

RESUMEN EJECUTIVO SOBRE LA CONSIDERACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS PLANES DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN DE 2º CICLO (2022-2027) EN LAS CUENCAS INTERCOMUNITARIAS

JUNIO 2021



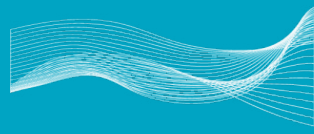
PGRI

Planes de
Gestión del
Riesgo de
Inundación



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



1. Posibles repercusiones del cambio climático en la incidencia de inundaciones

La Directiva 2007/60/CE de Evaluación y Gestión de los Riesgos de Inundación, traspuesta a la normativa española por el Real Decreto 903/2010, establece en su artículo 14.4 que las posibles repercusiones del cambio climático en la incidencia de las inundaciones se tomarán en consideración en las revisiones de la evaluación preliminar del riesgo de inundación (EPRI) y de los planes de gestión del riesgo de inundación (PGRI).

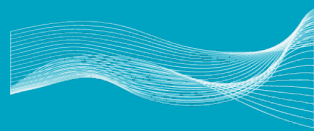
En consecuencia, ya en 2018 se elaboró el informe “Incorporación del Cambio Climático en la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) en el Segundo Ciclo de Aplicación de la Directiva de Inundaciones (2007/60/CE)” (MITECO, 2018), con el objetivo final de incorporar las posibles repercusiones del cambio climático en la fase EPRI, analizando los tramos de la red fluvial que previsiblemente podrían sufrir un mayor impacto del cambio climático en los caudales de crecida a través de la cuantificación de los cambios en la precipitación diaria máxima anual acumulada.

Y es ahora, para la revisión de los PGRI actualmente vigentes (que debe llevarse a cabo antes de finales de 2021 incorporando la posible influencia del cambio climático), que se ha podido contar con los resultados descritos en el informe “Impacto del cambio climático en las precipitaciones máximas en España” (CEDEX, 2021), elaborado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, cuyo objetivo es la evaluación del impacto del cambio climático sobre las precipitaciones máximas anuales, en distintos intervalos temporales, a partir de simulaciones procedentes de modelos climáticos regionales de EURO-CORDEX.

1.1. Informe “Impacto del cambio climático en las precipitaciones máximas en España” (CEDEX, 2021)”

Concretamente, en CEDEX (2021) se ha empleado el análisis de las proyecciones climáticas regionalizadas de los 15 modelos EURO-CORDEX disponibles, lo que ha permitido ampliar y profundizar en el estudio del impacto del cambio climático en las precipitaciones máximas respecto a lo realizado en el estudio precedente (MITECO, 2018). Además, también se ha ampliado





el número de variables analizadas, incluyendo las precipitaciones máximas en intervalos inferiores al día; se han estudiado tres periodos de impacto, con objeto de valorar la evolución del impacto a lo largo de todo el siglo XXI, y se han analizado tres periodos de retorno (10, 100 y 500 años), lo que ha permitido valorar el impacto en el conjunto de la ley de frecuencia.

Al mismo tiempo, se han incluido en el estudio distintos aspectos como el contraste de las simulaciones climáticas con los datos observados en el periodo de control y el análisis de los cambios en los principales estadísticos de las series de precipitaciones máximas anuales, así como la estimación de los cuantiles mediante el ajuste regional de la distribución SQRT-ETmax, de forma que la metodología empleada para la estimación de tasas de cambio en cuantil se conecta con la utilizada en el estudio vigente sobre precipitaciones máximas a escala nacional (“Máximas lluvias diarias en la España Peninsular” (DGC 1999)) realizado por el CEDEX para la Dirección General de Carreteras (DGC). De este modo, se han valorado los cambios tanto a nivel de celda como mediante el uso de regiones climáticas. No obstante, la estimación de cuantiles también se ha realizado mediante el ajuste de la distribución GEV de manera local, modelo estadístico empleado en el trabajo realizado por la UPM del que se partió en MITECO (2018), posibilitando la comparación de resultados con los obtenidos en MITECO (2018), y permitiendo extraer conclusiones sobre la influencia del modelo estadístico en los resultados sobre las tasas de cambio en cuantil.

En definitiva, este estudio puede considerarse como una actualización y extensión del análisis llevado a cabo para la incorporación de los efectos del cambio climático en la revisión del Evaluación Preliminar del Riesgo (EPRI) de segundo ciclo (MITECO, 2018).

Su ámbito de estudio es el conjunto del territorio español a excepción de las Islas Canarias, ya que no se disponen de datos para este territorio en la información de partida utilizada (se requeriría la utilización de los resultados de los modelos climáticos regionales de CORDEX África, distintos a los de EURO-CORDEX).

Los resultados de los análisis se han obtenido tanto a nivel local para cada una de las 3632 celdas de 0.11 grados en rejilla rotada en que se divide la zona de estudio, y en las que se dispone de las simulaciones de EURO-CORDEX para las distintas variables

Para la evaluación de la **influencia del cambio climático en la precipitación**, se ha

analizado su repercusión en la precipitación diaria máxima anual y la precipitación máxima horaria.

Para ello se han considerado:

Ámbito de estudio: **territorio español excepto Canarias** (por falta de datos)

15 proyecciones climáticas de EURO-CORDEX

2 escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero: RCP 4.5 y RCP 8.5

4 periodos de estudio: periodo de control (1971-2000) y tres periodos de impacto (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100).

3 periodos de retorno: 10, 100 y 500 años.

Acumulación de la precipitación en la red hidrográfica básica.

consideradas, como a nivel regional, para lo que se ha dividido la zona de estudio en 29 regiones climáticas. Estas regiones están compuestas por las 26 regiones climáticas peninsulares empleadas para la elaboración del trabajo “Máximas lluvias diarias en la España Peninsular” (Ferrer 1996; DGC 1999), como por tres regiones adicionales para las Islas Baleares, Ceuta y Melilla.

El estudio utiliza series de observaciones pertenecientes a 2079 estaciones meteorológicas procedentes de la red de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) con datos de precipitación diaria, que han sido seleccionadas teniendo en cuenta la longitud de la serie de datos disponible en el periodo de control y la densidad espacial de estaciones en la zona de estudio. Las estaciones seleccionadas cuentan al menos con 22 años de datos observados en el periodo de control, y dan lugar a la cobertura de algo más del 41% de las celdas de estudio.

Las simulaciones utilizadas están disponibles para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 (escenarios de emisión de gases de efecto invernadero usados en el *Quinto Informe de Evaluación del IPCC* (“*Intergovernmental Panel on Climate Change*”)).

Con respecto a la información disponible, se refiere a cuatro periodos de estudio: el periodo de control (1971 – 2000) y tres periodos de impacto (2011 – 2040, 2041 – 2070, 2071 – 2100).

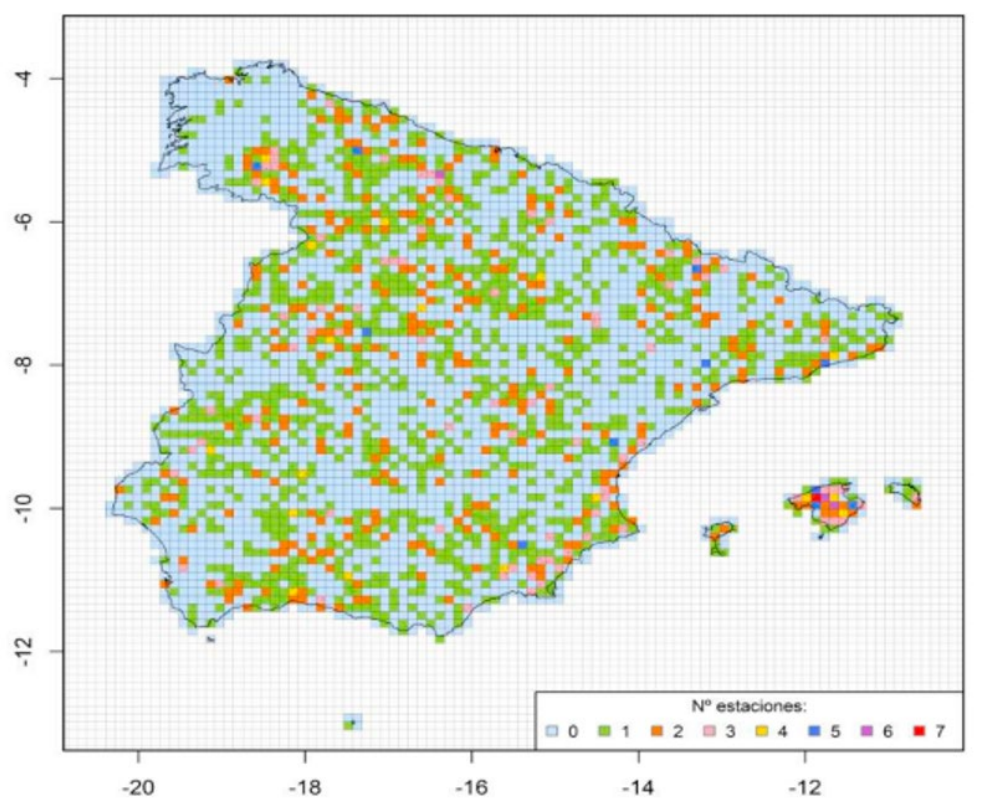


Figura 1. Zona de estudio, indicando celdas y número de estaciones meteorológicas por celda. Fuente: CEDEX, 2021

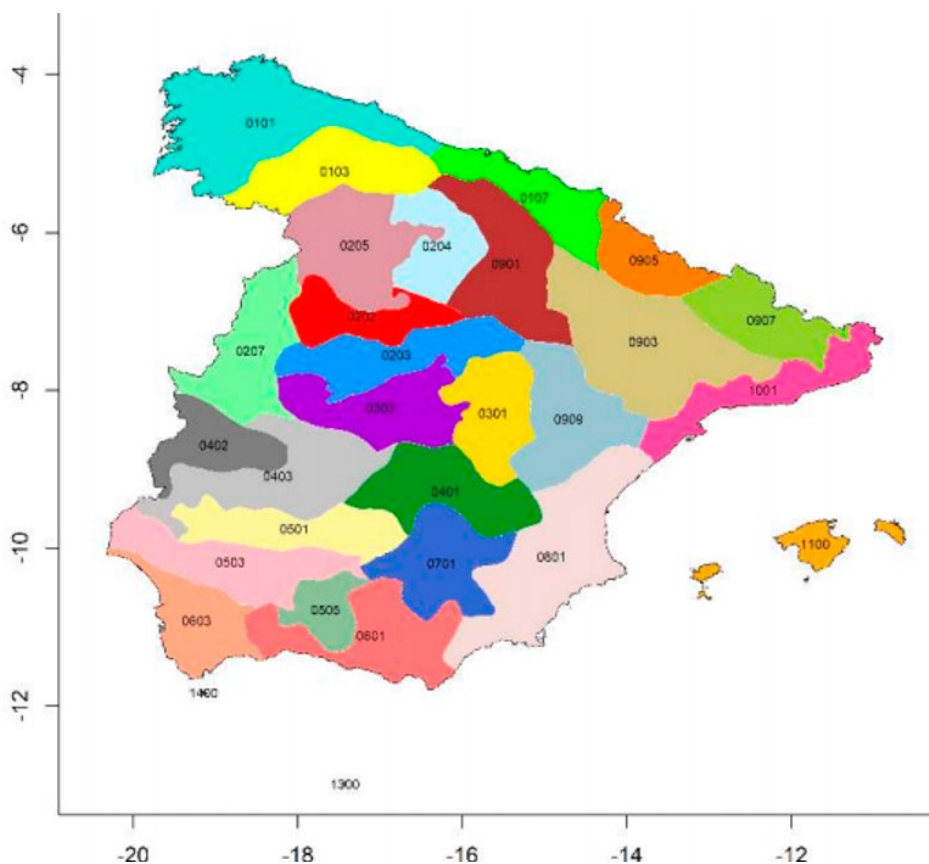
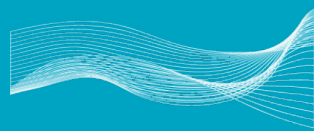


Figura 2. División de la zona de estudio en 29 regiones climáticas. Fuente: CEDEX, 2021

1.2. Fases del trabajo y principales resultados

1.2.1. Análisis del comportamiento de las series de precipitación diaria máxima anual procedentes de modelos climáticos regionales en el periodo de control respecto a las series de precipitación diaria máxima anual observadas

Objetivo: Evaluar si los modelos climáticos proporcionan series representativas y, por lo tanto, los resultados obtenidos a través de su análisis pueden considerarse realistas

Para ello, se han comparado las series diarias máximas anuales simuladas con las observadas (procedentes de las estaciones seleccionadas de la red de AEMET) mediante el contraste de estadísticos representativos de sus propiedades, en las celdas donde existen observaciones.

