

TRABAJO FIN DE GRADO

Proyecciones futuras de caudales extremos en las principales ciudades de la cuenca del Miño-Sil



Sabrina Hernández Lorenzo
Grado en Ciencias Ambientales
Julio 2022

Departamento de Física Aplicada

Faculta de Ciencias

Universida de Vigo

Faculta_deCiencias



Universida_deVigo

Proyecciones futuras de caudales extremos en las principales ciudades de la cuenca del Miño-Sil

**Trabajo de fin de grado
Grado en Ciencias Ambientales**



**Sabrina Hernández Lorenzo
Grado en Ciencias Ambientales
Julio 2022**

Dra. María Teresa de Castro Rodríguez, profesora titular del área de Física de la Tierra, del departamento de Física Aplicada, de la Universidad de Vigo y **Dr. Diego Fernández Novoa**, investigador del área de Física de la Tierra, del departamento de Física Aplicada, de la Universidad de Vigo.

INFORMAN:

Que el trabajo titulado “Proyecciones futuras de caudales extremos en las principales ciudades de la cuenca del Miño-Sil” presentado por D.^a Sabrina Hernández Lorenzo, con D.N.I.: 39457870-J, fue realizado bajo nuestra dirección y autorizamos su presentación como Trabajo de Fin de Grado del Grado de Ciencias Ambientales al considerarlo apto para su defensa.

Ourense, 08 de julio de 2022.

Dra. María Teresa de Castro Rodríguez

Dr. Diego Fernández Novoa

RESUMEN

El cambio climático que estamos experimentando en las últimas décadas, y que se espera que continúe intensificándose a medida que avance el siglo, está dando lugar a fenómenos climáticos cada vez más extremos. Entre ellos, la intensificación de las lluvias torrenciales y de las inundaciones en muchas partes del mundo se sitúan como unos de los fenómenos climáticos extremos más críticos que se están viendo afectados por el calentamiento global. Sin embargo, es necesario un análisis regionalizado de estos eventos ya que son muy dependientes de las características locales de cada zona. Es por ello que en este trabajo se analiza la evolución de los eventos más extremos de precipitación y las riadas asociadas en la cuenca del Miño-Sil en el futuro. Para ello se analizarán los datos de precipitación obtenidos de los modelos climáticos del proyecto EURO-CORDEX bajo el escenario RCP 8.5. Concretamente, se analizaron las proyecciones futuras de la evolución de la precipitación a lo largo de la cuenca del Miño-Sil, con especial atención a los eventos de precipitación extrema, considerando un período histórico (1990-2019) como referencia y dos períodos futuros: uno próximo (2030-2059) y otro más lejano (2070-2099). Asimismo, también se analizaron los cambios proyectados en los caudales extremos producidos por dicha precipitación a finales de siglo (2070-2099) respecto al período histórico de referencia (1990-2019).

En primer lugar, se realizó una validación y selección de entre más de 30 modelos disponibles en el proyecto EURO-CORDEX para conocer aquellos que ofrecían una mejor representatividad de la precipitación en la cuenca del Miño-Sil. Esta validación se realizó mediante la comparación de la precipitación ofrecida por cada modelo con los datos reales recogidos por pluviómetros de MeteoGalicia para un período común, a través de la evaluación de dos métodos estadísticos: el test de Perkins y el análisis de la desviación de los valores extremos de precipitación. Así, por un lado, el test de solapamiento (Perkins) permite analizar la reproducibilidad de toda la serie, mientras que el análisis enfocado en los valores extremos permite analizar la capacidad de los modelos de estimar esos eventos más críticos, los que más interesan a efectos del presente estudio. 7 modelos mostraron una buena estadística en ambos análisis y fueron los seleccionados para desarrollar el estudio.

