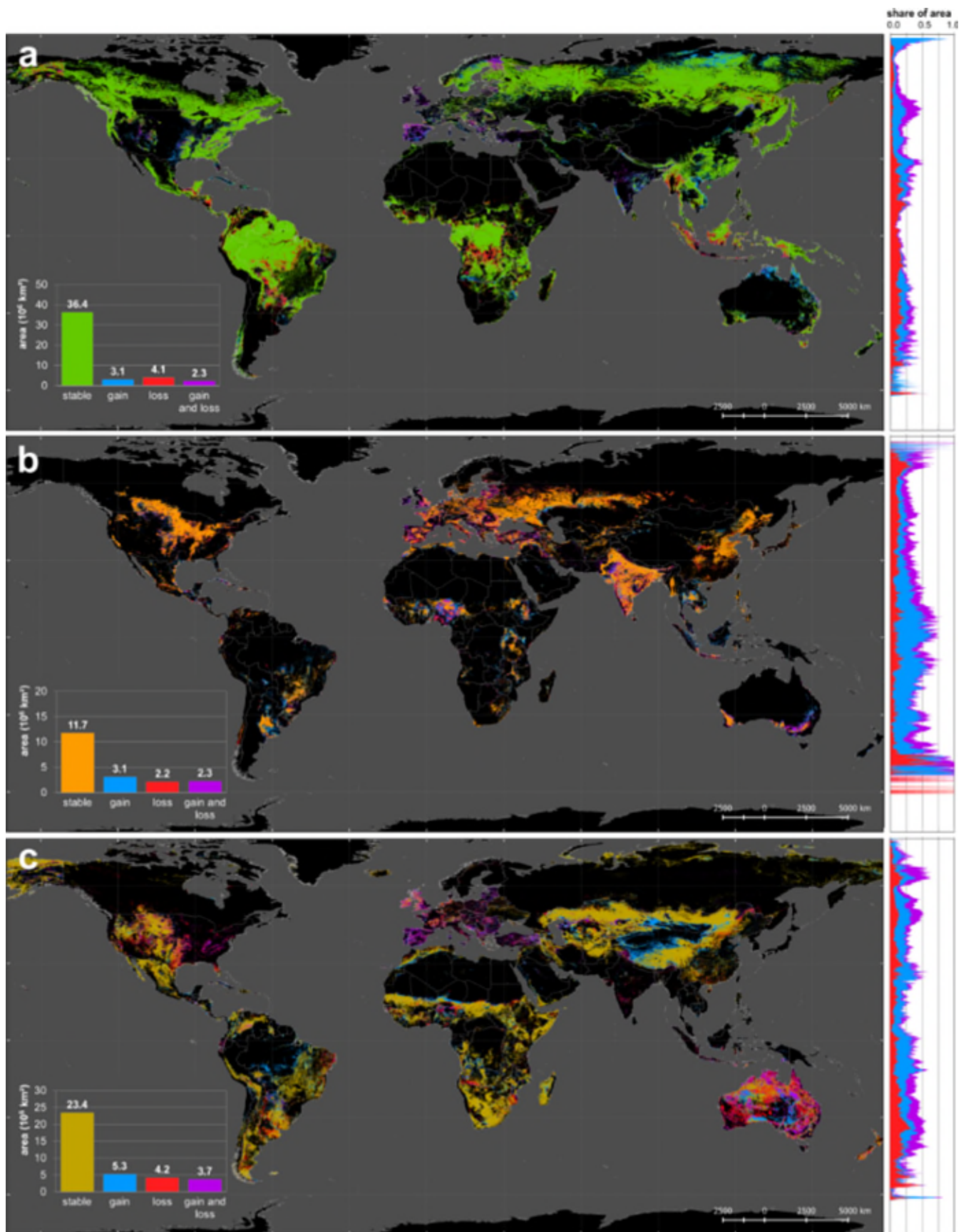


Figura 4: Distribución espacial de la extensión de bosque (a), tierras de cultivo (b) y pastos/pastizales (c), mostrando las zonas estables (naranja), ganancia (azul), pérdida (rojo) y de cambio (ganancias y pérdidas; granate) entre 1960 y 2019 (Winkler et al., 2021).

Cambios recientes en el uso del suelo

- El 17 % de la superficie terrestre ha experimentado al menos un cambio de uso del suelo desde 1960.
- El ritmo de cambio fue más intenso entre 1960 y 2004, y se ha moderado desde entonces.
- A escala global se registra una pérdida neta de superficie forestal (0,8 millones de km²) y un aumento de las tierras agrícolas —cultivos y pastizales— de 1,0 y 0,9 millones de km² respectivamente, con mayor intensidad en el Sur Global.
- En el sur de Europa la tendencia es opuesta: aumento de la superficie forestal y del sotobosque, y abandono de tierras agrícolas, con excepción de las zonas de regadío.

Cambios observados en los caudales extremos

Desde una perspectiva de los eventos extremos, los cambios relacionados con los caudales máximos instantáneos (Q_{max}) tienen un interés elevado en la mitigación y reducción del riesgo de inundaciones. Tal y como se ha descrito, se asume que una atmósfera más cálida puede retener una mayor cantidad de humedad potencialmente precipitable (Norris *et al.*, 2019). Sin embargo, el impacto de dicho efecto en los Q_{max} no es directo ya que intervienen otras variables, como el estado de la cuenca y del tramo de río/torrente en cuestión. Como en el caso de las variables anteriormente descritas, la principal incertidumbre para determinar tendencias y tasa de cambio en los Q_{max} es la disponibilidad de datos observados.

Basándose en la base de datos global del Observatorio de Inundaciones de Dartmouth (DFO), Najibi & Devineni (2018) evaluaron las tendencias existentes en la ocurrencia de inundaciones desde 1985 hasta 2015, y su relación con teleconexiones climáticas. Estos autores muestran que la frecuencia de las inundaciones y la duración de éstas han aumentado a escala global. Este aumento es de cuatro veces mayor en la región de los trópicos desde la década de 2000, y al menos

de 2,5 veces mayor en regiones geográficas de latitudes medias en el hemisferio norte.

Usando datos observados a escala global, Yin *et al.*, (2018) demostraron que los Q_{max} aumentan en la mayoría de las regiones a tasas superiores de las sugeridas por la intensificación de la precipitación asociada a la relación Clausius-Clapeyron, e incluso que exceden las tasas de incremento mostradas por los extremos de precipitación en la mayoría de las regiones del mundo. En base a estos resultados, Yin *et al.* (2018) sugieren que la respuesta hidrológica a valores extremos relacionada con los cambios climáticos y antropogénicos podría estar subestimada, lo que plantea un desafío importante de cara a la gestión del riesgo de inundaciones en las próximas décadas. Sharma *et al.* (2019) sugieren que los mecanismos que generan dichas diferencias están relacionados con una disminución en la humedad anterior del suelo, disminución de la extensión de las tormentas y disminuciones en los procesos de deshielo, poniendo de manifiesto que entender estos nexos sigue siendo un verdadero desafío científico. Por ejemplo, la comparación del caudal, precipitación y humedad del suelo indican que las inundaciones extremas están relacionadas con la intensidad de lluvia y las condiciones antecedentes de humedad del suelo previo a la tormenta (Wasko & Nathan, 2019). En su estudio, estos autores sugieren

que la disminución de la magnitud del Qmax está correlacionada con la disminución de la humedad del suelo, sugiriendo que la magnitud de las inundaciones podría aumentar sólo en los eventos más extremos, ya que los aumentos de precipitaciones de intensidad media se compensarán con la disminución en la humedad del suelo.

A su vez, Kemter *et al.* (2020), por medio de un análisis regional de los ríos de Europa, demostraron que existen relaciones positivas entre la magnitud de las inundaciones y su extensión (en términos de observación en datos de aforos). Estos autores muestran que en Europa central y las Islas británicas, dicha relación se debe a una correlación entre la magnitud-extensión de las precipitaciones y la humedad del suelo, poniendo en relieve la importancia de la gestión de estos factores en el riesgo de inundaciones.

Recientemente, las observaciones del aumento de los extremos de caudal han sido contextualizadas en un marco temporal más amplio. Por medio del análisis de registros históricos y paleohidrológicos, Blöschl *et al.* (2019) crearon una base de datos extensa sobre inundaciones ocurridas en el pasado y demostraron que el aumento de las precipitaciones otoñales e invernales ha provocado un incremento de las inundaciones en el noroeste de Europa. A su vez, estos autores detectaron una disminución de las inundaciones en cuencas medianas y grandes del sur de Europa asociada a una menor tasa de precipitaciones y un aumento de la evaporación, lo que pone de manifiesto la importancia de la cobertura de forestal en las zonas altas de las cuencas. Este estudio, sin embargo, solo tiene en cuenta inundaciones fluviales, y no inundaciones súbitas (flash-floods), que son las más usuales y peligrosas en el Mediterráneo. Finalmente, la disminución de la capa de nieve y el deshielo, como resultado del aumento de las temperaturas, explican una disminución de las inundaciones en Europa oriental. Los resultados derivados de este estudio indican que los cambios en la ocurrencia de inundaciones varían desde un aumento de aproximadamente el 11 % por década hasta una disminución del 23 %. Estos

cambios son consistentes con las proyecciones climáticas para las próximas décadas, lo que sugiere que los cambios en el sistema hídrico provocados por el cambio climático ya están ocurriendo.

Tarasova *et al.* (2023) han detectado, además, que los cambios en los procesos involucrados en la generación de inundaciones son más importantes que los cambios asociados a eventos extremos de precipitación. De hecho, estos autores sugieren que, durante las últimas cinco décadas, el cambio de los eventos de lluvia de un suelo seco a lluvia sobre suelo húmedo ha incrementado los periodos ricos en inundaciones en un +5 % en la región atlántica europea, mientras que un cambio opuesto en la región mediterránea, con lluvia dominante en suelo seco, ha provocado el incremento de los periodos pobres en inundaciones (p. ej., Varlas *et al.*, 2023). Las tipologías de inundaciones varían regionalmente en Europa, pero por lo general tienden a estar relacionadas con eventos extremos en la región alpina y mediterránea (Tradowsky *et al.*, 2023), y procesos de deshielo en el norte de Europa (Fischer & Schumann, 2024). Así, Bertola *et al.*, (2020) analizaron el impacto de estas tendencias en los periodos de retorno en tres regiones de Europa. Estos autores sugieren que, en el noroeste de Europa, en cuencas pequeñas (de hasta 100 km²), los caudales asociados a un periodo de retorno 100 años aumentan más que la mediana, mientras que en las cuencas medianas y grandes se observa lo contrario, apareciendo incluso algunas tendencias negativas, especialmente en el noroeste de Francia. En el sur de Europa, las tendencias siguen siendo negativas, aunque muestran una menor disminución en las inundaciones extremas (> 100 años de periodo de retorno) y en cuencas pequeñas. De hecho, estos autores sugieren que el papel del cambio climático depende, en gran medida, de la cuenca vertiente. Sin embargo, otro estudio sugiere que los conceptos como el periodo de retorno podría ser engañosos si no se actualizan para reflejar cambios significativos a lo largo del tiempo (Slater *et al.*, 2021). Estos autores, por medio del análisis de los

percentiles de las inundaciones de 20, 50 y 100 años evaluados ahora y hace 50 años, sugieren que las inundaciones de 20/50 años han aumentado principalmente en zonas de clima templado, pero han disminuido en zonas áridas, tropicales, polares y frías.

Por el contrario, las inundaciones de 100 años han disminuido principalmente en zonas áridas/templadas y muestran tendencias mixtas en zonas frías. Sin embargo, estos resultados están claramente condicionados por la falta de datos de registros prolongados, resaltando la necesidad de una actualización continua de las evaluaciones de peligros. Estas observaciones son coherentes con Mangini *et al.* (2018; Figura 5). Estos autores han estudiado la evaluación de las tendencias de las inundaciones en Europa central y septentrional, usando datos de observaciones de todos los países y los métodos del enfoque de inundación máxima anual (AMF) y el de pico por encima del umbral (POT). En sus resultados, se detectan cambios significativos, según la región de análisis. Por ejemplo, en la región atlántica se observa una tendencia general hacia el aumento de la magnitud y la frecuencia de las inundaciones. En la región boreal, se detecta una clara tendencia hacia el aumento de la frecuencia de las inundaciones y la disminución de su magnitud en todas las series del POT. En el centro de Europa, se presentan el mayor porcentaje de estaciones que exhiben tendencias positivas significativas, en particular en relación con la severidad de las inundaciones, relacionada con la frecuencia y magnitud de las precipitaciones. En la región alpina norte, se detecta una tendencia general hacia el aumento de la magnitud de las inundaciones, mientras que en la parte sur de los Alpes se detecta un patrón claro hacia una disminución de los picos de las inundaciones.

El empleo de modelos hidrológicos calibrados con observaciones corrobora en gran medida las conclusiones derivadas de los datos observados. En su estudio, Ghiggi *et al.* (2019)

analizaron los caudales medios mensuales para el periodo 1902-2014 a escala global usando modelos de aprendizaje automático. Sus resultados indican caudales más bajos en invierno en el hemisferio norte, con un aumento de la escurrimiento a finales de la primavera. En las latitudes medias húmedas, la evapotranspiración provoca que la escurrimiento más baja (alta) se produzca predominantemente durante los meses de verano (invierno). En los trópicos, la escurrimiento máxima tiende a ocurrir durante la temporada de lluvias, que sigue a la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (Schneider *et al.*, 2014). En la región mediterránea europea, estos autores aprecian una disminución de la escurrimiento anual, mientras que en el centro y el norte de Europa hay una tendencia hacia el aumento. Como tal, el impacto de estas inundaciones en la sociedad ha variado a lo largo de los años. Paprotny *et al.* (2018), basándose en una reconstrucción de la exposición a las inundaciones en Europa y desde 1870, sugieren que el área inundada anualmente y el número de personas afectadas han aumentado desde entonces, aunque esto contrasta con una disminución sustancial de los casos de muertes y, más recientemente, de las pérdidas financieras anuales. Esto podría indicar el efecto de las políticas de prevención en materia de riesgos de inundaciones a escala europea. A su vez, Brunner *et al.* (2021) aportan un esquema metodológico y teórico para entender los desafíos que los eventos de inundaciones tendrán en la sociedad actual, haciendo hincapié en el efecto de las sequías en este fenómeno, así como en el periodo de transiciones entre estos dos procesos. En este sentido, los resultados de los modelos GLOFAS basado en los datos de reanálisis ERA5 posibilitan la gestión y monitorización a escala global de las inundaciones y sequías, derivando una información importante sobre la variabilidad hidroclimática para la gestión de emergencias (Harrigan *et al.*, 2023).

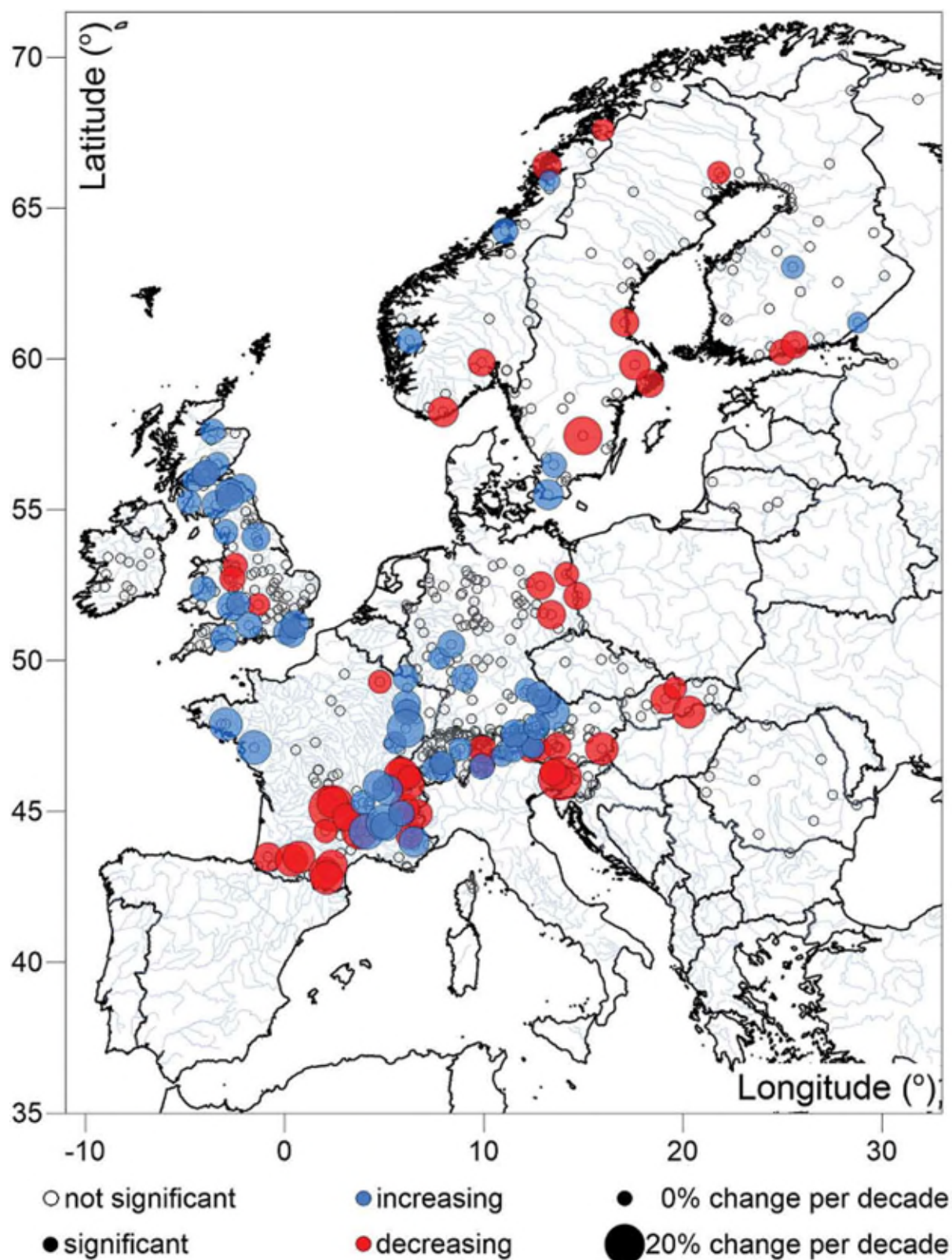


Figura 5: Tendencias de las series de inundaciones máximas anuales en Centroeuropa para el periodo 1965-2005. Los símbolos rellenos indican tendencias positivas (azul) y negativas (rojo) estadísticamente significativas con un nivel de significancia del 10 %. El tamaño del símbolo indica la magnitud del cambio en la magnitud media de la inundación (% por década) (Mangini et al., 2018).

Cambios detectados en los caudales extremos

A escala global:

- La frecuencia y duración de las inundaciones han aumentado en todo el mundo: hasta 4 veces en regiones tropicales desde la década de 2000, y al menos 2,5 veces en latitudes medias del hemisferio norte.
- El caudal máximo (Q-max) aumenta en la mayoría de las regiones, a tasas superiores a las previstas por la relación de Clausius-Clapeyron.

En Europa:

- Los cambios en frecuencia y duración son variables, con tasas que oscilan entre +11 % y -23 % por década según la región.
- En la región atlántica se observa una tendencia general al aumento de la magnitud y frecuencia de las inundaciones.
- En la región boreal aumenta la frecuencia de las inundaciones, pero disminuye su magnitud.
- En el centro de Europa se registran tendencias positivas tanto en frecuencia como en magnitud.
- En el sur de Europa disminuyen las inundaciones extraordinarias en cuencas medianas y grandes, aunque esta tendencia no es tan clara para eventos extremos (período de retorno superior a 100 años) ni en cuencas pequeñas.
- La disminución del Q-max se atribuye al déficit de humedad del suelo y al aumento de la masa forestal. Estas conclusiones están condicionadas por la escasez de registros prolongados, lo que subraya la necesidad de actualizar periódicamente las evaluaciones de peligrosidad.

3.2.2. Evidencias de cambios observados en España

Cambios observados en el régimen de precipitaciones

Los datos observados en España sugieren que el patrón de precipitaciones está fundamentalmente controlado por la variabilidad climática, con un importante efecto de la oscilación del atlántico norte (NAO, por sus siglas en inglés), y modulada por la temperatura del océano Atlántico (AMO – *Atlantic Multidecadal Oscillation*) y la del Mediterráneo (WeMO- *Western Mediterranean Oscillation*) (Meseguer-Ruiz *et al.*, 2021; Beguería *et al.*, 2025). Desde mediados del siglo XX, España ha experimentado una reducción de la cantidad de lluvia anual (y especialmente en verano). Aunque esta

reducción no es muy elevada, se produce con una mayor intensificación en la cuenca mediterránea, en el centro y sur peninsular (Senent-Aparicio *et al.*, 2023). La excepción a esta reducción se encuentra en los territorios atlánticos del norte, y en particular en Galicia y Asturias (Senent-Aparicio *et al.*, 2023, Figura 6). Este estudio demuestra que existe un menor número de días de lluvia, aunque la precipitación máxima diaria aumenta a escala anual y estacional, especialmente en abril y en octubre, con excepción del verano. De acuerdo con Peña-Angulo (2020), esta tendencia podría no ser significativa si se considera una serie de datos más extensa tanto en espacio como en el tiempo. De hecho, los eventos de precipitación de ≥ 200 mm/24 h en el Mediterráneo han aumentado en otoño desde mediados de siglo XX (Meseguer-Ruiz *et al.*,

2021). Estos resultados coinciden parcialmente con Benetó & Khodayar (2023), quienes han detectado tendencias positivas en los eventos de >100 mm/24 h en la región mediterránea (Figura 7), en comparación con los últimos 35 años (Insua-Costa *et al.*, 2021; Meseguer-Ruiz *et al.*, 2021). De igual manera, Del Jesus & Díez-Sierra (2023) describen un aumento en la tendencia de los eventos extremos de precipitación (>percentil 99th) usando datos horarios de precipitación observada y modelos regionales climáticos, lo que sugiere que dicha tendencia se verá reforzada en el futuro. Recientemente, Saynes (2023) ha analizado el comportamiento de la variabilidad no estacionaria de los datos observados de precipitación máxima diaria espacialmente distribuidos en España. Este autor encontró que a nivel local (global) las tendencias fueron significativas ($p = 0,05$) y positivas en un 34,22 % (19,64 %) en los puntos de rejilla analizados, mientras que solo fueron negativas en un 1,34 % (0,48 %) de los casos. Las tendencias encontradas en este estudio coinciden espacialmente con las identificadas por Senent-Aparicio *et al.* (2023). Lo que resulta evidente es que las tendencias observadas están localizadas en el territorio español. Recientemente, Beguería *et al.*, (2025) encontraron que las tendencias temporales a largo plazo mostraban una disminución general de la intensidad y magnitud de los eventos extremos a lo largo del periodo de estudio (1951–2020), aunque se observaron tendencias positivas significativas en algunas zonas del interior, la meseta noroccidental, el valle del río Guadalquivir y el sureste peninsular.

En este sentido, Vicente-Serrano *et al.* (2025), ha aportado mapas nacionales de precipitación extrema diaria en España utilizando más de 2.800 estaciones y técnicas de teoría de valores extremos combinadas con interpolación espacial avanzada. Este producto constituye una base homogénea y científicamente sólida para estimar cuantiles y periodos de retorno a escala nacional, y evaluar cambios espaciales en la peligrosidad asociada a eventos de T100.

Por otro lado, estudios recientes demuestran la utilidad del uso de estaciones personales para caracterizar eventos de precipitación extrema. Rombeek *et al.* (2025), analizó más de 200 estaciones meteorológicas personales para caracterizar la precipitación extrema subdiaria durante el episodio de Valencia del 2024. Gracias a la alta resolución temporal (≈ 5 minutos) y la densidad espacial, el estudio permite reconstruir con detalle la estructura espacial de la tormenta y detectar máximos locales no captados por redes convencionales.

Entre las zonas con tendencia positiva en los eventos extremos de precipitación destacan las regiones situadas a lo largo de la costa mediterránea peninsular (Benito *et al.*, 2015b; Ribas *et al.*, 2020). **Nuestro litoral mediterráneo se caracteriza por presentar una importante orografía y una variabilidad climática con fuerte influencia de las variaciones estacionales de temperatura del mar Mediterráneo.** Debido a la orografía y los contrastes de vegetación y usos del suelo, los modelos climáticos tienden a no representar fidedignamente los eventos de precipitación extremos que, además, tienden a ser de corta duración (subdiaria).

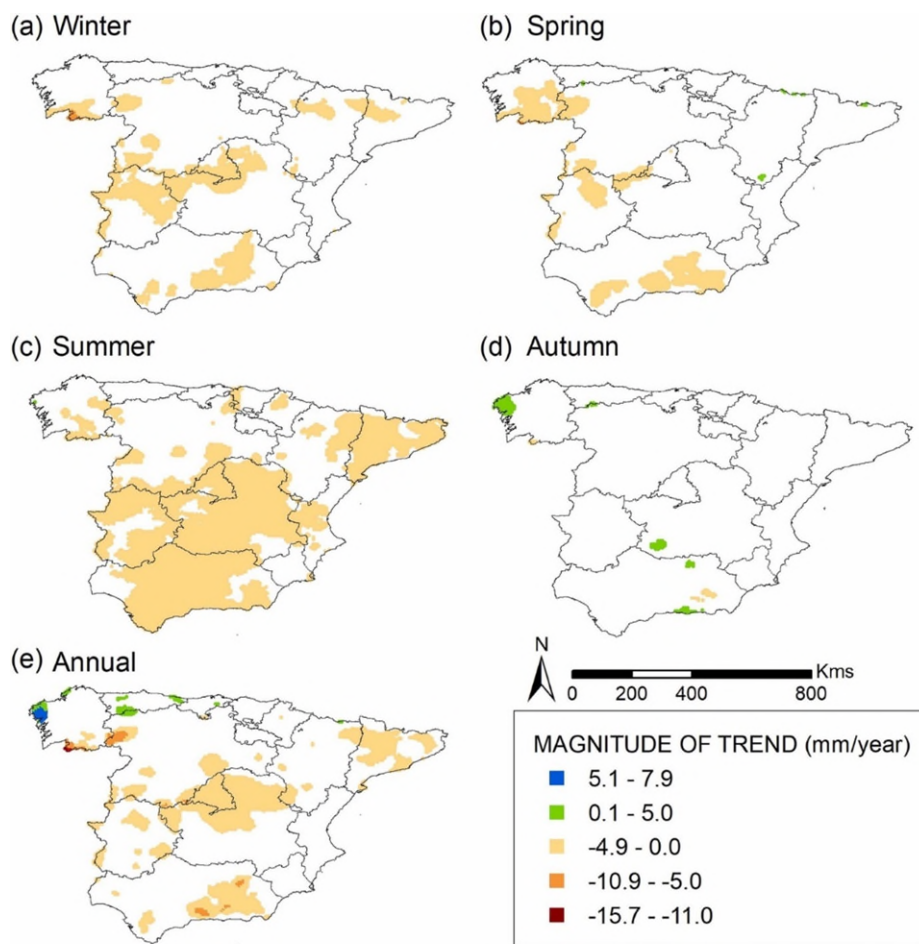


Figura 6: Distribución estacional y anual de las magnitudes de las tendencias de precipitación con un nivel de confianza del 95 % desde el invierno (a) hasta el otoño (d) y anualmente (e). El azul indica una tendencia positiva y el rojo una tendencia negativa (Senent-Aparicio et al. 2023).

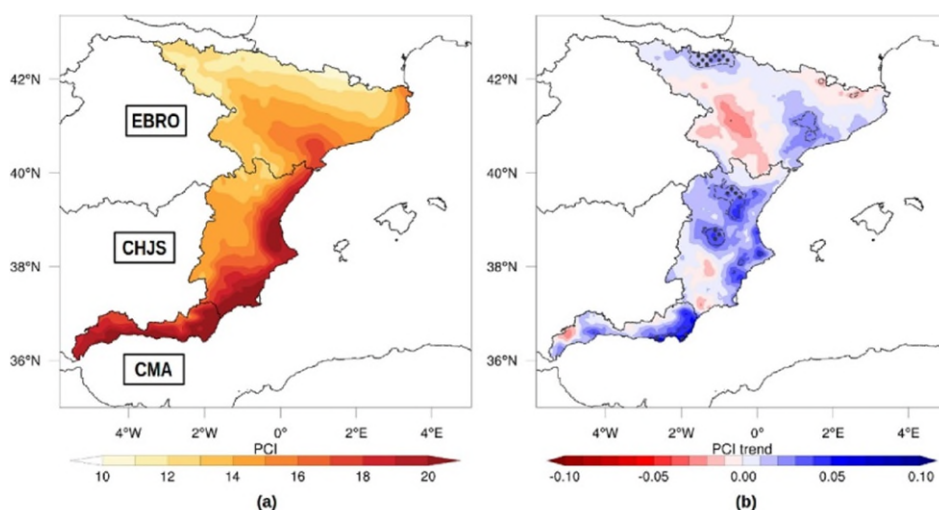


Figura 7: Izquierda: Derecha: tendencia en la costa mediterránea de la península ibérica para el periodo 1951-2020. Tendencias significativas $p < 0,05$ se marcan con puntos grises y las tendencias ligeramente significativas ($p < 0,1$) se indican con líneas grises discontinuas (mas información en: Benetó & Khodayar, 2023).

Cambios observados en el régimen de precipitaciones

- El patrón de precipitaciones extremas en España presenta una alta variabilidad.
- Se observa una reducción de la precipitación anual —especialmente en verano— en algunas regiones, junto con una notable intensificación de los eventos extremos en la cuenca mediterránea, el centro y el sur peninsular.
- El número de días de lluvia disminuye, pero la tendencia de la precipitación máxima diaria y subdiaria es predominantemente positiva.
- La tendencia positiva en los eventos extremos es más acusada en la costa mediterránea peninsular, especialmente en lluvias de alta intensidad (>150 mm/h) y corta duración (<24 h), entre noviembre y diciembre.

En un estudio basado en datos de precipitación a escala subdiaria, Camarasa-Belmonte *et al.* (2020) han demostrado que los eventos más intensos de precipitación de duración < 24 horas (intensidades absolutas máximas de ~ 158 mm/h) están aumentando, especialmente entre noviembre y diciembre, mientras que los eventos de menor intensidad disminuyen. Esta tendencia parece ser más importante en zonas del interior que en las zonas costeras, aunque estas últimas mantienen un nivel elevado de ocurrencia de eventos importantes. Estos resultados coinciden con otras regiones mediterráneas de la costa española (Lopez-Bustins *et al.*, 2020; Drobinski *et al.*, 2018; Ribes *et al.*, 2019; Vergara-Temprado *et al.*, 2021; del Jesus & Díez-Sierra, 2023; Comité CLIVAR-España, 2024) e incluso francesa (Meteo-France, 2019). Sin embargo, en un reciente estudio, Sánchez-Almodóvar *et al.* (2022) no encontraron dichas tendencias positivas y estadísticamente significativas del aumento de la precipitación basadas en 26 observatorios de la provincia de Alicante entre los años 1981 y 2020. No obstante, los eventos de precipitación intensa en la costa mediterránea pueden aumentar su coincidencia con temporales de mar, lo que incrementaría su impacto de las mismas en las zonas urbanas en (Sanuy *et al.*, 2021). En la región atlántica y en Portugal, la situación podría ser distinta. De acuerdo con Santos *et al.* (2019), la tendencia en relación con precipitaciones extremas en el

norte de Portugal es creciente. En el sur de Portugal, sin embargo, las precipitaciones extremas tienden a disminuir. Un estudio reciente (Vaz, 2021) ha detectado entre 1980 y 2008 un incremento en la intensidad de la precipitación extrema asociada a periodos de retorno más cortos, generando un aumento de procesos hidro-geomorfológicos respecto al periodo anterior (1950-1980).

Cambios observados en la cobertura nival

Los datos provenientes de observaciones del manto de nieve en las regiones de montañas de España son concluyentes, a pesar de la alta variabilidad existente, la extensión y los espesores medios han disminuido en los últimos años por el aumento de la temperatura. López-Moreno *et al.* (2020) investigaron la variabilidad temporal en la duración de la cobertura nival y su espesor en el Pirineo durante las últimas seis décadas a distintas altitudes. Estos autores usaron tanto datos observados como resultados de modelos climáticos, detectando una reducción significativa especialmente a 2100 m. No en vano, los autores identificaron diferencias importantes entre los distintos macizos montañosos. En general, las zonas del oeste han experimentado un mayor decrecimiento que las del este. En el Pirineo central, Albalat *et al.* (2022) han llegado a conclusiones similares, especialmente relacionadas con la disminución del número de días de nieve con manto superior a medio metro en las

estaciones de esquí más meridionales. Alonso-González *et al.* (2019) sugieren que la cantidad de precipitación en forma de nieve está altamente relacionada con fases negativas de la NAO, lo que podría explicar las reducciones actuales debido a la persistencia de fases positivas de la NAO durante los últimos años (Figura 8). Para evaluar esta hipótesis, López Moreno *et al.* (2023) han aplicado un modelo empírico basado en la transformación de lluvia-temperatura en nieve en Canfranc, generando la serie diaria de precipitación de nieve más larga del Pirineo. Esta serie confirma la relación estadística entre la variabilidad de la NAO y el espesor de nieve en invierno. En Sierra Nevada, Polo *et al.* (2022) encontraron una alta variabilidad en las medidas de espesor de nieve obtenidas durante cuatro años. Similares resultados han sido observados en el sistema Central (López

Moreno *et al.*, 2023). Esta variabilidad parece ser más grande en la cordillera Cantábrica y, especialmente en los Pirineos (Alonso-González *et al.*, 2020).

Como consecuencia del impacto en la cobertura nival, los caudales de los ríos pirenaicos tienden a disminuir y el deshielo de la nieve se produce antes, por lo que la duración y magnitud del manto nival se reducen gradualmente, lo que afecta a la disponibilidad de agua estacional en la región. Además, estas tendencias han sido vinculadas al aumento de la temperatura media y con cambios en la estacionalidad de las precipitaciones, lo que provoca un adelanto del periodo de deshielo y una prolongación de los periodos de bajos caudales. Todo ello plantea desafíos para la gestión de recursos hídricos en el Pirineo transfronterizo (Beguería, 2023).

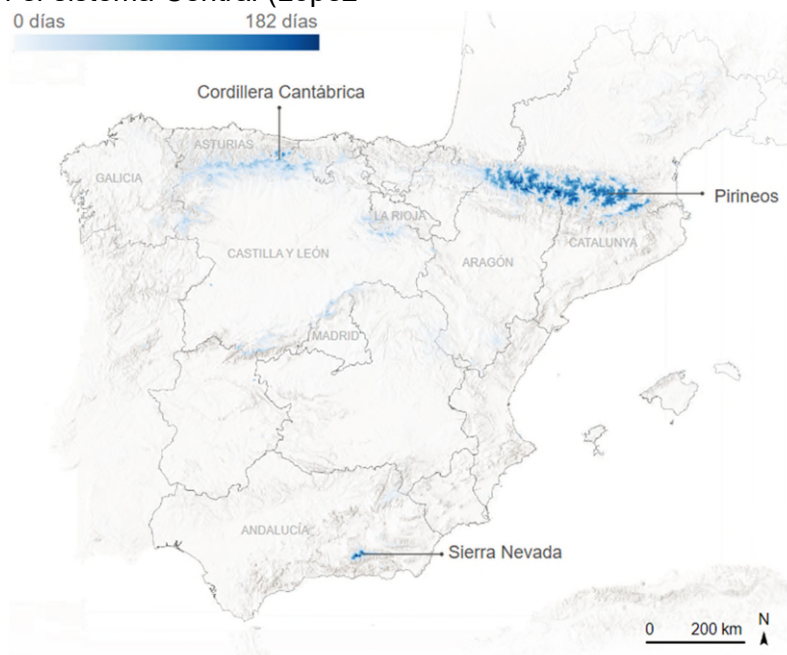


Figura 8: Infografía sobre la duración media de la cobertura de nieve basada en datos de la AEMET (Aragó & González, 2023, La Vanguardia). <https://stories.lavanguardia.com/sociedad/20230326/63759/espana-sin-niev>

Cambios detectados en la cobertura nival

- En España, la extensión y el espesor medio de la capa de nieve han disminuido en los últimos años como consecuencia del aumento de la temperatura. En el Pirineo, el número de días con espesores superiores a 50 cm muestra una tendencia negativa, dentro de una alta variabilidad interanual.