Los estadísticos utilizados son la media, el L-coeficiente de variación (LCV), el L-coeficiente de sesgo (LCS), el coeficiente de variación (CV), el coeficiente de sesgo (CS) y el valor máximo estandarizado (maxstd).

Resultados

El análisis del valor medio de los estadísticos en la zona de estudio muestra que los valores observados se encuentran dentro del rango de los estadísticos obtenidos mediante los modelos climáticos, aunque un mayor número de modelos sobreestima el LCV, el CV y el maxstd, y subestima la media.

El comportamiento general del conjunto de modelos climáticos de estudio en relación a la precipitación diaria máxima anual puede considerarse adecuado en el periodo de control, lo que apoya su utilización en el análisis del efecto del cambio climático.

Sin embargo, se ha detectado una subestimación generalizada de la precipitación máxima diaria en algunas regiones del este y sureste peninsular, así como en las Islas Baleares, que podría estar relacionada con una mayor limitación de los modelos climáticos para representar correctamente la precipitación convectiva típica de estas zonas; así como una sobreestimación en la región situada en el valle del Ebro.

El adecuado comportamiento de los modelos climáticos en el periodo de control, afirma su utilización en el análisis de cambio climático

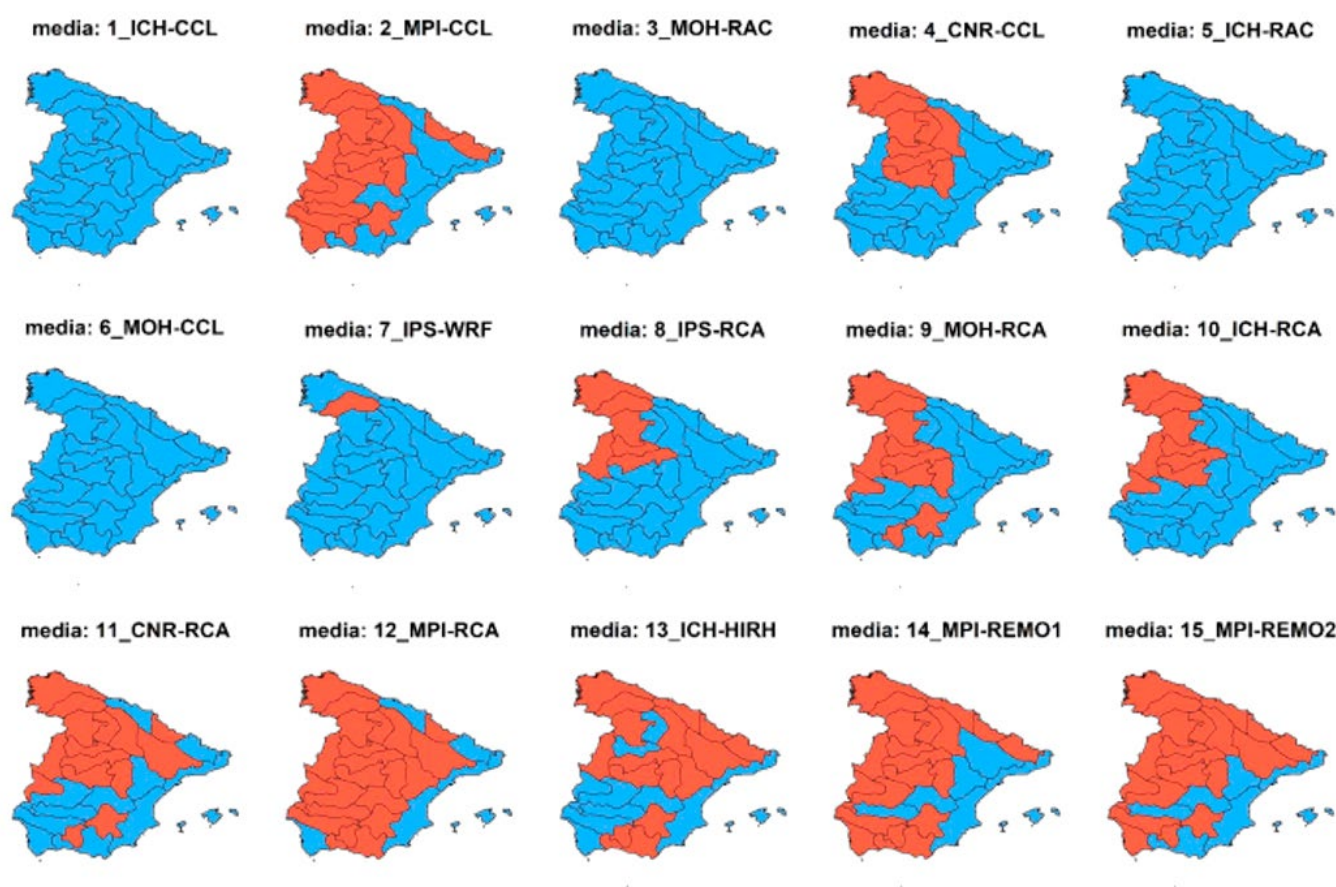
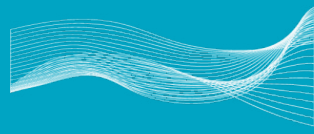


Figura 3. Análisis de la media de la precipitación diaria máxima anual por regiones: sobreestimación (en rojo) o subestimación (en azul) por parte de los modelos climáticos de estudio en relación a la media observada. Fuente: CEDEX, 2021



1.1.2. Análisis de tendencias y cambios en la mediana y en la varianza, así como en la estacionalidad, de las series de precipitación máxima anual procedentes de modelos climáticos regionales en los periodos de impacto

Objetivo: Identificar posibles tendencias, cambios en las poblaciones estadísticas y cambios en la estacionalidad correspondientes a las variables de estudio debido al efecto del cambio climático.

Debido a que el buen comportamiento de un modelo climático en el periodo de control no está necesariamente ligado con un buen comportamiento en los periodos de impacto, la evaluación del efecto del cambio climático se ha realizado en base al mayor número de modelos climáticos posible que permita conocer todo el rango de tendencias de evolución del clima que proporcionan los modelos disponibles.

El contraste de la estacionalidad de las series simuladas de precipitación diaria máxima anual con respecto a la estacionalidad observada permite concluir que los modelos climáticos (con la excepción de algunos modelos) muestran una buena representatividad general del ciclo estacional en las diferentes regiones, aunque con algunas diferencias dependiendo de la región climática de que se trate.

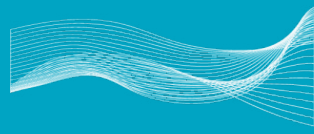
El análisis de tendencias en las variables de estudio se ha realizado sobre el periodo completo 2011-2100 para cada escenario (RCP 4.5 y RCP 8.5), y el de cambios en la mediana y en la varianza sobre cada uno de los tres periodos de impacto, también para cada uno de los dos escenarios, comparando éstos con el periodo de control.

Las tendencias se han analizado mediante el test de Mann Kendall, y los cambios en mediana y en varianza mediante los test de Wilcoxon y de Fligner Killeen, respectivamente. Cada test se aplica de forma local en cada celda para cada modelo climático de estudio y, posteriormente, se evalúa la significancia regional mediante la aplicación del método de la tasa de falso descubrimiento en cada región, identificando aquellas celdas y regiones para las que la mayoría de modelos climáticos coincide en la identificación de una tendencia, cambio en la mediana o cambio en la varianza significativo positivo o negativo.



La gran mayoría de los modelos climáticos muestra buena representatividad del ciclo estacional en las distintas regiones





Resultados

Se han obtenido resultados consistentes entre las distintas variables de estudio, a pesar de emplearse conjuntos de modelos climáticos diferentes para contar con la mayor información posible para cada variable, y aun no siendo por lo tanto sus resultados estrictamente comparables, debiéndose manejar con cautela.

Se han obtenido **resultados consistentes** en las variables de estudio

Precipitación diaria máxima anual

Los distintos modelos climáticos de estudio muestran una gran variabilidad de resultados. En general, el número de tendencias significativas, tanto positivas como negativas, es mayor para el escenario RCP 8.5 que para el RCP 4.5.

El número de cambios en la mediana significativos es, en general, mayor para el RCP 8.5 que para el RCP 4.5, excepto para cambios significativos negativos asociados con el periodo de impacto 2011-2040, que son menores para RCP 8.5. Este efecto se intensifica según avanza el siglo XXI. A nivel nacional (excepto Canarias, no incluida en el estudio) se identifica un aumento significativo de la mediana en celdas del norte de la Península (principalmente en el noroeste). A nivel de región, para la misma combinación de escenario y periodo de impacto, se identifica un aumento significativo de la mediana en cinco regiones en el noroeste de la Península.

Amplia **variabilidad de resultados**. En general, el número medio de resultados significativos positivos aumenta con el escenario y con el periodo de impacto, según avanza el siglo XXI

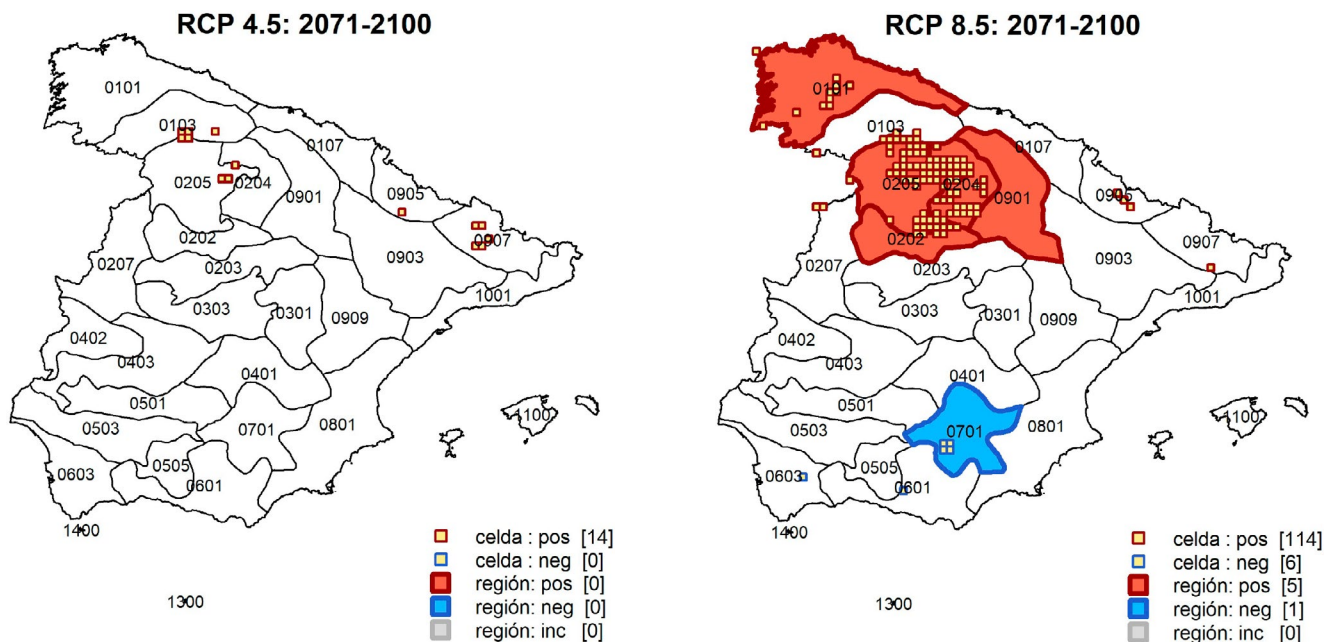
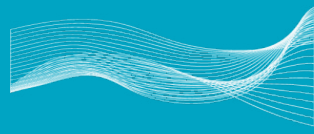


Figura 4. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación diaria máxima anual ("pos" = positivo; "neg" = negativo; "inc" = inconsistente). Fuente: CEDEX, 2021



Los resultados asociados a los cambios en la varianza presentan más variabilidad siendo, en general, el número de cambios en este estadístico significativos positivos mayores para RCP 8.5 que para RCP 4.5, y el número de cambios significativos negativos menores para RCP 8.5, existiendo excepciones en ambos casos. En general, el número medio de resultados significativos aumenta con el escenario (mayor en RCP 8.5 que en RCP 4.5) y con el periodo de impacto (existiendo excepciones) según avanza el siglo XXI, siendo el número medio de resultados significativos positivos mayor que el de resultados significativos negativos para los test estadísticos utilizados. A nivel nacional (excepto Canarias) se identifica un aumento significativo de la varianza en algunas celdas aisladas distribuidas por la Península.