Una vez seleccionados los modelos capaces de reproducir adecuadamente la precipitación en la cuenca, en primer lugar, se analizaron los cambios esperados en la precipitación media anual. Considerando el promedio ofrecido por todos los modelos válidos, los resultados indican una disminución del 8,5% para el futuro próximo, que se acentuará en el futuro lejano con una estimación de un 20% menos de lluvia en promedio respecto al período histórico para toda la cuenca. Sin embargo, esta disminución no será homogénea a lo largo del año, sino que variará estacionalmente. El invierno será la estación que menos acuse la disminución en la precipitación. Por el contrario, el descenso de precipitación más notable se producirá en verano, cayendo un 40% menos de precipitación a finales de siglo respecto a la actualidad. Esto puede implicar una situación crítica de escasez de agua en los meses cálidos en la cuenca del Miño-Sil. Sin embargo, esta disminución generalizada de la precipitación, no implica que los eventos extremos vayan a disminuir en el futuro. Al contrario, los eventos de precipitación extrema, considerados aquellos que superan del percentil 99,9, muestran un aumento inequívoco de su intensidad en torno al 6,5% en media para toda la cuenca para el futuro lejano. Si analizamos

la precipitación extrema en términos de períodos de retorno, estos también muestran un incremento de sus valores a medida que avanza el siglo. Esto indica que a pesar de que las precipitaciones serán menos frecuentes, estas pueden caer con mayor intensidad.

Por último, una vez caracterizadas las precipitaciones y analizada su evolución futura, estos datos se introdujeron en un modelo hidrológico para obtener los caudales fluviales asociados en las principales ciudades de la cuenca, tanto para el período histórico como para el futuro lejano. Estos datos permitieron analizar la evolución de los eventos más extremos de caudal, de forma que en gran parte de la cuenca se esperan aumentos considerables, sobre todo en la ciudad de Ourense y en la desembocadura el Miño, donde la intensificación de los caudales más extremos puede rondar el 30% a finales de siglo. En la zona del río Sil, la intensificación de los caudales extremos también será importante en las ciudades de Ponferrada y de O Barco. Finalmente, la intensificación de los caudales extremos tiene mayor incertidumbre en la zona superior del río Miño, más concretamente en la ciudad de Lugo.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Cambio climático.....	1
1.2 Eventos extremos: Precipitación e inundaciones.....	5
1.3 Área de estudio	7
1.4 Objetivos.....	9
2. DATOS Y METODOLOGÍA.....	11
2.1 CORDEX.....	11
2.2 MeteoGalicia	11
2.3 Modelo Hidrológico: HEC-HMS	12
2.4 Metodología.....	13
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
3.1 Análisis de los modelos climáticos.....	15
3.2 Análisis de la precipitación obtenida a través de los modelos climáticos y sus proyecciones futuras	16
3.3 Valores extremos de precipitación y sus proyecciones futuras	21
3.4 Proyecciones futuras de caudales extremos.....	25
4. CONCLUSIONES.....	31
5. BIBLIOGRAFÍA.....	33

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Cambio climático

Se entiende por clima el estado promedio y la variabilidad de las condiciones meteorológicas que caracterizan un dominio espacial durante un período de tiempo variable, pero generalmente extenso. De hecho, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) especifica que se requiere de un mínimo de 30 años para hablar de condiciones climáticas en una cierta región. En cuanto a las condiciones meteorológicas, estas suelen estar referidas a variables climáticas tales como temperatura, precipitación, o viento, entre otras.

Asimismo, el clima no se puede considerar como algo estático, sino que es un sistema dinámico capaz de evolucionar y de cambiar dependiendo de las diferentes condiciones que lo afectan. De hecho, el clima de nuestro planeta ha ido cambiando a lo largo de su historia (Uriarte, 2013; Fernández-Nóvoa et al., 2021). Así, se puede definir el cambio climático como la perturbación del estado del clima prolongada en el tiempo (como mínimo un decenio en escala temporal, tal y como afirma la OMM), que puede ser debida tanto a mecanismos climáticos naturales como a procesos antropogénicos donde la mano del hombre influencia estos cambios en el clima (Uriarte, 2013; Zalasiewicz y Willians, 2021). En cuanto a los mecanismos naturales que hacen variar el clima, podemos destacar procesos tales como la deriva de los continentes, el vulcanismo, los ciclos orbitales o los ciclos solares (Fernández-Nóvoa et al., 2021). En cuanto a los factores antropogénicos, además de la deforestación, el principal medio por el que el ser humano está contribuyendo a cambiar el clima es mediante el aumento de los gases de efecto invernadero (Fernández-Nóvoa et al., 2021), el principal forzador climático en las últimas décadas.