Cambios observados en el uso del suelo

Como es bien sabido, en España, la segunda mitad del siglo XX se ha caracterizado por el abandono rural generalizado y una expansión de los principales centros urbanos. Por lo general, el abandono de las actividades agrícolas y ganaderas, sobre todo en la mitad norte de España y cuenca mediterránea, ha favorecido un aumento de la cubierta forestal. De acuerdo con las observaciones realizadas por Delgado-Serrano y Hurtado-Martos (2018), los cambios más sustanciales desde 1987 se produjeron en (i) la cobertura del territorio dedicada al uso agrícola, con una reducción aproximada de 1.5×10^6 ha; (ii) zonas forestales, con un aumento de superficie de casi 1.0×10^6 ha; y (iii) en las superficies artificiales (asentamientos urbanos, infraestructura), cuyo valor se ha duplicado, llegando a aproximadamente el 2.5 % del territorio nacional. Dentro de estas tendencias, estos autores indican que los cultivos permanentes tales como frutales, viñedos y olivares han aumentado un 44 %, 30 % y 31 % respectivamente, mientras que los cultivos anuales han disminuido la cobertura en más de un 80 %. Otros tipos de cultivos han mostrado tendencias negativas similares, cercanas al 50 %. Por su parte, la superficie terrestre dedicada a pastos y pastizales muestran durante las dos últimas décadas una ganancia relativa de más de 2×10^5 ha. Finalmente, los sistemas agroforestales han mantenido una superficie relativamente estable, con una pequeña ganancia neta de superficie (3 %). Estos análisis son realizados en base a los datos extraídos del proyecto *Corine Land Cover (CLC)* aunque, tal y como demuestran García-Álvarez y Camacho-Olmedo (2023) y Martínez-Fernández *et al.* (2018), estos datos podrían incurrir en importantes discrepancias debido a las diferencias de metodologías aplicadas en cada país a lo largo de los años que constituyen la serie de datos. En España, las clases más afectadas podrían ser las clases relacionadas con la transición bosque-arbusto, patrones de cultivo complejos,

artificiales, pastizales y bosques. Gallardo *et al.* (2023) han analizado los cambios de uso del suelo en dos de las provincias españolas con densidad de población más baja de Europa, y que continúan sufriendo un proceso paulatino de despoblación: Teruel y Soria. En estas regiones, las tendencias varían ligeramente de lo observado en el conjunto del territorio español. Por ejemplo, se ha observado una expansión de los usos del suelo arbustivo y forestal y una disminución de la agricultura, aunque hay regiones de estas provincias en las que la cantidad de tierra utilizada para la agricultura ha aumentado significativamente. En estas regiones, sin embargo, el crecimiento urbano ha sido mínimo. Por su parte, en la región levantina, Delgado-Artés *et al.* (2022) han mostrado que el área dominada por bosques densos (matorrales y bosques) ha aumentado del 17 % al 28 % desde mediados del siglo XX, y que el área dominada por usos del suelo de transición tras el abandono de la agricultura también ha aumentado, del 8 % al 21 %. Aunque los resultados podrían variar en función de las condiciones del lugar (factores climáticos y de suelo específicos), se aprecia un contexto general de evolución progresiva hacia bosques densos en la región mediterránea. En el Pirineo, un análisis de fotointerpretación desde los años 1956 y hasta el 2017 muestra una reducción del área cultivada (-42 %) y de pastos (-63 %), mientras que los bosques duplicaron su superficie. Estos cambios fueron más significativos en las zonas subalpinas y alpinas de los Pirineos (García-Ruiz *et al.*, 2021, cuencas de montaña altas) y más intensos en el periodo comprendido entre 1956 y 1981 que entre 1981 y 2017. Las implicaciones de estos cambios en la estructura y la heterogeneidad del paisaje hacen que este sea más homogéneo ahora que en 1956 (Errea *et al.*, 2023).

En España, el abandono de los campos agrícolas ha tenido enormes consecuencias ambientales, y en particular sobre la hidrología

del suelo, escorrentía, fuentes de sedimento, erosión del suelo, ajustes de cauces fluviales y riesgos de incendios forestales (van Leeuwen *et al.*, 2019). De acuerdo con estos autores, los factores que han favorecido el abandono de campos agrícolas están relacionado con causas ambientales, socioeconómicas, regionales y de una gestión ineficiente (Peña-Angulo *et al.*, 2019). En las cuencas de montañas pirenaicas el abandono de campos agrícolas puede llegar a provocar la erosión del suelo incluso años después de que se produzca el abandono (Lasanta *et al.*, 2017). Además, en el Sistema Central, los cambios debidos al abandono de la tierra y a la proliferación de la masa forestal se han asociado históricamente a una mayor probabilidad de incendios (Montiel-Molina *et al.*, 2019), que pueden favorecer la erosión y la pérdida de suelo. Por otro lado, la recuperación de la cobertura forestal en los últimos años puede mejorar los procesos hidrológicos en las cuencas (ej. infiltración) y, por lo tanto, reducir el impacto sobre las poblaciones humanas de las inundaciones, la erosión del suelo y los deslizamientos de tierra, aunque estas masas forestales requieren una gestión adecuada. Mongil-Manso *et al.* (2022)

han realizado experimentos de infiltración-escorrentía en distintos usos del suelo mostrando que las mayores tasas de infiltración se obtuvieron en zonas de pinares reforestados ($857,67 \text{ mm h}^{-1}$), seguido de bosques de robles ($660,67 \text{ mm h}^{-1}$), pastos ($280,00 \text{ mm h}^{-1}$), y zonas de arbusto y monte bajo ($271,67 \text{ mm h}^{-1}$). Este comportamiento hidrológico diferencial es explicado por el impacto de los cambios de usos del suelo en las propiedades fisicoquímicas del suelo (textura del suelo, pedregosidad, pH, COS, carbono total, relación CorgN, densidad aparente y capacidad de campo), tal y como se ha demostrado en zonas de montaña del mediterráneo (Nadal-Romero *et al.*, 2023). Por otro lado, el aumento de la cobertura forestal puede llevar consigo una mayor interceptación de la precipitación en forma de lluvia y nieve, reduciendo significativamente el equivalente de agua que llega al suelo (Sanmiguel-Valladolid *et al.*, 2020). Por otro lado, algunos estudios indican que los cambios en la vegetación pueden amplificar, especialmente durante los años secos, la reducción del caudal de los ríos pirenaicos en más del 50 %, debido a un mayor consumo de agua de las plantas (Vicente-Serrano *et al.*, 2021).

Cambios observados en el uso del suelo

- El abandono rural en España ha propiciado una reducción de la superficie agrícola y un aumento de las zonas forestales y artificiales.
- Se observa una transición hacia cultivos permanentes (frutales, viñedos y olivares), mientras que los cultivos anuales han disminuido significativamente.
- Los cambios en el uso del suelo han homogeneizado la estructura del paisaje respecto a 1956.
- El abandono agrícola y la colonización por matorral denso y arbolado reducen la escorrentía, aumentan la interceptación y elevan el riesgo de incendios.

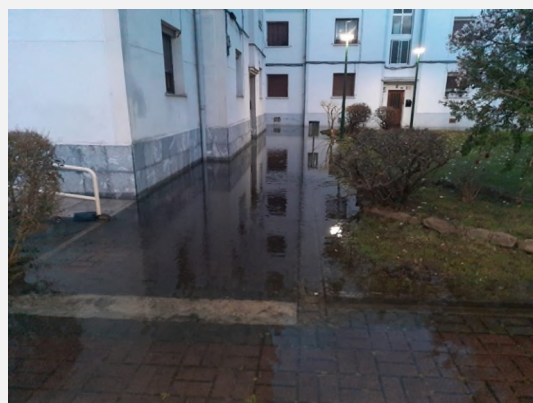
4. El efecto de la subida del mar en las inundaciones

El cambio climático está acelerando el ascenso del nivel del mar y alterando la dinámica hidrológica en España, lo que incrementa la exposición a inundaciones en zonas costeras y tramos bajos de los ríos. En regiones como Andalucía, la combinación del ascenso del mar, la erosión costera y la mayor intensidad de los temporales está aumentando la vulnerabilidad de playas, marismas y áreas urbanas litorales. Otiñar *et al.* (2025) proyectan un aumento de la probabilidad de inundaciones costeras a lo largo del siglo XXI, atribuible tanto al incremento del nivel medio del mar como a la mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos, en línea con las estimaciones del IPCC (2021).

El programa Copernicus (2022, 2023) y la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, 2020, 2023) señalan una tendencia clara a la elevación del nivel del mar y al aumento de la frecuencia de temporales intensos en el Mediterráneo occidental y el Atlántico ibérico. En España, el MITECO (2021, 2023) subraya que la regresión de las playas y la consiguiente pérdida de amortiguación natural frente a tormentas están incrementando el riesgo de inundación en los municipios costeros.

Este proceso no se limita al litoral. La subida del mar modifica el gradiente hidráulico en estuarios y desembocaduras, facilitando la penetración de mareas y oleaje hacia el interior y amplificando los efectos de las crecidas fluviales en tramos finales de ríos y rías. El Plan de Gestión del Riesgo de Inundación del Cantábrico Oriental (MITECO, 2022) señala que esta interacción entre dinámicas marinas y fluviales se agrava en escenarios climáticos recientes, especialmente en zonas urbanas con capacidad de drenaje limitada.

En conjunto, el riesgo de inundación en España es crecientemente complejo y multidimensional. Su gestión requerirá integrar proyecciones climáticas, planificación territorial y soluciones basadas en la naturaleza para adaptarse a un escenario en el que el ascenso del mar y las anomalías fluviales serán más frecuentes e intensas.



Izquierda: Avenida del río Deba el día 27 de febrero de 2024 en Soraluze (Gipuzkoa). Derecha: Inundación mareal del 12 de febrero 2024 en Hondarribia

Cambios observados en los caudales extremos en España

En España, los estudios previos indican que la tendencia general de las series de caudales registrados en estaciones de aforo muestra un patrón decreciente en la frecuencia de las inundaciones (López de la Cruz, 2013; Mediero *et al.*, 2014; Sanz Azcarate *et al.*, 2025). Esta disminución de los caudales máximos afecta a las crecidas extraordinarias ($T < 10$ años) y, en parte, se debe a la construcción de presas, la mayoría construidas en las décadas de los años 50 y 60. Sin embargo, el efecto laminador de los embalses se muestran ineficiente en el caso de las crecidas extraordinarias ($T > 25$ años), como las ocurridas en cuencas mediterráneas en 1982 y 1987, o en cuencas atlánticas en el año 1979. En cuencas con escasa regulación por presas, Mediero *et al.* (2014) analizaron las series de máximos anuales y picos sobre umbral en tres periodos (1942-2009, 1949-2009 y 1959-2009) para detectar la tendencia en la magnitud, la frecuencia y el momento de las inundaciones. Los resultados mostraron una tendencia general decreciente en la magnitud y frecuencia de las inundaciones en los tres periodos, con evidencias más notables en 1959-2009. También se detectó una tendencia creciente en la temporalidad (es decir, hacia inundaciones más tardías) en el noroeste de España. La mayoría de estas tendencias en las series de inundaciones podrían explicarse por un aumento en la evapotranspiración que incrementa el estrés hídrico en los suelos y las pérdidas por infiltración. López de la Cruz (2013) analiza las tendencias y rupturas de las series de caudal máximo en régimen natural (cuencas pequeñas y medianas) en 85 estaciones de aforo, identificando rupturas en el 55 % de las estaciones, de las cuales un 88 % experimentan una disminución de la media, posterior al punto de ruptura. Los puntos de ruptura encontrados se presentan en su mayoría durante el periodo de los años 60 a los 90, siendo más significativos durante la década de 1970.

Sanz Azcárate *et al.* (2025), a partir del análisis de estaciones de aforo en régimen natural o poco influenciado del norte de Navarra, constatan una disminución estadísticamente significativa de los caudales medios, bajos y altos en el periodo 1950-2020, especialmente acusada en los meses de verano y principios de otoño (julio-octubre), con descensos de entre el 5 y el 11% por década. En el periodo más reciente (1990-2020), la señal es menos homogénea, manteniéndose el descenso otoñal pero observándose una tendencia al aumento de caudales en los meses de invierno (febrero-marzo), lo que apunta a una redistribución estacional de los recursos hídricos asociada al cambio climático y al cambio global.

En un contexto análogo al mediterráneo español (sur-este de Francia), Tramblay *et al.* (2019) analizan los cambios de caudales entre 1958 y 2018, concluyendo que en la mayor parte de las cuencas las inundaciones más extremas muestran una tendencia a disminuir su frecuencia, aunque en un número reducido de ríos muestran una tendencia significativa a aumentar. En líneas generales, estos autores encontraron tendencias más negativas en las cuencas de mayor tamaño. A su vez, encontraron aumentos de hasta el 20 % y el 36 % en zonas urbanas, o semiurbanas, subrayando un fuerte impacto en la generación de escorrentía debido al aumento de superficies impermeables. Estos resultados son corroborados con modelos basados en observaciones. Por ejemplo, Jodar-Abellan *et al.* (2019) usó el modelo hidrológico SWAT a escala subdiaria y escenarios de usos de suelo (basados en la interpretación de los años 1990, 2000, 2006 y 2012) en el sureste de España para identificar una respuesta hidrológica caracterizada por un caudal más pronunciado y tiempos de concentración más cortos.

Estas tendencias son coherentes con los resultados para España del trabajo europeo realizado por Blöschl *et al.* (2019) para caudales extremos, quienes muestran una

tendencia decreciente para la región mediterránea en cuencas medianas y grandes, debido principalmente a una disminución de las precipitaciones y al aumento de la evaporación. En particular, en el territorio español, este trabajo encontró tasas de variación en el caudal medio anual (por década) entre el -5 y el -12 %. En la región mediterránea, Llasat *et al.* (2021) han realizado una revisión bibliográfica del efecto del cambio climático en las inundaciones, sugiriendo tendencias positivas en las inundaciones extraordinarias, pero no en las catastróficas. Esta observación ha sido corroborada por registros históricos que abarcan los últimos siglos (Barriendos *et al.*, 2019). Según estos autores, la fuerte influencia del impacto de las infraestructuras de defensa y el crecimiento urbano, podrían también contribuir a explicar las recientes tendencias de las inundaciones en la región Mediterránea occidental.

Ballesteros-Cánovas *et al.* (2019) analizan las series de datos de caudales máximos de ríos atlánticos de EE. UU. y Europa para determinar periodos de inundaciones frecuentes y relacionarlos con condiciones climáticas. Estos autores encuentran que los periodos de inundaciones se explican por el aumento de la temperatura del océano Atlántico, del que proviene gran parte de la humedad precipitable que llega a la península en forma de ríos atmosféricos (ver recuadro de explicación de los ríos atmosféricos) favorecidos por bloqueos de sistemas de presiones en el Atlántico, y por eventos de calentamiento súbito estratosférico. Estas condiciones explican la variabilidad de eventos hidrológicos extremos en la región de estudio, identificando el invierno de 1935/36 como uno de los más extremos. Una situación análoga ocurrió en el invierno de 2018, donde el efecto de un calentamiento súbito de la estratosfera favoreció inundaciones casi simultáneas en la misma región de estudio.

En las regiones de montaña de España, el registro de caudales y eventos extremos suele

estar sesgado e incompleto, por lo que es necesario aplicar métodos no sistemáticos para obtener una serie temporal homogénea (p. ej., Benito *et al.*, 2023). Se han realizado algunos esfuerzos recientemente para recopilar datos históricos a escala del Pirineo (Llasat *et al.*, 2024). Estos autores presentan una base de datos de 181 inundaciones que han causado un total de 151 víctimas mortales entre 1980 y 2015, con un coste de compensación por pérdidas económicas de hasta 142,5 millones de euros en la zona pirenaica española. Este estudio muestra una ligera tendencia positiva de 0,84 eventos por década en la ocurrencia de inundaciones ordinarias y extraordinarias, aunque no es significativa al 95 %. A nivel regional, el comportamiento de las inundaciones es más heterogéneo (generalmente no significativo), siendo las regiones del Pirineo más occidental las que muestran una tendencia positiva y significativa de 0,34 eventos/década. Otras bases de datos similares para la región del NE de España contabilizan más de 1200 muertos entre 1900 y 2020.

Además de estos estudios, los eventos catastróficos ocurridos en el Levante y sur de España en los últimos años han sido analizados desde una perspectiva de atribución climática. Calvo-Sancho *et al.* (2026), analizó en detalle la inundación catastrófica de octubre de 2024 en Valencia a través de experimentos tipo *storyline* y simulaciones comparativas entre un mundo actual y un escenario contrafactual sin calentamiento antropogénico. Estos autores concluyen que el aumento de temperatura ha intensificado la capacidad de la atmósfera para retener vapor de agua y ha amplificado la magnitud de las precipitaciones extremas del episodio. El trabajo demuestra que el cambio climático no solo incrementa la probabilidad de eventos intensos, sino que modifica la dinámica de las tormentas convectivas. Este estudio es importante ya que aporta evidencia científica robusta para justificar la incorporación explícita de factores de

intensificación climática en la evaluación cualitativa del régimen de extremos, especialmente en cuencas mediterráneas sensibles a DANAs, donde el papel de las temperaturas superficiales del mar y los forzamientos orográficos son importantes (Llasat *et al.*, 2025).

Las conclusiones del estudio anterior son coherentes con el trabajo presentado por Barriopedro *et al.*, (2025), quienes aplicaron un enfoque multimétodo de atribución al mismo

episodio extremo del 29 de octubre de 2024 que afectó a diferentes zonas de España. Al combinar distintos marcos metodológicos y conjuntos de datos observacionales, los autores encuentran una señal consistente de incremento de la intensidad y la probabilidad del evento con forzamiento antropogénico. El valor añadido de este estudio reside en su enfoque comparativo entre métodos, lo que permite acotar los rangos de incertidumbre que podrían incorporarse al análisis probabilístico del cambio de extremos en la región.

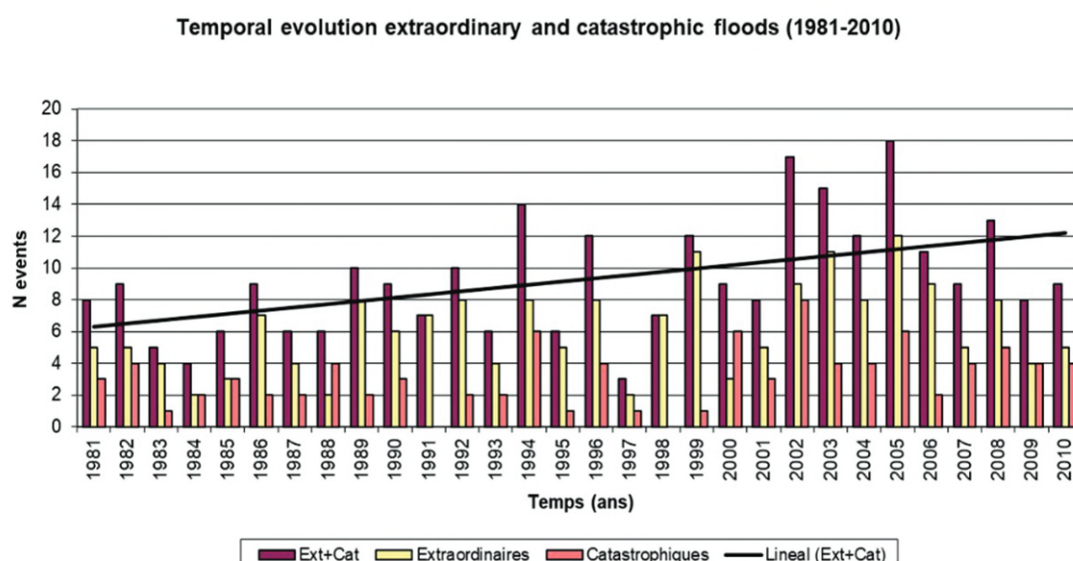


Figura 9: Evolución temporal de las inundaciones totales registradas en Cataluña y Baleares (España), sur de Francia y Calabria (Italia). Se distingue la categoría en función de los daños producidos (los catastróficos tienen peores impactos que los extraordinarios) (Llasat *et al.*, 2021).

Cambios observados en los caudales extremos

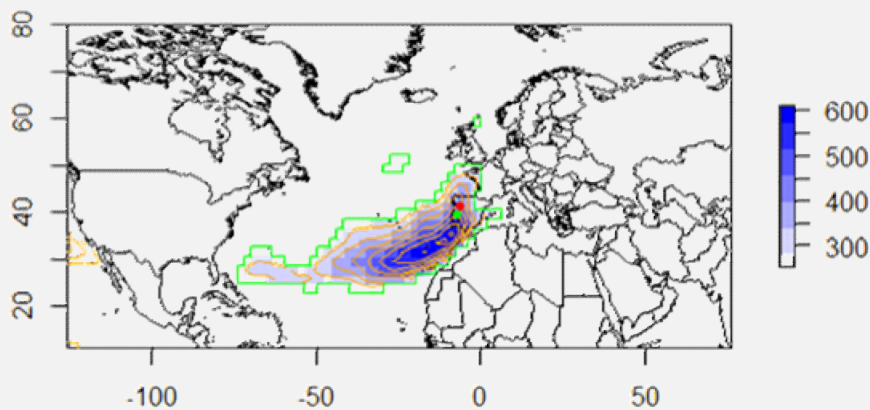
- La mayoría de los estudios registran una disminución en la magnitud y frecuencia de las inundaciones desde mediados del siglo XX, asociada a la regulación por presas y al aumento de la evapotranspiración, con reducciones del caudal medio anual de entre el 5 % y el 12 % por década.
- En cuencas medianas y grandes mediterráneas predominan tendencias negativas, mientras que en áreas urbanas y semiurbanas la escorrentía aumenta entre un 20 % y un 36 %, con picos más pronunciados y tiempos de concentración más cortos, como consecuencia de la impermeabilización del suelo.
- La variabilidad de las inundaciones está vinculada a forzamientos climáticos como el calentamiento del Atlántico, los ríos atmosféricos y los calentamientos súbitos estratosféricos. En regiones montañosas, como el Pirineo, las tendencias son heterogéneas y en general poco significativas.

5. Ríos atmosféricos

Los ríos atmosféricos (AR, del inglés Atmospheric Rivers) son corredores largos y estrechos de transporte intenso de vapor de agua que redistribuyen humedad desde regiones tropicales y subtropicales hacia latitudes medias (Gimeno *et al.*, 2014). Al interactuar con la orografía o con forzamientos dinámicos en superficie, favorecen el ascenso del aire húmedo y la ocurrencia de precipitaciones intensas. Los AR más extremos se han asociado a episodios importantes de inundación en el oeste de Norteamérica (Ralph *et al.*, 2006; Corringham *et al.*, 2019; Sharma & Déry, 2020) y en Europa (Ballesteros-Cánovas *et al.*, 2019; Benito *et al.*, 2021a).

Las proyecciones climáticas sugieren un aumento del transporte integrado de vapor de agua y de la intensidad de los AR más extremos en un clima más cálido, aunque los cambios en su frecuencia, localización y contribución a la precipitación regional presentan elevada incertidumbre (Werner *et al.*, 2015; Gershunov *et al.*, 2019; Espinoza *et al.*, 2018; Curry *et al.*, 2019). El posible desplazamiento hacia los polos de las trayectorias de tormenta podría modificar la distribución de eventos de precipitación ligera, moderada y extrema en algunas regiones (Gershunov *et al.*, 2019), alterando los patrones de inundación en áreas montañosas expuestas a la interacción entre transporte intenso de humedad y forzamientos orográficos.

Flood February 19, 1936



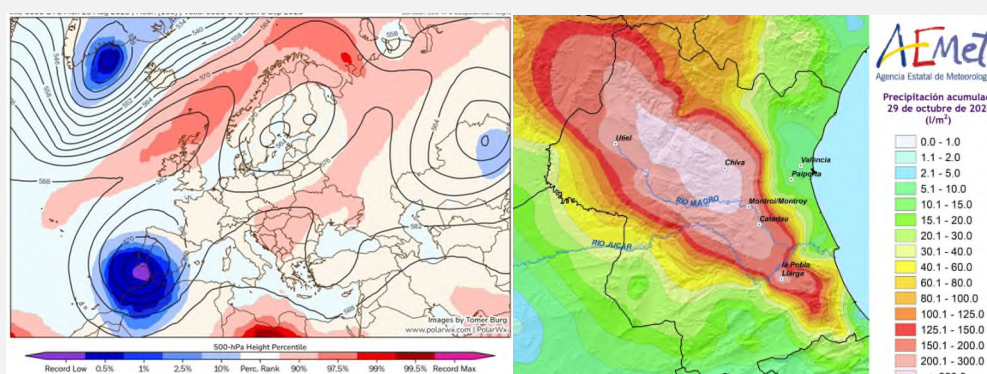
*Transporte integrado de vapor ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) de un AR relacionado con inundaciones en la Península Ibérica en 1936 (Ballesteros-Cánovas *et al.*, 2019).*

6. Depresiones aisladas en niveles altos (DANA) e inundaciones

Las inundaciones generadas por depresiones aisladas en niveles altos (DANA) constituyen eventos recurrentes en el litoral mediterráneo y sureste peninsular. Estos episodios suelen involucrar convección profunda organizada en estructuras como líneas convectivas, trenes de tormentas o, en ocasiones, sistemas convectivos mesoescalares, cuya persistencia o carácter cuasi-estacionario puede dar lugar a acumulados diarios superiores a varios cientos de milímetros. En este contexto se inscribe el episodio del 29 de octubre de 2024, originado por una DANA profunda y persistente sobre el Mediterráneo occidental, que creó un ambiente altamente favorable a la convección organizada debido a la circulación difluente en altura y a un aporte continuo de humedad con valores excepcionales de agua precipitable (CEAM 2024; Barriopedro *et al.* 2025).

En este evento, AEMET (2024) documentó intensidades superiores a 180 mm h^{-1} y acumulados diarios cercanos a $771,8 \text{ mm}$, valores considerados “fuera de rango” y coherentes con mecanismos de retroalimentación orográfica característicos de episodios mediterráneos extremos. La respuesta hidrológica fue inmediata, con crecidas súbitas en el río Magre y la Rambla del Poyo, donde las lluvias de muy alta intensidad generaron escorrentías torrenciales y destruyeron instrumentación, un comportamiento típico de las inundaciones relámpago mediterráneas. La combinación de torrencialidad, fuertes pendientes y urbanización en los tramos bajos agravó los daños en Requena, Utiel, Chiva, Cheste, Paiporta y Torrent, con pérdidas humanas y afección a infraestructuras y patrimonio cultural.

Aunque el sistema convectivo se desplazó posteriormente hacia Castelló y el Bajo Aragón con menor impacto, este episodio constituye el evento convectivo extremo más significativo del siglo XXI en la Comunidad Valenciana. Se integra, además, en una serie histórica de grandes avenidas —1776, 1864, 1897, 1949 y 1957— que confirma la elevada vulnerabilidad del Mediterráneo occidental a sistemas convectivos estacionarios, subrayando la necesidad de reforzar la adaptación climática y revisar la ordenación territorial en zonas de alta peligrosidad.



Ejemplo de embolsamiento de aire frío en niveles altos (500 mb) y datos de precipitación acumulada en el entorno del río Magro durante el evento del 29 de octubre de 2024.

3.3. Proyecciones según los modelos de cambio climático

3.3.1. Proyecciones a escala global y de Europa

Proyecciones sobre el régimen de precipitaciones

La última generación de modelos climáticos (Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados, Fase 6; CMIP6) proyecta cambios significativos en las condiciones climáticas regionales bajo escenarios de calentamiento entre 1,5°C y 2°C. Además de las alteraciones en la temperatura media, los modelos anticipan modificaciones en la intensidad de las precipitaciones en diversas regiones, así como un mayor riesgo de sequía y déficit hídrico en otras. Gründemann (2022), a partir de los resultados combinados de 25 modelos del CMIP6 para distintos escenarios de emisiones, muestra un incremento en la probabilidad de eventos extremos, especialmente en regiones con alta disponibilidad de humedad (Donat *et al.*, 2019; Tabari *et al.*, 2020). Este último estudio señala, en particular, que los extremos de precipitación aumentarán en mayor proporción que los eventos ordinarios, y que este fenómeno tendrá alcance global. Dicho incremento se producirá incluso en zonas donde los valores medios de precipitación podrían reducirse, lo que plantea retos para la gestión de los recursos hídricos (Zittis *et al.*, 2021). Estos resultados son coherentes con los obtenidos en regiones tropicales, donde los modelos atribuyen al cambio climático el aumento de las lluvias extremas asociadas a huracanes y ciclones (Patricola & Wehner, 2018).

Hosseinzadehtalaei (2020) concluye que la frecuencia de eventos de precipitación extrema sub-diarios con periodos de retorno de 50 y 100 años se triplicará en el escenario RCP8.5 (Figura 10). Por su parte, Du (2022) emplea un conjunto de 45 modelos CMIP6 para proyectar escenarios futuros, y sus resultados muestran una tendencia creciente significativa en la precipitación terrestre global anual durante 2021-2100 en los cuatro escenarios analizados. Estas tendencias alcanzan 3,0 y 6,77 mm/década en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 (CMIP5), y 4,23 y 8,96 mm/década en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 (CMIP6), respectivamente. El incremento será más acusado en las dos últimas décadas del siglo XXI, con cambios de hasta el 4,9 % (RCP4.5), 8,1 % (RCP8.5), 4,6 % (SSP2-4.5) y 10,1 % (SSP5-8.5) respecto al periodo 1986-2005.

La región mediterránea presenta, en cambio, una mayor incertidumbre. Cos (2022) señala que las precipitaciones en esta región se reducirán entre un 7 % y un 33 % durante los meses de verano a finales de siglo, según el escenario considerado. En invierno, los cambios son menos pronunciados: los escenarios más desfavorables apuntan a reducciones de hasta un 8 %, mientras que el más favorable proyecta un ligero aumento del 2 %. Con todo, estas proyecciones deben interpretarse con cautela, dado que los modelos climáticos reproducen con dificultad la variabilidad interanual e interdecadal de los patrones de precipitación a escala global (Vicente-Serrano *et al.*, 2022).

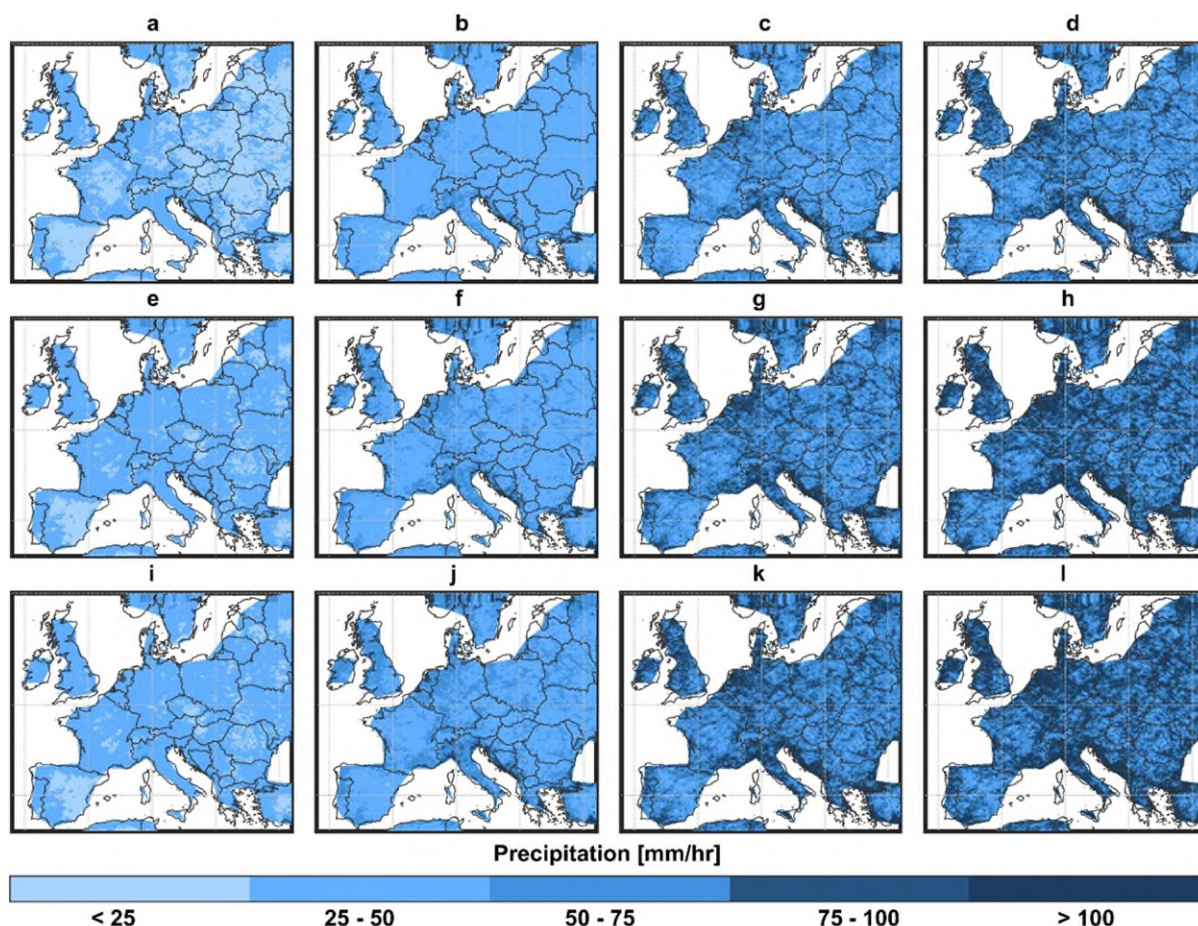


Figura 3: Distribución espacial de eventos de precipitación extrema (a-d) históricos (1998-2017) y (e-l) futuros (2071-2100) de 30 minutos de duración para los periodos de retorno de (a, e, i) 2 años, (b, f, j) 10 años, (c, g, k) 50 años y (d, h, l) 100 años (e, f, g, h) bajo RCP4.5 y (i, j, k, l) RCP8.5 según el conjunto de datos CMORPH (Hosseinizadehtalei et al., 2020).

Proyecciones sobre la cobertura nival

Las simulaciones de modelos climáticos regionales proyectan una disminución sustancial de la duración de la capa de nieve para Europa en las próximas décadas. Kotlarski *et al.* (2023) analizaron los cambios esperados en los Alpes europeos a partir de los modelos regionales EURO-CORDEX, bajo tres escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5). Sus resultados, aunque con elevadas incertidumbres, muestran patrones consistentes: las zonas de montaña media-alta experimentarán una amplificación de los efectos del calentamiento, y la capa de nieve quedará sujeta a una disminución generalizada, salvo en elevaciones muy altas. En el escenario RCP2.6 se registran grandes pérdidas de agua equivalente de nieve (SWE)

en las regiones próximas a los Alpes; en el RCP4.5, las reducciones superan el 50 % en amplias zonas al norte y al sur de la cordillera; y en el RCP8.5 alcanzan aproximadamente el 80 % en esta misma región (Figura 11).

Estos resultados son coherentes con los de Frei *et al.* (2018), quienes, en un análisis centrado específicamente en los Alpes europeos, proyectaron una fuerte disminución de las cantidades de nieve invernal en la mayor parte de la cordillera, con reducciones medias a finales de siglo de aproximadamente el 25 % y el 45 % para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente. Según estos autores, dichas reducciones se deben principalmente al calentamiento proyectado y están asociadas a una disminución tanto de la frecuencia como de la fracción de nevadas.

Mudryk *et al.* (2020) extendieron este análisis al hemisferio norte, comparando resultados de los modelos CMIP5 y CMIP6 (Figura 12). A partir de seis modelos, examinaron las tendencias históricas y futuras de la masa de nieve, e identificaron tendencias negativas en la extensión de la nieve entre 1981 y 2018, especialmente en noviembre, diciembre, marzo y mayo, con valores de aproximadamente -5 Gt yr^{-1} para todos los meses del periodo diciembre-mayo. El estudio también señala que los modelos CMIP6 reproducen mejor la climatología de la extensión de la nieve durante 1981-2014 que los modelos CMIP5. En cuanto a las proyecciones, los distintos escenarios

comienzan a divergir en torno a 2040: bajo el SSP1-2.6, la extensión media de la capa de nieve se reducirá un 18 % (± 7 %) en primavera y un 20 % (± 7 %) en otoño hacia 2060, respecto al promedio de 1995-2014. En el escenario más desfavorable, SSP5-8.5, las pérdidas serán continuas y alcanzarán el 55 % (± 10 %) en primavera y el 60 % (± 10 %) en otoño a finales del siglo XXI. Aunque los valores concretos varían según la localización geográfica, las tendencias globales son similares en Norteamérica (Wieder *et al.*, 2022), en las montañas de Asia central (Lalande *et al.*, 2022) y en el Ártico (McCrystall *et al.*, 2021), entre otras regiones..