También se detecta que los patrones estacionales futuros son muy similares a los del periodo de control en todos los casos, registrándose las mayores diferencias entre periodos de estudio, en la mayor parte de las regiones, en los meses de otoño e invierno, principalmente en el caso de las regiones de la vertiente atlántica. Estos resultados parecen indicar que no son esperables cambios relevantes en el patrón estacional de ocurrencia de las máximas precipitaciones diarias como consecuencia del cambio climático. No obstante, en la mayor parte de las regiones de la vertiente atlántica se aprecia, en algunos casos, un ligero retraso, de uno o dos meses, en el mes en el que se registra el mayor número de eventos, correspondiente a las estaciones de otoño o invierno.

Precipitación convectiva diaria máxima anual

Los resultados indicarían que el posible incremento de precipitación máxima en la zona de los Pirineos podría deberse en parte a una intensificación de los fenómenos de carácter convectivo típicos de las zonas montañosas.

Por otra parte, se destaca el hecho de que no se detecten cambios en la precipitación convectiva en la zona del levante y sureste peninsular (sí aparecen cambios en varianza en las Islas Baleares), salvo para la mediana en algunas celdas al norte de la región "1001", donde ese tipo de fenómeno es origen de las mayores precipitaciones que se producen en la zona.

No obstante, como se indicó anteriormente, los resultados proporcionados por los modelos climáticos en las regiones ubicadas en esa zona podrían ser menos fiables (debido al sesgo generalizado en la estimación de la media por parte de los modelos climáticos, posiblemente relacionado con una mayor limitación de los modelos para representar correctamente la precipitación convectiva típica de estas zonas), y, por lo tanto, será necesario tomarlos con una mayor precaución.



No se detectan importantes cambios en los patrones estacionales, aunque sí se observa un ligero retraso en el mes en que se registra el mayor número de eventos en la mayor parte de las regiones de la vertiente atlántica



Posible incremento de la precipitación máxima en los Pirineos. No se detectan cambios en levante y sureste peninsular



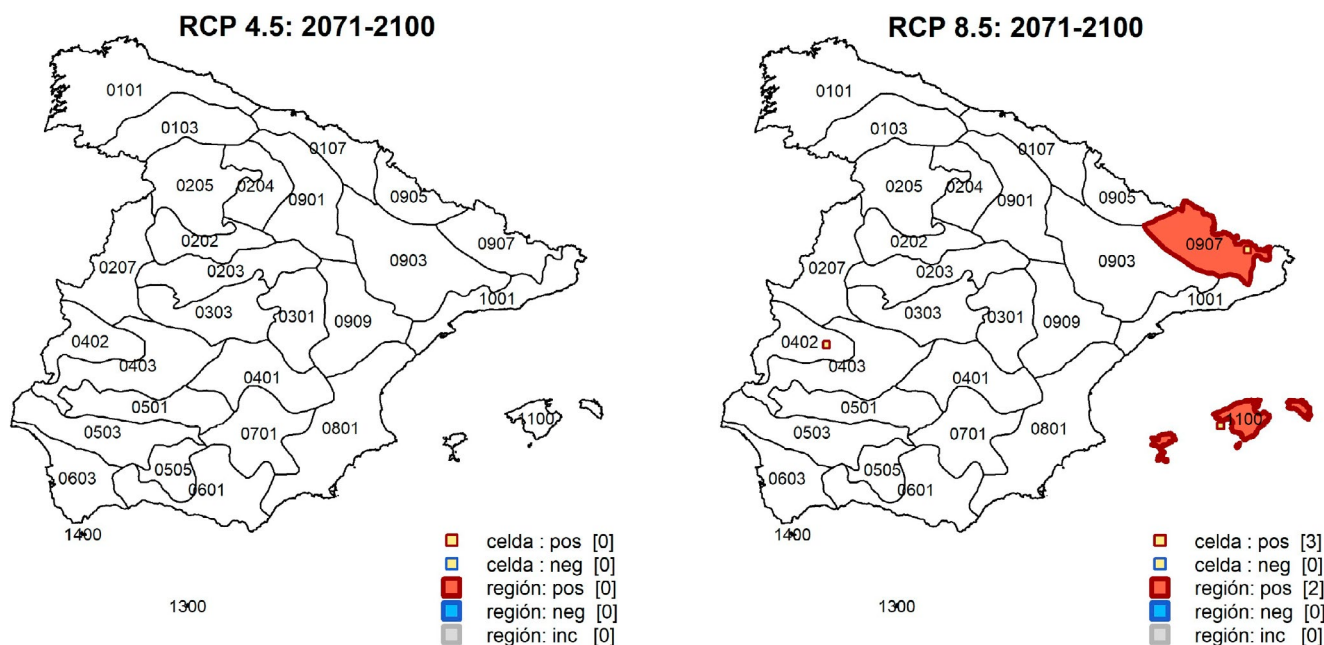
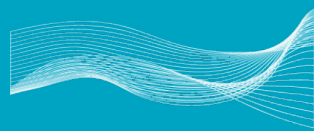


Figura 5. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación convectiva diaria máxima anual (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente). Fuente: CEDEX, 2021

Precipitación horaria máxima anual

Sus resultados son consistentes con los observados para la precipitación diaria máxima anual, siendo similar el patrón espacial de cambios, pero con una intensificación muy notable del incremento de la mediana y la varianza en ambos escenarios, y principalmente para el RCP 8.5 y el último periodo de impacto.

Los incrementos de mediana se ubican principalmente, al igual que para la precipitación diaria, en la zona noroccidental (aunque en este caso se extienden también hacia el centro y noreste peninsular), y ya no se pronostican descensos en la zona suroriental.

Los incrementos de varianza se producen principalmente en las regiones del centro y sur de la Península (también para la varianza con una mayor extensión hacia el noreste del país), de la misma forma que en el caso de la precipitación diaria, aunque, como se ha indicado, de una manera más intensa y generalizada.

Estos resultados apuntan a un mayor incremento de las precipitaciones para intervalos temporales más pequeños y, por lo tanto, a un incremento de la torrencialidad, en línea con la idea general de que el efecto del cambio climático es mayor en lluvias extremas asociadas con duraciones de lluvia más cortas.

Los resultados apuntan a un **incremento de la torrencialidad**

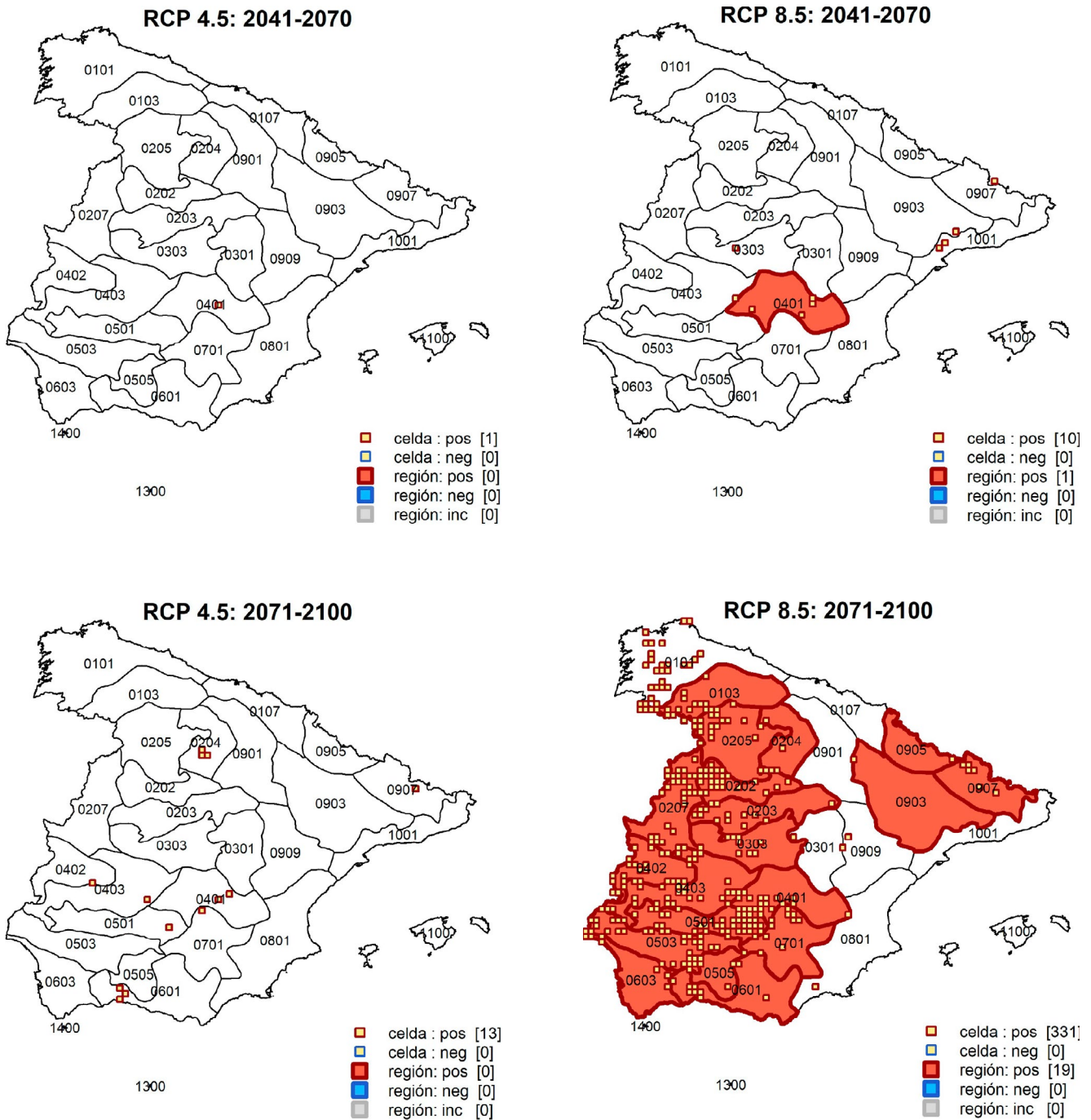
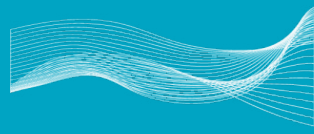
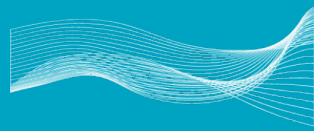


Figura 6. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación horaria máxima anual (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente. Fuente: CEDEX, 2021



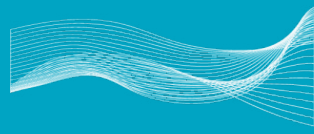
1.2.3 Estimación de las tasas de cambio en cuantil medias y asociadas a los percentiles 10 y 90 (para valorar la incertidumbre asociada a las estimaciones) de las series de precipitación máxima anual procedentes de los modelos climáticos de estudio, así como la evaluación de la significancia estadística de dichas tasas de cambio medias mediante un procedimiento basado en simulaciones de Monte Carlo

Objetivo: Proporcionar mapas de tasas de cambio en cuantil medias (identificando aquellas tasas con significancia estadística para la evaluación del impacto del cambio climático sobre las leyes de frecuencia de precipitación máxima), valorar su posible utilización en la evaluación del efecto del cambio climático en los caudales de crecida y proporcionar mapas de cambios en el factor de torrencialidad (para una primera aproximación a los posibles cambios en la estructura temporal de la precipitación y las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) bajo el efecto del cambio climático).

Debido al diferente conjunto de modelos climáticos disponible para analizar cada variable, se ha decidido centrar el estudio de las tasas de cambio en cuantificar y analizar con un mayor detalle la precipitación diaria máxima anual, como variable básica en los estudios de crecidas, complementando sus resultados con los obtenidos de forma cualitativa para la precipitación horaria máxima anual (para valorar los cambios en la distribución temporal de la precipitación) y la precipitación convectiva diaria máxima anual (para conocer en qué medida los cambios en la precipitación se deben a cambios en aquellas de origen convectivo). De forma adicional, se han calculado los cambios en el factor de torrencialidad (relación entre la intensidad de precipitación horaria y diaria) a través de las tasas de cambio en cuantil para precipitación diaria y horaria máxima anual obtenidas en base al uso de los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables, obteniéndose una visión general de dichos cambios de manera regional.