Para poner en contexto la influencia que el ser humano está ejerciendo sobre el clima, es necesario definir el efecto invernadero. El efecto invernadero es un fenómeno natural producido por ciertos compuestos de la atmósfera que son capaces de absorber parte de la radiación infrarroja emitida por la Tierra. Estos compuestos son los gases de efecto invernadero (GEI) y en menor medida los aerosoles. Concretamente, los principales gases de efecto invernadero son el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los halocarbonados. De forma simplificada, el efecto está basado en que estos gases dejan pasar prácticamente la totalidad de la radiación que llega emitida por el Sol, que debido a su elevada temperatura emite desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, incluyendo el espectro de luz visible. Es la luz visible la que mayoritariamente alcanza la capa donde se sitúan los gases de efecto invernadero, siendo capaz de atravesarla puesto que los GEIs no absorben en esas longitudes de onda, calentando así la superficie del planeta. Sin embargo, el planeta emite radiación principalmente en el espectro electromagnético del infrarrojo, debido a su menor temperatura. Esta radiación sí que es absorbida por los gases de efecto invernadero, que la devuelven parcialmente de nuevo a la superficie terrestre contribuyendo a incrementar la temperatura del planeta. Este efecto, de forma natural, es beneficioso para el planeta. De hecho, la vida en la Tierra, tal y como la conocemos, es posible gracias al efecto invernadero, ya que mantiene el planeta con temperaturas medias de en torno a $15^{\circ}C$. Sin embargo, desde la Revolución Industrial, estos gases se están incrementando de forma antropogénica,

principalmente a causa de la quema de combustible fósiles. Esto conlleva un desequilibrio en el balance radiativo del planeta que conduce a un incremento de la temperatura media, lo que provoca, a su vez, cambios asociados en el sistema climático. Como se puede comprobar en las siguientes figuras, el incremento de los gases de efecto invernadero, especialmente a partir de mediados del siglo XX (Figura 1.1), llevó asociado un incremento de la temperatura (Figura 1.2).

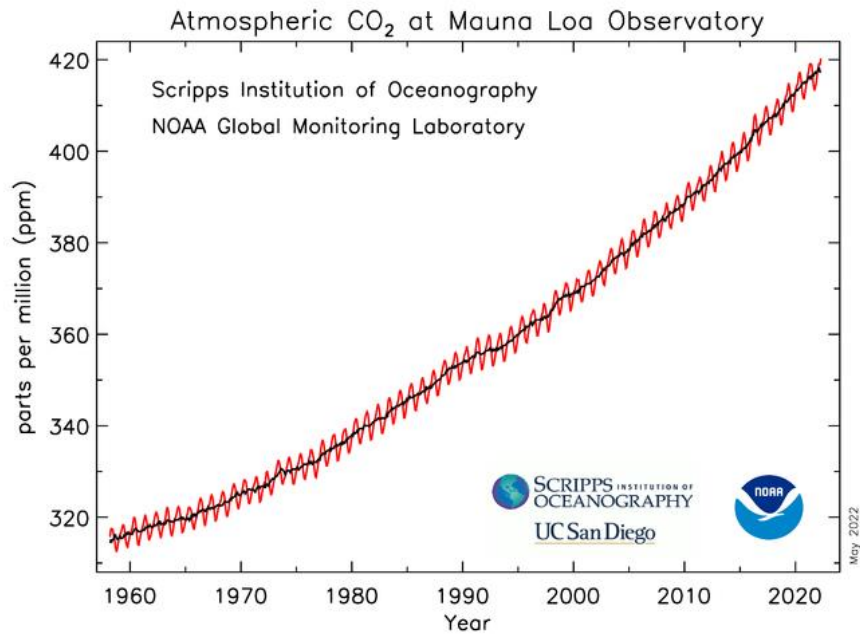


Figura 1.1. Evolución del CO₂ (ppm) medido en la atmósfera desde 1958 hasta 2022 en la estación de Mauna Loa (Hawaii, EEUU). Fuente: NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