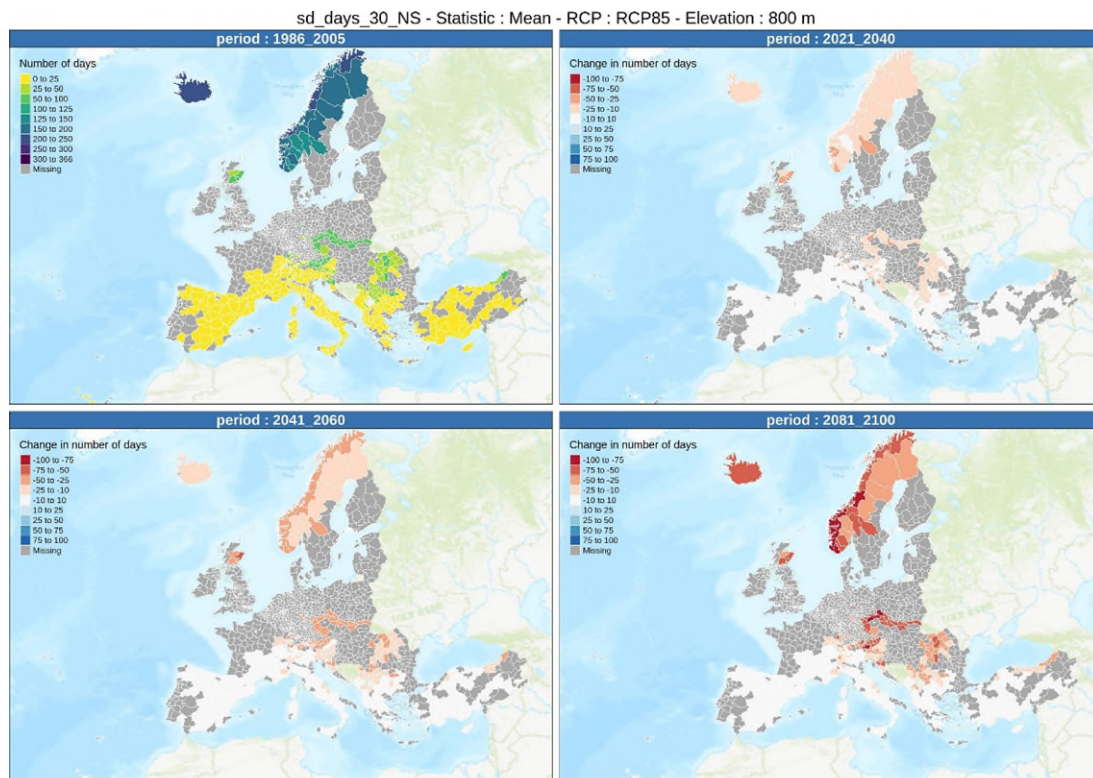


Figura 4: Cambios en el número de días de nieve a una altura de 800 m para distintos periodos temporales y bajo el escenario RCP8.5 (Morin *et al.*, 2021).

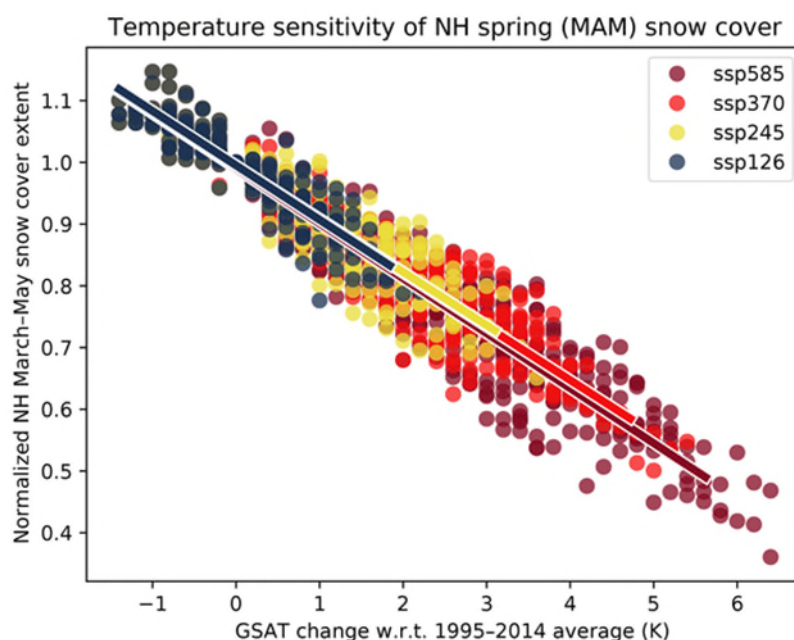


Figura 5: Extensión de la capa de nieve del NH en primavera (marzo a mayo, hemisferio Norte-HN) frente a GSAT (en relación con el promedio de 1995-2014) para los escenarios CMIP6 Nivel 1 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5), con regresiones lineales. Según Mudryk et al. (2020).

Proyecciones sobre la cobertura nival en Europa

- Los modelos climáticos regionales proyectan una reducción sustancial de la duración de la capa de nieve en Europa en las próximas décadas.
- Bajo el escenario SSP1-2.6, la extensión de la capa de nieve se reducirá un 18 % (± 7 %) en primavera y un 20 % (± 7 %) en otoño hacia 2060, respecto al promedio de 1995-2014.
- Bajo el escenario SSP5-8.5, las pérdidas alcanzarán el 55 % (± 10 %) en primavera y el 60 % (± 10 %) en otoño a finales del siglo XXI.
- En los Alpes europeos, la cobertura nival disminuirá entre un 25 % y un 45 % a finales de siglo (RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente), debido principalmente a la reducción de la frecuencia y la fracción de nevadas asociada al calentamiento proyectado.

Proyecciones sobre los cambios en el uso del suelo

Según la Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Biodiversidad (IPBES), alrededor del 75 % de la cobertura terrestre ha sido significativamente alterado por la acción humana (Opgenoorth & Faith, 2013), tendencia que las observaciones globales confirman. Para anticipar trayectorias futuras, es necesario emplear modelos que vinculen los cambios de uso del suelo con sus efectos en los servicios ecosistémicos

mediante escenarios territoriales plausibles, lo que permite fortalecer la capacidad adaptativa y orientar políticas de sostenibilidad (Gomes *et al.*, 2021) con implicaciones directas en la respuesta hídrica de las cuencas vertientes.

Hurt *et al.* (2020) emplearon las proyecciones del AR6 y los modelos avanzados del sistema terrestre (ESM) para estimar los efectos combinados de las actividades humanas (Figura 13). De los ocho escenarios SSP-RCP analizados (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP4-3.4, SSP4-6.0, SSP5-3.4-OS

y SSP5-8.5), todos proyectan aumentos en la superficie global de tierras de cultivo, mientras que seis anticipan reducciones en las tierras de pastoreo. A escala regional, los patrones son similares en la mayoría de los escenarios a finales de siglo: aumento de la superficie cultivada en América del Sur y pérdida continuada de tierras primarias a escala global, con especial incidencia en África. Estos cambios tendrán consecuencias relevantes para los procesos hidrológicos y la provisión de servicios ecosistémicos.

Gomes *et al.* (2021) ofrecen una revisión bibliográfica exhaustiva sobre las proyecciones de cambio de uso del suelo y sus impactos en los servicios ecosistémicos. La mayoría de los estudios revisados trabajan a una escala temporal de 30-50 años empleando

el modelo InVEST, validado mediante el coeficiente Kappa (Huang *et al.*, 2019) o a través de consultas con partes interesadas (p. ej., Martínez-Sastre *et al.*, 2017). En términos generales, varios autores señalan impactos negativos de los cambios futuros de uso del suelo sobre la capacidad de regulación de los ciclos biogeoquímicos, lo que podría acentuar el deterioro ecosistémico (Landuyt *et al.*, 2016; Krkoška Lorencová *et al.*, 2016). Este riesgo es especialmente pronunciado en regiones con altas tasas previstas de crecimiento poblacional y urbanización (Liu *et al.*, 2018; Lyu *et al.*, 2019), donde la disminución de la capacidad de retención del suelo puede intensificar los procesos hidrológicos.

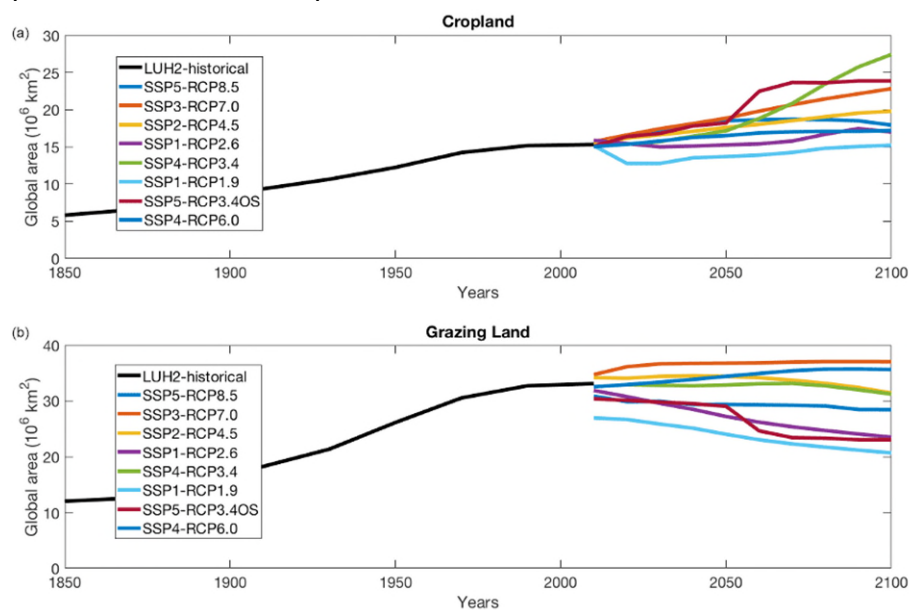


Figura 6: Cambios proyectados en (a) tierras de cultivo globales, (b) tierras de pastoreo globales (Hurt et al., 2020)

Proyecciones sobre los cambios de uso del suelo a escala global

- Las proyecciones indican un incremento de las tierras de cultivo a escala global, con mayor incidencia en el hemisferio sur, y una reducción de las tierras de pastoreo.
- Los impactos negativos se concentran en regiones con altas tasas de crecimiento

Proyecciones sobre los caudales extremos en Europa

La predicción de caudales en un escenario de cambio climático es un proceso científico y técnico complejo que requiere la implementación encadenada de modelos climáticos, hidrológicos e hidráulicos. Aunque la capacidad computacional ha mejorado significativamente en los últimos años, especialmente en la predicción estacional, persisten importantes fuentes de incertidumbre, en particular en la proyección de eventos extremos. Kundzewicz *et al.* (2017) describen críticamente las principales fuentes de incertidumbre asociadas a la proyección de la peligrosidad de inundaciones en Europa y su implicación en la gestión del riesgo. Estos autores las identifican en cuatro ámbitos: (i) las incertidumbres inherentes a la simplificación del sistema Tierra en modelos físico-climático-hidrológicos, de carácter epistemológico y aleatorio; (ii) las asociadas a los procesos de regionalización (downscaling) necesarios para proyectar modelos globales a escala regional; (iii) la dificultad de representar y calibrar los modelos con datos de eventos extremos de los distintos tipos de inundación; y (iv) la dificultad de cuantificar la variabilidad hidroclimática de extremos.

A pesar de estas limitaciones, la aplicación de modelos climáticos acoplados a modelos hidrológicos ha permitido identificar tendencias en las proyecciones futuras de inundaciones, tratando de reducir —o al menos cuantificar— las incertidumbres aleatorias mediante el empleo de conjuntos de modelos. A escala global, Dottori *et al.* (2018) cuantificaron las pérdidas humanas, los daños económicos directos y las pérdidas de bienestar para escenarios de calentamiento de +1,5 °C, +2 °C y +3 °C en ausencia de adaptación futura. Sus resultados sugieren que con un calentamiento de +1,5 °C las pérdidas humanas por inundaciones aumentarían entre un 70 % y un 83 %, y los daños directos entre un 160 % y un 240 %; con +2 °C, el número de muertes aumenta un 50 % y el daño económico directo

se duplica; y con +3 °C los impactos se intensifican, aunque la variabilidad entre modelos —y con ella la incertidumbre— crece considerablemente.

Zaherpour *et al.* (2018) emplearon un conjunto de seis modelos del Proyecto de Intercomparación de Modelos de Impacto Intersectorial, segunda fase (ISIMIP2a), pero encontraron dificultades para capturar el régimen hidrológico a escala global, con resultados que sugieren que la media del conjunto podría ser menos precisa que los modelos evaluados individualmente. En cambio, en EE. UU., donde la densa red de estaciones de aforo permite análisis más robustos, Lehner *et al.* (2019) encontraron, mediante análisis de sensibilidad de caudales con CMIP5, que la incertidumbre en las proyecciones podría reducirse hasta un 50 %, si bien advierten de las incertidumbres inherentes al proceso y llaman a la cautela en el uso de esta aproximación.

En Europa, Alfieri *et al.* (2018) realizó una comparación de estimación de los riesgos de inundación bajo la premisa de escenarios de calentamiento global de +1,5, +2 y +3 °C, respecto a los niveles preindustriales. En este estudio, se incluyen las proyecciones de las inundaciones en términos de nivel de daños esperados sobre la población potencial afectada. Los resultados indican que la comparación de modelos mejora la predicción y la identificación de las regiones con mayores cambios en el riesgo de inundación. Los resultados muestran que el calentamiento global está relacionado con un aumento sustancial del riesgo de inundación en la mayoría de los países de Europa central y occidental en todos los niveles de calentamiento. En Europa del este, el cambio promedio en el riesgo de inundaciones es menor y la coherencia de la aproximación multimodelo es más deficiente. En línea con estos resultados, Thober *et al.* (2018) han aplicado diversos modelos climáticos e hidrológicos para investigar el impacto del cambio climático en las inundaciones

europeas en un escenario de calentamiento global de +1,5, +2 y +3 °C. Este trabajo supone un esfuerzo computacional enorme (más de 45 modelos) a una escala de 5 km para toda Europa. Estos resultados indican, sin embargo, una reducción de los eventos de inundación en la región mediterránea, con cambios de hasta -11 % a 1,5 °C y de hasta -30 % a 3 °C. En las cuencas fluviales de Europa central y las Islas Británicas se observaron cambios menores (inferiores al 10 %), mientras que en Escandinavia los caudales aumentaron como consecuencia del incremento de las precipitaciones y de los procesos de deshielo. No obstante, los autores reconocen que el estudio no contempla las incertidumbres derivadas de la variabilidad climática interna, de las técnicas de reducción de escala (downscaling) ni de la parametrización del modelo hidrológico. Lo que sí resulta evidente es que el riesgo de inundación en zonas costeras se incrementará en escenarios de cambio climático.

Vousdoukas *et al.* (2018) presentan modelos de proyecciones probabilísticas, usando los niveles medios del mar, mareas y marejadas ciclónicas. Se espera que los niveles extremos del mar puedan aumentar entre 34 y 76 cm a finales del siglo, en un escenario de política de mitigación de emisiones moderado, mientras que el aumento pueda pasar de 58 a 172 cm en un escenario de condiciones como las actuales. Esto implica que gran parte de las costas de todo el mundo estén expuestas a un

mayor riesgo de inundaciones y sea necesario su adaptación a esta situación.

Por su parte, Di Sante *et al.* (2021) emplearon un amplio conjunto de simulaciones hidroclimáticas —44 de EURO-CORDEX, 13 de CMIP5 y 7 de CMIP6— para estudiar las inundaciones en Europa en el contexto del cambio climático, analizando específicamente el impacto sobre inundaciones con un periodo de retorno de 100 años (Q100). Sus resultados apuntan a una disminución en la magnitud de las inundaciones Q100 en el Mediterráneo, Escandinavia y el noreste de Europa, mientras que se observa la tendencia opuesta en Gran Bretaña, Irlanda, el norte de Italia y Europa occidental, donde se aprecia una señal robusta de aumento de la magnitud de las inundaciones, impulsada por el incremento de los episodios de precipitación extrema.

Finalmente, Do *et al.* (2020) analizaron los cambios históricos y futuros en las inundaciones globales mediante seis modelos hidrológicos globales. Este análisis pone de manifiesto un amplio rango de incertidumbres, con diferencias estadísticamente significativas entre las tendencias simuladas por modelos hidrológicos globales (GHM) forzados con datos climáticos observacionales y aquellos forzados con la salida de modelos climáticos con corrección de sesgo durante el periodo histórico (Figura 14). Los autores concluyen que las proyecciones futuras siguen siendo muy inciertas, lo que puede dificultar la toma de decisiones en materia de gestión del riesgo.

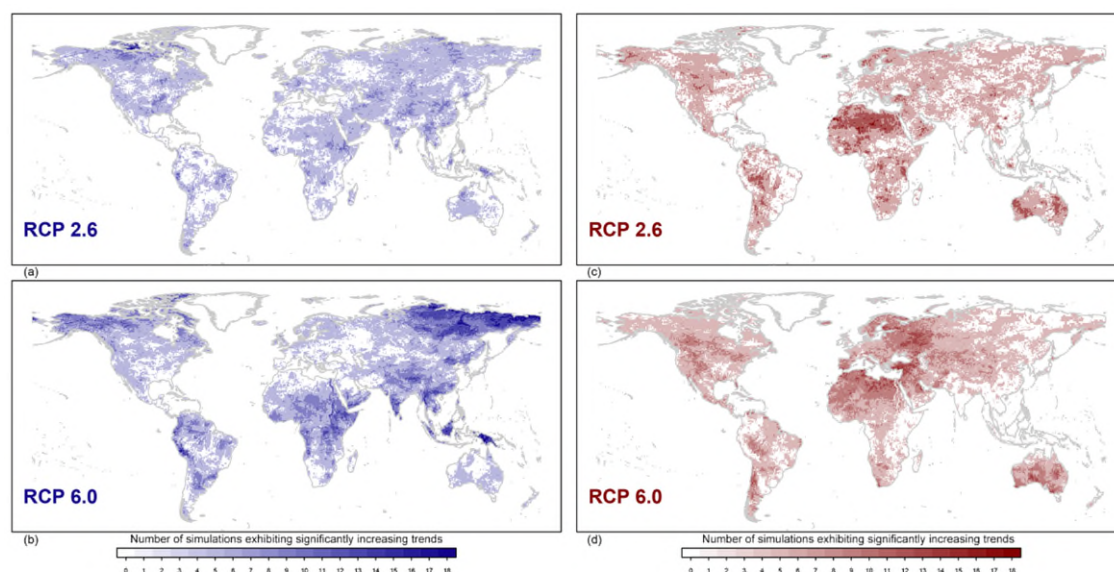


Figura 14: Cambios históricos y futuros de las inundaciones globales usando seis modelos hidrológicos globales (Do et al., 2020). Las simulaciones que muestran tendencias estadísticamente significativas al nivel del 10 % en cada celda de la cuadrícula. Los paneles (a) y (b) muestran los resultados para la evaluación de tendencias crecientes, mientras que (c) y (d) muestran resultados para tendencias decrecientes significativas. (a, c) Resultados de GCMRCP2.6 simulaciones; (b, d) resultados de las simulaciones GCMRCP6.0.

Para mejorar la comprensión de las tendencias de los caudales extremos relacionados con las inundaciones a escala global, se investigan los cambios históricos y futuros de los máximos anuales del caudal de 7 días, utilizando un archivo completo de caudal y seis modelos hidrológicos globales. La capacidad de los modelos para caracterizar tendencias en máximos anuales de caudal de 7 días a escala continental y global se ha evaluado en 3666 afluentes de ríos durante el periodo de 1971 a 2005, enfocándose en cuatro aspectos de las tendencias: (i) media, (ii) desviación estándar, (iii) porcentaje de ubicaciones que muestran tendencias significativas y (iv) patrón espacial. En comparación con las tendencias observadas, las tendencias simuladas impulsadas por el forzamiento climático antropogénico generalmente tienen una media más alta, una dispersión más baja y un porcentaje similar de ubicaciones que muestran tendencias significativas. Los modelos muestran una capacidad de baja a moderada para simular patrones espaciales de tendencias históricas, con aproximadamente sólo entre el 12 % y el 25 % de la varianza espacial de las tendencias observadas en

todas las estaciones de medición representadas por las simulaciones. Curiosamente, existen diferencias estadísticamente significativas entre las tendencias simuladas por modelos hidrológicos globales (GHM) forzados con el clima observacional y aquellos forzados por la producción de modelos climáticos con corrección de sesgo durante el periodo histórico, lo que sugiere el importante papel de los factores estocásticos naturales (decadales, interanual) de la variabilidad climática. Se encontraron diferencias significativas en las tendencias de las inundaciones simuladas al promediarlas solo en ubicaciones calibradas en comparación con las promediadas en todas las celdas de la cuadrícula simuladas. Este hecho resalta el potencial de sesgo hacia regiones bien observadas en nuestra comprensión de los cambios en las inundaciones. Las proyecciones climáticas futuras simuladas para los escenarios RCP2.6 y RCP6.0 sugieren un nivel potencialmente alto de cambio en regiones individuales, con hasta el 35 % de las celdas mostrando una tendencia estadísticamente significativa (aumento o disminución; al 10 % nivel de

significancia) y mayores cambios para escenarios más desfavorables.

A pesar de estos resultados, lo cierto es que en zonas donde las proyecciones indican una disminución de eventos extremos (ej. Mediterráneo), durante las últimas décadas se han visto afectadas por eventos extremos frecuentes. La diferencia entre la realidad experimentada y la proyectada siguiendo un esquema de modelos climáticos-hidrológicos es bien conocida por la comunidad científica.

La diferencia entre la dirección y magnitud del cambio proyectado entre los modelos usados la denominamos aquí como el *Problema Divergente* y está particularmente relacionado con las precipitaciones extremas que alimentan a los modelos hidrológicos. Las causas son conocidas, fundamentalmente la

complejidad de los procesos específicos de las cuencas que influyen en la respuesta a las inundaciones. Este fenómeno ha sido descrito con detalle por Wasko *et al.* (2023), quienes usaron una combinación de proyecciones de lluvia a escala continental y modelos de lluvia-escorrentía calibrados localmente para mostrar que los cambios proyectados en las inundaciones no siguen los cambios proyectados en las precipitaciones extremas. De hecho, los cambios en las inundaciones dependen de la región, tipo de escorrentía e intensidad del evento. Estos resultados pueden ser relevantes para entender los mecanismos que favorecen la diferencia entre las proyecciones y el aumento de eventos en la costa mediterránea española. Estos problemas han sido descritos en otras zonas del mundo (Yang *et al.*, 2018).

Proyecciones sobre los caudales extremos en Europa

- Las proyecciones muestran un patrón regional diferenciado bajo escenarios de calentamiento global, lo que dificulta la toma de decisiones en la gestión del riesgo.
- Los modelos proyectan un aumento global de las pérdidas humanas y económicas por inundaciones, aunque con dificultades para reproducir de forma unívoca el incremento en frecuencia y magnitud.
- Con un calentamiento de +1,5 °C, las pérdidas humanas por inundaciones podrían aumentar entre un 70 % y un 83 %, los daños directos entre un 160 % y un 240 %, y la reducción del bienestar entre un 0,23 % y un 0,29 %. Bajo un escenario de +3 °C estas cifras aumentan significativamente.
- En Europa central y occidental, incluidas Gran Bretaña e Irlanda, se espera un aumento del riesgo y la magnitud de las inundaciones asociado al incremento de precipitaciones extremas.
- En la región mediterránea, la mayoría de los modelos proyectan una disminución de los caudales extremos de hasta el 30 % en escenarios más cálidos, aunque con notable incertidumbre y divergencia respecto a los eventos recientes observados.
- En Escandinavia se prevé un aumento de caudales asociado a mayores precipitaciones y deshielo; en Europa del este, los cambios proyectados son más débiles y menos consistentes entre modelos.
- En regiones costeras, el nivel del mar podría aumentar entre 58 y 172 cm a finales de siglo en un escenario de emisiones sin mitigación, incrementando la exposición al riesgo de inundación en gran parte de las costas mundiales.

3.3.2. Proyecciones para España

Proyecciones sobre el régimen de precipitaciones

La incertidumbre sobre la evolución futura de las precipitaciones extremas es elevada y responde a tres fuentes de error: (1) las simulaciones climáticas (escenarios de emisiones y modelos climáticos), (2) los métodos de estimación de las precipitaciones extremas, y (3) la elevada variabilidad natural de las precipitaciones (Monjo *et al.*, 2016). A esto se suma que los métodos de proyección y de reducción de escala (*downscaling*) desde los modelos generales y regionales al contexto español resultan especialmente complejos, dada la alta variabilidad espacio-temporal que caracteriza su territorio (Hernanz *et al.*, 2022).

Las proyecciones del régimen de precipitaciones en España reflejan la influencia de las dos grandes regiones climáticas que la condicionan: la atlántica y la mediterránea. En términos generales, los modelos climáticos apuntan a una reducción de la precipitación anual en el territorio español, si bien con ciertas excepciones regionales. De forma aparentemente paradójica, aunque la mayoría de las proyecciones coinciden en una menor precipitación total anual, los modelos indican que, a escalas temporales más cortas —en particular a escala diaria—, los episodios de lluvia intensa podrían intensificarse (Zittis *et al.*, 2021).

Un estudio publicado en 2021 por el CEDEX (CEDEX, 2021) analizó el impacto del cambio climático en la precipitación diaria máxima anual en España peninsular (excluidas las Islas Canarias) mediante proyecciones climáticas regionalizadas de 15 modelos EURO-CORDEX con resolución de ~12,5 km, dividiendo el territorio en 29 regiones climáticas. Se evaluaron seis variables de precipitación extrema (diaria, convectiva diaria, horaria y acumulada en 3, 6 y 12 horas) para un periodo de control (1971-2000) y tres periodos futuros (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100), bajo dos escenarios

de emisiones (RCP 4.5 y RCP 8.5). Los resultados muestran las tasas de cambio en el cuantil de precipitación diaria máxima anual para distintos periodos de retorno y horizontes temporales. En el caso del cuantil de 100 años y para el horizonte temporal 2050, las tasas de cambio son positivas en casi todas las cuencas, con valores de hasta el 31% de aumento, destacando las demarcaciones de Cataluña, Júcar, cabecera del Segura, Guadiana, Duero y Ebro. En el caso del periodo de retorno de $T = 500$ años, se muestran igualmente tendencias positivas de hasta +35 % en el escenario más desfavorable (Figura 15; Requena *et al.*, 2023).

Lorenzo y Álvarez (2020) emplearon simulaciones del modelo EURO-CORDEX para evaluar los cambios en la precipitación en las próximas tres décadas (2021-2050) respecto al periodo 1971-2000. Aunque apuntan a una reducción generalizada de las precipitaciones anuales, sugieren que se producirá un aumento de las precipitaciones máximas diarias durante el invierno y el otoño, especialmente en zonas montañosas del centro-norte peninsular (Figura 16, zona con puntos grises). En términos generales, los resultados no arrojan una señal estadísticamente significativa, a excepción de algunas zonas del norte de la península. Es probable que los periodos de lluvia sean más intensos, particularmente en los escenarios de altas emisiones, a pesar de la reducción en el número de días de lluvia al año. A modo de ejemplo, se espera que el volumen de precipitación —ya sea lluvia, nieve o granizo— registrado en el día más húmedo del año en España aumente hasta un 10 % respecto al periodo de referencia (1850-1900) en todos los escenarios de incremento de la temperatura media global (de +1,5 °C a +4 °C por encima del valor preindustrial).

Estos resultados deben interpretarse con cautela, dadas las limitaciones de resolución espacial de los modelos empleados (RCM, ~12 km) y su incapacidad para resolver explícitamente los procesos convectivos. Con

todo, la tendencia general apunta a una reducción de la precipitación anual acompañada de una mayor concentración de las precipitaciones en eventos de mayor intensidad, lo que implica que los episodios de lluvia extrema se alternarán con periodos más o menos prolongados de sequía o escasez pluviométrica.

Cabe señalar, además, que, según el Atlas Interactivo del IPCC, ni las proyecciones de los modelos globales de CMIP6 ni las de los modelos regionales de EURO-CORDEX anidados sobre CMIP5 muestran una señal de cambio suficientemente robusta en los extremos diarios de precipitación en la región mediterránea. En cambio, los primeros resultados procedentes de modelos climáticos

regionales de convección explícita (CPRCM, *Convection-Permitting Regional Climate Models*) para proyecciones de precipitación extrema sub-diaria a escala espacial de 1-3 km (Lucas-Picher *et al.*, 2022, 2024; Dierickx *et al.*, 2025; Lompi *et al.*, 2025) sugieren que, si bien los extremos diarios seguirían sin mostrar una señal de cambio robusta, los extremos sub-diarios tendrían una mayor probabilidad de intensificarse, especialmente en los episodios dominados por convección profunda.

En definitiva, se configura un escenario en el que la variabilidad interanual de los extremos de precipitación aumenta de forma notable, con importantes implicaciones para la gestión de los riesgos hídricos (Conte *et al.*, 2020).

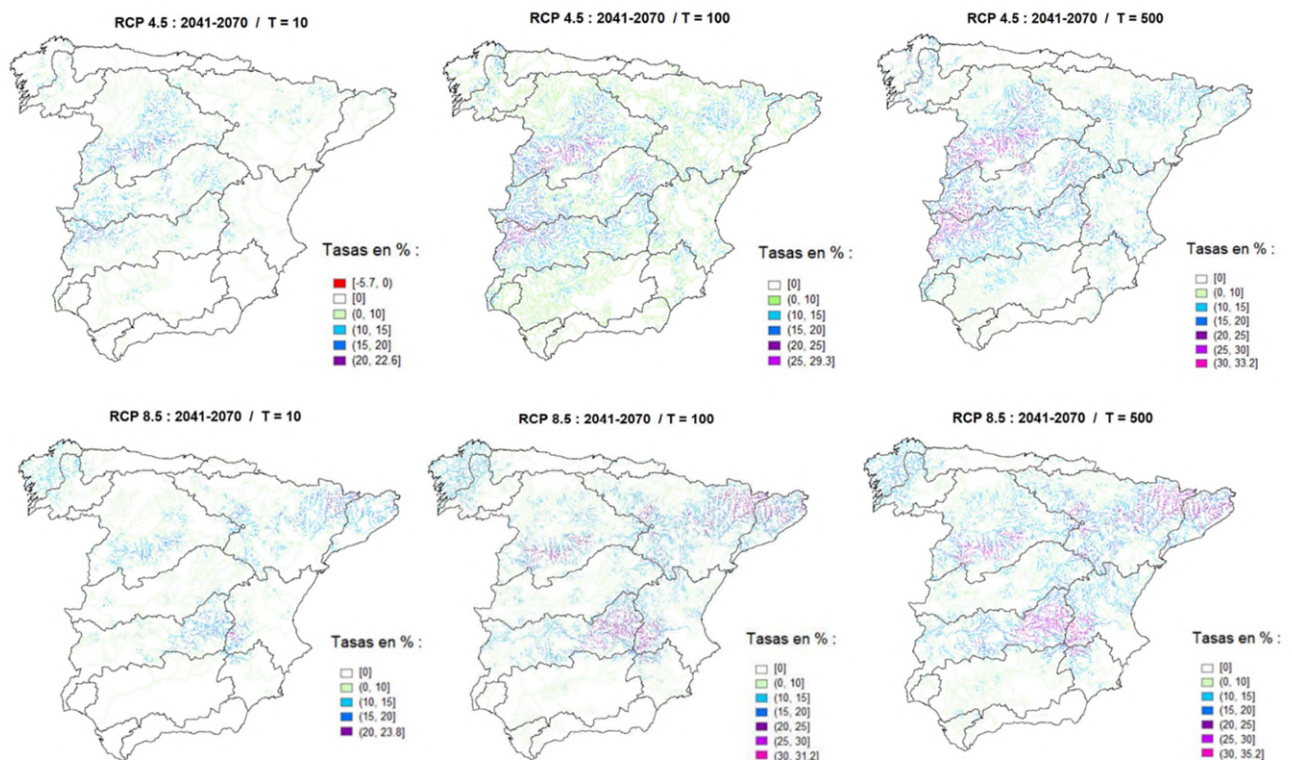


Figura 15: Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la Península para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes) (CEDEX, 2021; Requena *et al.*, 2023).

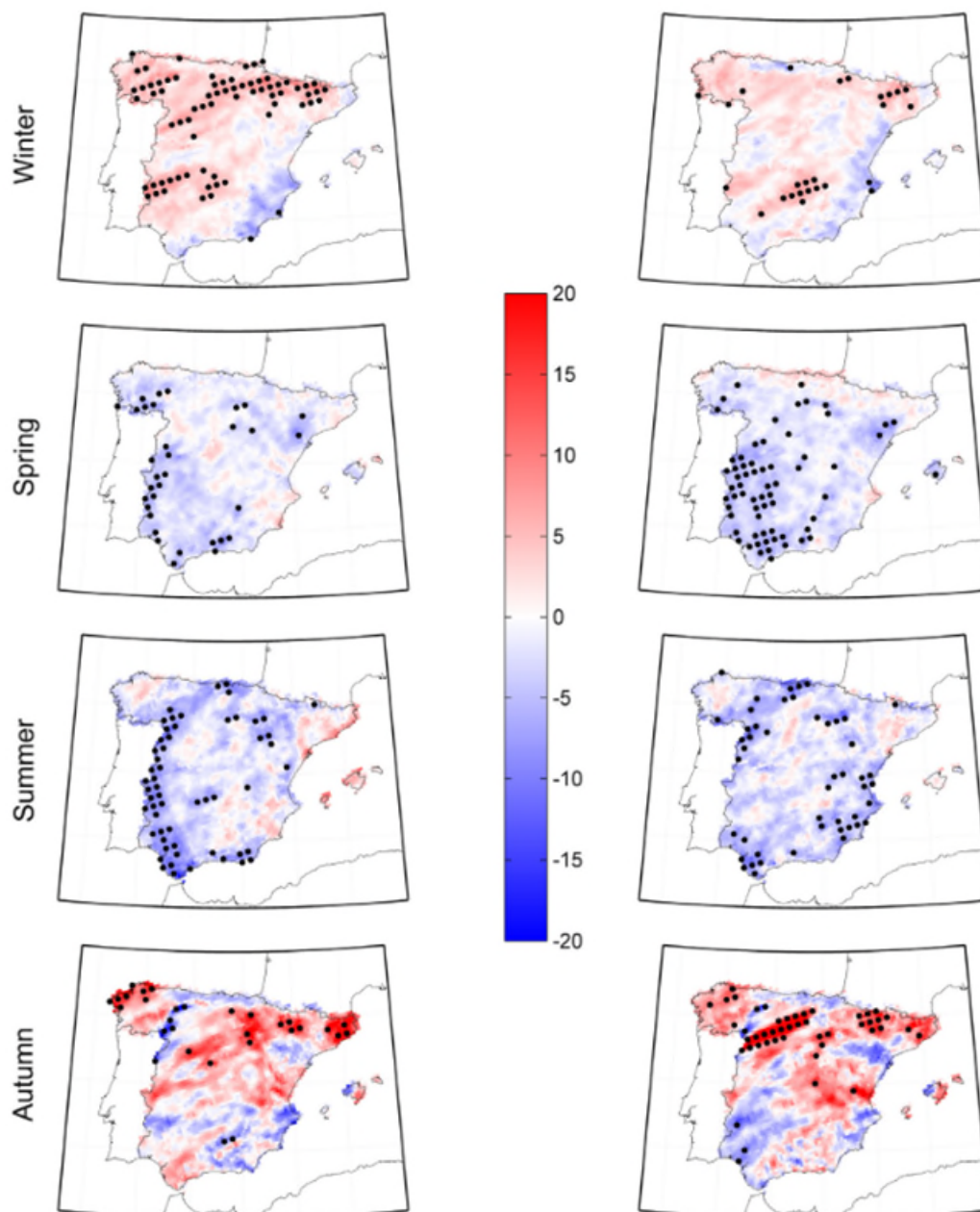


Figura 16: Análisis estacional de los cambios en la precipitación diaria máxima (índice RX1D) proyectado (%) del conjunto de modelos múltiples entre el periodo de referencia (1971-2000) y el periodo futuro próximo (2021-2060) para los escenarios de emisiones RCP4.5 y RCP8.5 (según Lorenzo & Álvarez, 2020). Los puntos grises señalan las zonas en las que las diferencias son significativas al nivel de significación del 5 % según la prueba de suma de rangos de Wilcoxon.