Las tasas de cambio se obtienen a partir de los cuantiles estimados para cada uno de los tres periodos de impacto para cada escenario, respecto a aquellos estimados para el periodo de control, obteniéndose mapas de tasas de cambio asociados a: "RCP 4.5: 2011-2040", "RCP 4.5: 2041-2070", "RCP 4.5: 2071-2100", "RCP 8.5: 2011-2040", "RCP 8.5: 2041-2070" y "RCP 8.5: 2071-2100". Además, las tasas de cambio en cuantil en una





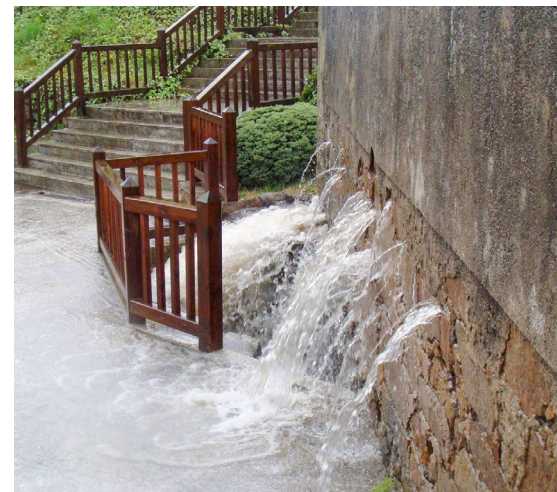
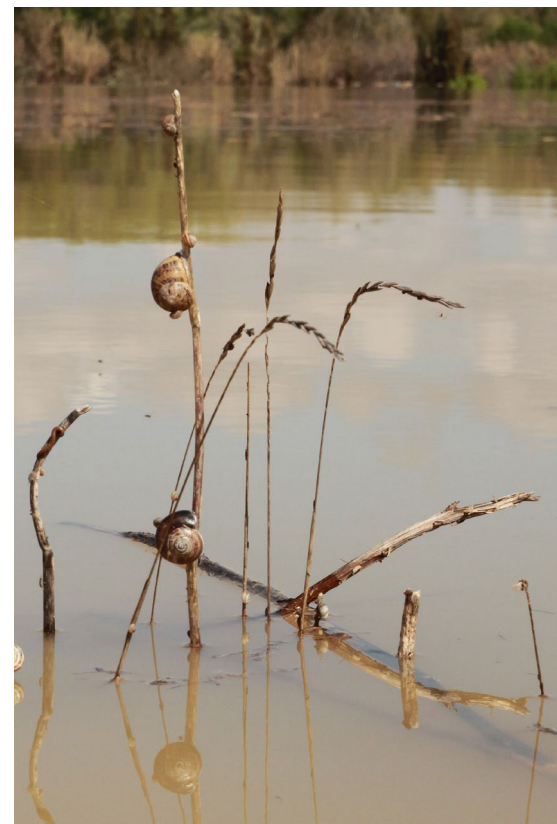
celda se han obtenido para los tres periodos de retorno ($T = 10, 100$ y 500 años).

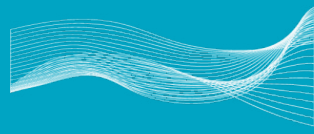
Estas tasas de cambio no pueden considerarse directamente relacionadas con el cambio climático, sino que en gran parte son debidas a la incertidumbre inherente a la estimación de los cuantiles (en mayor medida los de más alto periodo de retorno) a partir de muestras de tamaño reducido. Ha sido, por tanto, necesario analizar la significancia estadística de los cambios para identificar en qué casos son de suficiente magnitud como para que pueda afirmarse con cierto rigor que se deben a un cambio en la población estadística como consecuencia de un cambio en el clima.

La estimación de los cuantiles de precipitación máxima anual necesarios para la obtención de las tasas de cambio en cuantil se ha llevado a cabo mediante el ajuste de dos modelos estadísticos: (i) la distribución SQRT-ETmax ajustada por momentos ordinarios y CV regional (denominado en este trabajo como modelo SQRT-R) y (ii) la distribución GEV ajustada por L-momentos de manera local (denominado en este trabajo como modelo GEV-L).

Los mapas de tasas de cambio medias para cada modelo estadístico se obtienen como media de las tasas de cambio asociadas al conjunto de modelos climáticos para cada periodo de impacto y escenario en cada celda. Además de la media, en el caso de la precipitación diaria máxima anual, también se han estimado los valores asociados a los percentiles 10 y 90 con el objetivo de caracterizar la variabilidad de las tasas de cambio en el conjunto de modelos climáticos, lo que constituye una medida de su incertidumbre asociada.

La evaluación de la significancia estadística de los cambios en cuantil medios se ha llevado a cabo a nivel local en cada una de las celdas que forman la zona de estudio, así como a nivel regional (para el modelo SQRT-R) en base al uso de las regiones climáticas, a través de la estimación de los intervalos de confianza asociados a los cuantiles del periodo de control, mediante la realización de simulaciones de Monte Carlo, y de su posterior comparación con los cuantiles para los periodos de impacto y escenarios, siguiendo la metodología propuesta por el CEDEX y que ya fue empleada en MITECO (2018). De este modo, el cambio asociado a aquellos cuantiles que para un periodo de impacto y escenario estén fuera de los intervalos de confianza de los





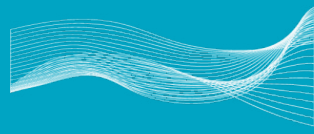
cuantiles para el periodo de control, para un determinado nivel de significancia seleccionado, puede considerarse significativo. La significancia regional se ha determinado mediante la aplicación del método de la tasa de falso descubrimiento en cada región climática considerada.

El modelo GEV-L da lugar a cuantiles más extremos y rangos de las tasas de cambio medias más amplios, mientras que identifica un menor porcentaje de celdas con cambios en cuantil significativos, presentando mayor dispersión espacial, siendo este porcentaje menor a medida que aumenta el periodo de retorno. El modelo SQRT-R, en cambio, da lugar a cuantiles menos extremos y rangos de las tasas de cambio medias más estrechos, mientras que identifica un mayor porcentaje de celdas con cambio en cuantil significativo que presenta una mayor concentración por zonas, siendo este porcentaje mayor a medida que aumenta el periodo de retorno. Las zonas que presentan mayores tasas de cambio medias positivas están generalmente asociadas con cambios en cuantil significativos positivos. El especial comportamiento del modelo GEV-L, con una reducción del número de celdas con cambio significativo según aumenta el periodo de retorno, está relacionado con la gran incertidumbre asociada a la estimación de cuantiles (especialmente para altos periodos de retorno), a partir de muestras de escasa longitud, mediante dicho modelo estadístico.

En definitiva, al incrementarse la incertidumbre, la señal de cambio climático se pierde, quedando enmascarada por la incertidumbre asociada al estadístico, por lo que ya no es posible identificar los cambios asociados a la modificación del clima. En consecuencia, el modelo GEV-L no permite identificar con rigor los cambios en los cuantiles como consecuencia del cambio climático, al menos, para periodos de retorno altos.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que el modelo estadístico concreto que se utilice para la obtención de las tasas de cambio de los cuantiles tiene una importancia crítica en los resultados. Se recomienda el uso de los mapas de tasas de cambio obtenidos en este trabajo mediante el modelo SQRT-R, que proporciona tasas de cambio más robustas, con menor heterogeneidad espacial que el modelo GEV-L, lo que facilita su aplicación en la práctica, así como un mayor número de celdas con cambios significativos a medida que aumenta el periodo de retorno, lo que proporciona resultados más consistentes y que,





en cualquier caso, dejarían del lado de la seguridad. Asimismo, el modelo SQRT-R es consistente con el empleado en la obtención de los mapas de precipitación máxima diaria derivados del trabajo “Máximas lluvias diarias en la España peninsular” (DGC 1999). Adicionalmente, se recomienda la utilización únicamente de aquellas tasas de cambio consideradas como significativas, ya que son las que pueden considerarse relacionadas con el impacto del cambio climático; asumiendo, en principio, que no se producirían cambios en aquellas celdas donde el cambio no es estadísticamente significativo.

Es importante destacar la existencia de diversas fuentes de incertidumbre asociadas a la estimación de las tasas de cambio en cuantil del presente estudio: (i) el procedimiento de evaluación de la significancia estadística de las tasas de cambio, (ii) la disponibilidad de modelos climáticos que afecta a dicha estimación de las tasas de cambio y su significancia y (iii) la gran variabilidad de resultados entre los distintos modelos.

▪ Resultados

Las variables de estudio consideradas muestran un comportamiento similar:

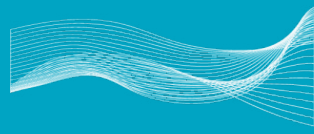
El rango de las tasas de cambio en cuantil medias y medias significativas es más amplio para el modelo GEV-L que para el modelo SQRT-R. Los valores medios de dichas tasas aumentan con el periodo de impacto, el periodo de retorno y también, en general, con el escenario para ambos modelos estadísticos.

El porcentaje de celdas con cambio en cuantil significativo positivo es mayor para el modelo SQRT-R que para el modelo GEV-L, aumentando dichas diferencias con el periodo de retorno y también, en general, con el escenario. El porcentaje de celdas con cambio significativo negativo es muy reducido para ambos modelos estadísticos.

Las celdas con cambios significativos positivos identificadas mediante el modelo SQRT-R para la precipitación diaria máxima anual (Figura 7), se localizan en mayor medida en el centro, noroeste y noreste peninsular (con ciertas diferencias en el patrón espacial proporcionado por el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5), extendiéndose por el resto del territorio según avanza el siglo XXI y aumenta el periodo de retorno, excepto a zonas del este, sur y cantábrico.



Se detectan **cambios significativos positivos** sobre todo en el centro, noroeste y noreste peninsular



El patrón espacial para la precipitación convectiva máxima anual es similar, localizándose fundamentalmente los cambios en el centro y noreste peninsular, e Islas Baleares, extendiéndose también en este caso a gran parte del territorio según avanza el siglo XXI y aumenta el periodo de retorno, y en mayor medida para el escenario RCP 8.5 que para el RCP 4.5, excepto a amplias zonas del sur, sureste, norte y noroeste peninsular.



Los cambios detectados se localizan en el centro y noreste peninsular e islas Baleares

SQRT-R: RCP 8.5

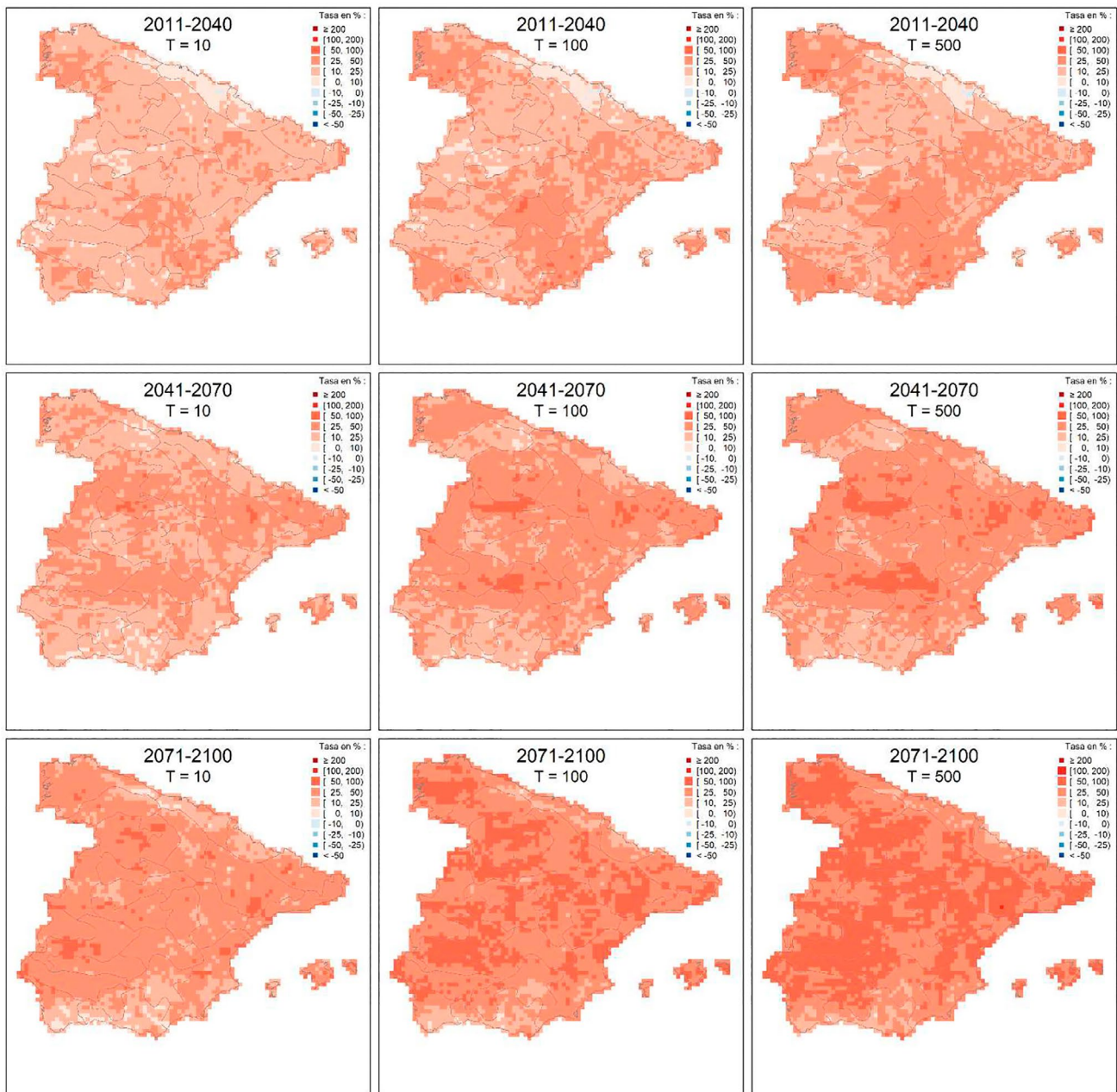
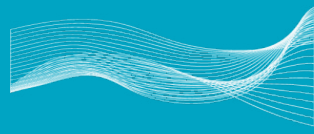