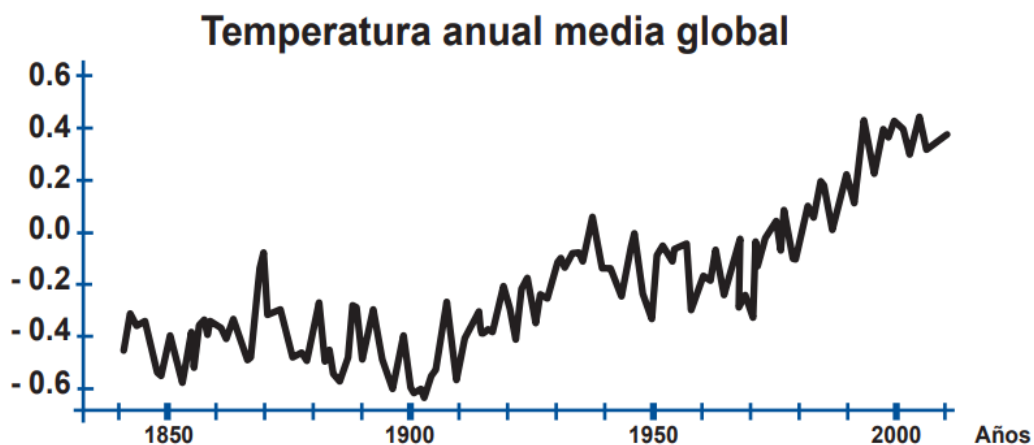


Figura 1.2. Evolución de la anomalía de la temperatura (°C) del aire en la superficie de la Tierra desde mediados del siglo XIX. El período 1961-1990 fue utilizado como período de referencia para el cálculo de la anomalía de temperatura. Fuente: IPCC, 2013.

Para comprender mejor este proceso antropogénico iniciado a partir de mediados del siglo XVIII, en la [Figura 1.3](#) se muestra el forzamiento radiativo (FR) desde esa época, es decir, se cuantifican las variaciones en el balance en los flujos de energía en el planeta. En la [Figura 1.3](#) se puede ver como el forzamiento radiativo total es positivo, con una estimación de 2,3 W/m² en 2011 en comparación a 1750 ([Figura 1.3](#)), aumentando por tanto la cantidad de energía que recibe la Tierra y dando lugar a la consecuente subida de la temperatura global. Podemos observar además como claramente, el principal responsable de este forzamiento radiativo positivo es el aumento de dióxido de carbono seguido por el metano, lo que da indicación de que gran parte de este incremento de temperatura es debido a causas antropogénicas.

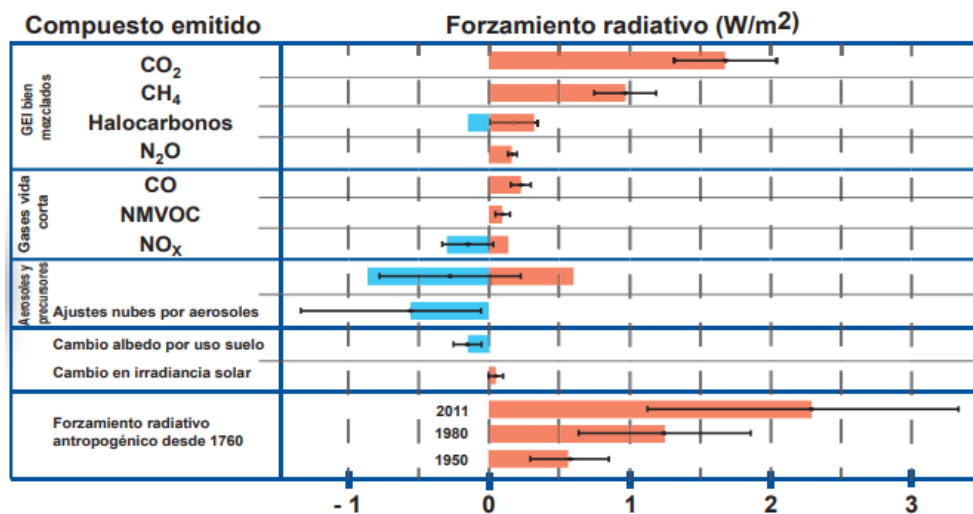


Figura 1.3. Contribuciones de diferentes factores al forzamiento radiativo (W/m²) estimado en 2011 con respecto a 1750. Fuente: IPCC, 2013.