Este escenario es coherente con los resultados obtenidos por Cutillas-Lozano *et al.* (2023) para la ciudad de Alicante. Estos autores elaboraron proyecciones de precipitación diaria y sub-diaria a partir de los modelos CMIP6 (escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5) y EURO-CORDEX (RCP2.6,

RCP4.5 y RCP8.5), expresando los resultados en términos de curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF). Los escenarios futuros más adversos (SSP3-7.0 y SSP5-8.5) muestran aumentos en las intensidades de lluvia que son tanto mayores cuanto más corta es la duración del episodio, particularmente para periodos de retorno superiores a 25 años. En concreto, la

intensidad de precipitación en 30 minutos se incrementa en el periodo 2022-2100 hasta un 6 % para T25, un 17 % para T50 y un 36 % para T100. Para periodos de retorno inferiores a 25 años, en cambio, los valores de IDF actuales podrían seguir siendo representativos en los escenarios futuros. Resultados similares han sido descritos por otros autores en la región mediterránea (Miró *et al.*, 2022; Llasat *et al.*, 2021).

Los resultados aportados por Ferreira (2021) sugieren que las situaciones sinópticas asociadas a eventos extremos en el levante podrían aumentar como resultado del calentamiento global. Comparando observaciones y las simulaciones del modelo WRF relacionadas con precipitaciones extremas, esta autora sugiere que la precipitación asociada a situaciones sinópticas de depresiones aisladas de niveles altos (DANA) podría aumentar hasta un 88 % en el noreste de España y en un 61 % en el mar Mediterráneo contiguo, favorecido por la energía de un mar cada vez más cálido. Estos resultados se basan en un único estudio regional simulando y son relevantes, pero se requiere de más estudios para alcanzar un consenso en la comunidad científica en cuanto a la magnitud del aumento proyectado para las situaciones de DANA y la caracterización de su incertidumbre. En Portugal, Santos *et al.* (2019) han encontrado las mismas tendencias: una disminución de las precipitaciones anuales (especialmente en el noroeste), y un aumento de las precipitaciones extremas, principalmente en la región sur. No obstante, los resultados derivados de las proyecciones de modelos climáticos deben ser interpretados igualmente con cautela.

Los resultados anteriores ofrecen una mayor resolución estacional y espacial que las proyecciones de extremos de precipitación empleadas en la EPRI del segundo ciclo de la

Directiva Marco (MITECO, 2018). Los cambios en la precipitación T100 de la EPRI en el Duero, el Guadiana y el noroeste de Galicia (Figura 17) resultan coherentes con los observados en otoño e invierno por Lorenzo y Álvarez (2020). Del mismo modo, los cambios en las Cuencas Internas de Cataluña y en el norte de la Confederación Hidrográfica del Júcar aparecen, en ambos casos, vinculados a las lluvias de otoño y primavera (Figura 18). Recientemente, Guzzon *et al.* (2025) evaluaron la mejora en la predicción de precipitaciones extremas en Cataluña mediante métodos análogos frente al modelo determinista GFS, concluyendo que los métodos basados en patrones atmosféricos históricos pueden mejorar la capacidad de anticipar eventos extremos con 24 horas de antelación.

De los estudios sobre precipitaciones máximas en condiciones de cambio climático se desprenden una serie de consideraciones generales sobre los posibles cambios en la lluvia extrema. Sin embargo, la elevada incertidumbre inherente a los modelos climáticos, unida a los largos periodos de retorno considerados en estos análisis, incrementa notablemente la incertidumbre de los resultados en el estudio de la peligrosidad de las inundaciones bajo condiciones de cambio climático. Más allá del impacto sobre las precipitaciones máximas diarias, es necesario valorar también los posibles cambios en las intensidades de lluvia y en el régimen de temperaturas máximas y mínimas, así como sus consecuencias sobre el riesgo de inundación. En definitiva, estas incertidumbres son difíciles de transmitir en el ámbito de la gestión del riesgo de inundación y, en su caso, deberían calibrarse en relación con los máximos de lluvia e inundación procedentes de registros instrumentales largos o de fuentes preinstrumentales.

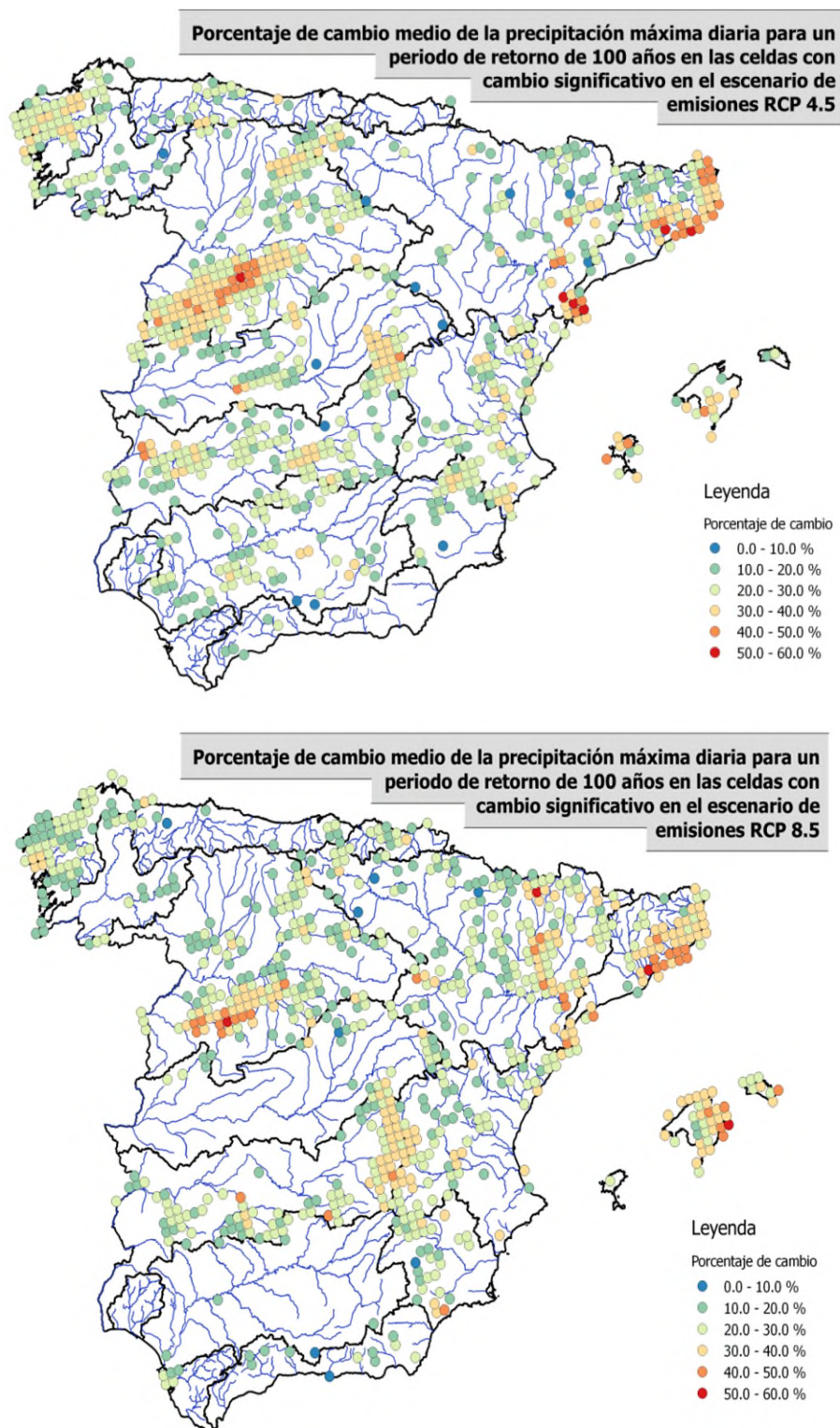


Figura 17: Las zonas de cambio significativo se localizan en la margen izquierda del río Duero en su tramo medio, cabecera del río Guadiana, zona norte en las cuencas internas de Cataluña y Galicia Costa, entre otras. En el escenario de elevadas emisiones (RCP8.5) los cambios de precipitación T100 se intensifican en la parte oriental de la cuenca del Ebro y norte de la Comunitat Valenciana. Según MITECO (2018).

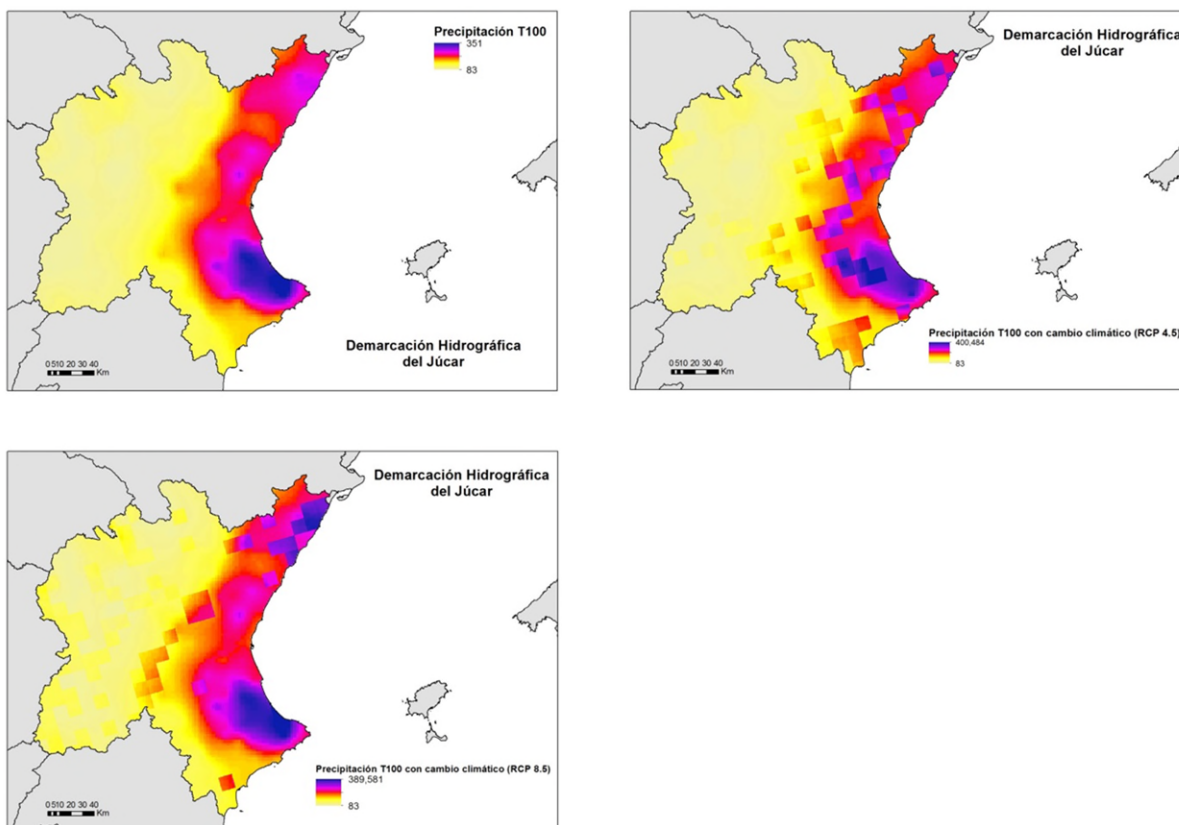


Figura 18: Ejemplo de los cambios en la lluvia máxima de T100 en la Demarcación Hidrográfica del Júcar, utilizada para la consideración del Cambio Climático en la EPRI (MITECO, 2018). Arriba izquierda: Lluvia máxima (en mm/día) para T100; arriba derecha lluvia máxima en el escenario RCP4.5 y abajo izquierda lluvia máxima (en mm/día) para T100 en el escenario RCP8.5.

Proyecciones sobre el régimen de precipitaciones

- Las proyecciones sobre la precipitación en España presentan un alto grado de incertidumbre.
- La tendencia general apunta a una reducción de la precipitación anual, aunque los modelos indican que los eventos intensos a escalas diarias y subdiarias podrían aumentar.
- Los períodos de lluvia serán probablemente más intensos, especialmente en escenarios de altas emisiones, pese a la reducción del número de días de lluvia al año.
- La intensidad de precipitación en 30 minutos se incrementa en el período 2022-2100 hasta un 6 % para T25, un 17 % para T50 y un 36 % para T100.
- Para períodos de retorno inferiores a 25 años, los valores de IDF actuales pueden ser representativos de escenarios futuros.

Proyecciones sobre la cobertura nival

En España, las proyecciones sobre la cobertura nival indican una reducción significativa, en términos de SWE (*snow-water-equivalent*) para finales de siglo XXI. En el Pirineo, esta reducción está relacionada con una sensibilidad a la temperatura y los cambios de precipitación (Bonsom *et al.*, 2023), aunque esta disminuye con la altura y hacia valles de montaña localizados en el este de los Pirineos. Se espera que los Pirineos españoles sean la cordillera europea más afectada por el cambio climático en términos de SWE medio y duración del manto nivoso (López-Moreno *et al.*, 2017). En este sentido, Morin *et al.* (2021), usando el modelo Crocus de simulación de cobertura nival, en base a los datos de proyecciones de escenarios climáticos estadísticamente ajustados EURO-CORDEX, encuentran una reducción de los días con nieve con espesores >30 cm. Collados-Lara *et al.* (2021) aplican un modelo estocástico basado en un generador climático para cuantificar cambios en la cobertura nival en Sierra Nevada. Sus resultados indican que para un horizonte temporal a finales de siglo (2071-2100), en el escenario de emisiones más desfavorable RCP8.5, la reducción del SCA será del 66 % de diciembre a febrero, y del 95 % de marzo a mayo. Según estos autores, estos cambios son equivalentes a un cambio de elevación de la nieve de alrededor de 400 m. Los impactos más notables en la hidrología de estos cambios son las variaciones en los caudales máximos y promedios esperados. Según Lastrada *et al.* (2021), se espera un aumento de los episodios de inundaciones como consecuencia de una

compleja relación entre los cambios en las precipitaciones y un aumento de las intensidades máximas de deshielo, que oscilan entre el 2,1 % en los Pirineos y el 7,4 % en la cordillera Cantábrica. Estos autores aplicaron el modelo desarrollado por la AEMET usando proyecciones del CMIP5, cuyos resultados indican que la duración de la nieve se acortará en unos 45 días en la cordillera Cantábrica, y en unos 30 días en el Pirineo para el horizonte temporal comprendido desde 2058 a 2070. La acumulación media de nieve disminuiría en un 28 % en los Pirineos y Sierra Nevada, y hasta un 42 % para el sistema Central y la cordillera Cantábrica. Como resultado, se espera un descenso del caudal medio en los ríos, que oscilará entre el 2,4 % en el Pirineo y el 7,3 % en la cordillera Cantábrica, incrementándose únicamente en el sistema Central un 4,0 %.

En el proyecto CLIMPY (OPCC, 2018), las proyecciones regionalizadas (escenarios RCP) apuntan a una fuerte reducción de la cobertura/espesor nival: en el Pirineo central, a ~1.800 m, el espesor medio de nieve podría reducirse a la mitad hacia 2050 y la permanencia de la nieve en el suelo acortarse en más de un mes. En la misma línea, los indicadores divulgados por el OPCC sitúan una reducción ~del 60% de la capa de nieve a 1.800 m para 2050. El proyecto PIRAGUA integra este tipo de escenarios para la prospectiva de recursos hídricos en el Pirineo, por lo que se espera menor almacenamiento nival y un deshielo más temprano, afectando la aportación nival a los caudales en cuencas pirenaicas españolas (OPCC 2018, 2025, 2026).

Proyecciones sobre la cobertura nival en España

- Las proyecciones indican una reducción significativa de la cobertura nival a finales del siglo XXI, con disminución del número de días con espesores superiores a 30 cm.
- En el escenario más desfavorable, la superficie de cobertura nival se reducirá un 66 % entre diciembre y febrero, y un 95 % entre marzo y mayo.
- La principal consecuencia es una reducción del caudal medio en los ríos de montaña de entre el 2,75 % y el 7 %.

Proyecciones sobre los cambios del uso del suelo en España

Basado en resultados de la plataforma de modelización territorial LUISA (Centro Conjunto de Investigación de la Comisión Europea), Perpiña Castillo *et al.*, (2020) sugieren importantes cambios de usos del suelo en España asociados al abandono agrícola a para finales de la década (2030). Sus análisis revelan que la región de Galicia, el norte de España (Asturias, Cantabria, Gipuzkoa, Bizkaia), el noreste de España (región de Aragón), los Pirineos centrales/cuenca del Ebro (Huesca, Navarra, Lleida) y el sureste de España (Murcia, Almería, Alicante, Málaga) sufrirán importantes procesos de abandono. Hürlimann *et al.* (2022) cuantificaron los impactos del uso y cobertura del suelo (LULC) en la susceptibilidad regional a los deslizamientos de tierra en las cuencas de montaña del Pirineo. Estos autores usaron el *software* IDRISI TerrSet para crear los futuros mapas LULC. Sus resultados sugieren que la superficie forestal aumentará significativamente, mientras que el área de pastizales y arbustos disminuirá. Esta situación podría tener un impacto positivo en la estabilidad general de las laderas. Según estos autores, la fuerza de las raíces es mayor en los bosques que en los pastizales y los arbustos, aunque no consideran el peso extra y los esfuerzos transmitidos por el viento a las capas superiores del suelo susceptible de ser movilizado. Usando el mismo modelo y aplicándolo al Valle de Arán, Shu *et al.* (2019) mostraron que la superficie forestal aumentará

de manera constante hasta el año 2100 (+57 % entre 2013 y 2097), aunque el incremento parece desacelerarse con el tiempo. Por su lado, la superficie arbustiva disminuirá de manera acelerada hasta un -28 %, mientras que la superficie de pastos, así como la superficie de pedregal, disminuirán a una tasa del -46 % y el -78 %, respectivamente. El área urbana, sin embargo, aumentará un +43 %, pero tenderá a desacelerarse especialmente después de 2049.

Cambio en los caudales extremos proyectados para España

Tal y como se ha señalado anteriormente, existen diversos trabajos que han llevado a cabo proyecciones de escenarios climáticos sobre el régimen de precipitaciones extremas en España. Sin embargo, los estudios que aplican esta aproximación para analizar cambios en los caudales son limitados y, por lo general, están restringidos a determinadas cuencas o se centran en caudales estacionales o mensuales (Pulido-Velázquez *et al.*, 2022).

El informe MedECC (2020) indica que, en términos generales, los caudales medios se verán reducidos en la región mediterránea como consecuencia de la menor precipitación proyectada por la mayoría de las simulaciones climáticas. Sin embargo, Trambly y Somot (2018) y Colmet-Daage *et al.* (2018) sugieren que las tendencias relacionadas con las precipitaciones extremas podrían ser opuestas. En esta línea, Cortés *et al.* (2019) muestran que la probabilidad de ocurrencia de inundaciones y los daños asociados en el este de España podrían aumentar como

Proyecciones sobre los cambios de uso del suelo en España

- La superficie forestal aumentará de forma sostenida hasta 2100, aunque el ritmo de incremento se desacelerará con el tiempo.
- La superficie arbustiva disminuirá hasta un 28 %, los pastos un 46 % y el pedregal un 78 %.
- El área urbana crecerá un 43 %, con una desaceleración progresiva a partir de 2049.

consecuencia del calentamiento global de +1,5 °C, +2 °C y +3 °C por encima de los niveles preindustriales, teniendo en cuenta diferentes escenarios de población. Estos autores observan que dicha probabilidad aumenta respecto al periodo de referencia (1976-2005) para la mayoría de los modelos y periodos de calentamiento bajo la combinación RCP8.5-SSP5, y que únicamente encuentran una reducción en la probabilidad de eventos dañinos al considerar el escenario SSP3, dado que este proyecta una marcada disminución de la población a finales del siglo XXI.

En este contexto, Ribas *et al.* (2020) sugieren que el aumento de las precipitaciones extremas en las zonas urbanas en expansión de la España mediterránea podría conllevar un incremento de la exposición, aunque no necesariamente de la vulnerabilidad —al menos en términos de víctimas mortales—. El uso de modelos de probabilidad de daños como función de las proyecciones de precipitación puede generar conocimiento e información valiosos en la región mediterránea (Cortès *et al.*, 2019); no obstante, persisten importantes incertidumbres asociadas a este tipo de aplicaciones, especialmente elevadas en las regiones más áridas, donde los modelos hidrológicos y estadísticos avanzados no logran reducirlas de manera suficiente (Beneyto *et al.*, 2023a, 2023b).

En otro ejemplo de aplicación, Lastrada *et al.* (2020, 2021) analizaron la cabecera del río Ebro, que se ve afectada por el deshielo del manto de nieve. Estos autores usaron varios modelos climáticos e hidrológicos sobre el escenario RCP8.5, con datos diarios de temperatura y precipitación de los años 2007-2070. Para el Ebro, el modelo MRI-CGCM3 muestra que el cambio climático provocará un aumento significativo del riesgo de inundación. A su vez, Garijo & Mediero (2018) estimaron para la cuenca del río Arga los cambios en la magnitud y la estacionalidad de las inundaciones debido al cambio climático. Para ello, emplearon 24 modelos climáticos globales, 10 modelos regionalizados a partir de

modelos globales de CMIP5 por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y 14 del proyecto EURO-CORDEX (RCP4.5 y 8.5). Aplicando modelos de lluvia-escorrentía, analizaron las series de máximos anuales y picos sobre el umbral (POT), obteniendo una pequeña disminución en la magnitud de las inundaciones para el RCP4.5, y un aumento para el RCP8.5. Además, identificaron un retraso en la estacionalidad de las inundaciones desde finales de otoño hasta finales de invierno.

Los modelos que incorporan un generador meteorológico (*weather generation*) permiten generar series largas de lluvias máximas (hasta 1000 años) en escenarios de cambio climático (p. ej. Benito *et al.*, 2021b; Beneyto *et al.*, 2022). De hecho, entender cómo cambiarán los hidrogramas de diseño es esencial para ver su impacto en las inundaciones del futuro. Por ejemplo, en la misma cuenca del río Arga, Lompi *et al.* (2021) consideraron las proyecciones de cambio climático proporcionadas por 12 modelos climáticos, 7 periodos de retorno, 2 escenarios de emisiones (RCP4.5 y RCP8.5) y 3 ventanas de tiempo (2011-2040, 2041-2070 y 2070-2100), junto a un modelo hidrológico distribuido del Simulador Interactivo de Cuenca en Tiempo Real (RIBS) para simular procesos de lluvia y escorrentía a escala de cuenca. Los resultados apuntan a una disminución en las descargas máximas de diseño para periodos de retorno menores a 10 años y un aumento para las inundaciones de 500 y 1000 años para ambos RCP en las tres ventanas de tiempo. El aumento de los caudales máximos de diseño es casi entre un 10 % y un 30 % mayor en el escenario RCP8.5 que en el RCP4.5. En la región mediterránea, Beneyto *et al.* (2022, 2023b) aplicaron un enfoque de modelización de tormentas que combina un generador meteorológico (WG) y un modelo hidrológico distribuido con transporte de sedimentos (modelo TETIS) para analizar la frecuencia de inundaciones en la cuenca del río Segura (Murcia, España). La

metodología fue calibrada con datos históricos de eventos catastróficos desde 1825. Sus resultados indican que eventos recientes con un periodo de retorno de 100 años pueden estar asociados a episodios de lluvia con periodos de retorno muy dispares, que varían entre 10 y 1000 años en función de la localización de la tormenta dentro de la cuenca. Este estudio pone de manifiesto la complejidad de estas aproximaciones y la necesidad de comprender los mecanismos físicos desencadenantes de los eventos extremos, especialmente en regiones mediterráneas caracterizadas por una elevada variabilidad climática.

Las inundaciones en muchas zonas costeras muestran una clara tendencia a aumentar por el efecto del nivel del mar. Por ejemplo, Sayol & Marcos (2018) han analizado el efecto compuesto de las marejadas y las olas extremas con las inundaciones en el delta del

Ebro, y han obtenido mapas de peligrosidad de inundaciones para mediados y finales del siglo XXI bajo dos escenarios de cambio climático, incluyendo efectos de subsidencia. Dependiendo de los escenarios (RCP 4.5 o RCP8.5), estos resultados indican que la superficie de delta inundada podría aumentar desde un 20 % hasta más del 80 %. Estos resultados son coherentes con los presentados por Bermúdez (2021), quienes además resaltaron el papel del efecto del cambio climático en la generación de eventos compuestos como las inundaciones en zonas costeras. De acuerdo con su estudio en los ríos Mandeo y Mendo del norte peninsular, las proyecciones locales futuras tienden a mostrar una ligera disminución de los eventos extremos relacionados con las marejadas ciclónicas, pero predicen un aumento de caudales extremos cuya magnitud depende en gran medida del modelo climático global (GCM) aplicado.

Proyecciones sobre los caudales extremos

- Los estudios de proyección de caudales en España son todavía limitados y se concentran en cuencas concretas, con elevadas incertidumbres especialmente en regiones áridas y en la modelización de extremos.
- En la región mediterránea, los caudales medios tenderían a disminuir, aunque podría aumentar la probabilidad de inundaciones dañinas bajo escenarios de altas emisiones (SSP5-RCP8.5); los escenarios con descenso poblacional (SSP3) muestran, en cambio, reducciones en el riesgo.
- En la cuenca del Arga, se proyecta una ligera disminución de la magnitud de las inundaciones bajo RCP4.5 y un aumento bajo RCP8.5, junto con un retraso estacional de las crecidas hacia finales de invierno.
- Para eventos de diseño, los caudales máximos disminuyen en periodos de retorno inferiores a 10 años y aumentan en eventos muy extremos (500-1000 años) en ambos escenarios, con incrementos más acusados en RCP8.5 (10-30 % respecto a RCP4.5).
- En el sureste peninsular (cuenca del Segura), la respuesta hidrológica presenta gran variabilidad espacial: eventos equivalentes a 100 años pueden asociarse a tormentas con periodos de retorno de entre 10 y 1000 años, según la localización de la precipitación en la cuenca.
- En zonas costeras como el delta del Ebro, la combinación de ascenso del nivel del mar, marejadas y caudales fluviales podría incrementar la superficie inundada entre un 20 % y más del 80 %, según el escenario (RCP4.5 o RCP8.5).

Tabla 1. Resumen de indicadores para cada una de las variables analizadas

Región	Variable	Observaciones	Proyecciones		
			SSP1 2.6 (RCP2.6)	SSP2 4.5 (RCP4.5)	SSP5 8.5 (RCP8.5)
Global (G) / Europa (Norte, Central, Sur)	Precipitación	Aumento, más claro a escala diaria		Aumento entre 4,23 y 3,0 mm/década (escala global y precipitación anual)	Aumento entre 8,96 y 6,77 mm/década Región mediterránea: -7 % hasta -33 % a finales del siglo (escala global y precipitación anual)
	Nieve	Descenso, más intenso en primavera	Reducción de la extensión de la capa: -18 % (± 7 %)	Reducción del SWE de un - 50 % en Centroeuropa	Reducción del SWE de un- 80 % en Centroeuropa; y Reducción de la extensión capa: -55 % (± 10 %)
	Uso del Suelo	Deforestación y aumento uso urbano, moderado.	Ver datos absolutos en Figura 13		
	Caudal	Aumento frecuencia y magnitud hasta un x4 en el trópico y x2.5 en el hemisferio norte			
España (Atlántico, Mediterráneo)	Precipitación	Alta variabilidad, reducción de lluvia anual, pero aumento de extremos subdiarios en la región mediterránea			
	Nieve	Reducción generalizada			Reducción cobertura de nieve. Pirineos: ~del 60% de la capa de nieve a 1.800 m para 2050; y Sierra nevada: 66 % de diciembre a febrero, y del 95% de marzo amayo
	Uso del Suelo	Abandono rural, aumento zona forestal y cultivos perennes	En promedio: ○ Superficie forestal aumentará 57 % promedio ○ Superficie arbustiva disminuirá un 28 % ○ Zona urbana aumentará un 43 %		
	Caudal	Aumento de eventos extraordinarios, no catastróficos			Aumentos caudales de diseño máximos en un +10 %-30 % respecto RCP4.5

3.4. Registros históricos y paleo de precipitaciones e inundaciones

3.4.1. Registros de lluvia

A pesar de los avances científicos y computacionales, los modelos climáticos de última generación tienden a subestimar las tasas y la magnitud de los cambios observados, especialmente cuando se comparan con registros que exceden el horizonte temporal de las observaciones instrumentales (los denominados registros paleo). A las causas de estas inexactitudes comentadas anteriormente se suma el hecho de que los modelos actuales suelen calibrarse con datos observados, lo que conlleva una simplificación de los procesos atmosféricos y de la superficie terrestre, así como la omisión de mecanismos de retroalimentación que operan en escalas temporales más amplias, como el deshielo de los polos, la elevación del nivel del mar o las retroalimentaciones del ciclo del carbono.

Con el fin de comprender el comportamiento del sistema Tierra en situaciones análogas del pasado en relación con el actual cambio climático, Fischer *et al.* (2018) ofrecen una visión amplia de los impactos esperados bajo distintos horizontes de calentamiento. Los autores reconocen el papel antrópico del actual periodo cálido, pero se centran en describir las evidencias disponibles sobre el comportamiento del sistema climático en situaciones de elevada concentración de CO₂ en el pasado. Para ello, analizan tres periodos

cálidos de referencia: (i) el máximo térmico del Holoceno (HTM, ~6000-4000 a.C.), (ii) el último interglaciar (LIG, hace aproximadamente 129-116 mil años), y (iii) el periodo cálido del Plioceno medio (MPWP, hace 3,3-3,0 millones de años), cuando la concentración de CO₂ se situaba entre 300 y 450 ppm, comparable al escenario RCP2.6. Los resultados sugieren que los estados climáticos más cálidos del pasado tienden a asociarse con un aumento de las precipitaciones en el hemisferio norte y una disminución en el hemisferio sur, especialmente en relación con los sistemas monzónicos de verano (HTM y LIG respecto a la época preindustrial). Un incremento de la actividad monzónica estival en la India y Asia ha sido igualmente documentado durante el MPWP.

Los registros paleo (sedimentos de lagos, anillos de crecimiento de árboles y registros de espeleotemas) indican que la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) durante el HTM estuvo asociada predominantemente a valores positivos, con una tendencia hacia valores negativos hacia el final de dicho periodo (Olsen *et al.*, 2012). Durante el LIG, los datos proxy obtenidos de corales muestran que tanto la NAO como la variabilidad decadal en general presentaron una intensidad elevada (Felis *et al.*, 2004). En relación con las inundaciones, los registros de paleoinundaciones del norte de Europa apuntan a un periodo de escasa actividad de inundaciones durante el HTM (Støren *et al.*, 2012).

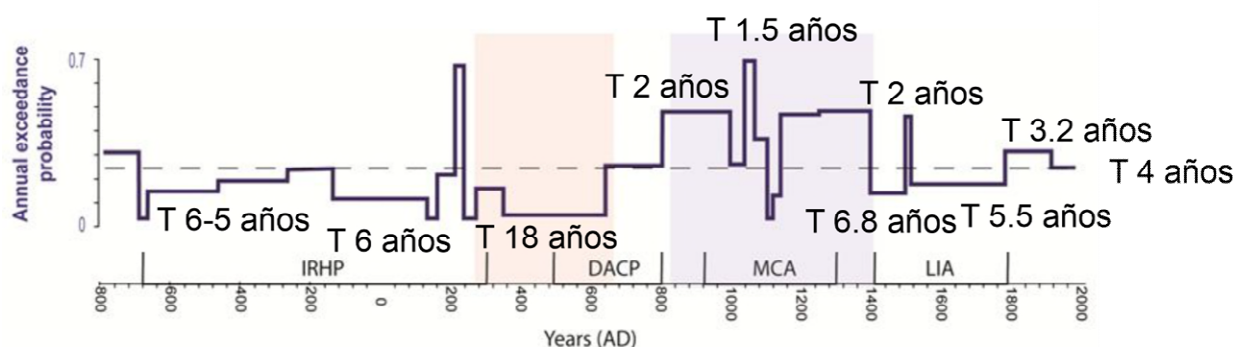


Figura 19: Probabilidad de excedencia de lluvias con intensidad >90mm/día (Moncortés, Lleida). Según Corella *et al.* (2016).

Existen múltiples registros naturales — sedimentos de ríos y lagos, anillos de crecimiento de árboles— que pueden aportar información cuantitativa sobre estos cambios y su relación con las condiciones climáticas y sinópticas. Estos valores cuantitativos pueden utilizarse como guía o como análogos de las condiciones climáticas futuras y, en cualquier caso, informan sobre los eventos extremos posibles en circunstancias de cambio climático. Por ejemplo, a partir de un registro lacustre con resolución estacional y anual (Figura 19) es posible inferir un aumento en la probabilidad de eventos de lluvia con intensidad superior a 90 mm/día durante los periodos cálidos de la Anomalía Climática Medieval (MCA), así como en determinados momentos —inicial y final— de la Pequeña Edad del Hielo (LIA) y del Periodo Húmedo Íbero-Romano. Estos datos constatan que el aumento de temperatura en el pasado ha favorecido la ocurrencia de eventos extremos de lluvia en este sector del noreste peninsular, corroborando así las proyecciones realizadas con modelos climáticos para finales del siglo XXI.

3.4.2. Registros de caudal

Los registros del pasado evidencian la variabilidad de los extremos de lluvia en relación a la temperatura global y, por tanto, la no estacionariedad de los eventos extremos. Por ello, se deben de analizar los cambios en la magnitud y frecuencia del caudal máximo respecto a la variabilidad natural del clima en los últimos milenios. El análisis de los registros de inundaciones pasadas ha revelado que la magnitud y la frecuencia de las inundaciones son muy sensibles a las alteraciones sutiles de la circulación atmosférica, con una mayor sensibilidad en las inundaciones "raras" más extremas (inundaciones de 50 años y superiores) que en las inundaciones frecuentes más pequeñas (inundaciones de 2 años) (Knox, 1993). Por ello, una respuesta típica de las inundaciones a la variabilidad

natural de la circulación atmosférica es la alternancia de periodos de "ricos" con otros "pobres" en inundaciones que afectan tanto a su frecuencia como a la magnitud. Estos cambios cíclicos en la concentración de inundaciones se han descrito en registros instrumentales (Robson *et al.*, 1998), históricos (Brázdil *et al.*, 2006; Blöschl *et al.*, 2020) y paleoinundaciones (Benito *et al.*, 2015a). A largo plazo, los registros de inundaciones muestran tres tipos de respuesta regional al cambio climático: (i) ríos en los que las inundaciones actuales se sitúan en la cola superior de las magnitudes de las paleoinundaciones; (ii) cuencas con cambios en la frecuencia/magnitud de las inundaciones que sólo afectan a algunos tipos de inundación (deshielo, episodios convectivos); (iii) regiones con tendencias hacia una disminución general de la frecuencia de las inundaciones, pero que ocasionalmente registran inundaciones extremas de consecuencias catastróficas (Sandoval-Rincón *et al.*, 2025).

En las regiones de clima templado, los cambios en las precipitaciones extremas no son tan evidentes debido a las poblaciones de inundaciones mixtas (precipitaciones invernales y estivales). En el Reino Unido, el registro histórico de las inundaciones en el río Ouse de Yorkshire muestra una mayor frecuencia de inundaciones estivales en el periodo 1700-1849 que en el periodo 1850-1999 (Macdonald, 2011). Sin embargo, en el río Ouse los caudales de crecidas moderadas (350 a 500 m³/s) han aumentado durante el siglo XX (Macdonald & Black, 2010), en particular en comparación con las crecidas más extremas (>500 m³/s). Estos picos de inundación moderados están produciendo grandes impactos socioeconómicos y, por lo tanto, probablemente la razón de la percepción pública de que el riesgo de inundaciones está aumentando en el Reino Unido.

En las regiones mediterráneas occidentales, la mayoría de los estudios indican que las

magnitudes de las paleoinundaciones fueron mayores que las inundaciones instrumentales (actuales), aunque hay algunas excepciones (Benito *et al.*, 2010). En el sur de Francia, la crecida del río Gardon en 2002 (23 víctimas y daños por valor de 1200 millones de euros) se presentó como un evento catastrófico ligado al calentamiento global, dado que alcanzó un

caudal pico superior a las observadas en el registro de aforos desde 1890 (DDE, 2003). Un estudio de paleoinundaciones demostró la ocurrencia de al menos cinco inundaciones mayores que la de 2002, registradas en el periodo 1400-1800 durante la Pequeña Edad de Hielo (Sheffer *et al.*, 2008; Figura 20).