Figura 7. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 90 en la Península y Baleares para precipitación diaria máxima anual en base a modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 8.5. Fuente: CEDEX, 2021



Por último, en el caso de la precipitación horaria máxima anual, para $T = 10$ años y el primer periodo de impacto, las celdas con cambios se ubican principalmente en el centro (en mayor medida en la parte occidental que en la oriental) y noreste peninsular, alcanzando también a algunas zonas del sur y sureste. Estas zonas se extienden a prácticamente la totalidad del territorio según avanza el siglo XXI y aumenta el periodo de retorno, con ligeras diferencias en el patrón espacial entre el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5. Los resultados obtenidos indican que los cambios afectarán a una mayor extensión de territorio que en el caso de la precipitación diaria, destacando un mayor número de celdas con cambios en el sur y sureste peninsular e Islas Baleares para ambos escenarios, en el noroeste peninsular para el escenario RCP 4.5 y en la zona central occidental para el escenario RCP 8.5. Asimismo, las tasas de cambio son, en general, de mayor magnitud para la precipitación horaria que para la diaria. Estos resultados parecen apuntar a un mayor incremento de las precipitaciones para intervalos temporales más pequeños y, por lo tanto, a una mayor torrencialidad.

El cambio relativo en el factor de torrencialidad en la Península y Baleares presenta mayores valores positivos que negativos, aumentando el valor máximo con el periodo de retorno. Las celdas con cambios relativos positivos se encuentran distribuidas a lo largo de la Península, presentando generalmente mayores cambios a medida que aumenta el periodo de retorno y el periodo de impacto. Las zonas donde en mayor medida no se pronostican cambios (i.e., donde se encuentra la mayor parte de las celdas para las que no existe cambio en cuantil significativo para precipitación diaria ni horaria máxima anual) se encuentran en el noroeste y sur de la Península y en Baleares.

1.2.4. Análisis de los cambios en los cuantiles de precipitación diaria máxima anual acumulada en la red fluvial

Objetivo: elaboración de mapas de tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada debido al efecto del cambio climático para facilitar la identificación de tramos de la red fluvial donde podrían darse los cambios más relevantes en los caudales de crecida.

Para ello se parte de las tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual medias significativas (para $\alpha = 0.10$) estimadas a través del método SQRT-R, modelo estadístico

Los cambios afectarán a una mayor extensión de territorio que en el caso de la precipitación diaria, y serán de mayor magnitud (mayor torrencialidad)



empleado en la elaboración del estudio “Máximas lluvias diarias en la España peninsular” (DGC 1999) sobre cuyos mapas de cuantiles de precipitación diaria máxima anual observada se aplicarán dichas tasas de cambio. El contraste de los mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la red fluvial futura con los mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada observada (obtenidos ambos en base al mapa de direcciones de la red de drenaje, mediante el cual se identifican las celdas pertenecientes a cada cuenca agregando su precipitación) permite elaborar los mapas de tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada.

Dado que los cuantiles de precipitación diaria máxima anual observada se encuentran disponibles únicamente para la Península, se han obtenido resultados solo para las cuencas españolas localizadas dentro de la misma. Por coherencia con MITECO (2018), el análisis se realiza para el periodo de impacto 2041-2070, considerando cada uno de los dos escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5), y para los tres periodos de retorno utilizados en este estudio (T = 10, 100 y 500 años).

▪ Resultados

Prácticamente todas las tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada a lo largo de la red fluvial en la Península para el periodo de impacto 2041-2070 son positivas, alcanzando valores de hasta el 35%, con la excepción de un pequeño tramo de la red fluvial localizado en el sur de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas, que presenta tasas de cambio negativas para T = 10 años en relación al escenario RCP 4.5. El efecto de las tasas de cambio en cuantil de esta variable es más marcado a medida que aumenta el periodo de retorno y para el escenario más pesimista.

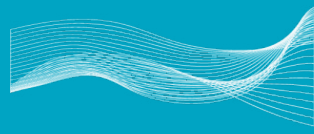
Con respecto a la distribución espacial de las tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada a lo largo de la red fluvial en la Península, las zonas donde existe una mayor densidad de tramos con valores más elevados de las tasas de cambio aumenta a medida que aumenta el periodo de retorno. Estas zonas se encuentran localizadas a lo largo de toda la Península, aunque con muy escasa presencia en el sur y en la vertiente cantábrica para ambos escenarios. Las demarcaciones hidrográficas con mayor presencia de tramos con cambios más importantes en relación al escenario RCP 4.5 son la del Guadiana, la del Tajo y la del Duero; mientras que para el escenario RCP 8.5 son el Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña, la del Júcar, la cabecera de la del Segura, la del Guadiana, la del Duero y la del Ebro (ver Figura 8 y Figura 9).

••• Casi todas las tasas de cambio en cuantil de la precipitación diaria máxima anual acumulada en la red fluvial para el periodo 2041-2070 **son positivas**

••• La distribución espacial de las tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la red fluvial señala que las demarcaciones con mayor presencia de **tramos con cambios más importantes** son:

RCP 4.5: Guadiana, Tajo y Duero

RCP 8.5: Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña, Júcar, la cabecera del Segura, Guadiana, Duero y Ebro



RCP 4.5 : 2041-2070 / T = 500

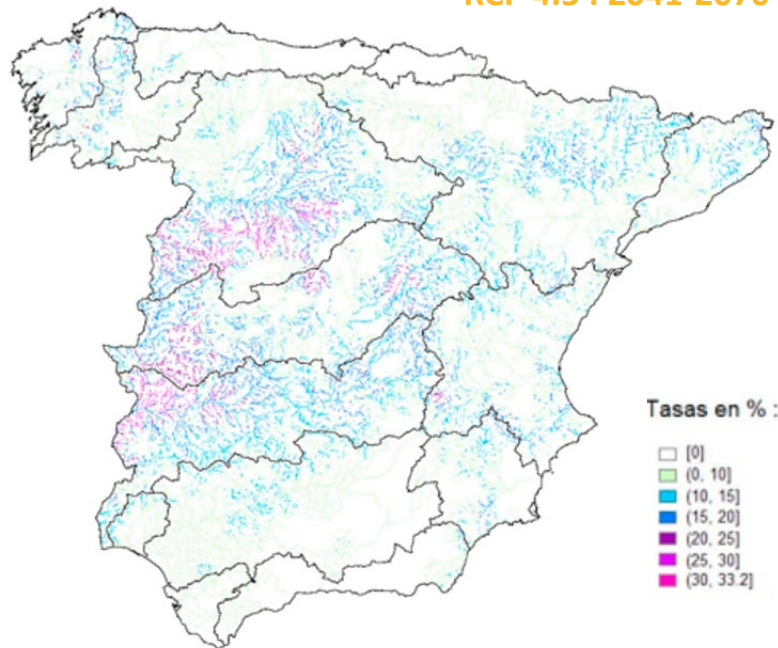


Figura 8. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la Península para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes) para RCP 4.5 y T = 500 años. En morado se aprecian las zonas con una tasa de cambio superior al 20%

RCP 8.5 : 2041-2070 / T = 500

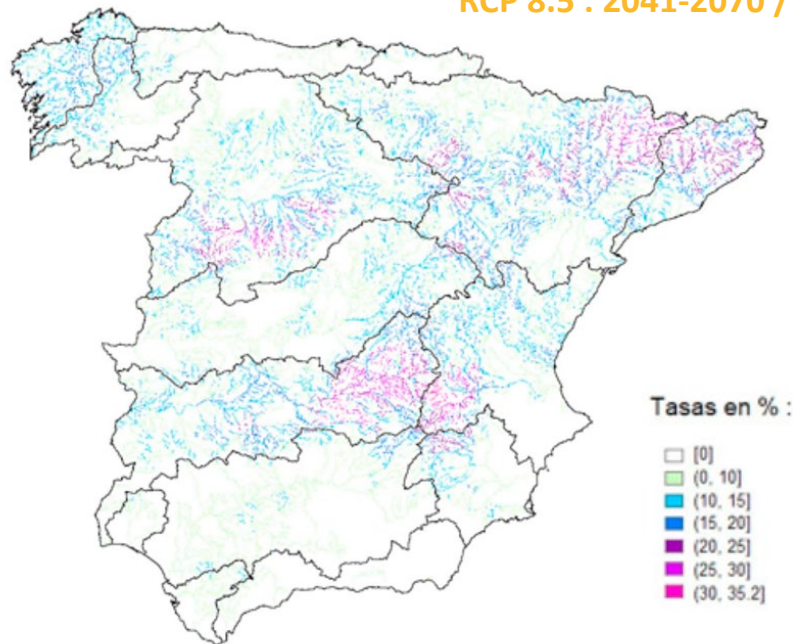


Figura 9. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la Península para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes) para RCP 8.5 y T = 500 años. En morado se aprecian las zonas con una tasa de cambio superior al 20%

2. Consideración del cambio climático en los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación

Utilizando como punto de partida los resultados obtenidos en el informe “Impacto del cambio climático en las precipitaciones máximas en España (CEDEX, 2021)”, para la consideración del cambio climático en los PGRI de segundo ciclo de las distintas demarcaciones hidrográficas del territorio español, tal y como requiere el artículo 14.4 de la Directiva de Inundaciones, se ha desarrollado una metodología que permite abordar el análisis de la potencial influencia de dicho cambio climático sobre las inundaciones de carácter fluvial y pluvial.

De este modo, ha sido posible identificar los tramos ARPSI que potencialmente pueden sufrir un aumento del riesgo de inundación como consecuencia de la influencia del cambio climático, y valorar este probable aumento de forma cualitativa.

Esta metodología centra su análisis sobre dos componentes diferenciadas, las cuales son determinantes en la variación y frecuencia de las leyes de caudales: la componente meteorológica y la componente usos del suelo. A través de una fórmula matemática que relaciona ambas, se ha determinado cualitativamente la posible influencia del cambio climático en el riesgo de inundación.

$$Valor_{\text{cambio climático}} = Valor_{\text{comp.meteorológica}} + Valor_{\text{comp.uso del suelo}}$$

Tanto la componente meteorológica como la componente usos del suelo se consideran, a su vez, dependientes de ciertas variables, las cuales ostentan distinta importancia (peso) en el cálculo de cada ecuación.

En el caso de la componente meteorológica, se considera que se encuentra condicionada

por las variables precipitación y nieve, siendo especialmente importante el papel de la precipitación en el cálculo de dicha influencia, como se ha visto en el apartado anterior.