En la [Figura 1.4](#) podemos corroborar como la temperatura media actual supera en más de 1°C la temperatura previa a la Revolución Industrial, no teniendo precedentes este calentamiento en más de 2000 años.

Como se comentó anteriormente, este desequilibrio ha llevado asociado durante las últimas décadas una serie de cambios en las variables climáticas además de la subida de las temperaturas tanto en la atmósfera como en los océanos, como son: la disminución de la cantidad y de la extensión del hielo y de nieve, la subida del nivel del mar, la acidificación de los océanos, el desplazamiento de las zonas climáticas hacia los polos o el aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos como olas de calor y precipitaciones extremas, entre otros (IPCC, 2013; 2021).

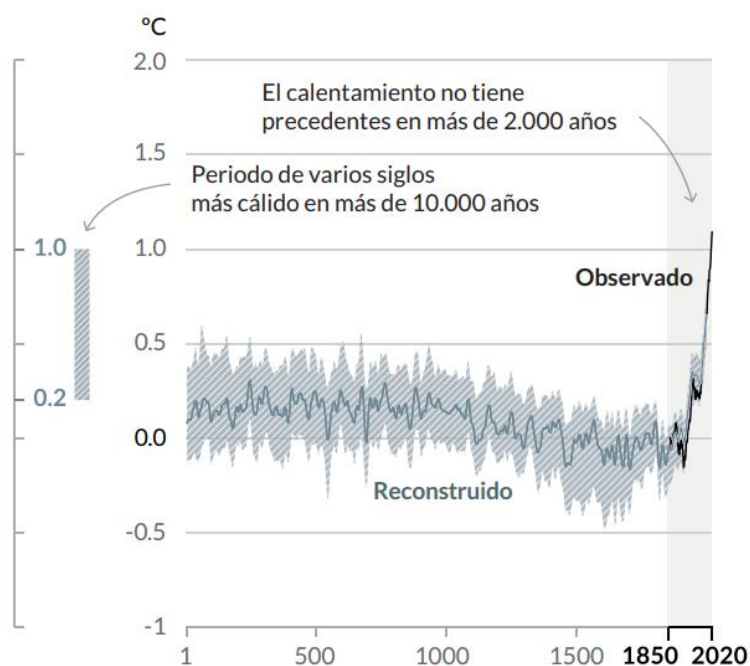


Figura 1.4. Cambios en la temperatura superficial media global (°C) tomando la temperatura del período 1850-1900 como referencia. Fuente: IPCC, 2021.

Una vez constatados los efectos del cambio climático en las últimas décadas, es necesario estimar su evolución futura para poder adaptarse a ellos y mitigar sus impactos. Así, para determinar la evolución futura del clima se desarrollaron una serie de modelos climáticos que realizan proyecciones futuras para estimar la variabilidad del clima en las próximas décadas. Estos modelos climáticos globales (GCM por sus siglas en inglés) abarcan todo el planeta y permiten obtener simulaciones globales del clima, con resoluciones máximas en el entorno de los 100 km. Además, proyectos como el EURO-CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling) (<http://www.euro-cordex.net/>) desarrollan Modelos Climáticos Regionales (RCM por sus siglas en inglés) que se alimentan en sus fronteras de datos proporcionados por los modelos globales y realizan simulaciones con alta resolución espacial (≈ 11 km). Esta alta resolución de los RCMs permite analizar con mayor precisión y detalle la variabilidad climática futura de cada región. En regiones con importantes cambios orográficos es fundamental utilizar modelos con buena resolución espacial para poder capturar bien sus características climáticas y proyectar adecuadamente los cambios esperados.