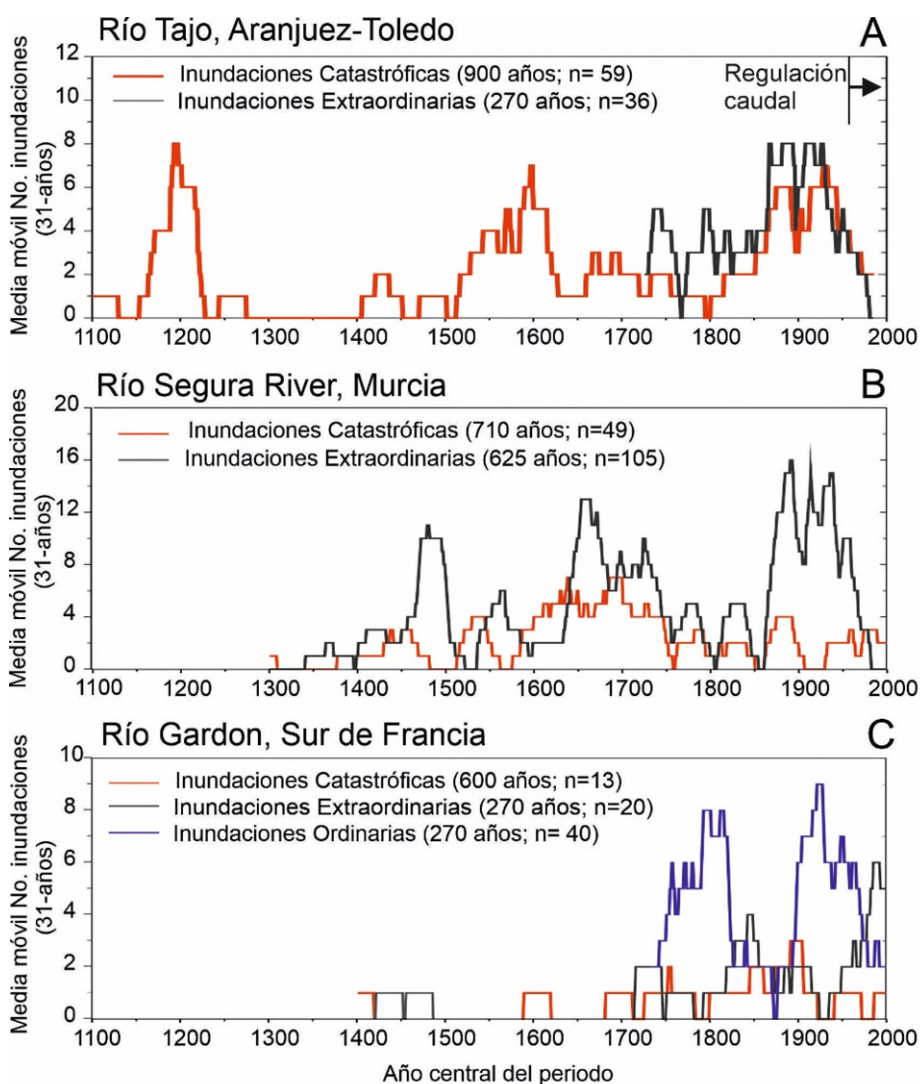


Figura 20: Registro de inundaciones históricas en el río Tajo (Aranjuez) y el río Segura (Murcia) y río Gardon (sur de Francia) mostrando la variabilidad de la frecuencia de las inundaciones catastróficas (grandes daños materiales y humanos), extraordinarias (daños materiales moderados a bajos) y ordinarias (desbordamiento con daños menores). En el registro del Tajo y el Segura, se observa la concentración de inundaciones en algunos periodos de la pequeña edad del hielo y la disminución de la frecuencia en la segunda mitad del siglo XX.

De forma similar, diversos estudios de paleoinundaciones en España han documentado caudales máximos superiores a los registrados en inundaciones recientes, incluyendo cuencas como las del Llobregat y el Ter (Thorndycraft *et al.*, 2005). En varios registros se observa que la frecuencia de las inundaciones de mayor magnitud (periodo de retorno superior a 50 años) ha disminuido desde finales del siglo XIX, mientras que las inundaciones extraordinarias y ordinarias aumentaron a lo largo del siglo XX (Benito *et al.*, 2015a, 2015b; Figura 19). Esta reducción de las inundaciones de gran magnitud no se correlaciona con una tendencia igualmente negativa en las pérdidas económicas asociadas, que muestran más bien una tendencia general al alza durante el periodo 1971-2010, lo que apunta a un aumento de la vulnerabilidad socioeconómica (Benito y Machado, 2012). De hecho, inundaciones moderadas recientes han producido graves daños en entornos urbanos e infraestructuras de nueva construcción, levantadas bajo una planificación local deficiente y con escasa concienciación pública sobre el riesgo. A modo de ejemplo, en el sureste de España la riada de septiembre de 2012, conocida como la riada de San Wenceslao, fue originada por 235 mm de lluvia en 12 horas —una precipitación moderada en comparación con los máximos históricos de 600 mm en 5 horas registrados durante la riada de octubre de 1973 (Capel Molina, 1974)—. A pesar de ello, la riada de 2012 es la quinta más dañina de la que se tiene constancia, si bien su magnitud a la entrada al embalse de Valdeinfierno fue inferior a la de los eventos de 1973, 1941 y 1891 (Benito *et al.*, 2012).

En definitiva, los estudios de paleoinundaciones permiten conocer los caudales máximos de eventos extremos ocurridos en relación con una amplia gama de anomalías meteorológicas esperables en un clima cambiante (Harrison *et al.*, 2025) y revelan la magnitud real de las inundaciones extremas posibles a escala local, reduciendo

así las incertidumbres introducidas por los modelos climáticos con escenarios futuros. En el ámbito de la Unión Europea, varios países han propuesto el uso de datos de inundaciones históricas como referencia directa para la estimación de la probabilidad de inundaciones futuras, en el marco de las estrategias de bajo riesgo orientadas a resolver la incertidumbre asociada a la reducción de escala de los resultados de los modelos climáticos (García *et al.*, 2014; EC, 2021b, 2021c). Este enfoque basado en el registro histórico contribuye además a reforzar la confianza pública en las soluciones propuestas que, en última instancia, implican un esfuerzo económico y social considerable para la mitigación del riesgo de inundación.

4. Revisión de la adaptación al cambio climático por parte de Europa

4.1. Cambio climático en la Directiva Europea de Inundaciones

La Directiva de la UE sobre inundaciones (2007/60/CE) establece que deben tenerse en cuenta los posibles efectos del cambio climático en la peligrosidad de las inundaciones a la hora de evaluar y gestionar los riesgos de inundación. Durante el primer ciclo de implementación de la Directiva, fueron pocos los países que adoptaron medidas específicas respecto a la influencia del cambio climático en la peligrosidad de las inundaciones. La mayor parte de los análisis se centró en determinar cambios en las precipitaciones extremas a partir de los resultados de los modelos climáticos, tomando

como base las trayectorias de emisiones del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (AR4; IPCC, 2007). En relación con este primer ciclo, el Tribunal de Cuentas Europeo (TCE) llevó a cabo en 2018 una auditoría (ECA, 2018) sobre los estudios del efecto del cambio climático en las inundaciones y su integración en los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI) de los Estados Miembros (EM). El informe describe los desafíos asociados a la cuantificación del riesgo de inundación en el contexto del cambio climático futuro, habida cuenta de las grandes incertidumbres presentes en los marcos actuales de modelización climática. Precisamente, dichas incertidumbres fueron uno de los factores que llevaron a algunos Estados Miembros a decidir no incorporar los efectos del cambio climático en sus primeros planes de gestión del riesgo de inundación, o a hacerlo de forma muy limitada.

¿Qué tipos de inundaciones tiene en cuenta a la hora de evaluar los impactos del cambio climático?

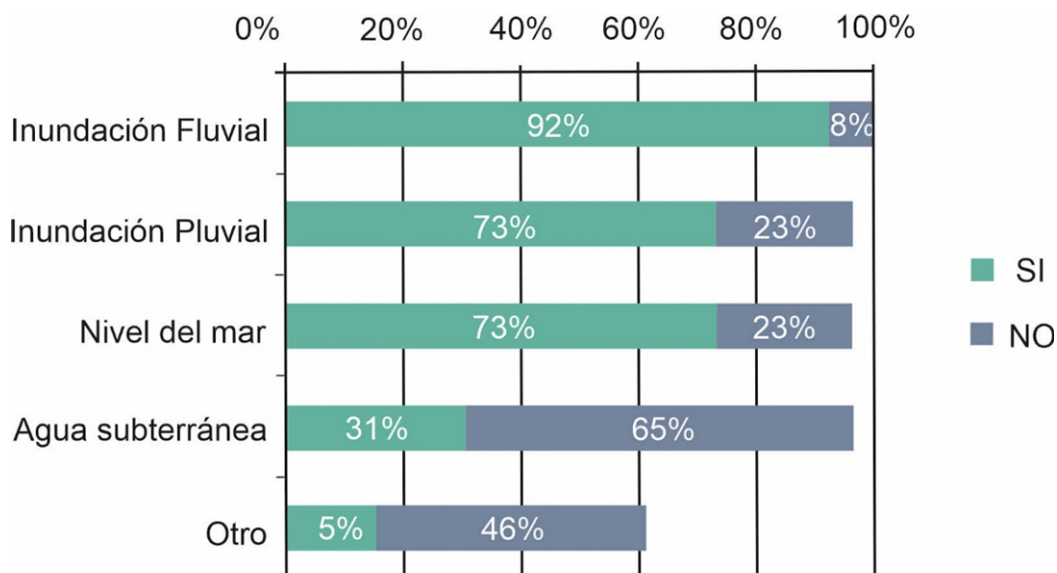


Figura 21: Resultado de una encuesta realizada a los estados miembros (EM) del Grupo Europeo de Inundaciones sobre los tipos de inundaciones que se tienen en cuenta al evaluar el cambio climático. Fuente: EC, 2021b.

4.2. Principales líneas metodológicas seguidas para la implementación del segundo ciclo de la Directiva de Inundaciones por los países participantes en el Grupo Europeo

Durante la implantación del segundo ciclo de la Directiva se hicieron nuevos esfuerzos para determinar los posibles efectos del cambio climático en las inundaciones (Figura 21). En concreto, España realizó un análisis general de los cambios en las lluvias extremas con escenarios de clima futuro del AR5 (IPCC, 2013) a partir de los cuales se desarrollaron mapas de cambios de lluvia acumulada en la red fluvial, que sirvieron para identificar tramos de red fluvial particularmente susceptibles a modificaciones de caudal dentro del estudio de la EPRI. Igualmente, el análisis de varias cuencas piloto donde se proyectaban estos cambios en las lluvias de diseño (T100) sobre modelos hidrológicos distribuidos, mostraron diferencias de resultados en función de los modelos climáticos aplicados. De nuevo, se concluyó que los datos derivados de los modelos climáticos con escenarios de emisiones informan sobre los posibles

cambios en las precipitaciones, pero resultan insuficientes para su integración en los mapas de peligrosidad y riesgo. A escala europea, los distintos estados miembros (EM) han abordado este problema en el segundo ciclo de forma muy variada, y en función de sus condiciones geográficas, climáticas, extensión y medios científico-técnicos (Figura 22). En la mayor parte de los casos, el análisis de la tendencia se ha realizado a partir de los datos de escenarios del AR5 del IPCC y bases de datos de clima publicados a escala global o adaptados por las agencias climáticas de cada país. En general, sigue existiendo un consenso entre los distintos países sobre la elevada incertidumbre que se deriva de la dispersión de las lluvias extremas de los diferentes modelos climáticos, la evaluación estadística, y los modelos hidrológicos asociados a los escenarios carentes del proceso de calibración y validación adecuados (EC, 2021c; Figuras 21 y 22).

Del análisis de la documentación disponible sobre el tipo y grado de análisis realizado por parte de cada EM (EC 2021c), se extrae la información por países recogida en la Tabla 2.

Considerando el estado de la información proporcionada por las proyecciones, modelos y estudios existentes sobre los probables impactos del cambio climático, ¿cree que es posible ofrecer predicciones fiables, con el fin de elaborar mapas de peligrosidad y riesgo de inundaciones?

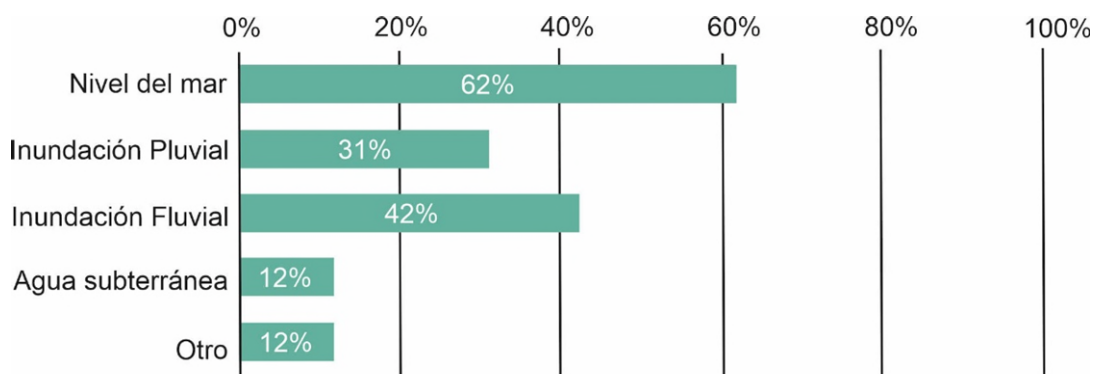


Figura 22: Resultado de la encuesta a EM preguntados por la capacidad de las proyecciones y modelos climáticos para predecir cambios en diferentes tipos de inundaciones. Fuente: EC, 2021b.

Tabla 2 Resumen de las directrices europeas existentes sobre factores de ajuste al cambio climático para caudales de diseño de inundaciones fluviales y precipitaciones de diseño (Fuentes: CEH 2013; Madsen et al, 2014).

País	Región	Parámetro	Cambio
Bélgica	Nacional	Caudales de crecida fluvial de diseño	Aumento del 30 %
Dinamarca	Nacional	Lluvias de diseño	Aumento del 20%, 30 % y 40 % para periodos de retorno de 2, 10 y 100 años.
Alemania	Baviera	Caudales de crecida fluvial de diseño con un periodo de retorno de 1 en 100 años	Aumento del 15 %
Alemania	Baden-Württemberg	Caudales de crecida fluvial de diseño	Aumento entre el 0 % y el 75 % según la ubicación y el periodo de retorno
España	Nacional	Lluvias máximas acumuladas (T100 años). Periodo 2041-2070, RCP8.5. Estudios de cuencas piloto	Elevada variabilidad en lluvias máximas. Según modelo aplicado aumenta, sin cambio o reduce. Aumenta principalmente a escala subdiaria
Noruega	Nacional	Caudales de crecida fluvial de diseño	Aumento del 0 %, 20 % y 40 % en función de la región, la estación de crecidas predominante y el tamaño de la cuenca.
Suecia	Nacional	Lluvias de diseño	El aumento es del 25 % para las precipitaciones con una duración inferior a una hora y del 20 % para las precipitaciones con una duración superior a una hora.
Reino Unido (Inglaterra)	Regional	Caudales de crecida fluvial de diseño	Aumento del 5 % al 120 % para 2080 en función de la región y el escenario de emisiones
Reino Unido (Inglaterra)	Nacional	Lluvias de diseño	Aumento del 5 % al 40 % para 2080 en función del escenario de emisiones

Teniendo en cuenta las conclusiones del segundo ciclo por parte de los EM, la CE elaboró un Documento de Debate (CE, 2020) que identifica retos y propone orientaciones. Igualmente, se realizó en 2021 una encuesta entre 13 estados miembros (Austria, Bélgica, Alemania, España, Finlandia, Hungría, Irlanda, Luxemburgo, Liechtenstein, Polonia, Portugal,

Suecia, Eslovaquia) y el Reino Unido sobre la aplicación de estudios sobre cambio climático dentro del segundo ciclo de la Directiva (CE, 2021a). De esta encuesta cuyos resultados se detallan en el informe sobre inundaciones y cambio climático publicado por la Comisión (CE, 2021b), se han extraído algunas preguntas y respuestas que se consideran

relevantes para el Grupo Español de Inundaciones del MITERD.

¿Qué retos plantea la aplicación de medidas a escala local en relación con los efectos del cambio climático en las inundaciones?

Cinco de los Estados Miembros encuestados (Austria, España, Irlanda, Suecia, Polonia y Reino Unido) formularon observaciones sobre los retos que plantea la aplicación de medidas a escala local, señalando que, si bien los modelos climáticos globales y regionales (GCM y RCM) son herramientas útiles para comprender las condiciones climáticas futuras, no resultan adecuados para modelizar condiciones meteorológicas extremas —como las precipitaciones intensas y de corta duración— que generan caudales de crecida. Tres de estos Estados Miembros (España, Irlanda y Suecia) indicaron que les resultaba difícil utilizar los resultados brutos de los modelos climáticos globales (GCM) y que carecían de orientaciones claras sobre cómo emplear dichos resultados y sus incertidumbres asociadas para evaluar los cambios en la peligrosidad e incorporarlos en la elaboración de medidas de adaptación al riesgo de inundación.

Un Estado Miembro (Suecia) señaló la existencia de un reto específico relacionado con las incertidumbres del cambio climático derivadas de la variabilidad interna natural del sistema climático, aspecto que no se aborda en el documento de debate (*Swedish Meteorological and Hydrological Institute*, 2020). Este Estado Miembro indicó que la elevada variabilidad natural dificulta la detección del cambio climático a largo plazo forzado por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, dado que el sistema climático puede encontrarse en estados naturalmente fríos o cálidos, húmedos o secos, durante periodos prolongados como años o décadas. Este fenómeno resulta especialmente relevante a escala regional y local, y tiene un mayor impacto sobre la

capacidad de proyectar futuros cambios en las precipitaciones que sobre los cambios correspondientes en la temperatura. En consecuencia, señalan la necesidad de generar un gran número de proyecciones climáticas con el mismo modelo y forzamiento, diferenciadas únicamente en las condiciones iniciales, con el fin de muestrear adecuadamente esta fuente de incertidumbre. Ello exige, a su vez, modelos de muy alta resolución y grandes conjuntos de simulaciones, lo que supone un reto computacional considerable que limita significativamente el alcance de cualquier evaluación del cambio climático.

En efecto, en numerosos Estados Miembros se ha observado una marcada variabilidad de los fenómenos extremos en el pasado, tanto a escala decenal como multidecenal, con periodos de elevada frecuencia de inundaciones alternándose con periodos de escasa actividad. Esto tiene implicaciones directas para la evaluación de la magnitud y la frecuencia de las inundaciones, y se espera que dicha variabilidad hidroclimática persista en un contexto de cambio climático. Sin embargo, la variabilidad natural no está suficientemente representada en los actuales modelos climáticos globales y regionales. Por su parte, un Estado Miembro (Finlandia) indicó que, aunque no consideraba necesario introducir cambios sustanciales en el documento, sería conveniente incluir orientaciones sobre cómo comunicar de forma más accesible el cambio climático en los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación.

¿Puede concretar los retos a los que se enfrenta en su Estado Miembro (EM) en cuanto a la inclusión del cambio climático en su planificación de la gestión del riesgo de inundaciones (Flood Risk Management; FRM)? ¿Qué lagunas de conocimiento o incertidumbres existen? Por ejemplo, ¿existen en su país escenarios oficiales de cambio climático que incluyan variables hidrológicas?

La encuesta permite concluir que los principales retos a los que se enfrentan los EM a la hora de incluir el cambio climático en la planificación de la gestión del riesgo de inundación (PGRI) son los siguientes:

La incertidumbre relacionada con el riesgo futuro de inundaciones. Se reconoce la necesidad de continuar reduciendo las incertidumbres en todos los elementos del complejo marco de modelización. Estas incertidumbres dificultan, en el mejor de los casos, la planificación y la adaptación al riesgo futuro de inundaciones y, en el peor, imposibilitan la adopción de medidas concretas ante dicho riesgo.

La escala local. La adaptación requiere información a escala local, cuya resolución no alcanzan los modelos climáticos actuales. Por tanto, se necesita mayor investigación para modelizar los fenómenos de precipitaciones extremas e inundaciones repentinas en el clima actual y futuro, así como para mejorar el análisis y la predicción de las tendencias futuras de este tipo de fenómenos.

La identificación y orientación de herramientas y medidas para una adaptación sólida frente al riesgo futuro de inundaciones. Se requiere una mayor orientación sobre la toma de decisiones y la planificación robusta en un contexto de riesgo de inundación incierto.

El enfoque regional en la producción de factores de cambio climático. Dentro de cada EM es necesario un enfoque regional para la generación de factores de cambio climático que puedan ser utilizados por los profesionales para estimar con agilidad los cambios en los caudales de inundación, las precipitaciones intensas y la elevación del nivel del mar.

Los impactos antropogénicos en los caudales de crecida. Los cambios antropogénicos en las cuencas —como las modificaciones en el uso del suelo— tienen un efecto sobre los extremos hidrológicos. En el

futuro, el uso del suelo de origen antrópico, como la urbanización, podría tener un impacto mayor que el propio cambio climático. Separar los efectos del cambio de uso del suelo y del cambio climático en los caudales de crecida futuros constituye un reto para muchos Estados Miembros.

¿Existen en su país escenarios oficiales de cambio climático que incluyan variables hidrológicas?

Muchas agencias oficiales proporcionan datos de los extremos superior e inferior que permiten analizar posibles cambios a ambos lados del escenario medio de cambio climático. Estos escenarios ofrecen proyecciones asociadas a un incremento de la temperatura media mundial de +2 °C y +4 °C para la década de 2080 respecto a la línea de base de la década de 1990. En al menos cinco EM se emplean factores de aumento de los caudales de crecida y de las precipitaciones intensas, adoptándose con frecuencia un escenario de cambio climático "medio" o "alto" para su aplicación práctica.

En Austria, las tendencias conocidas en los regímenes hidrológicos derivadas del cambio climático se integran en los modelos y las evaluaciones de drenaje para determinar la extensión de las futuras inundaciones y sus periodos de retorno. Las incertidumbres asociadas al cambio climático futuro se han considerado "muy significativas", lo que se traduce en variaciones de los caudales máximos de inundación de entre -4 % y +10 % en algunas zonas (CE, 2016). No obstante, cabe señalar que investigaciones recientes han demostrado que los cambios observados en los caudales de crecida ya superan los atribuibles a la variabilidad natural del sistema (Blöschl *et al.*, 2020), lo que relativiza la afirmación de que la variabilidad natural sería superior a los cambios proyectados por el cambio climático.

De la Tabla 2 se desprende que los países que utilizan factores de cambio climático han adoptado un enfoque marcadamente

preventivo a la hora de incorporar el cambio climático en sus factores para inundaciones fluviales, pluviales y repentinas. Esta orientación se debe, en gran medida, a que muchos EM han basado estos cambios en escenarios de altas emisiones de gases de efecto invernadero (por ejemplo, RCP8.5 o A1B).

En Irlanda, los investigadores optaron por un marco neutro de evaluación climática con el fin de examinar la respuesta de la magnitud de las inundaciones a cambios en la cantidad y la estacionalidad de las precipitaciones anuales (Broderick *et al.*, 2019). A partir de este marco se estableció una tipología de sensibilidades de las cuencas que permite realizar inferencias sobre las propiedades hidroclimatológicas que condicionan la sensibilidad al cambio climático (Broderick *et al.*, 2017). Dicha tipología se complementó con un conjunto de reglas de decisión basadas en descriptores físicos de la cuenca, que permiten extrapolar el tipo de sensibilidad a una muestra más amplia de cuencas, incluyendo aquellas sin aforo o con datos escasos (Broderick *et al.*, 2017).

¿Se le ocurren otras posibles acciones para abordar la necesidad de tener en cuenta el cambio climático en la planificación de la gestión del riesgo de inundación?

El Reino Unido declaró que entre las posibles acciones podrían figurar:

- Las evaluaciones preliminares del riesgo de inundación (EPRI) que tienen en cuenta el cambio climático;
- Cartografía de inundaciones, incluido el cambio climático;
- Planificación y gestión del desarrollo en los Estados miembros para tener en cuenta el cambio climático;
- Sensibilización sobre el cambio climático.

Una acción mencionada por dos estados miembros (Hungría y España) consiste en explorar soluciones de gestión del riesgo de inundación basadas en análisis locales de las Áreas de Riesgo Potencial Significativo de

Inundación (ARPSI) vulnerables, en las que puedan aplicarse acciones que benefician a todos ("*no regret actions*"), basadas en eventos que pueden ocurrir en el peor de los casos. La estrategia consiste en recopilar series de datos de inundaciones a largo plazo —a escala centenaria e incluso milenaria— correspondientes a periodos de calentamiento climático o de mayor actividad de inundaciones, incorporando los eventos extremos ocurridos en el pasado que podrían volver a producirse en el futuro. Estos datos no proceden de modelos climáticos, sino de evidencias directas de los niveles de inundación alcanzados, recogidas tanto en registros históricos como en estudios de paleoinundaciones. Su utilidad es doble: por un lado, proporcionan una referencia directa sobre las posibilidades reales de inundación, contribuyendo a que la población local tome conciencia de sus riesgos específicos y se sienta motivada para afrontarlos; por otro, los datos de eventos extremos pasados pueden emplearse para reducir la incertidumbre de los modelos climáticos o como datos de entrada en modelos hidrológicos distribuidos, en combinación con generadores meteorológicos.

Por su parte, un Estado Miembro (Portugal) señaló que para algunos EM resultaría de gran utilidad disponer de análisis sobre los efectos del cambio climático en cuencas fluviales transfronterizas, así como sobre los impactos del cambio climático en la vida útil de estructuras hidráulicas como las presas.

4.3. Posibles soluciones para resolver las lagunas de conocimiento y desarrollo de herramientas aplicadas

En este capítulo se ofrecen algunas posibles soluciones para contribuir a colmar las lagunas de conocimiento existentes sobre los efectos del cambio climático en la gestión del riesgo de inundación. Entre las principales propuestas destacan las siguientes:

- Abordar el problema de la no estacionariedad de la frecuencia de las

inundaciones en las estimaciones de peligrosidad y riesgo.

- Mejorar el proceso de incorporación de la ciencia del cambio climático a la práctica de la gestión del riesgo de inundación.
- Utilizar una serie de factores relacionados con el cambio climático y su impacto en el riesgo de inundación: un ejemplo de enfoque basado en el riesgo.
- Utilizar herramientas en línea para ofrecer un portal de información sobre inundaciones y precipitaciones en el contexto del cambio climático.

Estas soluciones se desarrollan a continuación.

4.3.1. Tratamiento del problema de la estacionariedad en las estimaciones de la frecuencia de las inundaciones

Hasta la fecha, en la mayoría de los Estados miembros la estimación de la frecuencia de las inundaciones se lleva a cabo utilizando métodos basados en la suposición fundamental de un registro histórico estacionario⁵ para los caudales de inundación y/o las precipitaciones (véase CEH, 2012). El reto que plantea este enfoque reside en que los registros de observación disponibles en Europa —como los aforos de caudales fluviales— son relativamente cortos, generalmente inferiores a 60 años. La variabilidad climática natural presenta ciclos a escala decenal y multidecenal que, sin embargo, no suelen tenerse en cuenta en el análisis estadístico de caudales máximos o precipitaciones extremas.

Reconociendo que los datos observados representan las condiciones del pasado y que podrían no reflejar adecuadamente el comportamiento estadístico futuro —es decir, que los datos podrían ser no estacionarios—, varios países europeos han emprendido estudios de sensibilidad sobre los posibles

cambios futuros en las relaciones entre las precipitaciones extremas y la frecuencia de las inundaciones, mediante el uso de proyecciones de modelos climáticos globales y regionales. El método más habitual consiste en analizar las series de precipitaciones y caudales de crecida para diferentes períodos temporales y comparar las estimaciones de caudales y precipitaciones para distintos cuantiles. Por lo general, esto se realiza cotejando las estimaciones de diseño obtenidas a partir del análisis de frecuencia de inundaciones durante un periodo histórico de referencia (1961-1990) con las correspondientes a un escenario climático futuro simulado (por ejemplo, 2071-2100).

En un cuestionario dirigido a los EM en el marco del primer ciclo de la Directiva de Inundaciones, realizado en 2016, algunos encuestados señalaron que el cambio climático se incorpora de forma indirecta a través de los ciclos de revisión de seis años previstos en la Directiva y del uso de series temporales actualizadas en la modelización (CE, 2016). Sin embargo, este enfoque no contempla adecuadamente el cambio climático, ya que el rango de variación del clima en el pasado reciente —periodo para el que se dispone de observaciones de caudal y precipitación— es limitado en comparación con los cambios previstos en la mayoría de los escenarios de cambio climático. El uso de resultados a escala reducida procedentes de modelos climáticos globales permite capturar mejor las implicaciones del aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero sobre las frecuencias futuras de caudales y precipitaciones.

4.3.2. Mejorar el proceso de incorporación de la ciencia a la práctica de la gestión de los riesgos de inundación

La existencia de grandes incertidumbres en las proyecciones sobre el cambio climático y en

⁵ La estacionariedad es un supuesto común, utilizado en muchas técnicas de series temporales, según el cual los datos son “estacionarios”. Un proceso estacionario tiene

la propiedad de que la media y la varianza no cambian con el tiempo.

las consiguientes estimaciones de peligrosidad de inundaciones pone de manifiesto la necesidad de mejorar la interacción entre la investigación científica y la práctica, incluyendo la toma de decisiones y la formulación de políticas desde la escala local hasta la nacional. Una forma de fortalecer esta relación consiste en crear plataformas científicas y de política pública sobre el cambio climático a escala nacional y/o regional —ya sea paneuropea o de grandes cuencas fluviales transfronterizas—, que sirvan de interfaz entre la ciencia, las administraciones públicas, los gestores del riesgo de inundación y la ciudadanía. Estas plataformas pueden desempeñar un papel clave en la transferencia del conocimiento generado por la investigación climática hacia la toma de decisiones en la gestión del riesgo de inundación. Un ejemplo de ello es la colaboración entre el CSIC y el MITERD en España, que facilita el intercambio de conocimiento entre ciencia, política y práctica, proporcionando un marco general para coordinar los esfuerzos en materia de cambio climático y gestión del riesgo de inundación.

4.3.3. Factores de cambio climático y riesgo de inundación: un enfoque basado en el riesgo

En Inglaterra, la Agencia de Medio Ambiente ha puesto el énfasis en la evaluación de una serie de factores de cambio climático para comprender su impacto sobre el riesgo de inundación. Como se ha señalado anteriormente, existe una elevada incertidumbre en torno a los futuros caudales máximos de inundación y las precipitaciones extremas como consecuencia del cambio climático. En el Reino Unido se han elaborado diversas proyecciones de cambio climático para los caudales de inundación y las precipitaciones, incluyendo una estimación de límite superior que permite evaluar el rango de riesgos con un enfoque más robusto que el proporcionado por un valor único (Environment Agency, 2016, 2020). Este enfoque basado en el riesgo contribuye a gestionar la

incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas y puede complementarse con el uso de series largas de caudales históricos, que permiten incorporar la variabilidad natural del clima y, en cierta medida, anticipar condiciones que podrían materializarse como consecuencia del calentamiento global.

4.3.4. Utilización de herramientas en línea para proporcionar un portal de información sobre inundaciones y precipitaciones en el marco del cambio climático

Una solución es el desarrollo de herramientas en línea a escala europea que proporcionen datos de entrada útiles para la modelización hidrológica, como el aumento de la intensidad de las precipitaciones y de los caudales de inundación bajo distintos escenarios de cambio climático. Un ejemplo de este tipo de herramienta es la IDF_CC (www.idf-cc-uwo.ca), diseñada para su uso en Canadá como un sistema sencillo y flexible de apoyo a la toma de decisiones. Su función es generar información sobre las curvas locales de intensidad-duración-frecuencia (IDF) para cualquier localización del territorio canadiense, incorporando los posibles impactos del cambio climático en una serie de escenarios de emisiones. En el Apéndice A del informe CE (2021) se ofrecen más detalles sobre esta herramienta.

4.3.5. Servicio de Cambio Climático de Copernicus y almacén de datos

El Servicio de Cambio Climático de Copernicus pone a disposición conjuntos de datos de gran utilidad para este fin. En materia de inundaciones costeras, destacan, entre otros, los indicadores de cambio del nivel del agua para la costa europea para el periodo 1977-2100, derivados de proyecciones climáticas futuras, así como las series temporales de oleaje superficial oceánico para la costa europea correspondientes al periodo 1976-2100.

5. Estrategias de Adaptación en España

5.1. Breve resumen del marco normativo

En los últimos años se ha desarrollado un marco legislativo a diferentes niveles con el objetivo de mejorar la gestión de las inundaciones y paliar sus efectos negativos, acompañado de metodologías para evaluar la peligrosidad y el riesgo asociados a estos eventos. Dado que la gestión de los efectos adversos de las inundaciones afecta a todas las administraciones, su organización se articula en tres niveles: local, autonómico y estatal. La administración local interviene en materia de planeamiento urbanístico y protección civil; la autonómica, en ordenación del territorio, protección civil y gestión del dominio público hidráulico en las cuencas intracomunitarias; y la estatal, en protección civil, gestión del dominio público hidráulico en las cuencas intercomunitarias y gestión del dominio público marítimo-terrestre en las inundaciones originadas en zonas de transición o por la elevación del nivel del mar.

Como instrumento de referencia a escala europea, la Comisión Europea aprobó en noviembre de 2007 la Directiva 2007/60/CE sobre evaluación y gestión de las inundaciones, transpuesta a la legislación española mediante el Real Decreto 903/2010. Su implementación supone una oportunidad para mejorar la coordinación interadministrativa en la reducción de daños, centrándose fundamentalmente en las zonas con mayor riesgo, denominadas Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI). En el marco de esta Directiva se elaboraron y aprobaron los primeros Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI) en 2016, sujetos a un proceso de revisión periódica cada seis años, coincidiendo con los ciclos de planificación hidrológica.

La reducción de los impactos de las inundaciones debe ser, además, compatible

con el buen estado ecológico de las masas de agua y la conservación de los hábitats naturales. Ello ha dado lugar a nuevos retos que se concretan en paradigmas legales, científicos, técnicos y sociales que exigen la adopción de esquemas de gestión integral y planificación territorial en las zonas inundables, capaces de integrar las exigencias de la Directiva Marco del Agua (DMA, 2000/60/CE), la Directiva de Inundaciones (2007/60/CE) y la Directiva Hábitats (92/43/CE). La recuperación de la conectividad hidráulica, hidrológica, geomorfológica y ecológica entre el cauce y la llanura de inundación contribuye a mejorar la calidad ambiental de las masas de agua, en consonancia con los criterios establecidos en la DMA y la Directiva Hábitats. En este sentido, resulta necesario potenciar la integración del conocimiento sobre los ecosistemas fluviales bajo la perspectiva de la Directiva Hábitats y reforzar la coordinación con los objetivos ambientales de la DMA, lo que redundará en una gestión más adecuada de los cauces, en la reducción de impactos y en el incremento de la resiliencia de los ecosistemas. Todo ello contribuirá a garantizar un suministro adecuado de agua de calidad y a fortalecer la concienciación ambiental de la sociedad.

Recientemente, el marco normativo relativo en materia de inundaciones se ha visto reforzado. La Ley de Cambio Climático y Transición Energética aprobada en 2021 (Ley 7/2021) es el principal instrumento legal que existe en España para hacer frente a los desafíos del impacto asociado al cambio climático en nuestro territorio. El primer artículo de esta ley especifica la necesidad de *“promover la adaptación a los impactos del cambio climático y la implantación de un modelo de desarrollo sostenible que genere empleo decente y contribuya a la reducción de las desigualdades”*. En particular, el artículo 17 del Título V de la Ley de Cambio Climático y Transición Energética establece que el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) constituye la herramienta básica de

planificación “para fomentar la resiliencia y la adaptación frente al cambio climático, e incluirá la adaptación frente a los impactos en España derivados del cambio climático”, entre los que se encuentra de forma explícita el riesgo de inundaciones. En coherencia con ello, el artículo 19, relativo a la “Consideración del cambio climático en la planificación y gestión del agua”, insta a integrar de manera sistemática la información climática disponible en los procesos de planificación hidrológica y de gestión del riesgo de inundaciones, alineándolos con las políticas sectoriales existentes.

El PNACC establece el marco estratégico de referencia para la adaptación al cambio climático en España, con un enfoque transversal basado en la mejor evidencia científica disponible y orientado a la reducción de la vulnerabilidad y al aumento de la resiliencia de los sistemas naturales y socioeconómicos. Este marco se articula mediante Programas de Trabajo plurianuales que concretan objetivos, líneas de acción, responsables institucionales, indicadores de seguimiento y mecanismos de evaluación.