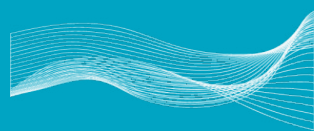
$$Valor_{\text{comp.meteorológica}} = 0,8 \times (Valor_{\text{precipitación}}) + 0,2 \times (Valor_{\text{fenómeno nival}})$$

Por otro lado, la componente usos del suelo estaría influenciada por los propios cambios en los usos del suelo, la erosión, la incidencia de los incendios y la superficie impermeabilizada, siendo esta última la que mayor importancia presentaría dentro de la fórmula.

$$Valor_{\text{comp.usos suelo}} = 0,1 \times (Valor_{\text{cambio usos suelo}}) + 0,3 (Valor_{\text{erosión}}) + 0,1 \times (Valor_{\text{incendios forestales}}) + 0,5 \times (Valor_{\text{Sup.impermeabilizada}})$$

Todas estas variables han sido analizadas para cada una de las subcuencas Pfafstetter, unidad espacial a la que se han trasladado los resultados obtenidos de cada variable. Tras clasificarlos en una escala según los distintos valores observados, se les ha asignado un valor numérico entre 0 y 3, en función de su influencia en el riesgo de inundación (siendo 0 una influencia nula y 3 influencia alta o muy alta, clasificados cualitativamente).

A continuación, habiendo evaluado de forma independiente cada uno de los factores, se ha resuelto cada ecuación planteada, obteniendo el valor total de cada componente. Es decir, se ha obtenido la valoración de la influencia probable del cambio climático sobre cada componente y, en consecuencia, la probabilidad de riesgo asociada. Estas equivalencias pueden observarse en la siguiente tabla.



Valoración de la influencia probable del cambio climático sobre la componente meteorológica	Valoración de la influencia de la componente usos del suelo en el riesgo de inundación	Probabilidad de riesgo
> 2		Incremento probable altamente significativo
1 - 2		Incremento probable significativo
0 - 1		Incremento probable poco significativo
0		Sin probable incremento significativo

Tabla 1. Valoración de la influencia probable del cambio climático en la componente meteorológica y de la influencia de la componente usos del suelo en el riesgo de inundación

Finalmente, tras haber calculado por separado las variables de la componente meteorológica y de la componente usos del suelo, y utilizando la ecuación correspondiente, se ha obtenido la valoración cualitativa total del incremento probable en el riesgo de inundación debido al cambio climático en cada subcuenca Pfafstetter, y se ha acumulado dicha influencia en la red de drenaje, para cada periodo de retorno de estudio y según los dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 4.5 y RCP 8.5), con el objetivo de localizar los tramos ARPSI que pudieran ubicarse en estas zonas de posible influencia del cambio climático en el riesgo de inundación.

Valoración total del efecto probable del cambio climático	Riesgo: Incremento probable
> 2	Incremento probable altamente significativo
1 - 2	Incremento probable significativo
0 - 1	Incremento probable poco significativo
0	Sin probable incremento significativo

Tabla 2. Valoración cualitativa total del incremento probable en el riesgo de inundación debido al cambio climático

En cualquier caso, con respecto a los resultados obtenidos, es necesario tener en cuenta las incertidumbres intrínsecas a los propios modelos climáticos y a la generación de datos.

A continuación, se incluye el esquema metodológico empleado en este estudio.

METODOLOGÍA APLICADA A LA ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RIESGO DE INUNDACIÓN

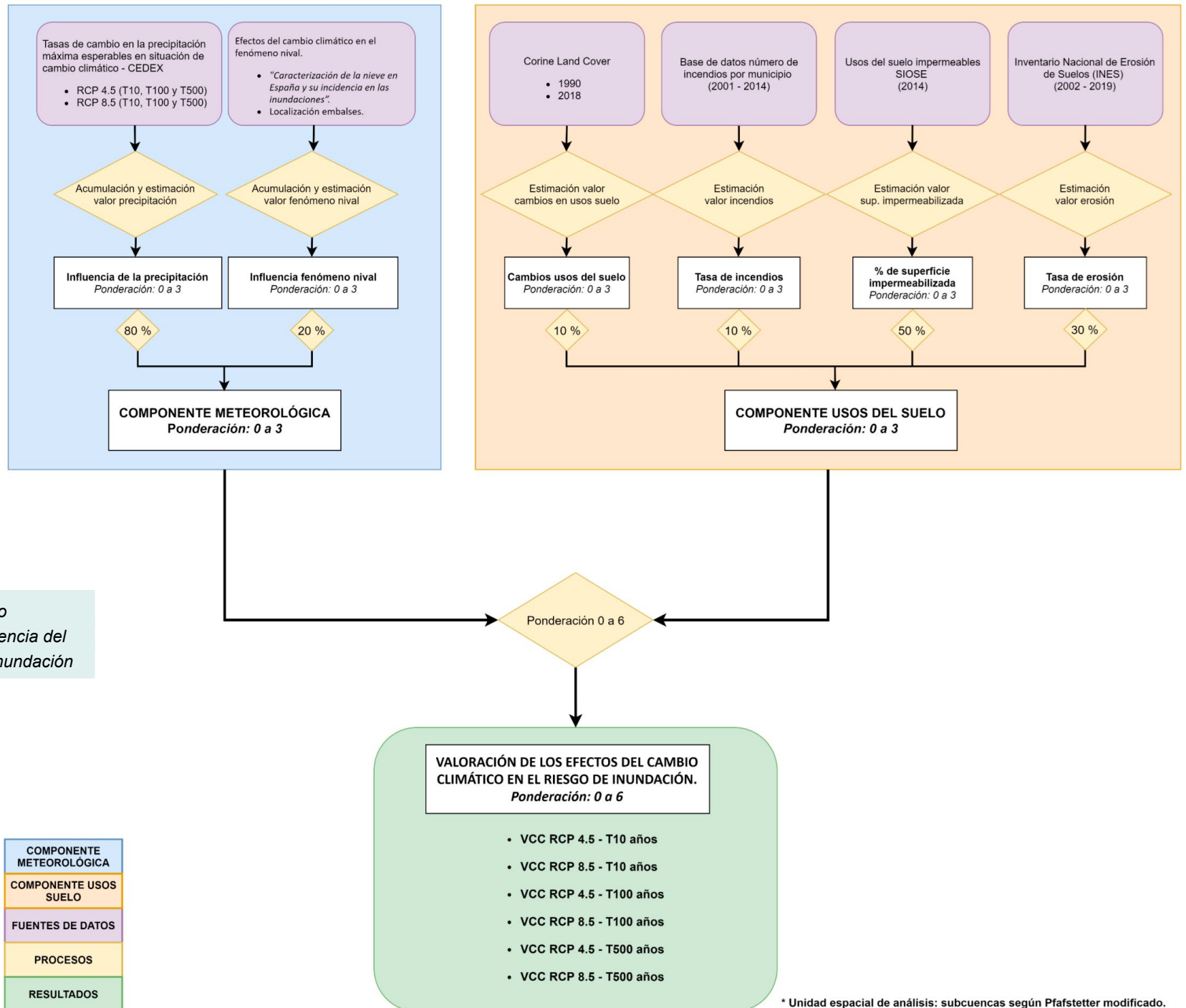


Figura 10. Esquema metodológico empleado en el estudio de la influencia del cambio climático en el riesgo de inundación

COMPONENTE METEOROLÓGICA
COMPONENTE USOS SUELO
FUENTES DE DATOS
PROCESOS
RESULTADOS

VALORACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RIESGO DE INUNDACIÓN.
Ponderación: 0 a 6

- VCC RCP 4.5 - T10 años
- VCC RCP 8.5 - T10 años
- VCC RCP 4.5 - T100 años
- VCC RCP 8.5 - T100 años
- VCC RCP 4.5 - T500 años
- VCC RCP 8.5 - T500 años

* Unidad espacial de análisis: subcuencas según Pfafstetter modificado.

2.1. Componente meteorológica

Para definir la componente meteorológica se han considerado las dos principales variables asociadas que influyen en la generación de crecidas: las precipitaciones y la fusión nival, asignándole un mayor peso (80%) a la variable precipitación al presentar mayor influencia en los episodios de inundación.

$$\text{Valor}_{\text{comp.meteorológica}} = 0,8 \times (\text{Valor}_{\text{precipitación}}) + 0,2 \times (\text{Valor}_{\text{fenómeno nival}})$$

2.1.1. Variable precipitación

De todas las variables evaluadas para analizar la potencial influencia del cambio climático en el riesgo de inundación, es la precipitación la que mayor peso presenta en el régimen de crecidas.

Para su incorporación en la revisión de los PGRI de segundo ciclo, se ha partido de los resultados alcanzados en el informe “Impacto del cambio climático en las precipitaciones máximas en España” (CEDEX, 2021), elaborado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y descrito anteriormente, cuyo objetivo ha sido la evaluación del impacto del cambio climático sobre las precipitaciones máximas anuales, en distintos intervalos temporales, a partir de simulaciones procedentes de modelos climáticos regionales de EURO-CORDEX.

Concretamente, se han utilizado los mapas de tasas de cambio de precipitación diaria máxima anual acumulada en la red fluvial, calculados para cada periodo de retorno y escenario de emisiones de gases de efecto invernadero. Estos mapas se han reclasificado de tal forma que la influencia probable asociada al cambio climático se valora según la tasa de cambio de la mencionada precipitación máxima diaria acumulada en la red de drenaje. Mientras que no se ha considerado significativa una tasa de cambio inferior al 10%, sucesivos aumentos del 10% suponen un aumento en el valor de precipitación.

▪ Resultados

A continuación, se mencionan los principales resultados obtenidos tras el análisis de la precipitación diaria máxima anual (variable de referencia y base en todos los estudios de crecidas) y los cambios en cuantil.

Para la evaluación de la **influencia del cambio climático en la precipitación**, se ha analizado su repercusión en la precipitación diaria máxima anual y la precipitación máxima horaria. Para ello se han considerado:

Ámbito de estudio: **territorio español excepto Canarias** (por falta de datos)

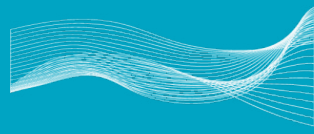
15 proyecciones climáticas de EURO-CORDEX

2 escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero: RCP 4.5 y RCP 8.5

4 periodos de estudio: periodo de control (1971-2000) y tres periodos de impacto (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100).

3 periodos de retorno: 10, 100 y 500 años.

Acumulación de la precipitación en la red hidrográfica básica.



Precipitación diaria máxima anual: los diferentes modelos climáticos del estudio muestran una gran variabilidad de resultados. En general, el número medio de resultados significativos aumenta con el escenario (mayor en RCP 8.5 que en RCP 4.5) y con el periodo de impacto (existiendo excepciones) según avanza el siglo XXI. Los mayores cambios se identifican para el escenario y el periodo de impacto “RCP 8.5: 2071-2100”.

Cambios en cuantil (para el modelo SQRT-R): los resultados para la Península y Baleares muestran cómo los incrementos en los cuantiles son claramente predominantes a lo largo de toda la zona de estudio. Asimismo, se advierte un aumento de la magnitud de las tasas medias a medida que aumenta el periodo de impacto, el periodo de retorno y, en menor medida, el escenario; variando desde un 5%, 6% y 7% para los periodos de retorno de 10, 100 y 500 años, respectivamente, y “RCP 4.5: 2011-2040”, hasta un 15%, 21% y 24% para “RCP 8.5: 2071-2100”.

2.1.2 Variable nieve

Los cambios en el régimen nival en los sistemas montañosos es, sin duda, uno de los más claros indicadores de que pudiera estar produciéndose un cambio climático, puesto que es extremadamente sensible al cambio en las condiciones meteorológicas globales.

La probable influencia del cambio climático en el fenómeno nival y su relación con los efectos derivados de la fusión (aumento de caudales y posibles episodios de crecidas anuales) se ha valorado a partir de los resultados incluidos en el trabajo “Caracterización de la nieve en España y su incidencia en las inundaciones” (Spesa Ingeniería S.A., 2019), llevado a cabo en subcuencas nivales del Pirineo, Sierra Nevada, el Sistema Central y la Cordillera Cantábrica. Este trabajo utilizó las previsiones climáticas establecidas por el conjunto de modelos climáticos del proyecto EURO-CORDEX para un escenario RCP 8.5.

Este trabajo ha determinado el patrón actual medio de las precipitaciones en forma de nieve, la duración temporal media en las cabeceras de los ríos y la rapidez de la fusión, entre otros aspectos, utilizando el modelo hidrológico Aster. Con estos factores definidos, posteriormente se ha analizado el nuevo comportamiento esperado atendiendo a las previsiones establecidas por los diversos modelos climáticos.

Para definir la probable influencia del cambio climático sobre la variable nieve, se han seleccionado los aspectos más significativos para el riesgo de inundación: la fusión máxima y el caudal máximo, los cuales, a su vez, se relacionan según la siguiente expresión.