Además, para poder hacer las simulaciones futuras, es necesario introducir en los modelos estimaciones de cómo serán las condiciones futuras en términos de forzamiento radiativo, tal y como establece el *Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático* (IPCC, 2013). Para ello, se analizan diferentes escenarios futuros de emisión que permiten obtener una representación plausible de la evolución futura de las emisiones de gases de efecto invernadero basada en un conjunto de supuestos tales como el desarrollo demográfico y socioeconómico y la evolución tecnológica, así como las principales relaciones entre ellos (IPCC, 2013; 2021). De forma concreta, para la elaboración del quinto informe de evaluación del IPCC (IPCC, 2013) se consideraron cuatro escenarios de emisión bajo el nombre de Trayectorias de Concentración

Representativa (RCP), proyectando el forzamiento radiativo futuro hasta el año 2100 considerando un rango de valores de entre 2,6 y 8,5 W/m², abarcando así los posibles escenarios futuros de cara a final de siglo. En el escenario más desfavorable, el forzamiento radiativo alcanzaría los 8,5 W/m² con la temperatura media global incrementándose en más de 4°C con respecto a la temperatura promedio del período 1986-2005. En el reciente sexto informe del IPCC (IPCC, 2021) se actualizan estos supuestos con 5 escenarios futuros de emisión que consideran desde una reducción en las emisiones en el escenario más favorable, hasta un aumento desenfrenado en el más pesimista. Los análisis indican que incluso en el escenario más favorable, a finales de siglo la temperatura se habrá incrementado más de 1,5 °C respecto a los niveles preindustriales.

En cualquier caso, esta evolución futura va a tener una serie de consecuencias en forma de cambios en el clima que se esperan para las próximas décadas, que pueden ser más o menos acusados en función del escenario hacia el que evolucionemos. Las proyecciones climáticas indican un futuro en donde los fenómenos extremos, tales como las precipitaciones extremas, inundaciones, olas de calor, y las sequías, serán más frecuentes. Además, la subida de temperatura de la atmósfera y el océano, así como el ascenso del nivel del mar, experimentarán incrementos adicionales a medida que avance el siglo XXI. Unido a ello, la extensión del permafrost, nieve y hielo continuarán descendiendo a lo largo del siglo (IPCC, 2013; 2021).

1.2 Eventos extremos: Precipitación e inundaciones

Se entiende como fenómeno climático extremo aquel evento meteorológico poco frecuente para su distribución estadística en un lugar determinado. Algunos ejemplos de fenómenos climáticos extremos son, entre otros: sequías, inundaciones, olas de calor y ciclones tropicales. En este sentido, numerosos estudios científicos han corroborado el aumento generalizado tanto en magnitud como en frecuencia de los eventos extremos en las últimas décadas, estableciendo como causa principal el aumento de gases de efecto invernadero con el consecuente incremento del forzamiento radiativo (Schoof y Robeson, 2016; Jongman, 2018).

Entre los eventos extremos, los fenómenos de precipitación intensa y los eventos de inundación asociados, se sitúan como unos de los más importantes y preocupantes debido a sus catastróficas consecuencias, ya que causan daños en importantes infraestructuras, además de poner en riesgo la integridad de las personas (Noji, 2000; Fekete et al., 2017; Paprotny et al., 2018). Además del incremento tanto en la frecuencia como magnitud de estos fenómenos detectado de forma general en las últimas décadas en muchas partes del planeta, se espera que en el futuro la situación sea todavía más crítica, aunque bien es cierto que este aumento no es homogéneo, sino que es altamente dependiente de las características regionales, pudiendo incluso haber zonas concretas donde el riesgo disminuya (Arnell y Gosling, 2016; Alfieri et al., 2017; Jongman, 2018; Blöschl et al., 2019). Sin embargo, de forma general, el aumento de la temperatura global facilita que la atmósfera retenga más humedad, contribuyendo a que se puedan intensificar los eventos de precipitación extrema y las consecuentes inundaciones en muchas regiones del planeta (IPCC, 2021).

Las proyecciones futuras de los modelos climáticos del EURO-CORDEX se han vuelto de gran utilidad para realizar estudios sobre los impactos del cambio climático en el continente europeo. Se han realizado investigaciones acerca de la evolución del ciclo hidrológico de cara a finales de siglo en base al escenario RCP 8.5, el más pesimista de los considerados en el IPCC. Los resultados de estas investigaciones determinaron que la intensificación del ciclo hidrológico a causa de temperaturas atmosféricas crecientes va estrechamente ligada a la recurrencia de lluvias torrenciales que repercutirán directamente sobre el riesgo de fenómenos de inundación, que se verán intensificados (Alfieri et al., 2015a). Se ha determinado que, en promedio, la frecuencia de los eventos más extremos de inundación en Europa se duplicará en las próximas tres décadas, con una tendencia que continuará aumentando a medida que avance el siglo. De hecho, se espera que esta intensificación afecte aproximadamente al 75% de los ríos europeos (Alfieri et al., 2015a). Esto provocará además un aumento significativo tanto en el número de personas afectadas, como en las pérdidas económicas asociadas a los daños provocados por las inundaciones (Alfieri et al., 2015b).