El Primer Programa de Trabajo del PNACC 2021-2025 representa un hito relevante al operativizar, por primera vez de forma estructurada, las medidas de adaptación en los distintos sectores estratégicos. Entre sus prioridades destacan el fortalecimiento de los sistemas de información climática, la integración de proyecciones de cambio climático en la planificación sectorial, el desarrollo de metodologías de evaluación de riesgos climáticos y la mejora de la gobernanza y coordinación multinivel. En relación con el riesgo de inundación, el programa subraya la necesidad de incorporar escenarios climáticos futuros en la delimitación de zonas inundables, la planificación hidrológica y los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI), así como de reforzar las medidas de adaptación basadas en ecosistemas y las soluciones de carácter preventivo.

La legislación española se inscribe en un movimiento europeo más amplio orientado a dotar de seguridad jurídica a las políticas de adaptación al cambio climático. En este sentido, la Ley Europea del Clima (Reglamento UE 2021/1119) refuerza la obligación de los Estados Miembros de desarrollar e implementar estrategias de adaptación que fortalezcan la resiliencia y reduzcan la vulnerabilidad frente a los efectos adversos del cambio climático, en coherencia con los objetivos climáticos a largo plazo de la Unión Europea.

Con el objetivo de contribuir a este marco normativo y estratégico, el presente informe revisa de manera crítica la información disponible sobre adaptación y reducción del riesgo de inundación en España, teniendo en cuenta la todavía limitada integración de los efectos del cambio climático en el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) y en los instrumentos de planificación asociados. Esta situación refleja, en gran medida, la persistencia de una brecha entre los requerimientos normativos y sociopolíticos y el grado de madurez del conocimiento científico-técnico, brecha que este informe pretende contribuir a reducir mediante una síntesis rigurosa y aplicada de la evidencia disponible.

La Tabla 3 recoge el marco normativo vigente en materia de inundaciones en España y Europa. A pesar de la abundante legislación existente, persisten importantes retos en su aplicación efectiva. Entre ellos destaca la necesidad de reducir las fuertes presiones de ocupación que sufren las zonas limítrofes a los cauces, con el fin de mitigar los daños derivados de las inundaciones por avenida. Asimismo, es preciso incorporar sistemáticamente las zonas inundables del SNCZI en los Planes Generales de Ordenación Urbana (PGOU) de los municipios, y mejorar su delimitación mediante estudios de peligrosidad de detalle. Resulta igualmente necesario especificar con claridad qué usos del suelo son admisibles en las zonas inundables del territorio nacional, siendo

recomendable que dichos usos queden regulados mediante una norma con rango de Ley estatal.

De cara a los próximos años, uno de los principales retos será armonizar los distintos PGRI de las Demarcaciones Hidrográficas con los Planes de Ordenación del Territorio (POT) de las Comunidades Autónomas y con los PGOU de los ayuntamientos, avanzando al mismo tiempo en la actualización de las Áreas

de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI). Por último, la gestión de las inundaciones en las demarcaciones fronterizas requiere un enfoque transfronterizo que garantice la coordinación con los Estados Miembros que comparten demarcaciones hidrográficas —en particular Francia y Portugal—, tanto en la elaboración de mapas de peligrosidad como en el intercambio de información en el marco de la Directiva de Inundaciones.

Tabla 3: Referencias a las inundaciones en la legislación europea y española

Normativa en materia de inundación	Definición/Artículos	Alcance	A destacar
Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas	Artículos 1.e); Artículo 4.3.a) iv); Artículo 4.6; Artículo 11.3.I); Artículo 11.5; Anexo II 2.4.)	Europeo	Artículo 4 donde se indica que el deterioro temporal del estado de las masas de agua no constituirá infracción de las disposiciones de la presente Directiva si se debe a causas naturales o de fuerza mayor que sean excepcionales o no hayan podido preverse razonablemente, en particular graves inundaciones
Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2007 relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación	Toda la Directiva	Europeo	Se han de renovar en cada ciclo de planificación hidrológica: Mapas de peligrosidad por inundaciones y los mapas de riesgo de inundación
Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Aguas	Artículo 11.: "Las zonas inundables	Español	El Gobierno, por Real Decreto, podrá establecer las limitaciones en el uso de las zonas inundables que estime necesarias para garantizar la seguridad de las personas y bienes

Normativa en materia de inundación	Definición/Artículos	Alcance	A destacar
Real Decreto 849/1986, de 11 de abril por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los Títulos Preliminar, I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas	Artículo 14.: "1. Los terrenos que puedan resultar inundados durante las crecidas no ordinarias de los lagos, lagunas, embalses, ríos o arroyos conservarán la calificación jurídica y la titularidad dominical que tuvieran	Español	Elaboración de zonas de flujo preferente y vías de intenso desagüe, la elaboración del SNCZI, la creación de una Comisión Técnica de Seguridad de presas
Real Decreto 927/1988, de 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, en desarrollo Títulos II y III de la Ley de Aguas	Artículo 59.3.: "Situaciones hidrológicas extremas	Español	El Comité Permanente será Órgano de información y asesoramiento de las autoridades competentes en materia de protección civil en las emergencias por inundaciones
Ley 10/2001, de 5 de Julio, del Plan Hidrológico Nacional	Artículo 28.2 y 3.: "Protección del dominio público hidráulico y actuaciones en zonas inundables	Español	Corregir las situaciones que afecten a la protección del dominio público hidráulico, incluyendo la eliminación de construcciones e instalaciones que fuera necesario
Real Decreto 115/2010 de 22 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de prevención frente a inundaciones	Toda la Directiva: seis capítulos divididos en 18 artículos y un anexo	Portugués	El decreto introduce en el Sistema legal Portuguesa la Directiva 2007/EC y aporta un plan de gestión del riesgo
Ley de Compromiso Nacional con el Medio Ambiente (LENE) o Grenelle I	Artículo 221 en particular de esta ley dio lugar a la creación del Capítulo VI del Código Ambiental, titulado "Evolución y gestión de riesgos", y que contiene los artículos L.566-1 a L.566-13	Francés	Aplicación incompleta de la Directiva 2007/60/CE

Normativa en materia de inundación	Definición/Artículos	Alcance	A destacar
Transposición por vía reglamentaria, mediante decreto n.º 2011-227 de 2 de marzo	Artículo 11.: “Las zonas inundables	Francés	Transposición completa de la Directiva 2007/60/EC al derecho francés
Planes hidrológicos	Los temas importantes incluidos en los planes relacionados con gestión de inundaciones, alteraciones hidromorfológicas, caudales ecológicos, cambio climático, etc. Esta ley especifica la necesidad de “... <i>promover la adaptación a los impactos del cambio climático y la implantación de un modelo de desarrollo sostenible que genere empleo decente y contribuya a la reducción de las desigualdades</i> ”	Nivel cuenca, España	En vigor el plan 2016-2021 y en elaboración el siguiente plan 2021-2027
La Ley de Cambio Climático y Transición Energética	En particular, en el artículo 17 del Título V de esta ley se establece que el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) es la herramienta básica de planificación para fomentar la resiliencia y la adaptación frente al cambio climático, e incluirá la adaptación frente a los impactos en España derivados del cambio climático, entre los que se encuentra el riesgo de inundaciones.	Español	Ley aprobada en 2021 (Ley 7/2021)
Ley Europea del Clima	<i>Desarrollar e implementar estrategias de adaptación para fortalecer la resiliencia y reducir la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático</i>	Europeo	2021/1119/EC

5.2. Principios básicos sobre adaptación y mitigación

La adaptación y la mitigación son dos conceptos fundamentales en el ámbito del cambio climático y la sostenibilidad ambiental. La adaptación hace referencia a la capacidad de un sistema para ajustarse a las condiciones cambiantes del clima y a los eventos extremos, minimizando los daños esperados. En la práctica, implica implementar medidas para reducir la vulnerabilidad de las personas y de los bienes materiales e inmateriales frente a los daños causados por inundaciones, aumentando la resiliencia de las cuencas y los tramos fluviales mediante una gestión sostenible que respete la dinámica natural del cauce y minimice la exposición y la vulnerabilidad de los elementos en riesgo. La mitigación, por su parte, se refiere a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y a otras acciones orientadas a disminuir la magnitud del cambio climático y su incidencia sobre los procesos hidrológicos extremos, como el fomento de los sumideros de carbono. Aplicada a la gestión hidrológica, implica, por ejemplo, la adopción de tecnologías limpias o soluciones basadas en la naturaleza que reduzcan la huella ambiental en la gestión de cuencas y contribuyan a limitar el calentamiento global.

El desarrollo de políticas de adaptación y mitigación no es sencillo y constituye, en sí mismo, un campo relevante de investigación. Como se ha descrito en las secciones anteriores, existen elevadas incertidumbres en las proyecciones de caudales máximos en España, relacionadas fundamentalmente con la alta variabilidad entre los modelos climáticos utilizados y los escenarios considerados, así como con las limitaciones inherentes a los enfoques descendentes (top-down) de modelización hidrológico-hidráulica. Ante esta situación, las estrategias de adaptación y mitigación deben incorporar estas incertidumbres y considerar el rango completo de posibles escenarios, tanto por parte de los

investigadores como de los organismos responsables de la toma de decisiones.

En el diseño de medidas de adaptación frente al riesgo de inundación es necesario establecer objetivos que tengan en cuenta los distintos grados de incertidumbre asociados a las proyecciones para diferentes horizontes temporales, sin que ello sea óbice para avanzar en la implementación de medidas que contribuyan a reducir los riesgos. En este sentido, el cambio climático constituye un factor que modifica y amplifica los riesgos climáticos existentes, pero también una oportunidad para fortalecer las capacidades de respuesta adaptativa de las cuencas vertientes frente a las inundaciones, a través de: (i) la mejora en la evaluación del riesgo, (ii) el avance en el mantenimiento, la renovación y la actualización de las normas de diseño de infraestructuras, y (iii) la introducción de medidas basadas en la naturaleza que permitan un desarrollo sostenible de la cuenca vertiente.

En las últimas décadas ha emergido un cambio de paradigma en la gestión del riesgo de inundación, que otorga un mayor protagonismo a las llanuras de inundación, tradicionalmente limitadas por infraestructuras como motas y diques transversales (ClimateADAPT, 2015). En particular, la recuperación de humedales y la reconversión de dichas llanuras en espacios de uso recreativo posibilita una mayor laminación de los picos de inundación, mejora el almacenamiento de agua y genera otros servicios ecosistémicos de valor. En esta misma línea, el estado del conocimiento científico y técnico pone de relieve el papel fundamental del transporte de sedimentos en la dinámica fluvial. La eliminación de barreras transversales en los cauces favorece el flujo libre de sedimentos, minimiza los efectos localizados de incisión del cauce y mejora el estado ecosistémico de los sistemas hídricos. Por otro lado, muchas de las infraestructuras hidráulicas construidas para contener o laminar los picos de descarga datan de

mediados del siglo XX y pueden presentar deficiencias por falta de mantenimiento (Ballesteros-Cánovas *et al.*, 2016) o criterios de diseño que no se ajustan a las condiciones hidrológicas presentes y futuras. Es necesario, por tanto, implementar medidas de mantenimiento, evaluación y monitorización de dichas estructuras, especialmente en aquellas zonas donde su eliminación no resulte aconsejable.

La Península Ibérica se caracteriza, además, por un elevado porcentaje de cauces efímeros y torrenciales, cuya dinámica presenta diferencias significativas respecto a la de las grandes cuencas fluviales, lo que hace que las medidas de adaptación no sean del todo análogas. Estos cauces presentan un régimen hídrico intermitente, pero con una elevada capacidad de transporte de caudal líquido y sólido durante episodios de lluvia intensa o de escorrentía. La velocidad y la energía con que el agua discurre por estos cauces durante eventos extremos generan procesos de erosión intensa del cauce y de las áreas circundantes, con arrastre de sedimentos, rocas y materiales (Vázquez-Tarrío *et al.*, 2024), lo que los hace especialmente propensos a inundaciones repentinas que representan un riesgo significativo para las comunidades y las infraestructuras próximas.

Dada la aparición súbita de estos eventos y su rápida evolución, la planificación del uso del suelo constituye la herramienta más eficaz para reducir la exposición y los daños asociados (EXCIMAP, 2007). En concreto, la elaboración de mapas de usos del suelo basados en la peligrosidad y el riesgo de inundación, que restrinjan la implantación de nuevos asentamientos en zonas de alta exposición, es el instrumento más adecuado para este fin.

A escala de cuenca, la implementación de medidas incluye el mantenimiento de una

cubierta forestal saludable en los ámbitos donde esta sea la vocación natural del territorio. No obstante, esta medida puede tener un efecto paliativo en eventos ordinarios y moderados, pero no impedirá la ocurrencia y el desarrollo de eventos extremos (Bathurst *et al.*, 2017). Una vez más, el conocimiento de los eventos extremos representa el mayor desafío científico en este ámbito.

Desde hace unos años, se han implementado sistemas de alerta temprana como herramientas de adaptación al riesgo de inundaciones. Los sistemas de alerta temprana pueden ser herramientas fundamentales en la gestión del riesgo de inundaciones, ya que permiten anticipar la llegada de eventos extremos y tomar medidas preventivas para reducir al máximo los daños y proteger a la población. Este tipo de medidas es útil en grandes cuencas fluviales; sin embargo, en cauces efímeros y torrenciales, debido a su dinámica, el tiempo de alerta es de minutos, imposibilitando la implementación de medidas preventivas. Además, los modelos climáticos se han mostrado inadecuados para tal fin, ya que son incapaces de predecir la ocurrencia de fenómenos de tormenta o lluvia de alta intensidad y corta duración (ANYWHERE Project, 2018⁶). Los sistemas de alerta temprana, deben, en cualquier caso, ampliarse con medidas de capacitación, sensibilización, comunicación del riesgo.

En definitiva, la recuperación y puesta en valor de las llanuras de inundación y las zonas aledañas a los cauces constituye una propuesta clara por parte de los gestores para devolver espacio al río. Las llanuras aluviales y, en particular, los humedales y zonas de uso recreativo, pueden desempeñar un papel relevante en el almacenamiento de agua y la laminación de los picos de inundación. Esta práctica, combinada con una zonificación más precisa de la peligrosidad de inundación que

⁶ http://gebrada.upc.es/anywhere/the-project/wp-content/uploads/docs/D2.2_PUBLIC.pdf

incorpore la variabilidad climática de los eventos extremos, debería configurarse como una herramienta robusta para minimizar los impactos futuros. A ello debe sumarse la mejora de las técnicas constructivas, orientada a que los edificios y las infraestructuras sean más resistentes frente a los eventos climáticos extremos.

5.3. Análisis recientes de la vulnerabilidad y exposición en España

La comunidad científica española reconoce que la reducción de la vulnerabilidad constituye una prioridad para disminuir los riesgos asociados a eventos de inundación extrema en las próximas décadas (Vargas y Cánovas-García, 2022). Durante las últimas décadas se han sucedido los esfuerzos para mejorar su caracterización, tanto por parte de la comunidad científica como de las distintas instituciones encargadas de la gestión hidrológica. Los primeros trabajos en España centrados en el estudio de la vulnerabilidad frente a inundaciones se orientaron a determinar los elementos expuestos y a combinar esta información con indicadores socioeconómicos (Ribera, 2004; Arranz, 2008). A través de la evaluación temporal de estos indicadores, algunos investigadores han señalado un posible aumento de la exposición, especialmente en el litoral mediterráneo (Olcina *et al.*, 2016), asociado a la ocupación incontrolada de las llanuras de inundación por infraestructuras, espacios de ocio y viviendas, junto al impacto del cambio climático. Aunque estos trabajos apuntan a una problemática existente y progresivamente agravada, abordan únicamente la dimensión física de la vulnerabilidad, limitándose al análisis estructural de la exposición de elementos y población.

Desde un punto de vista científico-técnico, existen dos desafíos que han comenzado a abordarse en los últimos años. Por un lado, se hace necesario enfocar los estudios de riesgo desde una perspectiva integradora, que conciba la vulnerabilidad como función de la

exposición, la susceptibilidad y la capacidad adaptativa de los sistemas socioeconómicos. En este sentido, cobra relevancia el concepto de socio-hidrología, disciplina que contextualiza la dinámica de las llanuras aluviales habitadas como sistemas profundamente entrelazados y dinámicos, en los que una comunidad que comienza a asentarse en una zona propensa a inundaciones puede llegar a adaptarse y condicionar sus actividades a dichos procesos (Di Baldassarre *et al.*, 2013; Tian *et al.*, 2025). Una visión más integradora de la vulnerabilidad permitiría comprender mejor las interacciones socio-hidrológicas y, por tanto, mejorar la capacidad de adaptación y reducción de impactos (Bodoque *et al.*, 2016). Por otro lado, son todavía escasos los ejemplos en los que los estudios de vulnerabilidad se integran en los instrumentos de ordenación del territorio (Vargas y Cánovas-García, 2022).

Para facilitar dicha integración, algunos autores han desarrollado bases de datos abiertas y cartografías donde se analiza la vulnerabilidad a escala municipal. Es el caso de Málaga, donde Perles *et al.* (2017) construyeron un índice basado en más de 30 indicadores. Por su parte, Morales *et al.* (2021) abordaron la dimensión social de la susceptibilidad, proponiendo un Índice Compuesto de Vulnerabilidad Social (ICVS) a partir de 18 indicadores sociodemográficos.

Recientemente, Aroca-Jiménez *et al.* (2022) elaboraron un Índice Integrado de Vulnerabilidad Multidimensional (IMVI) a escala regional para Castilla y León, mediante una aproximación holística que incorpora todas las dimensiones de la vulnerabilidad — social, económica, ecosistémica, física, institucional y cultural— y sus componentes — exposición, susceptibilidad y resiliencia—. El estudio analiza además las incertidumbres asociadas e identifica patrones espaciales a escala regional desagregados a nivel municipal. Esta contribución supone un

avance metodológico replicable en otras regiones e incluso a escala de país.

Desde un punto de vista institucional, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico ha publicado en los últimos años diversas guías metodológicas orientadas a minimizar los daños por inundación: (i) Evaluación de la resiliencia de los núcleos urbanos frente al riesgo de inundaciones: redes, sistemas urbanos y otras infraestructuras (MITECO, 2019a); (ii) *Guía de adaptación al riesgo de inundaciones: explotaciones agrícolas y ganaderas* (MITECO, 2019b); (iii) *Recomendaciones para la construcción y rehabilitación de edificaciones en zonas inundables* (MITECO, 2019c); y (iv) *Guía de adaptación al riesgo de inundaciones: sistemas urbanos de drenaje sostenible* (MITECO, 2019d). Entre los ejemplos de aplicación institucional que incorporan componentes de vulnerabilidad destacan el Plan Especial de Protección Civil de Castilla-La Mancha (PRICAM, 2015), el Plan de Acción Territorial de Carácter Sectorial sobre Prevención del Riesgo de Inundaciones en la Comunitat Valenciana (PATRICOVA) y el Plan Especial de Emergencias por Inundaciones en Cataluña (INUNCAT).

5.4. Estrategias de adaptación frente al riesgo de inundaciones

La adaptación frente a la peligrosidad y el riesgo de inundación requiere un enfoque multidisciplinar que contemple intervenciones diversas articuladas a partir de una planificación territorial adecuada. Estas medidas abarcan la zonificación de la peligrosidad y el riesgo, las medidas estructurales de protección, los sistemas de alerta temprana, las soluciones basadas en la naturaleza, así como los mecanismos de protección social, financiera —incluyendo los sistemas de seguros— e institucional. La combinación más adecuada de medidas puede variar entre zonas y escalas de actuación, en función de los niveles de riesgo,

la disponibilidad de financiación y la voluntad política.

En términos generales, se recomiendan las siguientes medidas o estrategias, agrupadas en seis categorías: (i) medidas institucionales; (ii) mejora del conocimiento de la peligrosidad y su zonificación; (iii) medidas orientadas a la identificación de la vulnerabilidad y el impacto; (iv) medidas multisectoriales, estructurales y no estructurales; (v) medidas basadas en sistemas de alerta temprana; y (vi) medidas de comunicación social.

Medidas Institucionales:

- **Fortalecimiento del contexto institucional:** Se propone fortalecer las estrategias de comunicación entre los organismos públicos de gestión del riesgo y las instituciones de planificación territorial
- **Alineación con estrategias supranacionales:** Considerar los principios de la Estrategia del Agua para la Transición Ecológica en la adaptación y mejora de la resiliencia del recurso hídrico y de sus usos frente al cambio climático, incorporándolos en la identificación, evaluación y selección de actuaciones en los planes hidrológicos, forestales y de gestión del agua.
- **Instrumentos financieros:** Elaborar un plan de financiación de actuaciones que garantice los recursos necesarios para abordar los riesgos identificados, e incluir asesoramiento sobre la cobertura de seguros a particulares y empresas, así como sobre la gestión de daños en caso de siniestro.

Medidas para mejorar el conocimiento de la peligrosidad:

- **Mayor colaboración científico-técnica:** La existencia de grandes incertidumbres en las proyecciones del cambio climático y en las consiguientes estimaciones de peligrosidad de inundación pone de

manifiesto la necesidad de mejorar la interacción entre la investigación científica y la práctica, incluyendo a quienes toman decisiones y formulan políticas desde la escala local hasta la nacional.

- **Mejorar el conocimiento del comportamiento de las cuencas fluviales y torrenciales frente a eventos extremos:** Se propone fortalecer los esfuerzos orientados a determinar, mediante registros históricos o paleohidrológicos, el comportamiento de las cuencas frente a eventos extremos, aportando información sobre escenarios plausibles y contrastados. Esta información puede regionalizarse y proporcionar datos cuantitativos que permitan evaluar el grado de certidumbre de las aproximaciones basadas en modelos hidrológicos y en datos de eventos extremos del pasado.
- **Inclusión de la posibilidad de coalescencia de procesos/eventos extremos:** Se propone profundizar en la comprensión de los procesos y mecanismos desencadenantes de eventos en los que la confluencia de procesos puede ser determinante, particularmente en zonas de montaña o de alta torrencialidad (Ballesteros-Cánovas *et al.*, 2025).
- **Redefinición probabilística de eventos extremos:** La extrapolación de las series de caudales disponibles en España para estimar la probabilidad de caudales asociados a periodos de retorno de 100 y 500 años presenta serias limitaciones metodológicas con importantes implicaciones económicas. Se recomienda redefinir dichas estimaciones incorporando tanto datos sistemáticos como no sistemáticos —históricos y de paleoinundaciones— que cubran, al menos, el periodo temporal de análisis. Cuando esto no sea factible, se recomienda recurrir a métodos de

regionalización de extremos. Si tampoco esto fuera posible, se recomienda especificar claramente en los planes de gestión las limitaciones del uso de extrapolaciones estadísticas, haciendo hincapié en su impacto sobre las incertidumbres resultantes y en la incapacidad de estos métodos para representar comportamientos no lineales y complejos de las cuencas en dichos horizontes temporales.

- **Mejorar métodos para la zonificación de la peligrosidad:** Se recomienda incorporar en los mapas de peligrosidad las incertidumbres asociadas a los parámetros de entrada (Bodoque *et al.*, 2023), así como información sobre los potenciales cambios geomorfológicos del cauce y los posibles efectos de la carga sedimentaria y leñosa (Vázquez-Tarrío *et al.*, 2024). Sería deseable que estos documentos incluyeran además información empírica sobre la extensión e impacto de eventos extremos pasados y, en particular, que comunicaran cómo el cambio climático podría modificar directamente los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación.
- **Mejorar el entendimiento entre el impacto del Cambio Climático y las inundaciones:** Se recomienda continuar monitorizando y evaluando la evolución futura de los parámetros climáticos asociados a las inundaciones, y realizar el seguimiento de los impactos derivados del cambio climático con el fin de ajustar las actuaciones en función del avance de dichos impactos y de las mejoras en el conocimiento científico.

Medidas para identificar y reducir la vulnerabilidad y la exposición:

- **Inclusión de modelos de vulnerabilidad multidimensional en los análisis de riesgo** basados en el enfoque definido por el IPCC (2021). Se recomienda anticiparse a los impactos previsibles del cambio

climático, identificando y analizando el nivel de exposición y la vulnerabilidad de las actividades socioeconómicas y los ecosistemas, y desarrollando medidas que reduzcan dicha exposición y vulnerabilidad. Este análisis prestará especial atención a los fenómenos climáticos extremos, considerando su probabilidad de ocurrencia, intensidad e impacto, y se llevará a cabo mediante enfoques inclusivos e integradores (Aroca-Jiménez *et al.*, 2022).

- **Aumento de la resiliencia, la adaptación y la mitigación mediante medidas basadas en la naturaleza.** Se recomienda incluir actuaciones orientadas a mejorar la infiltración en las cuencas vertientes — donde se genera la escorrentía y el caudal líquido y sólido— y a fortalecer la resiliencia de las masas de agua. En el marco de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación, se recomienda implementar y reforzar medidas de control de avenidas mediante actuaciones de corrección hidrológico-forestal y prevención de la erosión. En este ámbito, se sugiere tomar como referencia las recomendaciones recogidas en el informe *EEA Report No 01/2021: Nature-based solutions in Europe: Policy, knowledge and practice for climate change adaptation and disaster risk reduction*.

Medidas multisectoriales:

- **Impacto en el sector agrícola.** Identificar y gestionar los riesgos hidroclimáticos en relación con su impacto sobre los cultivos, las necesidades agronómicas del riego, el consumo de agua para refrigeración de centrales térmicas y nucleares, y demás usos del agua. Incorporar en la planificación los impactos derivados del cambio climático sobre las tipologías de las masas de agua superficial y subterránea y sus condiciones de referencia.

- **Impactos ecosistémicos.** Determinar la adaptación necesaria de los usos del agua compatible con los recursos disponibles, una vez considerados los impactos del cambio climático, y con el mantenimiento del buen estado ecológico de las masas de agua.
- **Impacto en el ciclo sedimentario.** Incorporar en la planificación los impactos derivados de la retención de sedimentos en los embalses y las soluciones para su movilización, con el doble objetivo de mantener la capacidad de regulación de los propios embalses y de restaurar el transporte de sedimentos hacia los sistemas costeros, contribuyendo así a frenar la regresión de las playas y la subsidencia de los deltas.
- **Evaluación de la resiliencia de las infraestructuras existentes frente al cambio climático.** En un contexto en el que muchas estructuras fueron construidas a mediados del siglo XX, resulta necesario reevaluar su fiabilidad, especialmente aquellas que se encuentran en la fase final de su ciclo de vida —en particular en zonas de torrentes de montaña—, dado que su fallo puede desencadenar graves consecuencias (p. ej., el desastre del Camping Las Nieves en Biescas, 1996; Benito *et al.*, 1998). Se recomienda implementar un plan de monitorización y evaluación de dichas estructuras a escala de cuenca.

Medidas basadas en sistemas de alerta tempranas:

- **Sistemas de alerta temprana.** Los sistemas de alerta temprana son esenciales a escala de cuenca hidrográfica en España, aunque pueden presentar limitaciones cuando se aplican a cuencas torrenciales o torrentes de montaña. Deben evaluarse los parámetros hidrológicos basados tanto en el pronóstico meteorológico como en la estimación del

pico del hidrograma. El acoplamiento de modelos de predicción meteorológica con modelos hidrológicos e hidráulicos puede resultar de interés, pero su aplicación debe validarse en cada caso, especialmente a partir de información de eventos extremos históricos. No obstante, dicho acoplamiento implica necesariamente simplificaciones, por lo que sus resultados deben ser interpretados con cautela por especialistas. En este contexto, las técnicas basadas en inteligencia artificial podrían contribuir a mejorar la capacidad predictiva de estos sistemas. Debe reconocerse que, en la actualidad, estos sistemas presentan un elevado nivel de incertidumbre, tal y como se describe en el informe 2.5 del proyecto ANYWHERE. Los sistemas de alerta temprana deberían complementarse con medidas de capacitación, sensibilización y comunicación del riesgo.

6. Conclusiones generales

A la luz del análisis realizado, las conclusiones deben ir más allá de la enumeración de tendencias climáticas y centrarse en cómo estas evidencias obligan a replantear el marco conceptual y operativo de los análisis y medidas que se plantean para dar cumplimiento a la Directiva 200//60/C: Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) y revisión de las Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI), Mapas de Peligrosidad y Riesgo (MAPRI) y Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI). El elemento clave no es únicamente qué está cambiando, sino cómo esos cambios afectan a los supuestos sobre los que se ha construido históricamente la gestión del riesgo de inundaciones en España.

Las observaciones disponibles indican que el régimen hidroclimático ya no puede considerarse estrictamente estacionario. Aunque la atribución precisa de las tendencias detectadas en magnitud y frecuencia de las inundaciones presenta incertidumbres, el conjunto de señales es coherente con un

contexto de calentamiento sostenido, mayor variabilidad y posible intensificación de extremos. En España, esta evolución se manifiesta de forma heterogénea: ligeros incrementos en la frecuencia de precipitaciones máximas en el sector mediterráneo, descensos en áreas del interior y sur peninsular, y modificaciones en los regímenes nivales de montaña, donde el adelanto del deshielo y la reducción de los máximos primaverales están alterando la estacionalidad de las avenidas. A ello se suman episodios recientes de gran severidad en la fachada mediterránea que han generado daños significativos, evidenciando que la peligrosidad no puede evaluarse exclusivamente a partir de tendencias medias, sino atendiendo también a eventos de baja frecuencia, pero alto impacto.

Las proyecciones climáticas regionalizadas refuerzan esta lectura compleja. Para el horizonte 2041-2070, bajo escenarios de emisiones elevadas, se anticipan aumentos de precipitación extrema invernal en diversas demarcaciones, con incrementos que en algunos sectores podrían situarse entre el 5 % y el 25 %, así como señales de intensificación en episodios asociados a periodos de retorno elevados en determinadas zonas mediterráneas. Sin embargo, la respuesta no es uniforme entre dominios hidroclimáticos y, en ocasiones, los modelos muestran divergencias incluso entre ARPSI próximas entre sí. Esta variabilidad no debe interpretarse como una limitación insalvable, sino como un recordatorio de que la incertidumbre es inherente al sistema y debe incorporarse explícitamente a la planificación.

En este contexto, el mensaje principal para la EPRI no es únicamente que puedan aumentar determinadas precipitaciones extremas, sino que están cambiando la distribución espacial de la peligrosidad, la estacionalidad de los procesos y su interacción con los factores territoriales. El riesgo de inundación resulta de la combinación entre peligrosidad, exposición y vulnerabilidad. En España, el crecimiento urbano en llanuras aluviales y zonas costeras, la concentración de infraestructuras estratégicas y la transformación de los usos del suelo han incrementado notablemente la exposición. Las áreas mediterráneas, especialmente sensibles a DANAs y episodios convectivos intensos, concentran hoy una

elevada vulnerabilidad asociada a la presión urbanística y a la impermeabilización del territorio.

Por ello, la revisión de las ARPSI no puede limitarse a trasladar incrementos porcentuales de precipitación extrema sobre cartografías existentes. Debe adoptar una visión sistémica que integre, junto a las señales climáticas, la evolución demográfica, los cambios en la cobertura vegetal, la desertificación, los incendios forestales y la alteración de la capacidad natural de laminación de las cuencas. La expansión forestal en determinadas áreas interiores puede haber reducido la escorrentía en eventos ordinarios, mientras que la urbanización en zonas costeras incrementa la respuesta hidrológica ante tormentas intensas, dinámicas que pueden amplificar la severidad de los eventos extremos incluso cuando el caudal medio anual disminuye.

El tercer ciclo ofrece, por tanto, la oportunidad de avanzar desde una evaluación predominantemente retrospectiva hacia un enfoque prospectivo y adaptativo. Evaluar cualitativamente el cambio en el régimen de caudales requiere no solo analizar extremos de precipitación, sino también identificar cuencas particularmente sensibles, aquellas donde pequeñas variaciones en la intensidad de lluvia o en las condiciones antecedentes pueden producir incrementos significativos en la magnitud de las avenidas. Esta priorización resulta esencial para orientar las modelizaciones hidrológicas detalladas en el ámbito de cada ARPSI.

En este proceso cobra especial relevancia superar la dependencia exclusiva de series instrumentales relativamente cortas. Muchas estaciones de aforo no superan las cinco o seis décadas de registros, lo que limita la capacidad para capturar la variabilidad natural de largo plazo y la recurrencia de eventos extraordinarios. España dispone, sin embargo, de un amplio acervo documental e histórico, así como de estudios paleohidrológicos que permiten reconstruir crecidas significativas ocurridas antes de la era instrumental. Integrar este conocimiento amplía la ventana temporal de análisis y aporta una perspectiva imprescindible para contextualizar los eventos recientes.

Los registros históricos y preinstrumentales no solo enriquecen el análisis estadístico, sino que proporcionan análogos naturales de configuraciones atmosféricas y patrones hidrológicos extremos que pueden repetirse en el futuro bajo condiciones climáticas distintas. En el ámbito mediterráneo, donde los episodios más dañinos suelen estar asociados a configuraciones de baja frecuencia, pero gran impacto, este enfoque resulta particularmente valioso. El pasado debe entenderse no solo como referencia estadística, sino como laboratorio natural que ayuda a identificar escenarios límite y a calibrar la respuesta de las cuencas frente a situaciones excepcionales.

La incorporación de series largas contribuye además a revisar críticamente el uso de periodos de retorno clásicos en un contexto no estacionario. Las estimaciones basadas únicamente en datos recientes pueden subestimar la probabilidad de ocurrencia de eventos de gran magnitud. La ampliación temporal mediante fuentes históricas mejora la estabilidad de las estimaciones y permite detectar posibles fases de mayor actividad hidrológica, información fundamental para diseñar medidas proporcionadas al riesgo real.

Paralelamente, la integración de escenarios múltiples en la revisión de las ARPSI —desde trayectorias de emisiones intermedias hasta escenarios de altas emisiones— permite considerar un abanico de futuros plausibles y diseñar medidas robustas frente a distintos niveles de calentamiento. La señal de aumento de precipitaciones extremas en zonas costeras, especialmente en el Mediterráneo, refuerza la necesidad de revisar los perímetros de inundabilidad, actualizar las curvas de intensidad-duración-frecuencia y replantear los supuestos basados en estacionariedad.

En consecuencia, la EPRI debe evolucionar hacia un instrumento dinámico que no solo identifique las áreas actualmente afectadas por inundaciones significativas, sino también aquellas que podrían experimentar incrementos sustanciales de riesgo bajo escenarios climáticos y territoriales plausibles. Esto exige integrar análisis climáticos regionalizados, factores de ajuste, estudios de sensibilidad hidrológica y una mayor coordinación entre la planificación hidrológica,

la ordenación del territorio y las políticas de adaptación.

Finalmente, las estrategias de adaptación deben combinar soluciones estructurales con enfoques basados en la naturaleza y con medidas de reducción de la exposición. La restauración de llanuras de inundación, la recuperación de humedales, la mejora de las normas constructivas y la planificación territorial preventiva son elementos esenciales para reducir la vulnerabilidad futura. En un escenario de cambio climático en el que persistirá un riesgo residual incluso bajo trayectorias de mitigación ambiciosas, la resiliencia territorial será tan determinante como la mejora en la estimación de la peligrosidad.

En síntesis, España afronta un contexto de creciente complejidad hidrológica, con

señales regionalmente diferenciadas, posible intensificación de extremos y elevada incertidumbre. La revisión de la EPRI y de las ARPSI debe reflejar esta realidad incorporando una perspectiva prospectiva, no estacionaria y territorialmente integrada, apoyada tanto en la mejor ciencia climática disponible como en el conocimiento histórico de largo plazo. Solo mediante esta aproximación será posible anticipar adecuadamente la evolución del riesgo y avanzar hacia una gestión verdaderamente adaptativa y robusta.

7. Referencias Bibliográficas

AEMET. 2024. Informe técnico sobre el episodio de precipitaciones extremas del 29–31 de octubre de 2024 en la Comunidad Valenciana. Agencia Estatal de Meteorología.

Albalat, A., Trapero, L., Lemus, M., & Pons, M. (2022). Indicadores para el análisis de la evolución del espesor del manto de nieve en las estaciones de esquí: el caso de Andorra. <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/14044>

Alfieri, L., Dottori, F., Betts, R., Salamon, P., & Feyen, L. (2018). Multi-model projections of river flood risk in Europe under global warming. *Climate*, 6(1), 6.

Ali, H., & Mishra, V. (2018). Contributions of dynamic and thermodynamic scaling in subdaily precipitation extremes in India. *Geophysical Research Letters*, 45, 2352–2361. <https://doi.org/10.1002/2018GL077065>.

Alonso-González, E., López-Moreno, J.I., Navarro-Serrano, F., Sanmiguel-Vallelado, A., Revuelto, J., Domínguez-Castro, F., & Ceballos, A. (2020). Snow climatology for the mountains in the Iberian Peninsula using satellite imagery and simulations with dynamically downscaled reanalysis data. *International Journal of Climatology*, 40(1), 477–491.