Para la evaluación de la **influencia del cambio climático en la nieve**, se ha analizado su repercusión en la fusión máxima y el caudal máximo.

Para ello, se ha considerado:

Ámbito de estudio: subcuencas nivales del **Pirineo, Sierra Nevada, Sistema Central y Cordillera Cantábrica**.

15 proyecciones climáticas de EURO-CORDEX

1 escenario de emisiones de gases de efecto invernadero: RCP 8.5

1 periodo de retorno: 100 años.

Periodo de impacto: 2070.

Influencia de la nieve en el riesgo de inundación en las subcuencas nivales y hasta el primer embalse aguas abajo de la cuenca.

$$\text{Valor}_{\text{nieve}} = \text{Pond. Fusión} \times (\text{Valor}_{\text{fusión máxima}}) + \text{Pond. Caudal} (\text{Valor}_{\text{caudal máximo}})$$

Para asignar los valores de fusión máxima y de caudal máximo se ha calculado la tasa de variación del escenario futuro respecto del actual. A su vez, ambas variables se han ponderado según su influencia en el régimen de crecidas. Esta ponderación varía según el sistema montañoso y se determina a partir del porcentaje de agua (para un año medio) precipitada en forma de nieve respecto a la precipitación total para los meses comprendidos entre diciembre y mayo.

Los resultados del estudio de Spesa Ingeniería S.A. se han incorporado considerando que toda la superficie de las subcuencas nivales presenta influencia en los episodios de crecidas, y dicha influencia se mantiene en los cauces vertientes de dichas cuencas hasta el primer embalse ubicado aguas abajo de la subcuenca, al considerar su potencial laminador de crecidas.

▪ Resultados

Los principales resultados obtenidos sobre la influencia nival en los episodios de crecidas, a nivel de cada sistema analizado (Pirineos, Sierra Nevada, Sistema Central y Cordillera Cantábrica), son los siguientes:

Pirineo: Se prevé un aumento considerable de la influencia nival entre los meses de febrero a mayo por el aumento de las fusiones máximas y un cambio en el patrón de fusión con un adelanto medio aproximado de un mes.

Sierra Nevada: La influencia será importante en los primeros tres meses de año por el importante incremento de las fusiones nivales en este periodo.

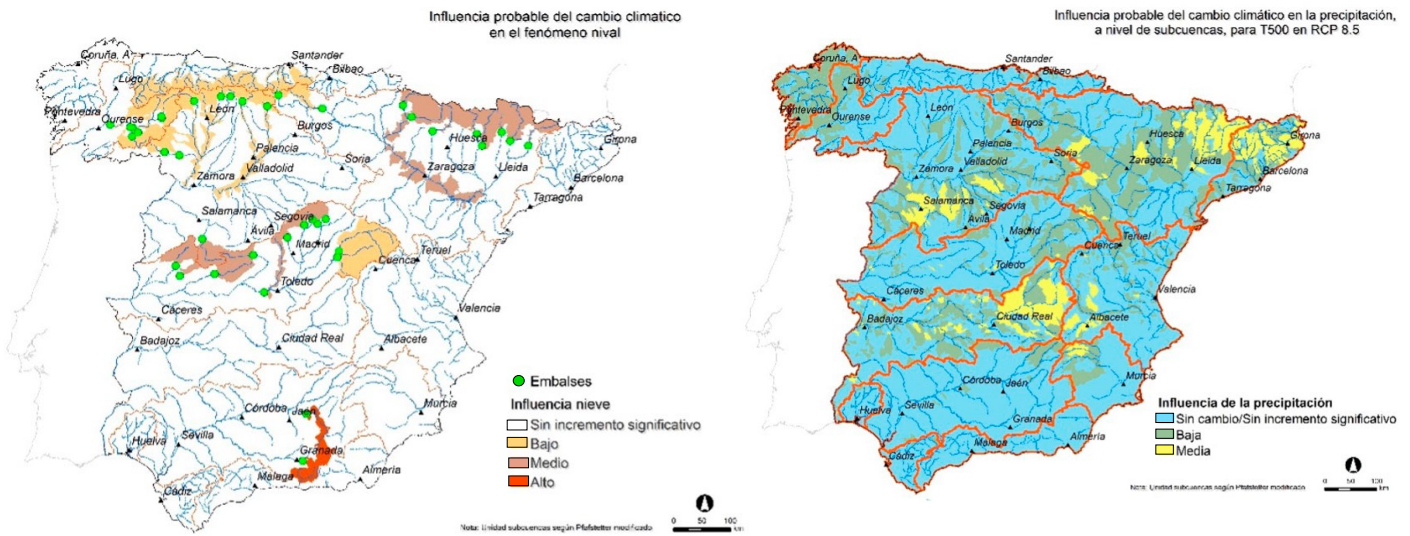
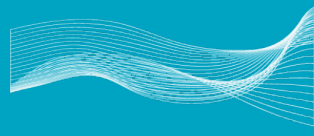
Sistema Central: La influencia será considerable en los tres primeros meses del año debido al fuerte aumento en las fusiones máximas durante este periodo. Se prevé un cambio en el patrón de fusión, aumentando en los meses invernales y disminuyendo en primavera.

Cordillera Cantábrica: Influencia considerable en los primeros tres meses del año debido al fuerte aumento en las fusiones máximas durante este periodo, y pese a la disminución de las precipitaciones. También se prevé una clara disminución de los recursos nivales medios y un cambio en el patrón de fusión, con una menor duración del manto nival.

Importante influencia del cambio climático en la fusión nival, variable en función del ámbito de estudio.

1.1.3 Mapas componente meteorológica

Una vez se han calculado las distintas variables de la componente meteorológica (precipitación y nieve), se han obtenido los distintos mapas resultado (teniendo en cuenta los tres periodos de retorno en estudio y los dos escenarios RCP). A continuación, se muestra un ejemplo:



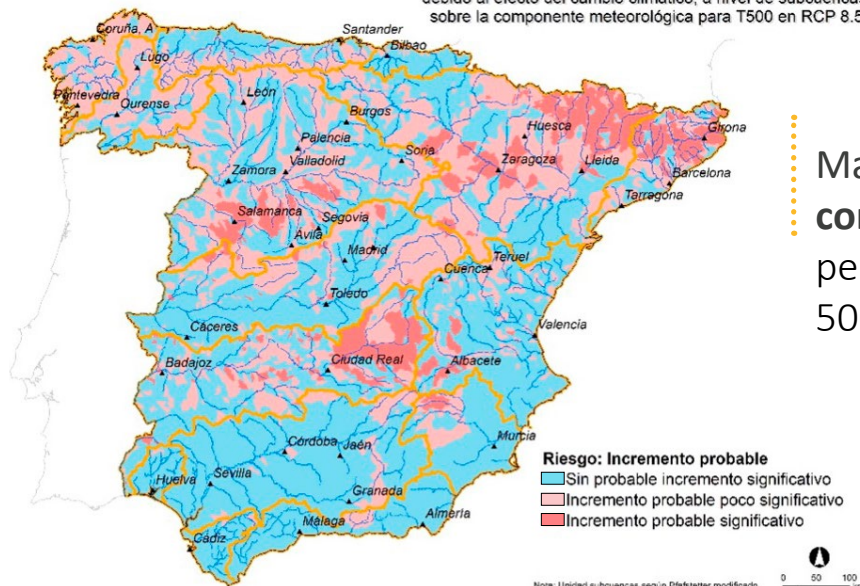
Mapa de **variable precipitación:**
periodo de retorno de
500 años y RCP 8.5



Mapa de **variable nieve**

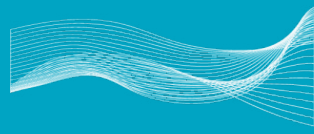


Incremento probable en el riesgo de inundación
debido al efecto del cambio climático, a nivel de subcuencas,
sobre la componente meteorológica para T500 en RCP 8.5



Mapa de **componente meteorológica:**
periodo de retorno de
500 años y RCP 8.5

Figura 11. Proceso seguido para la obtención de los mapas de la componente meteorológica, para el ejemplo de T500 y RCP 8.5. En el mapa de componente meteorológica se observan en azul las zonas sin probable incremento significativo del riesgo de inundación por influencia del cambio climático mientras que en rojo se identificarían las zonas con un incremento probable significativo



2.1 Componente usos del suelo

La componente usos del suelo se considera condicionada por cuatro factores: los propios cambios en los usos del suelo, la erosión, la incidencia de los incendios y la superficie impermeabilizada. El factor al que se ha asignado mayor relevancia en la generación de crecidas, dentro de la componente de usos de suelo, es la presencia de superficie impermeabilizada, dándole un peso del 50%, ya que influye en la mayor generación de escorrentía y velocidad del agua y reduce la infiltración natural. También se considera de relevancia el factor de la erosión, a la que se le ha dado un 30%, pues incrementa el arrastre de sedimentos y la velocidad del flujo, lo que se traduce en un aumento de la peligrosidad de la inundación.

Además, aunque con menor relevancia, se han tenido en cuenta los cambios de usos de suelo en las subcuencas y el número de incendios forestales, a los que se les ha asignado un peso de un 10% a cada uno.

$$\text{Valor}_{\text{comp.usos suelo}} = 0,1 \times (\text{Valor}_{\text{cambio usos suelo}}) + 0,3 (\text{Valor}_{\text{erosión}}) + 0,1 \times (\text{Valor}_{\text{incendios forestales}}) + 0,5 \times (\text{Valor}_{\text{Sup.impermeabilizada}})$$

La información de partida utilizada para el cálculo de los cambios en los usos del suelo ha sido la base de datos elaborada en el proyecto Corine Land Cover para los años 1990 y 2018. En el caso del análisis del grado de erosión de la cuenca, se han utilizado los datos procedentes del Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES), elaborado entre los años 2001 y 2019 por el Ministerio de Medio Ambiente. Para identificar el grado de influencia de los incendios forestales, se ha partido de la información oficial relativa al número total de incendios y conatos documentados en los distintos municipios de las demarcaciones hidrográficas entre los años 2001 y 2014. Finalmente, para definir la superficie impermeabilizada en el espacio fluvial se han utilizado los usos del suelo detallados en el SIOSE (de fecha 2014) correspondientes a coberturas de suelo compactado o sellado y que, en consecuencia, limitan significativamente la infiltración.

Para la consideración de la **influencia de los usos del suelo en el riesgo de inundación** se han tenido en cuenta los cambios en los usos del suelo en la cuenca, la erosión, la incidencia de los incendios y la superficie impermeabilizada.



Imagen 1: Ejemplo de erosión y pérdida de suelo en cultivo de olivar en el municipio de Cebolla (Toledo). Fuente: INCLAM-HGM 2019

▪ Resultados

A continuación, se mencionan los principales resultados obtenidos del análisis de los factores que conforman la componente usos del suelo:

Variación del uso del suelo: De forma generalizada, no se observan cambios significativos. Las superficies con influencia baja se ubican el cruce de los grandes núcleos poblacionales que registraron un aumento de población entre los periodos considerados (1990-2108), mientras que las zonas con influencia media y alta tienen poca representatividad espacial, ubicándose especialmente en áreas que han sufrido un cambio sustancial de usos del suelo (zonas de polígonos industriales, balsas de riego o zonas con deforestación significativa).

Grado de erosión: De forma generalizada predominan los valores de influencia media, los cuales se ubican especialmente a lo largo de los ejes centrales de los grandes ríos de la vertiente mediterránea (zonas de acumulación de sedimentos) debido fundamentalmente a la tipología de litología y suelos. Las zonas sin influencia o con baja erosión, están localizadas en la vertiente norte atlántica y la demarcación hidrográfica del río Duero. Este hecho se debe especialmente a la fuerte cobertura forestal de estos territorios que protegen los suelos de la erosión. Los valores de influencia alta y muy alta, predominan en las zonas de cabecera, con fuertes pendientes, y sobre todo a lo largo del frente mediterráneo andaluz. Esto está condicionado, por un lado, por la fuerte ocupación urbanística y por otro, fundamentalmente por la tipología de litología y suelos.

Incendios forestales: En casi todo el territorio peninsular prevalecen las zonas sin influencia de incendios o con influencia baja. Mientras que las zonas con influencia alta o muy alta están ubicadas principalmente en Galicia, Cantabria y Asturias, las zonas con influencia media predominan en las cuencas del centro y sur peninsular, destacándose el bajo Tajo, el bajo Guadiana y el Segura.

Superficie impermeabilizada: Predominan las zonas sin influencia de este factor o con influencia baja en la mayoría del territorio peninsular. Los valores de influencia alta y muy alta tienen su mayor representatividad en las zonas donde discurren los ríos Manzanares y Jarama (Comunidad de Madrid), y la franja costera de la provincia de Barcelona y Tarragona.

Mientras que la **influencia de la erosión** se detecta principalmente en el eje de los grandes ríos de la vertiente mediterránea, en zonas de cabecera con fuertes pendientes o en áreas muy urbanizadas, la **influencia de los incendios** se limita principalmente a zonas de Galicia, Cantabria y Asturias.

2.2.1 Mapa componente usos del suelo

Una vez se han calculado las distintas variables de la componente usos del suelo (variación en los usos del suelo, erosión, incendios y superficie impermeabilizada), se ha obtenido el mapa resultado:

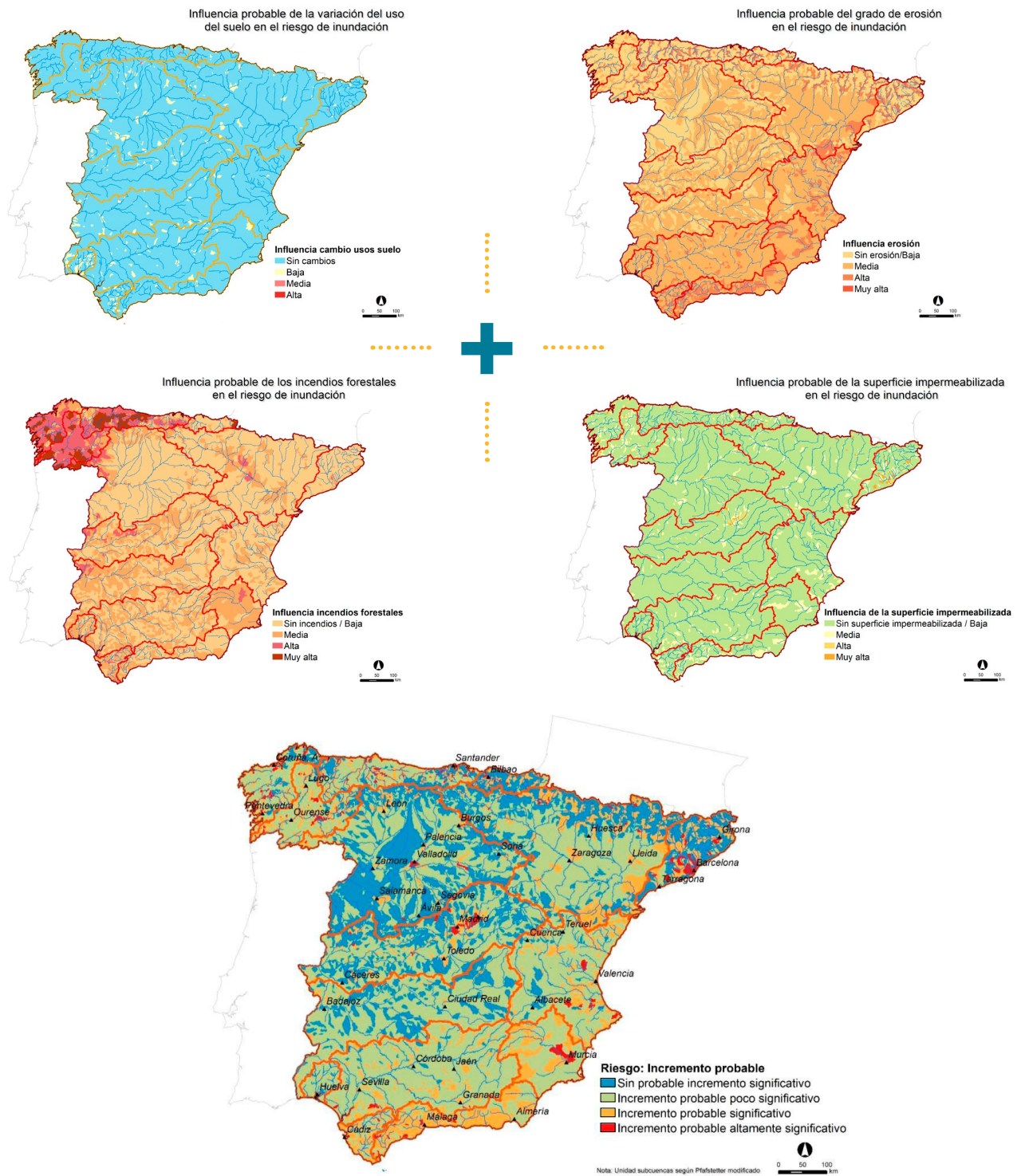
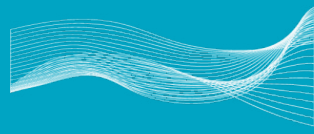


Figura 12. Proceso seguido para la obtención de los mapas de la componente usos del suelo. Se observan en azul las zonas sin probable incremento significativo, principalmente ubicadas en el norte y centro de la Península, excepto Galicia y Cantabria, y en naranja y rojo las zonas con un incremento probable significativo o altamente significativo, respectivamente, en la costa mediterránea y algunos puntos de grandes ciudades, principalmente

2.3 Valoración cualitativa total del incremento probable en el riesgo de inundación debido al cambio climático

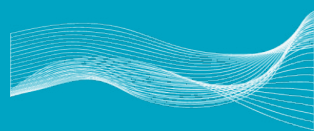
Finalmente, una vez se dispone de los datos relativos a la influencia del cambio climático sobre las componentes meteorológica y de usos del suelo, se ha obtenido la valoración cualitativa total de la probable influencia del cambio climático en el riesgo de inundación.

Esta valoración se ha obtenido para cada uno de los periodos de retorno y para cada escenario de emisiones de gases de efecto invernadero analizados (asignando las categorías de la Tabla 2). Estos mapas obtenidos muestran las zonas donde el incremento del riesgo de inundación como consecuencia del cambio climático es más probable.

A continuación, se muestra un ejemplo de los mapas resultantes, el mapa con la valoración de la probable influencia del cambio climático en el riesgo de inundación para el periodo de retorno de 500 años, en el RCP 8.5. A destacar las cuencas del Ebro y el alto Guadiana, el bajo Segura, los grandes núcleos poblacionales y las zonas de invernaderos del sur, que presentan importantes zonas con un incremento probable altamente significativo. También se aprecia la heterogeneidad urbanística de Galicia y el País Vasco.



Figura 13. Valoración cualitativa total del incremento probable en el riesgo de inundación debido al cambio climático para T500 en un escenario RCP 8.5 a nivel de subcuencas Pfafstetter



Como se ha mencionado anteriormente, la valoración cualitativa total del incremento probable en el riesgo de inundación debido al cambio climático fue analizada considerando como unidad espacial las subcuencas según Pfafstetter modificado (MITECO).

Para conocer el grado probable de influencia del cambio climático en el riesgo de inundación de los distintos subtramos ARPSI de cada demarcación hidrográfica intercomunitaria, se emplearon varios métodos de análisis GIS. Como resultado, se obtuvo tanto el número de ARPSIs con grado variable de incremento probable significativo, así como su porcentaje con respecto al total de ARPSIs.

Los resultados se presentan resumidamente en la siguiente tabla por periodos de retorno y escenario RCP. En líneas generales, la situación más desfavorable se presenta para el escenario RCP 8.5 (excepto en las demarcaciones de Duero y Tajo, donde el escenario más desfavorable es el RCP 4.5). En cualquier caso, es importante destacar el grado de incertidumbre asociado a los escenarios de cambio climático. En las islas Canarias, Baleares, Ceuta y Melilla no ha sido aplicar esta metodología por no disponer de datos. Se espera poder realizar estudios específicos en estas zonas en ciclos futuros.



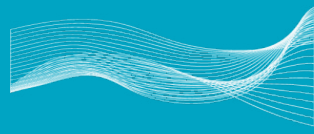
Alrededor del **25-30%** de las ARPSIs presentarían un **incremento probable significativo del riesgo de inundación** debido al cambio climático **para ambos escenarios RCP**, aumentando según el periodo de retorno.

Un **14-19%** de las ARPSIs presentaría un **incremento probable altamente significativo**.

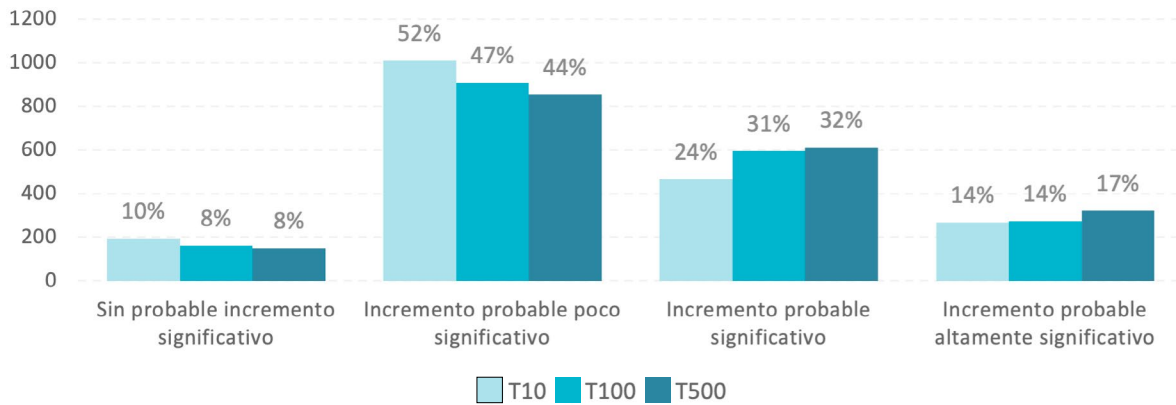
	Escenario RCP 4.5					
	T10		T100		T500	
	Nº subtramos	%	Nº subtramos	%	Nº subtramos	%
Sin probable incremento significativo	195	10.1	160	8.3	149	7.7
Incremento probable poco significativo	1009	52.1	907	46.9	853	44.1
Incremento probable significativo	464	24.0	595	30.7	613	31.7
Incremento probable altamente significativo	267	13.8	273	14.1	320	16.5

	Escenario RCP 8.5					
	T10		T100		T500	
	Nº subtramos	%	Nº subtramos	%	Nº subtramos	%
Sin probable incremento significativo	197	10.2	175	9.0	145	7.5
Incremento probable poco significativo	969	50.1	886	45.8	862	44.5
Incremento probable significativo	495	25.6	518	26.8	563	29.1
Incremento probable altamente significativo	274	14.2	356	18.4	365	18.9

Tabla 3. Valoración cualitativa total del incremento probable en el riesgo de inundación debido al cambio climático, a nivel de subtramos ARPSI, para las demarcaciones intercomunitarias y distintos periodos de retorno



Escenario RCP 4.5



Escenario RCP 8.5

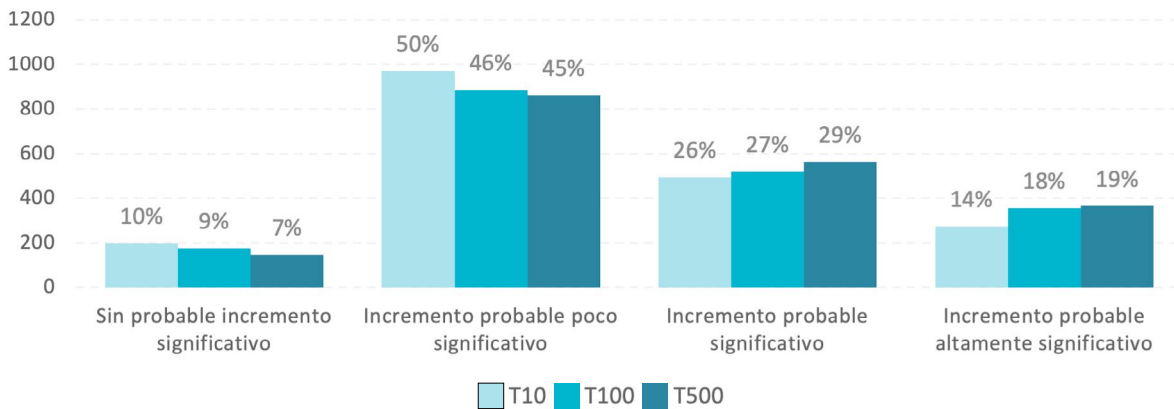


Gráfico 1. Valoración cualitativa total del incremento probable en el riesgo de inundación debido al cambio climático, a nivel de subtramos ARPSI, para las demarcaciones intercomunitarias y distintos periodos de retorno. Escenario RCP 4.5 (arriba) y escenario RCP 8.5 (abajo).