Alonso-González, E., López-Moreno, J.I., Navarro-Serrano, F.M., & Revuelto, J. (2019). Impact of North Atlantic oscillation on the snowpack in Iberian Peninsula mountains. *Water*, 12(1), 105.

Aroca-Jiménez, E., Bodoque, J.M., García, J.A., & Figueroa-García, J.E. (2022). Holistic characterization of flash flood vulnerability: Construction and validation of an integrated multidimensional vulnerability index. *Journal of Hydrology*, 612, 128083.

Arranz Lozano, M. (2008). Flood risks and urban vulnerability: some Spanish case studies. *Estudios Geográficos*, 69(265), 385–416.

Bacer, S., Christoudias, T., & Pozzer, A. (2016). Projection of North Atlantic Oscillation and its effect on tracer transport. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(24), 15581–15592.

Ballesteros Cánovas, J.A., Eguibar, M., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A., Stoffel, M., & Gutiérrez-Pérez, I. (2011). Estimating flash flood discharge in an ungauged mountain catchment with 2D hydraulic models and dendrogeomorphic palaeostage indicators. *Hydrological Processes*, 25(6), 970–979.

Ballesteros Cánovas, J.A., Stoffel, M., Corona, C., Schraml, K., Gobiet, A., Tani, S., Sinabell, F., Fuchs, S., & Kaitna, R. (2016). Debris-flow risk analysis in a managed torrent based on a stochastic life-cycle performance. *Science of the total environment*, 557, 142–153.

Ballesteros-Cánovas, J. A., Stoffel, M., St George, S., & Hirschboeck, K. (2015). A review of flood records from tree rings. *Progress in Physical Geography*, 39(6), 794–816.

Ballesteros-Cánovas, J. A., Twose, I. M., Muñoz-Torrero, A., Sánchez, J. C. R., Grodek, T., López-Moreno, I., ... & Benito, G. (2025). Rockfall-induced debris flow event in the Pyrenees: The case of Pineta valley of September 2022. *Catena*, 253, 108876. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108876>.

Ballesteros-Cánovas, J.A., Stoffel, M., Benito, G., Rohrer, M., Barriopedro, D., García-Herrera, R., Beniston, M., & Brönnimann, S. (2019). On the extraordinary winter flood episode over the North Atlantic Basin in 1936. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436(1), 206–216.

Barriendos, M., Gil-Guirado, S., Pino, D., Tuset, J., Pérez-Morales, A., Alberola, A., Costa, J., Balasch, J.C., Castelltort, X., Mazón, J., & 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.

Barriopedro, D., Jiménez-Esteve, B., Collazo, S., Garrido-Perez, J. M., Johnson, J. E., & García-Herrera, R. (2025). A Multimethod Attribution Analysis of Spain's 2024 Extreme Precipitation Event. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 106(12), E2440-E2460.

Barriopedro, D., Jiménez-Esteve, B., Collazo, S., Garrido-Perez, J. M., Johnson, J. E., & García-Herrera, R. (2025). A multi-method attribution analysis of the Spain's 2024 extreme precipitation event. *Bulletin of the American Meteorological Society*, BAMS-D.

Bathurst, J.C., Birkinshaw, S.J., Cisneros Espinosa, F., & Iroumé, A. (2017). Forest impact on flood peak discharge and sediment yield in streamflow. *River System Analysis and Management*, 15-29.

Beck, H.E., Van Dijk, A.I., Levizzani, V., Schellekens, J., Miralles, D.G., Martens, B., & De Roo, A. (2017). MSWEP: 3-hourly 0.25 global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 589-615.

Beguería, S. (Ed.). (2023). *Adaptación al cambio climático en la cuenca pirenaica: Memorias científicas del proyecto PIRAGUA* (Vol. 2). Instituto de Ciencias Ambientales de Aragón / Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Beguería, S., Tomas-Burguera, M., Serrano-Notivoli, R., Barriopedro, D., & Vicente-Serrano, S. M. (2025). Evolution of extreme precipitation in Spain: contribution of atmospheric dynamics and long-term trends. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s00477-025-02961-x>

Beguería, S., Tomas-Burguera, M., Serrano-Notivoli, R., Barriopedro, D., & Vicente-Serrano, S. M. (2025). Evolution of extreme precipitation in Spain: contribution of atmospheric dynamics and long-term trends. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 39(5), 2137-2157.

Benetó, P., & Khodayar, S. (2023). On the need for improved knowledge on the regional-to-local precipitation variability in eastern Spain under climate change. *Atmospheric Research*, 106795.

Beneyto, C., Aranda, J.Á., & Francés, F. (2023a). Exploring the uncertainty of weather generators' extreme estimates in different practical available information scenarios. *Hydrological Sciences Journal*, 68(9), 1203-1212.

Beneyto, C., Aranda, J.Á., & Francés, F. (2024). On the Use of Weather Generators for the Estimation of Low-Frequency Floods under a Changing Climate. *Water*, 16, 1059. <https://doi.org/10.3390/w16071059>

Beneyto, C., Aranda, J.Á., Salazar-Galán, S., García-Bartual, R., Albentosa-Hernández, E., & Francés, F. (2022). Expanding information for flood frequency analysis using a weather generator and distributed hydrological modelling in a Spanish Mediterranean catchment, IAHS-AISH Scientific Assembly 2022, Montpellier, France, 29 May–3 Jun 2022, IAHS2022-275, <https://doi.org/10.5194/iahs2022-275>, 2022.

Beneyto, C., Vignes, G., Aranda, J.Á., & Francés, F. (2023b). Sample Uncertainty Analysis of Daily Flood Quantiles Using a Weather Generator. *Water*, 15(19), 3489.

Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L. M., Coppola, E., Eckert, N., ... & Vincent, C. (2018). The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere*, 12(2), 759-794.

Benito, G. (2021a) Determinación de caudales extremos con registros de paleocrecidas: aplicaciones a la seguridad de presas. En: Paleocrecidas y avenidas históricas y su aplicación a la seguridad hidrológica de las presas, Jiménez, A. (Ed.) Servicio de Publicaciones del CEDEX, Ministerio de Fomento, Madrid, 41-62.

Benito, G., & Machado, M.J. (2012). Floods in the Iberian Peninsula: *IAHS-AISH Publication*, no. SPEC. ISS. 10, 372-383.

Benito, G., Ballesteros-Cánovas, J.A., & Díez-Herrero, A. (2023). Palaeoflood Hydrology: Reconstructing rare events and extreme flood discharges. In: Paron, P. and Di Baldassarre, G. (eds.). *Hydro-Meteorological hazards, risks, and disasters. Hazards and Disasters Series*, Elsevier, Amsterdam. 65-103.

Benito, G., Beneyto, C., Aranda, J.Á., Machado, M., Francés, F., & Sánchez-Moya, Y. (2021b). Inundaciones y cambio climático: certezas e incertidumbres en el camino a la adaptación. *Cuadernos de geografía*, 107, 191-216.

Benito, G., Brázdil, R., Herget, J., & Machado, M.J. (2015a). Quantitative historical hydrology in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 19, 1-57.

Benito, G., Castillo, O., Ballesteros-Cánovas, J.A., Machado, M., & Barriandos, M. (2021a). Enhanced flood hazard assessment beyond decadal climate cycles based on centennial historical data (Duero basin, Spain). *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25, 6107-6132. <https://doi.org/10.5194/hess-25-6107-2021>

Benito, G., Greenbaum, N., Medialdea, A., Calle, M., Sanchez-Moya, Y., Machado, M., Ballesteros-Cánovas, J.A., & Corella, J.P. (2023). Late Pleistocene–Holocene multi-decadal patterns of extreme floods in NW Iberia: The Duero River palaeoflood record. *Quaternary Science Reviews*, 321, 108356.

Benito, G., Grodek, T., & Enzel, Y. (1998). The geomorphic and hydrologic impacts of the catastrophic failure of flood-control-dams during the 1996-Biescas flood (Central Pyrennes, Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 42(4), 417-437.

Benito, G., Harden, T.M., & O'Connor, J. (2020). Quantitative Paleoflood Hydrology. In: Shroder, J.J.F. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*, 6, 743-767. Elsevier, Academic Press. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12495-9>.

Benito, G., Lang, M., Barriandos, M., Llasat, M.C., Francés, F., Ouarda, T., Thorndycraft, V., Enzel, Y., Bardossy, A., Coeur, D., & Bobée, B. (2004). Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. Review of scientific methods. *Natural Hazards* 31, 623–643.

Benito, G., Lang, M., Barriandos, M., Llasat, M.C., Francés, F., Ouarda, T., Thorndycraft, V., Enzel, Y., Bardossy, A., Coeur, D., & Bobée, B. (2004). Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. Review of scientific methods. *Natural hazards*, 31, 623-643.

Benito, G., Machado, M.J., & Rodríguez Lloveras, X. (2012). Las crecidas del 28 de Septiembre de 2012 en el SE de España. *Revista Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 20 (3), 299-302.

Benito, G., Macklin, M.G., Cohen, K.M. & Herget, J. (2015). Past hydrological extreme events in a changing climate. *Catena* 130, 1-2. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.001>

Benito, G., Macklin, M.G., Zielhofer, C., Jones, A.F., & Machado, M.J. (2015b). Holocene flooding and climate change in the Mediterranean. *Catena*, 130, 13-33.

Benito, G., Rico, M., Sánchez-Moya, Y., Sopena, A., Thorndycraft, V.R., & Barriandos, M. (2010). The impact of late Holocene climatic variability and land use change on the flood

hydrology of the Guadalentín River, southeast Spain: *Global and Planetary Change*, 70(1-4), 53-63.

Bermúdez, M., Farfán, J.F., Willems, P., & Cea, L. (2021). Assessing the effects of climate change on compound flooding in coastal river areas. *Water Resources Research*, 57(10), e2020WR029321.

Bertola, M., Viglione, A., Lun, D., Hall, J., & Blöschl, G. (2020). Flood trends in Europe: are changes in small and big floods different? *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(4), 1805-1822.

Blázquez, L., García, J. A., & Bodoque, J. M. (2021). Stakeholder analysis: Mapping the river networks for integrated flood risk management. *Environmental Science & Policy*, 124, 506-516.

Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R. A., Parajka, J., Merz, B., ... & Živković, N. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573(7772), 108-111.

Bock, L., Lauer, A., Schlund, M., Barreiro, M., Bellouin, N., Jones, C., Meehl, G.A., Predoi, V., Roberts, M.J. & Eyring, V. (2020). Quantifying progress across different CMIP phases with the ESMValTool. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(21), e2019JD032321.

Bodoque, J.M., Amérigo, M., Díez-Herrero, A., García, J.A., Cortés, B., Ballesteros-Cánovas, J.A., & Olcina, J. (2016). Improvement of resilience of urban areas by integrating social perception in flash-flood risk management. *Journal of Hydrology*, 541, 665-676.

Bodoque, J.M., Esteban-Muñoz, Á., & Ballesteros-Cánovas, J.A. (2023). Overlooking probabilistic mapping renders urban flood risk management inequitable. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 279.

Bonsoms, J., López-Moreno, J.I., & Alonso-González, E. (2023). Snow sensitivity to temperature and precipitation change during compound cold-hot and wet-dry seasons in the Pyrenees. *The Cryosphere*, 17(3), 1307-1326.

Bormann, K.J., Brown, R.D., Derksen, C., & Painter, T.H. (2018). Estimating snow-cover trends from space, *Nature Climate Change*, 8(11), 924–928. doi:10.1038/s41558-018-0318-3.

Brázdil, R., Kundzewicz, Z.W., & Benito, G. (2006). Historical hydrology for studying flood risk in Europe: *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 51(5), 739-764.

Broderick, C., & Murphy, C. (2017). Climate change and fluvial flooding: Developing a typology of catchment sensitivity, Irish Climate Analysis and Research UnitS (ICARUS), Department of Geography, Maynooth University, Ireland

Broderick, C., Murphy, C., Wilby, R.L., Matthews, T., Prudhomme, C., & Adamson, M. (2019). Using a scenario-neutral framework to avoid potential maladaptation to future flood risk. *Water Resources Research*, 55(2), 1079-1104.

Brown, C. F., Brumby, S.P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Hyde, S.B., Mazzariello, J., ... & Tait, A.M. (2022). Dynamic World: Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*, 9(1), 251.

Brunner, M.I., Slater, L., Tallaksen, L.M., & Clark, M. (2021). Challenges in modeling and predicting floods and droughts: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(3), e1520.

Bryan, B.A., Gao, L., Ye, Y., Sun, X., Connor, J.D., ... & Hou, X. (2018). China's response to a national land-system sustainability emergency. *Nature* 559, 193-204.

Calvo-Sancho, C., Díaz-Fernández, J., González-Alemán, J. J., Halifa-Marín, A., Miglietta, M. M., Azorin-Molina, C., ... & Martín, M. L. (2026). Human-induced climate change amplification on storm dynamics in Valencia's 2024 catastrophic flash flood. *Nature Communications*, 17(1), 1492.

Camarasa-Belmonte, A.M., Rubio, M., & Salas, J. (2020). Rainfall events and climate change in Mediterranean environments: an alarming shift from resource to risk in Eastern Spain. *Natural Hazards*, 103, 423-445.

Capel Molina, J. (1974). Génesis de las inundaciones de Octubre de 1973 en el Sureste de la Península ibérica. *Cuadernos Geográficos*, 4, 149-166.

Carvalho, L.M. (2020). Assessing precipitation trends in the Americas with historical data: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 11(2), e627

Casanueva, A., Herrera, S., Fernández, J., & Gutiérrez, J.M. (2016). Towards a fair comparison of statistical and dynamical downscaling in the framework of the EURO-CORDEX initiative. *Climatic Change*, 137, 411-426.

CEAM. 2024. Análisis meteorológico del episodio extremo asociado a la DANA de finales de octubre de 2024. Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo.

CEDEX 2021. Impacto del Cambio Climático en las Precipitaciones máximas en España. Informe y nueve Anexos. https://ceh.cedex.es/web/documentos/Imp_CClimatico_Pmax/Informe_Impacto_Climatico_Pmax_40-617-5-001.pdf

Centre for Ecology and Hydrology (CEH) (2012). *Review of applied-statistical methods for flood-frequency analysis in Europe*. <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/19286>

Centre for Ecology and Hydrology (CEH) (2013). *A review of applied methods in Europe for flood frequency in a changing climate*, WG4: Flood frequency analysis and environmental change. ISBN: 978-1-906698-36-2

Cervigón, F. L. R., & del Moral Ituarte, L. (2020). Cambio climático en la planificación hidrológica en España: necesidad urgente de adaptación. Observatorio de las Políticas del Agua, Fundación Nueva Cultura del Agua

Chen, C. *et al.* (2019). China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nat. Sustain.* 2, 122–129.

Christensen, O.B., & Kjellström, E. (2020). Partitioning uncertainty components of mean climate and climate change in a large ensemble of European regional climate model projections. *Climate Dynamics*, 54(9-10), 4293-4308.

Christidis, N., & Stott, P.A. (2022). Human influence on seasonal precipitation in Europe. *Journal of Climate*, 35(15), 5215-5231.

Ciscar, J.C., Ibarreta, D., Soria, A., *et al.*, (2018). Climate impacts in Europe: Final report of the JRC PESETA III project, EUR 29427 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-97218-8, doi:10.2760/93257, JRC112769.

ClimateADAPT (2015). Country Profiles: *Spain: Biogeophysical Characteristics*. Updated 165/03/2021. Accessed 01/06/2023. Available from: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/countries-regions/countries/spain>

Cohn, T.A., England, J.F., Berenbrock, C.E., Mason, R.R., Stedinger, J.R., & Lamontagne, J.R. (2013). A generalized Grubbs-Beck test statistic for detecting multiple potentially influential low outliers in flood series. *Water Resources Research*, 49(8), 5047-5058.

Cohn, T.A., Lane, W.L., & Baier, W.G. (1997). An algorithm for computing moments-based flood quantile estimates when historical flood information is available. *Water Resources Research*, 33(9), 2089-2096.

Cohn, T.A., Lane, W.L., & Stedinger, J.R. (2001). Confidence intervals for expected moments algorithm flood quantile estimates. *Water Resources Research*, 37(6), 1695-1706.

Collados-Lara, A.J., Pardo-Igúzquiza, E., & Pulido-Velazquez, D. (2021). Assessing the impact of climate change—and its uncertainty—on snow cover areas by using cellular automata models and stochastic weather generators. *Science of the Total Environment*, 788, 147776.

Colmet-Daage, A., Sanchez-Gomez, E., Ricci, S., Llovel, C., Borrell Estupina, V., Quintana-Seguí, P., Llasat, M.C., & Servat, E. (2018). Evaluation of uncertainties in mean and extreme precipitation under climate change for northwestern Mediterranean watersheds from high-resolution Med and Euro-CORDEX ensembles. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), 673-687.

Comité CLIVAR-España. (2024). Informe CLIVAR-SPAIN sobre el clima en España (1ª ed.). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico / Oficina Española de Cambio Climático.

Conte, E., Troncone, A., Donato, A., & Pugliese, L. (2020). Prediction of the mobility of landslides activated by rainfall using a simplified approach. In *Geotechnical Research for Land Protection and Development: Proceedings of CNRIG 2019*, 7, 281-288. Springer International Publishing.

Corringham, T.W., Ralph, F.M., Gershunov, A., Cayan, D.R., & Talbot, C.A. (2019). Atmospheric rivers drive flood damages in the western United States. *Science Advances* 5(12), eaax4631. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax4631>.

Cortès, M., Turco, M., Ward, P., Sánchez-Espigares, J.A., Alfieri, L., & Llasat, M.C. (2019). Changes in flood damage with global warming on the eastern coast of Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(12), 2855-2877.

Cos, J., Doblas-Reyes, F., Jury, M., Marcos, R., Bretonnière, P. A., & Samsó, M. (2022). The Mediterranean climate change hotspot in the CMIP5 and CMIP6 projections. *Earth System Dynamics*, 13(1), 321-340.

Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.-P., Iglesias, A., ... Xoplaki, E. (2018). *Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean*. Nature Climate Change, 8, 972–980. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>

Curry, C.L., Islam, S.U., Zwiers, F.W., & Déry, S.J. (2019). Atmospheric rivers increase future flood risk in Western Canada's largest Pacific River. *Geophysical Research Letters*, 46, 1651–1661. <https://doi.org/10.1029/2018GL080720>

Cutillas-Lozano, L.G., López, M.S.C., Velasco, A.P., Andrés-Doménech, I., & Olcina-Cantos, J. (2023). Local-scale regionalisation of climate change effects on rainfall pattern: application to Alicante City (Spain). *Theoretical and Applied Climatology*, 154(1-2), 377-402.

- Da Silva, N. A., & Haerter, J. O. (2025). Super-Clausius–Clapeyron scaling of extreme precipitation explained by shift from stratiform to convective rain type. *Nature Geoscience*.
- DDE (2003). Validation des relevés hydrométriques de la crue du 8 et 9 septembre 2002. Unpublished Report N° 102793 of Sogreah-Daragon. November 2003, 98pp.
- De Viron, O., Dickey, J.O., & Ghil, M. (2013). Global modes of climate variability. *Geophysical Research Letters*, 40(9), 1832-1837.
- del Jesus, M., & Diez-Sierra, J. (2023). Climate change effects on sub-daily precipitation in Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 68(8), 1065-1077. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2215931>
- del Jesus, M., & Diez-Sierra, J. (2023). Climate change effects on sub-daily precipitation in Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 68(8), 1065-1077.
- Delgado-Artés, R., Garófano-Gómez, V., Oliver-Villanueva, J.V., & Rojas-Briales, E. (2022). Land use/cover change analysis in the Mediterranean region: A regional case study of forest evolution in Castelló (Spain) over 50 years. *Land Use Policy*, 114, 105967.
- Delgado-Serrano, M.M., & Hurtado-Martos, J.Á. (2018). Land use changes in Spain. Drivers and trends in agricultural land use. *EU agrarian Law*, 7(2), 1-8.
- Desinayak, N., Prasad, A.K., El-Askary, H., Kafatos, M., & Asrar, G.R. (2022). Snow cover variability and trend over the Hindu Kush Himalayan region using MODIS and SRTM data. In *Annales Geophysicae*, 40(1), 67-82. Copernicus GmbH.
- Di Baldassarre, G., Kreibich, H., Vorogushyn, S., Aerts, J., Arnbjerg-Nielsen, K., Barendrecht, M., ... & Ward, P.J. (2018). Hess Opinions: An interdisciplinary research agenda to explore the unintended consequences of structural flood protection. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5629-5637.
- Di Baldassarre, G., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Salinas, J. L., & Blöschl, G.. (2013). Socio-hydrology: conceptualising human-flood interactions, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 3295–3303, <https://doi.org/10.5194/hess-17-3295-2013>.
- Di Sante, F., Coppola, E., & Giorgi, F. (2021). Projections of river floods in Europe using EURO-CORDEX, CMIP5 and CMIP6 simulations. *International Journal of Climatology*, 41(5), 3203-3221.
- Dierickx, A., Dewettinck, W., Van Schaeybroeck, B., De Cruz, L., Caluwaerts, S., Termonia, P., & Van de Vyver, H. (2025). EURO-SUPREME: sub-daily precipitation extremes in the EURO-CORDEX ensemble. *Earth System Science Data Discussions*, 2025, 1-22.
- Do, H.X., Zhao, F., Westra, S., Leonard, M., Gudmundsson, L., Boulange, J.E.S., ... & Wada, Y. (2020). Historical and future changes in global flood magnitude—evidence from a model–observation investigation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(3), 1543-1564.
- Donat, M.G., Angéilil, O., & Ukkola, A.M. (2019). Intensification of precipitation extremes in the world's humid and water-limited regions. *Environmental Research Letters*, 14(6), 065003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1c8e>.
- Dottori *et al.* (2020) Adaptación al aumento del riesgo de inundaciones fluviales en la UE en el contexto del cambio climático. Informe técnico del CCI.
- Dottori, F., Szewczyk, W., Ciscar, J.C., Zhao, F., Alfieri, L., Hirabayashi, Y., ... & Feyen, L. (2018). Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming. *Nature Climate Change*, 8(9), 781-786.
- Drobinski, P., Silva, N. D., Panthou, G., Bastin, S., Muller, C., Ahrens, B., ... & Torma, C. Z. (2018). Scaling precipitation extremes with temperature in the Mediterranean: past

climate assessment and projection in anthropogenic scenarios. *Climate dynamics*, 51(3), 1237-1257.

Du, Y., Wang, D., Zhu, J., Wang, D., Qi, X., & Cai, J. (2022). Comprehensive assessment of CMIP5 and CMIP6 models in simulating and projecting precipitation over the global land. *International Journal of Climatology*, 42(13), 6859-6875.

Dunn, R.J., Alexander, L.V., Donat, M.G., Zhang, X., Bador, M., Herold, N., ... & Bin Hj Yussof, M.N.A. (2020). Development of an updated global land in situ-based data set of temperature and precipitation extremes: HadEX3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(16), e2019JD032263.

EFA 2025. Floods. EU environmental policy. https://environment.ec.europa.eu/topics/water/floods_en

England, J.F., Cohn, T., Faber, B., Stedinger, J., Thomas, W., Veilleux, A., Kiang, J., & Mason, R. (2019). *Guidelines for Determining Flood Flow Frequency*, Bulletin 17C. Reston, VA: U.S. Geological Survey.

Environment Agency (2016). *Presentation on climate allowances for flood risk assessments*, May 2016. <https://www.gov.uk/guidance/flood-risk-assessments-climate-change-allowances>.

Environment Agency (2020). *Flood risk assessments: Climate change allowances*, 20 July 2020, available at: <https://www.gov.uk/guidance/flood-risk-assessments-climate-change-allowances>; Last accessed 26 may 2024.

EPA (2021). <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-snow-cover#:~:text=More%20snow%20means%20more%20energy,for%20many%20plants%20and%20animals>.

Errea, M.P., Cortijos-López, M., Llena, M., Nadal-Romero, E., Zabalza-Martínez, J., & Lasanta, T. (2023). From the local landscape organization to land abandonment: an analysis of landscape changes (1956–2017) in the Aísa Valley (Spanish Pyrenees). *Landscape Ecology*, 38(12), 3443-3462

Errea, M.P., Cortijos-López, M., Llena, M., Nadal-Romero, E., Zabalza-Martínez, J., & Lasanta, T. (2023). From the local landscape organization to land abandonment: an analysis of landscape changes (1956–2017) in the Aísa Valley (Spanish Pyrenees). *Landscape Ecology*, 38(12), 3443-3462.

Espinoza, V., Waliser, D.E., Guan, B., Lavers, D.A., & Ralph, F.M. (2018). Global analysis of climate change projection effects on atmospheric rivers. *Geophysical Research Letters*, 45, 4299–4308. <https://doi.org/10.1029/2017GL076968>

EU2021. Impact of climate change on floods: *Survey findings and possible next steps to close the knowledge and implementation gap*. doi:10.2779/932572, y European Union, 2021. Current Practice in Flood Risk Management in the European Union. doi:10.2779/235272

European Commission (2016). *The Floods Directive first cycle questionnaire results report*, 349p. Available at <https://www.miteco.gob.es/ca/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/snczi/guia-metodologica-determinacion-zonas-inundables.html>

European Commission (2020). Discussion paper WG F 26-response to Council conclusions climate change impact on floods. <https://circabc.europa.eu/ui/group/9ab5926d-bed4-4322-9aa7-9964bbe8312d/library/419cedb7-961b-485e-8c10-608e422258a1/details>. Last accessed: 26 may 2024.

European Commission (2021). *Climate Change Adaptation Workshop Report*, 29th Working Group on Floods. Luxemburg, 12-13 October 2021. 21 pp.

European Commission (2021). Impact of climate change on floods: Survey findings and possible next steps to close the knowledge and implementation gap. A final survey based study. Available at: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0a85ea49-57dd-11ec-91ac-01aa75ed71a1/language-en>. Last accessed: 26 may 2024.

European Commission (2021). Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ("European Climate Law"). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32021R1119yqid=1627892432177>

European Court of Auditors (ECA) (2018). Special report no 25/2018: *Floods Directive: progress in assessing risks, while planning and implementation need to improve*, 20 November, available at: <https://www.eca.europa.eu/en/publications?did=47211>, last accessed: 26 may 2024

EXCIMAP (2007). *Handbook on good practices for flood mapping in Europe*. Excimap (European exchange circle on flood mapping).

Felis, T., Lohmann, G., Kuhnert, H., Lorenz, S.J., Scholz, D., Pätzold, J., Al-Rousan, S.A., & Al-Moghrabi, S.M. (2004). Increased seasonality in Middle East temperatures during the last interglacial period. *Nature*, 429, 164-168.

Feng, X. *et al.* (2016). Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nat. Clim. Change*, 6, 1019-1022.

Ferreira, R.N. (2021). Cut-Off Lows and Extreme Precipitation in Eastern Spain: Current and Future Climate. *Atmosphere*, 12, 835. <https://doi.org/10.3390/atmos12070835>

Findell, K.L. *et al.* (2019). Rising temperatures increase importance of oceanic evaporation as a source for continental precipitation. *Journal of Climate*, 32, 7713-7726.

Fischer, H., Meissner, K.J., Mix, A.C., Abram, N.J., Austermann, J., Brovkin, V., ... & Zhou, L. (2018). Palaeoclimate constraints on the impact of 2 C anthropogenic warming and beyond. *Nature Geoscience*, 11(7), 474-485.

Fischer, S., & Schumann, A. (2024). Dominant Flood Types in Europe and Their Role in Flood Statistics. *Authorea preprints*. Doi: 10.22541/au.170967842.22210015/v1

Fowler, H. J., Lenderink, G., Prein, A. F., Westra, S., Allan, R. P., Ban, N., ... & Zhang, X. (2021). Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(2), 107-122.

Fowler, H.J., Ali, H., Allan, R.P., Ban, N., Barbero, R., Berg, P., ... & Whitford, A. (2021). Towards advancing scientific knowledge of climate change impacts on short-duration rainfall extremes. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2195), 20190542.

Francés, F. (2004). Flood frequency analysis using systematic and non-systematic information. *Systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation*, edited by: Benito, G. and Thorndycraft, VR, CSIC, Madrid, 55-70.

Francés, F., Salas, J.D., & Boes, D.C. (1994). Flood frequency analysis with systematic and historical or paleoflood data based on the two-parameter general extreme value models. *Water resources research*, 30(6), 1653-1664.

Frei, P., Kotlarski, S., Liniger, M.A., & Schär, C. (2018). Future snowfall in the Alps: projections based on the EURO-CORDEX regional climate models. *The Cryosphere*, 12(1), 1-24.

Friedl, M.A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., & Huang, X. (2010). MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote sensing of Environment*, 114(1), 168-182.

Fuentes-Franco, R., Docquier, D., Koenigk, T., Zimmermann, K., & Giorgi, F. (2023). Winter heavy precipitation events over Northern Europe modulated by a weaker NAO variability by the end of the 21st century. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1), 72.

Fugazza, D., Manara, V., Senese, A., Diolaiuti, G., & Maugeri, M. (2021). Snow cover variability in the greater alpine region in the MODIS era (2000–2019). *Remote Sensing*, 13(15), 2945.

Gallardo, M., Fernández-Portela, J., Cocero, D., & Vilar, L. (2023). Land use and land cover changes in depopulated areas of mediterranean Europe: A case study in two inland provinces of Spain. *Land*, 12(11), 1967.

García Álvarez, D., & Camacho Olmedo, M.T. (2023). Analysing the inconsistencies of CORINE status layers (CLC) and layers of changes (CHA) (1990-2018) for a Spanish case study. *Annals of GIS*, 29(3), 369-386. <https://doi.org/10.1080/19475683.2023.2166583>

García-Ruiz, J.M., Arnáez, J., Sanjuán, Y., López-Moreno, J.I., Nadal-Romero, E., & Beguería, S. (2021). Landscape changes and land degradation in the subalpine belt of the Central Spanish Pyrenees. *Journal of Arid Environments*, 186, 104396.

Garijo, C., & Mediero, L. (2018). Influence of climate change on flood magnitude and seasonality in the Arga River catchment in Spain. *Acta Geophysica*, 66, 769-790.

Gaume, E., Gaál, L., Viglione, A., Szolgay, J., Kohnová, S., & Blöschl, G. (2010). Bayesian MCMC approach to regional flood frequency analyses involving extraordinary flood events at ungauged sites. *Journal of hydrology*, 394(1-2), 101-117.

Gershunov, A., Shulgina, T., Clemesha, R.E.S., ... & Ralph, F.M. (2019). Precipitation regime change in Western North America: The role of Atmospheric Rivers. *Scientific Reports*, 9, 9944. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46169-w>

Ghiggi, G., Humphrey, V., Seneviratne, S.I., & Gudmundsson, L. (2019). GRUN: an observation-based global gridded runoff dataset from 1902 to 2014. *Earth System Science Data*, 11(4), 1655-1674.

Gimeno, L., Nieto, R., & Sorí, R. (2020). The growing importance of oceanic moisture sources for continental precipitation. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 3(1), 27.

Gimeno, L., Sorí, R., Vazquez, M., Stojanovic, M., Algarra, I., Eiras-Barca, J., ... & Nieto, R. (2022). Extreme precipitation events. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 9(6), e1611.

Gomes, E., Inácio, M., Bogdzevič, K., Kalinauskas, M., Karnauskaitė, D., & Pereira, P. (2021). Future land-use changes and its impacts on terrestrial ecosystem services: A review. *Science of the Total Environment*, 781, 146716.

Gründemann, G.J., van de Giesen, N., Brunner, L., & van der Ent, R. (2022). Rarest rainfall events will see the greatest relative increase in magnitude under future climate change. *Communications Earth & Environment*, 3(1), 235.

Guerreiro, S.B., Fowler, H.J., Barbero, R., Westra, S., Lenderink, G., Blenkinsop, S., ... & Li, X.F. (2018). Detection of continental-scale intensification of hourly rainfall extremes. *Nature Climate Change*, 8(9), 803-807.

Guzzon, C., Marcos-Matamoros, R., Llasat, M. C., & Llasat-Botija, M. (2025). Improving extreme precipitation forecasts in Catalonia (NE Iberian Peninsula) using analog methods: A comparison with the GFS model. *Weather and Climate Extremes*, 100839.

Harrigan, S., Zoster, E., Cloke, H., Salamon, P., & Prudhomme, C. (2023). Daily ensemble river discharge reforecasts and real-time forecasts from the operational Global Flood Awareness System. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 27(1), 1-19.

Harrison, S., Macklin, M. G., Toonen, W. H., Benito, G., & Cohen, K. M. (2025). Robust climate attribution of modern floods needs palaeoflood science. *Climatic Change*, 178(4), 71.

Haslinger, K., Breinl, K., Pavlin, L., Pistotnik, G., Bertola, M., Olefs, M., ... & Blöschl, G. (2025). Increasing hourly heavy rainfall in Austria reflected in flood changes. *Nature*, 639(8055), 667-672.

Hernanz, A., García-Valero, J. A., Domínguez, M., Ramos-Calzado, P., Pastor-Saavedra, M. A., & Rodríguez-Camino, E. (2022). Evaluation of statistical downscaling methods for climate change projections over Spain: present conditions with perfect predictors. *International Journal of Climatology*, 42(2), 762-776.

Hirabayashi, Y., Kanae, S., Emori, S., Oki, T., & Kimoto, M. (2008). Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate. *Hydrological Sciences Journal*, 53(4), 754-772.

Hosseinzadehtalaei, P., Tabari, H., & Willems, P. (2020). Climate change impact on short-duration extreme precipitation and intensity–duration–frequency curves over Europe. *Journal of Hydrology*, 590, 125249.

Huang, J., Hartemink, A.E., & Zhang, Y. (2019). Climate and land-use change effects on soil carbon stocks over 150 years in Wisconsin, USA. *Remote Sensing*, 11(12), 1504. <https://doi.org/10.3390/rs11121504>

Huang, K., & Xia, J. (2019). High ecosystem stability of evergreen broadleaf forests under severe droughts. *Global Change Biology*, 25(10), 3494-3503.

Hürlimann, M., Guo, Z., Puig-Polo, C., & Medina, V. (2022). Impacts of future climate and land cover changes on landslide susceptibility: Regional scale modelling in the Val d'Aran region (Pyrenees, Spain). *Landslides*, 1-20.

Hurt, G.C., Chini, L., Sahajpal, R., Froking, S., Bodirsky, B.L., Calvin, K., ... & Zhang, X. (2020). Harmonization of global land use change and management for the period 850–2100 (LUH2) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 13(11), 5425-5464.

Hutchinson, M.F. (1995). Stochastic space-time weather models from ground-based data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 73(3-4), 237-264.

Insua-Costa, D., Lemus-Cánovas, M., Miguez-Macho, G., & Llasat, M.C. (2021). Climatology and ranking of hazardous precipitation events in the western Mediterranean area. *Atmospheric Research*, 255, 105521.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). *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*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>

IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor y K. L. Miller (Eds.). Cambridge University Press, UK y New York, NY, USA, pp. 996.

IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. Available at <http://www.ipcc.ch/report/ar5/2>.

IPCC (2022). Pörtner, H.O., Roberts, D.C., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegría, A., ... & Okem, A. (2022). *IPCC, 2022: Summary for policymakers*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3-33, doi:10.1017/9781009325844.001.

Jodar-Abellan, A., Valdes-Abellan, J., Pla, C., & Gomariz-Castillo, F. (2019). Impact of land use changes on flash flood prediction using a sub-daily SWAT model in five Mediterranean ungauged watersheds (SE Spain). *Science of the Total Environment*, 657, 1578-1591.

Joyce, R.J., Janowiak, J E., Arkin, P.A., & Xie, P. (2004). CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 5(3), 487-503.

Kemter, M., Merz, B., Marwan, N., Vorogushyn, S., & Blöschl, G. (2020). Joint trends in flood magnitudes and spatial extents across Europe. *Geophysical Research Letters*, 47(7), e2020GL087464.

Kendon, M., McCarthy, M., Jevrejeva, S., Matthews, A., & Legg, T. (2019). State of the UK climate 2018. *International Journal of Climatology*, 39, 1-55.

Knox, J.C. (1993). Large increases in flood magnitude in response to modest changes in climate. *Nature*, 361, 430-432.

Kotlarski, S., Gobiet, A., Morin, S., Olefs, M., Rajczak, J., & Samacoïts, R. (2023). 21st Century alpine climate change. *Climate Dynamics*, 60(1), 65-86.

Krkoška Lorencová, E., Harmáčková, Z.V., Landová, L., Pártl, A., & Vačkář, D. (2016). Assessing impact of land use and climate change on regulating ecosystem services in the Czech Republic. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2(3), e01210.

Kundzewicz, Z.W., Krysanova, V., Dankers, R., Hirabayashi, Y., Kanae, S., Hattermann, F. F., ... & Schellnhuber, H.J. (2017). Differences in flood hazard projections in Europe-their causes and consequences for decision making. *Hydrological Sciences Journal*, 62(1), 1-14.

Lalande, M., Ménégot, M., Krinner, G., Naegeli, K., & Wunderle, S. (2022). Climate change in the High Mountain Asia in CMIP6. *Earth System Dynamics*, 12(4), 1061-1098.

Landuyt, D., Broekx, S., & Goethals, P.L. (2016). Bayesian belief networks to analyse trade-offs among ecosystem services at the regional scale. *Ecological Indicators*, 71, 327-335.

Lang, M., Naulet, R., Recking, A., Cœur, D., & Gigon, C. (2002). Étude de cas: l'analyse des pluies et crues extrêmes observées depuis 200 ans dans un bassin cévenol, l'Ardèche. *La Houille Blanche*, 6/7, 131-138.

Lang, M., Ouarda, T.B., & Bobée, B. (1999). Towards operational guidelines for over-threshold modeling. *Journal of hydrology*, 225(3-4), 103-117.

Lasanta, T., Arnáez, J., Pascual, N., Ruiz-Flaño, P., Errea, M.P., & Lana-Renault, N. (2017). Space-time process and drivers of land abandonment in Europe. *Catena*, 149, 810-823.

Lastrada, E., Cobos, G., & Torrijo, F.J. (2020). Analysis of climate change's effect on flood risk. Case study of Reinosa in the Ebro river Basin. *Water*, 12(4), 1114.

Lastrada, E., Garzón-Roca, J., Cobos, G., & Torrijo, F.J. (2021). A decrease in the regulatory effect of snow-related phenomena in Spanish mountain areas due to climate change. *Water*, 13(11), 1550.

Lehner, F., Wood, A.W., Vano, J.A., Lawrence, D.M., Clark, M.P., & Mankin, J.S. (2019). The potential to reduce uncertainty in regional runoff projections from climate models. *Nature Climate Change*, 9(12), 926-933.

Lenderink, G., Barbero, R., Loriaux, J. M., & Fowler, H. J. (2017). Super-Clausius–Clapeyron scaling of extreme hourly convective precipitation and its relation to large-scale atmospheric conditions. *Journal of Climate*, 30(15), 6037-6052.

Lionello, P. (Ed.). (2012). *The climate of the Mediterranean region: From the past to the future*. Elsevier.

Liu, H., Gong, P., Wang, J., Clinton, N., Bai, Y., & Liang, S. (2020). Annual dynamics of global land cover and its long-term changes from 1982 to 2015. *Earth System Science Data*, 12(2), 1217-1243.

Liu, J., Milne, R.I., Cadotte, M.W., Wu, Z.Y., Provan, J., Zhu, G.F., ... & Li, D.Z. (2018). Protect Third Pole's fragile ecosystem. *Science*, 362(6421), 1368-1368.

Llasat, M. C., del Moral, A., Cortès, M., & Rigo, T. (2021). Convective precipitation trends in the Spanish Mediterranean region. *Atmospheric Research*, 257, 105581.

Llasat, M. C., Marcos-Matamoros, R., Pascual, R., Rigo, T., Insúa-Costa, D., & Crespo-Otero, A. (2025). Western Mediterranean flash floods through the Lens of Alcanar (NE Iberian Peninsula): Meteorological drivers and trends. *Atmospheric Research*, 326, 108266.

Llasat, M.C., del Moral, A., Cortès, M., & Rigo, T. (2021). Convective precipitation trends in the Spanish Mediterranean region. *Atmospheric Research*, 257, 105581.

Llasat, M.C., Llasat-Botija, M., Pardo, E., Marcos-Matamoros, R., & Lemus-Canovas, M. (2024). Floods in the Pyrenees: A global view through a regional database, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* 24(10), 3423-3443.

Lompi, M., Marra, F., Deidda, R., Caporali, E., Borga, M., & Dallan, E. (2025). Non-stationary frequency analysis of long-term convection permitting simulations reveals sub-daily extreme precipitation changes in central-southern Europe. *Advances in Water Resources*, 105071.

Lompi, M., Mediero, L., & Caporali, E. (2021). Future flood hazard assessment for the City of Pamplona (Spain) using an ensemble of climate change projections. *Water*, 13(6), 792.

López de la Cruz, J. (2013). Análisis estadístico y modelación del régimen de las crecidas en ríos de la España Península en un contexto no estacionario. Tesis de Doctorado. Director: F. Francés. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

López-Bustins, J.A., & Lemus-Canovas, M. (2020). The influence of the Western Mediterranean Oscillation upon the spatio-temporal variability of precipitation over Catalonia (northeastern of the Iberian Peninsula). *Atmospheric Research*, 236, 104819.

López-Moreno, J.I., Gascoin, S., Herrero, J., Sproles, E.A., Pons, M., Alonso-González, E., Hanich, L., Boudhar, A., Musselman, K.N., Molotch, N.P., Sickman, J., & Pomeroy, J. (2017). Different sensitivities of snowpacks to warming in Mediterranean climate mountain areas. *Environmental Research Letters*, 12(7), 074006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa70cb>

López-Moreno, J.I., Granados, I., Ceballos-Barbancho, A., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Alonso-González, E., ... & Latron, J. (2023). The signal of snowmelt in streamflow and stable water isotopes in a high mountain catchment in Central Spain. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 46, 101356.

López-Moreno, J.I., Pomeroy, J.W., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Navarro-Serrano, F.M., Vidaller, I., & Alonso-González, E. (2021). Changes in the frequency of global high mountain rain-on-snow events due to climate warming. *Environmental Research Letters*, 16(9), 094021.

López-Moreno, J.I., Soubeyroux, J.M., Gascoin, S., Alonso-Gonzalez, E., Durán-Gómez, N., Lafaysse, M. *et al.* (2020). Long-term trends (1958–2017) in snow cover duration and depth in the Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 40, 6122-6136. DOI: 10.1002/joc.6571.

Lorenzo, M.N., & Alvarez, I. (2020). Climate change patterns in precipitation over Spain using CORDEX projections for 2021-2050. *Science of the Total Environment*, 723, 138014.

Losada, I.J., Feliu, E. y Sanz, M.J. (Coords.) 2025. Evaluación de Riesgos e Impactos derivados del Cambio Climático en España (ERICC-2025). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid. <https://ericc.adaptecca.es/>

Lucas-Picher, P., Argüeso, D., Brisson, E., Trambly, Y., Berg, P., Lemonsu, A., ... & Caillaud, C. (2021). Convection-permitting modeling with regional climate models: Latest developments and next steps. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 12(6), e731.

Lucas-Picher, P., Brisson, E., Caillaud, C., Alias, A., Nabat, P., Lemonsu, A., ... & Somot, S. (2024). Evaluation of the convection-permitting regional climate model CNRM-AROME41t1 over Northwestern Europe. *Climate Dynamics*, 62(6), 4587-4615.

Lyu, R., Clarke, K.C., Zhang, J., Feng, J., Jia, X., & Li, J. (2019). Spatial correlations among ecosystem services and their socio-ecological driving factors: A case study in the city belt along the Yellow River in Ningxia, China. *Applied Geography*, 108, 64-73.

Macdonald, N. (2011). Trends in flood seasonality of the River Ouse (Northern England) from archive and instrumental sources since AD 1600. *Climatic Change*, 1-23.

Macdonald, N., & Black, A. R. (2010). Reassessment of flood frequency using historical information for the River Ouse at York, UK (1200-2000). *Hydrological Sciences Journal*, 55, 1152-1162.

Macdonald, N., Werritty, A., Black, A.R., & McEwen, L.J. (2006). Historical and pooled flood frequency analysis for the River Tay at Perth, Scotland. *Area*, 38(1), 34-46.

Madsen, H., Lawrence, D., Lang, M., Martinkova, M., & Kjeldsen, T.R. (2014). Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology*, 519, 3634-3650.

MAMR (2011). Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO

Mangini, W., Viglione, A., Hall, J., Hundecha, Y., Ceola, S., Montanari, A., Rogger, M., Salinas, J.L., Borzì, I., & Parajka, J. (2018). Detection of trends in magnitude and frequency of flood peaks across Europe. *Hydrological Sciences Journal*, 63(4), 493-512.

Martínez-Fernández, J., Ruiz-Benito, P., & Jornet, A. B. (2018). La última actualización de la cartografía CORINE Land Cover (CLC2012) en España: repercusiones para los estudios de cambios en la cobertura y uso del suelo. *Estudios Geográficos*, 79(284), 267-281.

Martínez-Sastre, R., Ravera, F., González, J.A., López Santiago, C., Bidegain, I., & Munda, G. (2017). Mediterranean landscapes under change: Combining social multicriteria evaluation and the ecosystem services framework for land use planning, *Land Use Policy*, 67, 472-486.

McCrystall, M.R., Stroeve, J., Serreze, M., Forbes, B. C., & Screen, J.A. (2021). New climate models reveal faster and larger increases in Arctic precipitation than previously projected. *Nature Communications*, 12(1), 6765.

MedCLIVAR. (2015). *The climate of the Mediterranean region: Research progress and climate change impacts*. MedCLIVAR Network Report.

MedECC (2020). *Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future*. First Mediterranean Assessment Report [Cramer, W., Guiot, J., Marini, K. (eds.)] Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/ MAP, Marseille, France, 632pp, ISBN 978-2-9577416-0-1, doi: 10.5281/zenodo.4768833

MedECC. (2020). *Climate and environmental change in the Mediterranean basin – Current situation and risks for the future. First Mediterranean Assessment Report (MAR1)*. Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP.

Mediero, L., Santillán, D., Garrote, L., & Granados, A. (2014). Detection and attribution of trends in magnitude, frequency and timing of floods in Spain. *Journal of Hydrology*, 517, 1072-1088.

Meseguer-Ruiz, O., Lopez-Bustins, J.A., Arbiol-Roca, L., Martin-Vide, J., Miró, J., & Estrela, M.J. (2021). Temporal changes in extreme precipitation and exposure of tourism in Eastern and South-Eastern Spain. *Theoretical and Applied Climatology*, 144, 379-390.

MÉTÉO-FRANCE (2019). *Changement climatique et épisodes méditerranéens*. <http://www.meteofrance.fr/>.

Miró, J.J., Lemus-Canovas, M., Serrano-Notivolí, R., Cantos, J.O., Estrela, M.J., Martin-Vide, J., Sarricolea, P., & Meseguer-Ruiz, O. (2022). A component-based approximation for trend detection of intense rainfall in the Spanish Mediterranean coast. *Weather and Climate Extremes*, 38, 100513.

MITECO (2018). *Incorporación del cambio climático en la evaluación preliminar del riesgo de inundación (EPRI) en el segundo ciclo de aplicación de la Directiva de inundaciones (2007/60/CE). Metodología General*. Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO). 39 pp.

MITECO (2019a). *Evaluación de la resiliencia de los núcleos urbanos frente al riesgo de inundaciones: redes, sistemas urbanos y otras infraestructuras*. Ministerio para la Transición Ecológica. 65 pp.

MITECO (2019b). *Guía de adaptación al riesgo de inundaciones: explotaciones agrícolas y ganaderas*. Ministerio para la Transición Ecológica. 113 pp.

MITECO (2019c). *Recomendaciones para la construcción y rehabilitación de edificaciones en zonas inundables*. Ministerio para la Transición Ecológica. 70 pp.

MITECO (2019d). *Guía de adaptación al riesgo de inundaciones: sistemas urbanos de drenaje sostenible*. Ministerio para la Transición Ecológica. 93 pp.

Mongil-Manso, J., Navarro-Hevia, J., & San Martín, R. (2022). Impact of land use change and afforestation on soil properties in a Mediterranean Mountain area of Central Spain. *Land*, 11(7), 1043.

Monjo, R., Gaitán, E., Pórtoles, J., Ribalaygua, J., & Torres, L. (2016). Changes in extreme precipitation over Spain using statistical downscaling of CMIP5 projections. *Int. J. Climatol.* 36, 757-769.

Montiel-Molina, C., Vilar, L., Romão-Sequeira, C., Karlsson, O., Galiana-Martín, L., Madrazo-García de Lomana, G., & Palacios-Estremera, M.T. (2019). Have historical land use/land cover changes triggered a fire regime shift in central Spain? *Fire*, 2(3), 44.

Morales, A.P., Guirado, S.G., & García, A.Q. (2021). ¿Somos todos iguales ante una inundación?: Análisis de la vulnerabilidad social en el litoral mediterráneo español. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 88, 6.

Morin, S., Samacoïts, R., François, H., Carmagnola, C.M., Abegg, B., Demiroglu, O.C., ... & Cauchy, A. (2021). Pan-European meteorological and snow indicators of climate change impact on ski tourism. *Climate Services*, 22, 100215.

MRI (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nat. Clim. Change*, 5(5), 424-430.

Mudryk, L., Santolaria-Otín, M., Krinner, G., Ménégoz, M., Derksen, C., Brutel-Vuilmet, C., Brady, M., & Essery, R. (2020). Historical Northern Hemisphere snow cover trends and projected changes in the CMIP6 multi-model ensemble. *The Cryosphere*, 14(7), 2495-2514.

Musselman, K.N., Addor, N., Vano, J.A., & Molotch, N.P. (2021). Winter melt trends portend widespread declines in snow water resources. *Nature Climate Change*, 11(5), 418-424.

Nadal-Romero, E., Khorchani, M., Gaspar, L., Arnáez, J., Cammeraat, E., Navas, A., & Lasanta, T. (2023). How do land use and land cover changes after farmland abandonment affect soil properties and soil nutrients in Mediterranean mountain agroecosystems? *Catena*, 226, 107062.

Najibi, N., & Devineni, N. (2018). Recent trends in the frequency and duration of global floods. *Earth System Dynamics*, 9(2), 757-783.

NOAA 2023. Monthly Global Climate Report for Annual 2022, published online January 2023. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213>

Norris, J., Chen, G., & Neelin, J.D. (2019). Thermodynamic versus dynamic controls on extreme precipitation in a warming climate from the community earth system model large ensemble. *Journal of Climate*, 32(4), 1025-1045

Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (OPCC) (2018). Informe OPCC2 sobre el cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación (Resumen ejecutivo).

Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (OPCC) (2025). Sitio web OPCC (indicador “-60%” capa de nieve a 1.800 m en 2050).

Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (OPCC) (2026). PIRAGUA – Adaptación al cambio climático en el Pirineo mediante la evaluación hidrológica y cooperación transfronteriza.

Olcina, J., Sauri, D., Hernández, M., & Ribas, A. (2016). Flood policy in Spain: a review for the period 1983-2013. *Disaster Prevention and Management*, 25(1), 41-58.

Olsen, J., Anderson, N.J. & Knudsen, M.F. (2012). Variability of the North Atlantic Oscillation over the past 5,200 years. *Nature Geoscience*, 5, 808-812.

Opgenoorth, L., & Faith, D.P. (2013). The intergovernmental science-policy platform The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), up and walking. *Frontiers of Biogeography*, 5(4), DOI: 10.21425/F5FBG20746

Papalexiou, S.M., & Montanari, A. (2019). Global and regional increase of precipitation extremes under global warming. *Water Resources Research*, 55(6), 4901-4914

Paprotny, D., Sebastian, A., Morales-Nápoles, O., & Jonkman, S.N. (2018). Trends in flood losses in Europe over the past 150 years. *Nature communications*, 9(1), 1985.

Patricola, C.M., & Wehner, M.F. (2018). Anthropogenic influences on major tropical cyclone events. *Nature*, 563(7731), 339-346

Peña-Angulo, D., Khorchani, M., Errea, P., Lasanta, T., Martínez-Arnáiz, M., & Nadal-Romero, E. (2019). Factors explaining the diversity of land cover in abandoned fields in a Mediterranean mountain area. *Catena*, 181, 104064.

Peña-Angulo, D., Vicente-Serrano, S. M., Domínguez-Castro, F., Murphy, C., Reig, F., Tramblay, Y., Trigo, R.M., Luna, M.Y., Turco, M., Noguera, I., Aznarez-Balta, M., García-Herrera, R., Tomás-Burguera, M., & El Kenawy, A. (2020). Long-term precipitation in Southwestern Europe reveals no clear trend attributable to anthropogenic forcing. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094070.

Perles, M.J., Sortino, J.F., & Cantarero, F. (2017). Cartografía de la vulnerabilidad del territorio frente al riesgo de inundación. Propuesta adaptada a la Directiva europea de inundaciones y normativas derivadas. *Bol. Asoc. Geógr. Esp*, 75, 341–372.

Perpiña Castillo, C., Coll Aliaga, E., Lavalle, C., & Martínez Llario, J. C. (2020). An assessment and spatial modelling of agricultural land abandonment in Spain (2015-2030). *Sustainability*, 12(2), 560.

Polo, M.J., Herrero, J., Millares, A., Pimentel, R., Moñino, A., Pérez-Palazón, M.J., ... & Losada, M.A. (2022). Snow dynamics, hydrology, and erosion. In *The Landscape of the Sierra Nevada: A Unique Laboratory of Global Processes in Spain* (pp. 149-164). Springer International Publishing.

PRICAM (2015). Plan Especial de Protección Civil de Castilla la Mancha. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. 255 pp.

Priestley, M.D., Ackerley, D., Catto, J.L., Hodges, K.I., McDonald, R.E., & Lee, R.W. (2020). An overview of the extratropical storm tracks in CMIP6 historical simulations. *Journal of Climate*, 33(15), 6315-6343.

Pulido-Velázquez, M., Marcos-García, P., Girard, C., Sanchis-Ibor, C., Martínez-Capel, F., García-Prats, A., ... & Rinaudo, J.D. (2022). A top-down meets bottom-up approach for climate change adaptation in water resource systems. In *Climate adaptation modelling* (pp. 149-157). Springer International Publishing.

Ralph, F.M., Neiman, P.J., Wick, G.A., Gutman, S.I., Dettinger, M.D., Cayan, D.R., & White, A.B. (2006). Flooding on California's Russian River: Role of atmospheric rivers. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L13801, doi:10.1029/2006GL026689.

Ren, D., Wang, Y., Wang, G., & Liu, L. (2023). Rising trends of global precipitable water vapor and its correlation with flood frequency. *Geodesy and Geodynamics*, 14(4), 355-367.

Ribas, A., Olcina, J., & Sauri, D. (2020). More exposed but also more vulnerable? Climate change, high intensity precipitation events and flooding in Mediterranean Spain. *Disaster Prevention and Management*, 29(3), 229-248.

Ribera Masgrau, L. (2004). Flood risk maps: Vulnerability representation and technological innovations contribution. Los mapas de riesgo de inundaciones Representación de la vulnerabilidad y aportación de las innovaciones tecnológicas. *Doc. Anàl. Geogr.* 43, 153-171.

Robson, A.J., Jones, T.K., Reed, D.W., & Bayliss, A.C., (1998), A study of national trend and variation in the UK floods. *International Journal of Climatology*, 18, 165-182.

Rodriguez-Lloveras, X., Buytaert, W., & Benito, G. (2016). Land use can offset climate change induced increases in erosion in Mediterranean watersheds, *Catena* 143, 244-255, <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.04.012>.

Rombeek, N., Hrachowitz, M., & Uijlenhoet, R. (2025). Torrential rainfall in Valencia, Spain, recorded by personal weather stations preceding and during the 29 October 2024 floods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29(22), 6715-6733.

Saavedra, F.A., Kampf, S.K., Fassnacht, S.R., & Sibold, J.S. (2018). Changes in Andes snow cover from MODIS data, 2000-2016. *The Cryosphere*, 12(3), 1027-1046.

Sánchez-Almodóvar, E., Martín-Vide, J., Olcina-Cantos, J., & Lemus-Canovas, M. (2022). Are atmospheric situations now more favourable for heavy rainfall in the Spanish Mediterranean? Analysis of Episodes in the Alicante Province (1981-2020). *Atmosphere*, 13(9), 1410.

Sandoval-Rincón, K. P., Garrote-Revilla, J., Vázquez-Tarrio, D., Cervel, S., Hernández-Manchado, J., López-Vinielles, J., ... & Díez-Herrero, A. (2025). PaleoRiada: a new integrated spatial database of palaeofloods in Spain. *Earth System Science Data Discussions*, 2025, 1-25.

Sanmiguel-Valladolid, A., López-Moreno, J.I., Morán-Tejeda, E., Alonso-González, E., Navarro-Serrano, F.M., Rico, I., & Camarero, J.J. (2020). Variable effects of forest canopies on snow processes in a valley of the central Spanish Pyrenees. *Hydrological Processes*, 34(10), 2247-2262.

Santos, M., Fonseca, A., Frago, M., & Santos, J.A. (2019). Recent and future changes of precipitation extremes in mainland Portugal. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 1305-1319.

Sanuy, M., Rigo, T., Jiménez, J.A., & Llasat, M.C. (2021). Classifying compound coastal storm and heavy rainfall events in the north-western Spanish Mediterranean. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(6), 3759-3781.

Sanz Azcarate, L., Perez Mata, I., Castiella Canalejo, A. Navarro Oronoz, V. (2025). Seguimiento del impacto del cambio climático en los recursos hídricos de Navarra. Metodología y propuesta de indicadores. VIII Jornadas de Ingeniería del Agua. 22 y 23 de octubre de 2025. Zaragoza

Sanz, M.J. y Galán, E. (editoras) (2020). Impactos y riesgos derivados del cambio climático en España. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid. https://adaptecca.es/sites/default/files/documentos/impactosyriesgosccespanawebfinal_tcm30-518210_0.pdf

Saynes, D.R. (2023). Análisis de frecuencia no estacionario de las precipitaciones extremas en España para su predicción en escenarios de cambio climático. Trabajo Fin de Máster Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad de Valencia. 150 pp.

Sayol, J.M., & Marcos, M. (2018). Assessing flood risk under sea level rise and extreme sea levels scenarios: Application to the Ebro delta (Spain). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(2), 794-811.

Schneider, T., Bischoff, T., & Haug, G.H. (2014). Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *Nature*, 513(7516), 45-53.

Seager, R.J., Naik, N., & Hegerl, G.C. (2010). Thermodynamic and dynamic mechanisms for large-scale changes in the hydrological cycle in response to global warming. *Journal of Climate*, 23, 4651-4668, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3655.1>.

Senent-Aparicio, J., López-Ballesteros, A., Jimeno-Sáez, P., & Pérez-Sánchez, J. (2023). Recent precipitation trends in Peninsular Spain and implications for water infrastructure design. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 45, 101308.

Seneviratne, S.I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C.M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., & Zhang, X. (2012). *Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment*. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D.

Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, p. 109-230.

Sharma, A.R., & Déry, S.J. (2020). Linking Atmospheric Rivers to Annual and Extreme River Runoff in British Columbia and Southeastern Alaska. *J. Hydrometeor.*, 21, 2457-2472, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0281.1>.

Sharma, P.J., Patel, P.L., & Jothiprakash, V. (2019). Impact of rainfall variability and anthropogenic activities on streamflow changes and water stress conditions across Tapi Basin in India. *Science of the total environment*, 687, 885-897.

Sheffer, N.A., Rico, M., Enzel, Y., Benito, G., & Grodek, T. (2008). The Palaeoflood record of the Gardon River, France: A comparison with the extreme 2002 flood event. *Geomorphology*, 98 (1-2), 71-83.

Shrestha, R.R., Bonsal, B.R., Bonnyman, J.M., Cannon, A.J., & Najafi, M.R. (2021). Heterogeneous snowpack response and snow drought occurrence across river basins of northwestern North America under 1.0 C to 4.0 C global warming. *Climatic Change*, 164, 1-21.

Shu, H., Hürlimann, M., Molowny-Horas, R., González, M., Pinyol, J., Abancó, C., & Ma, J. (2019). Relation between land cover and landslide susceptibility in Val d'Aran, Pyrenees (Spain): Historical aspects, present situation and forward prediction. *Science of the Total Environment*, 693, 133557.

Slater, L., Villarini, G., Archfield, S., Faulkner, D., Lamb, R., Khouakhi, A., & Yin, J. (2021). Global changes in 20-year, 50-year, and 100-year river floods. *Geophysical Research Letters*, 48(6), e2020GL091824.

Spinoni, J., Barbosa, P., De Jager, A., McCormick, N., Naumann, G., Vogt, J.V., Magni, D., Masante, D., & Mazzeschi, M. (2019). A new global database of meteorological drought events from 1951 to 2016. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 22:100593.

Stephenson, D.B., Pavan, V., Collins, M., Junge, M.M., Quadrelli, R., & Participating CMIP2 Modelling Groups (2006). North Atlantic Oscillation response to transient greenhouse gas forcing and the impact on European winter climate: a CMIP2 multi-model assessment. *Climate Dynamics*, 27, 401-420.

Støren, E.N., Kolstad, E.W., & Paasche, Ø. (2012). Linking past flood frequencies in Norway to regional atmospheric circulation anomalies. *J. Quat. Sci.* 27, 71-80, doi:10.1002/jqs.1520.

Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) (2020). *Rekommendationer vid val av nederbördsstatistik för dimensionering av dagvattensystem – “state of the art”*. https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.159923!/State%20of%20the%20Art-2020-03-11_GS.pdf

Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports*, 10(1), 1-10.

Tabari, H., Madani, K., & Willem, P. (2020). The contribution of anthropogenic influence to more anomalous extreme precipitation in Europe. *Environmental Research Letters*, 15(10), 104077. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb268>

Tarasova, L., Lun, D., Merz, R., Blöschl, G., Basso, S., Bertola, M., ... & Kumar, R. (2023). Shifts in flood generation processes exacerbate regional flood anomalies in Europe. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 49.

Tejedor, E., Benito, G., Serrano-Notivol, R., González-Rouco, F., Esper, J., & Büntgen U. (2024). Recent heatwaves as a prelude to climate extremes in the western Mediterranean region. *Climate and Atmospheric Science*, 7(1), 218.

Thober, S., Kumar, R., Wanders, N., Marx, A., Pan, M., Rakovec, O., ... & Zink, M. (2018). Multi-model ensemble projections of European river floods and high flows at 1.5, 2, and 3 degrees global warming. *Environmental Research Letters*, 13(1), 014003.

Thorndycraft, V., Benito, G., Rico, M., Sopena, A., Sánchez, Y., & Casas, M. (2005). A long-term flood discharge record derived from slackwater flood deposits of the Llobregat River, NE Spain. *Journal of Hydrology*, 313 (1-2), 16-31.

Tian, F., Wei, J., Haefner, M., & Kreibich, H. (Eds.). (2025). *Coevolution and prediction of Coupled Human-Water Systems: A Socio-Hydrologic Synthesis of Change in Hydrology and Society*. Cambridge University Press.

Tradowsky, J.S., Philip, S.Y., Kreienkamp, F., Kew, S.F., Lorenz, P., Arrighi, J., ... & Wanders, N. (2023). Attribution of the heavy rainfall events leading to severe flooding in Western Europe during July 2021. *Climatic Change*, 176(7), 90.

Tramblay, Y., & Somot, S. (2018). Future evolution of extreme precipitation in the Mediterranean. *Climatic Change*, 151(2), 289-302.

Tramblay, Y., Mimeau, L., Neppel, L., Vinet, F., & Sauquet, E. (2019). Detection and attribution of flood trends in Mediterranean basins. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(11), 4419-4431.

Treppiedi, D., Francipane, A., & Noto, L. V. (2025). Projecting depth-duration-frequency curves for future climate: a case study in the mediterranean area. *Water Resources Management*, 1-19.

Tuset, J., Barriendos, M., & Barriendos, J. (2022). "Historical Floods on the Spanish Mediterranean Basin: A Methodological Proposal for the Classification of Information at High Spatio-Temporal Resolution-AMICME Database (CE 1035–2022)" *Land*, 11(12), 2311. <https://doi.org/10.3390/land11122311>

Van Leeuwen, C.C., Cammeraat, E.L., de Vente, J., & Boix-Fayos, C. (2019). The evolution of soil conservation policies targeting land abandonment and soil erosion in Spain: A review. *Land use policy*, 83, 174-186.

Vannière, B., Demory, M.E., Vidale, P.L., Schiemann, R., Roberts, M.J., Roberts, C.D., ... & Senan, R. (2019). Multi-model evaluation of the sensitivity of the global energy budget and hydrological cycle to resolution. *Climate dynamics*, 52, 6817-6846.

Vargas Molina, J., & Canovas-Garcia, F. (2022). Flood risk characterization in spatial planning: progress and challenges for the incorporation of vulnerability. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (92), 1-48.

Varlas, G., Papadaki, C., Stefanidis, K., Mentzafou, A., Pechlivanidis, I., Papadopoulos, A., & Dimitriou, E. (2023). Increasing trends in discharge maxima of a Mediterranean River during early autumn. *Water*, 15(6), 1022.

Vaz, T.C.G. (2021). Movimentos de vertente desencadeados pela precipitação em Portugal continental. PhD Thesis, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa. <http://hdl.handle.net/10451/52496>.

Vázquez-Tarrio, D., Ruiz-Villanueva, V., Garrote, J., Benito, G., Calle, M., Lucía, A., & Díez-Herrero, A. (2024). Effects of sediment transport on flood hazards: Lessons learned and remaining challenges. *Geomorphology*, 446, 108976.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., Reig, F., Royo, A., Arretxea, M., Gil, M., ... & Nieto, R. (2025). Developing science-informed maps and climate service for extreme rainfall in Spain. *Natural Hazards*, 1-22.

Vicente-Serrano, S. M., Trambly, Y., Reig, F., González-Hidalgo, J. C., Beguería, S., Brunetti, M., ... & Potopová, V. (2025). High temporal variability not trend dominates Mediterranean precipitation. *Nature*, 639, 658–666. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08576-6>

Vicente-Serrano, S.M., Domínguez-Castro, F., Murphy, C., Peña-Angulo, D., Tomas-Burguera, M., Noguera, I., ... & El Kenawy, A. (2021). Increased vegetation in mountainous headwaters amplifies water stress during dry periods. *Geophysical Research Letters*, 48(18), e2021GL094672.

Vicente-Serrano, S.M., García-Herrera, R., Peña-Angulo, D., Tomas-Burguera, M., Domínguez-Castro, F., Noguera, I., ... & El Kenawy, A. (2022). Do CMIP models capture long-term observed annual precipitation trends? *Climate Dynamics*, 58(9-10), 2825-2842.

Vousdoukas, M.I. *et al.* (2020) Adaptación al aumento del riesgo de inundaciones costeras en la UE en el contexto del cambio climático. Informe técnico del CCI.

Vousdoukas, M.I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Jevrejeva, S., Jackson, L.P., & Feyen, L. (2018). Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nature communications*, 9(1), 2360.

Wasko, C., & Nathan, R. (2019). Influence of changes in rainfall and soil moisture on trends in flooding. *Journal of Hydrology*, 575, 432-441.

Wasko, C., Guo, D., Ho, M., Nathan, R., & Vogel, E. (2023). Diverging projections for flood and rainfall frequency curves. *Journal of Hydrology*, 620, 129403.

Wieder, W.R., Kennedy, D., Lehner, F., Musselman, K.N., Rodgers, K.B., Rosenbloom, N., ... & Yamaguchi, R. (2022). Pervasive alterations to snow-dominated ecosystem functions under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(30), e2202393119.

Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M., & Herold, M. (2021). Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature communications*, 12(1), 2501.

WMO 2025. Estado del clima mundial en 2024. Organización Meteorológica Mundial. OMM-N° 1368. ISBN 978-92-63-31368-3. <https://library.wmo.int/records/item/69455-state-of-the-global-climate-2024>

Yang, Y., Zhang, S., McVicar, T.R., Beck, H. E., Zhang, Y., & Liu, B. (2018). Disconnection between trends of atmospheric drying and continental runoff. *Water Resources Research*, 54(7), 4700-4713.

Yin, J., Gentile, P., Zhou, S., Sullivan, S.C., Wang, R., Zhang, Y., & Guo, S. (2018). Large increase in global storm runoff extremes driven by climate and anthropogenic changes. *Nature communications*, 9(1), 4389.

Yu, L., Du, Z., Dong, R., Zheng, J., Tu, Y., Chen, X., ... & Gong, P. (2022). FROM-GLC Plus: Toward near real-time and multi-resolution land cover mapping. *GIScience & Remote Sensing*, 59(1), 1026-1047.

Zaherpour, J., Gosling, S.N., Mount, N., Schmied, H.M., Veldkamp, T.I., Dankers, R., ... & Wada, Y. (2018). Worldwide evaluation of mean and extreme runoff from six global-scale hydrological models that account for human impacts. *Environmental Research Letters*, 13(6), 065015.

Zittis, G., Bruggeman, A., & Lelieveld, J. (2021). Revisiting future extreme precipitation trends in the Mediterranean. *Weather and Climate Extremes*, 34, 100380. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100380>.

Zobel, Z., Wang, J., Wuebbles, D.J., & Kotamarthi, V.R. (2018). Analyses for high-resolution projections through the end of the 21st century for precipitation extremes over the United States. *Earth's Future*, 6(10), 1471-1490. <https://doi.org/10.1029/2018EF000956>.

Conoce a los autores:



Juan Antonio Ballesteros Cánovas, Investigador del Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, Madrid.

juan.ballesteros@mncn.csic.es

Su investigación se centra en la comprensión de los riesgos hidrológicos en el contexto del cambio global, sus interacciones y coalescencia de procesos. En concreto, sus investigaciones abarcan tres temas fundamentales: (1) el impacto de la hidrosfera en la vegetación; (2) la comprensión de la frecuencia y magnitud de eventos extremos en cuencas torrenciales; y, (3) la comprensión de los vínculos entre dichos eventos extremos, el clima y actividades antropogénicas.



Gerardo Benito Ferrández, Profesor de Investigación del Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, Madrid

benito@mncn.csic.es

Su investigación se centra en los riesgos de inundación, y en la reconstrucción de inundaciones del pasado mediante registros de paleocrecidas e histórico-documentales, así como en su relación con la variabilidad climática. Ha sido autor en el Quinto Informe de Evaluación de Impactos y Adaptación al Cambio Climático del IPCC y en el Informe Especial del IPCC sobre «Gestión de los riesgos de fenómenos y desastres extremos para avanzar en la adaptación al cambio climático».

Conoce el Laboratorio de Hidrología y Cambio Climático

Somos un equipo de investigación adscrito al Grupo de Procesos Geoambientales y Cambio Global del Museo Nacional de Ciencias Naturales-CSIC de Madrid. Nos especializamos en el estudio de los extremos hidroclimáticos —inundaciones y sequías— y su relación con el cambio climático, combinando una amplia experiencia en hidrología de paleoinundaciones, hidrología histórica y riesgos naturales en entornos de montaña con un enfoque marcadamente multidisciplinar.

Nuestro trabajo abarca desde escalas locales hasta globales, y se apoya en métodos tan diversos como la geomorfología, la dendrocronología, el análisis de sedimentos lacustres, la teledetección, la estadística y la modelización hidrológica e hidráulica. Investigamos la magnitud y frecuencia de inundaciones y sequías, tanto en eventos singulares como en multiprocesos con efectos en cascada sobre las cuencas hidrográficas.

Asimismo, reconstruimos la frecuencia y magnitud de procesos hidrogeomórficos en regiones montañosas —flujos de detritos, corrimientos de tierras y avalanchas— y estudiamos la respuesta de los ecosistemas forestales a estas perturbaciones, contribuyendo cuando es posible a la mitigación de sus impactos. Nuestra investigación se extiende también al campo de la paleoclimatología, donde buscamos identificar los cambios ambientales que impulsaron la variabilidad climática en el pasado.

Conéctate a www.floodsresearch.com; X: [@floods_research](https://twitter.com/floods_research); Instagram: [@floods_research](https://www.instagram.com/floods_research)



**THE HYDROLOGY AND
CLIMATE CHANGE LAB**

Inundaciones y Cambio Climático. Estudios y Experiencias a nivel europeo (2018-2025)

El impacto del cambio climático en las inundaciones es una de las principales preocupaciones ambientales y de seguridad en la actualidad. Desde la publicación del informe “Inundaciones y cambio climático” en 2018, la ciencia ha seguido avanzando en la comprensión de los efectos del calentamiento global sobre las precipitaciones extremas, la acumulación nival y la peligrosidad de las inundaciones, aunque persisten incertidumbres a nivel local.

Este libro ofrece una actualización de las evidencias científicas más recientes, abordando los cambios observados y proyectados en los patrones de precipitación y los caudales máximos en Europa y España. A través de un enfoque interdisciplinar, se presentan estrategias de adaptación y mitigación frente al riesgo de inundaciones, así como herramientas metodológicas para su estudio en áreas con riesgo potencial significativo.

Un análisis riguroso y actualizado para comprender mejor la relación entre cambio climático e inundaciones y avanzar hacia una gestión más resiliente del riesgo.



MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



CSIC