En cuanto a las expectativas enfocadas a España, desde AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) se desarrollaron modelos estadísticos de regionalización para España. Estos modelos detectaron una disminución general de los días con lluvia, sin embargo, confirmaron un aumento en la tasa de precipitaciones extremas (Morata, 2014). En estos análisis se establece el porcentaje de cambio esperado en la precipitación extrema para tres horizontes temporales (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) respecto al periodo de referencia (1976- 2005) (Figura 5), donde se muestra un aumento en gran parte de las cuencas fluviales de España, que se incrementa a finales de siglo.

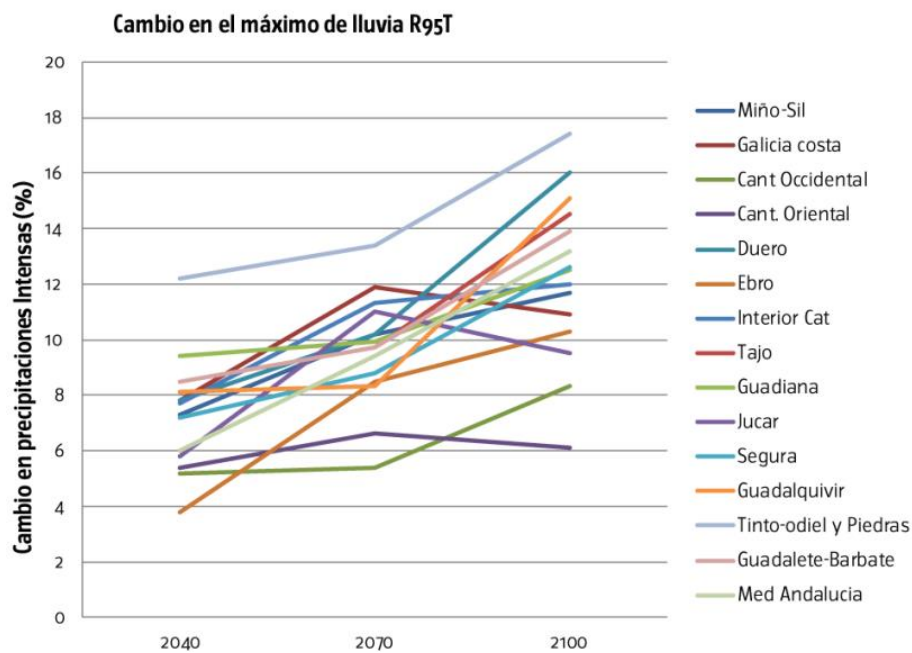


Figura 1.5. Cambio en precipitaciones intensas respecto al periodo de control (1976-2005) para tres ventanas temporales (2011-2040, 2041-2070, y 2071-2100) en diferentes Demarcaciones Hidrográficas. Datos obtenidos del EURO-CORDEX de AEMET. Fuente: [Inundaciones y cambio climático, 2018](#).

La evolución del caudal es más incierta, ya que hay una insuficiencia de estudios que aplicasen varios modelos hidrológicos de forma simultánea para su proyección, sin embargo, se pueden detectar algunos cambios importantes y que parecen robustos. Se esperan aumentos inequívocos en los caudales extremos (periodo de retorno de 100 años) en las demarcaciones hidrográficas del Miño-Sil, Galicia Costa, Duero y Ebro ([Inundaciones y cambio climático, 2018](#)).

1.3 Área de estudio

El área de estudio de este trabajo se enfoca en la demarcación hidrográfica del Miño-Sil, situada en el noroeste de la Península Ibérica ([Figuras 1.6 y 1.7](#)). Este territorio abarca gran parte de Galicia, a la vez que atraviesa territorio leonés, incluye una mínima parte de Asturias y se introduce en el norte de Portugal. La superficie total de la cuenca se sitúa alrededor de los 17.000 km².

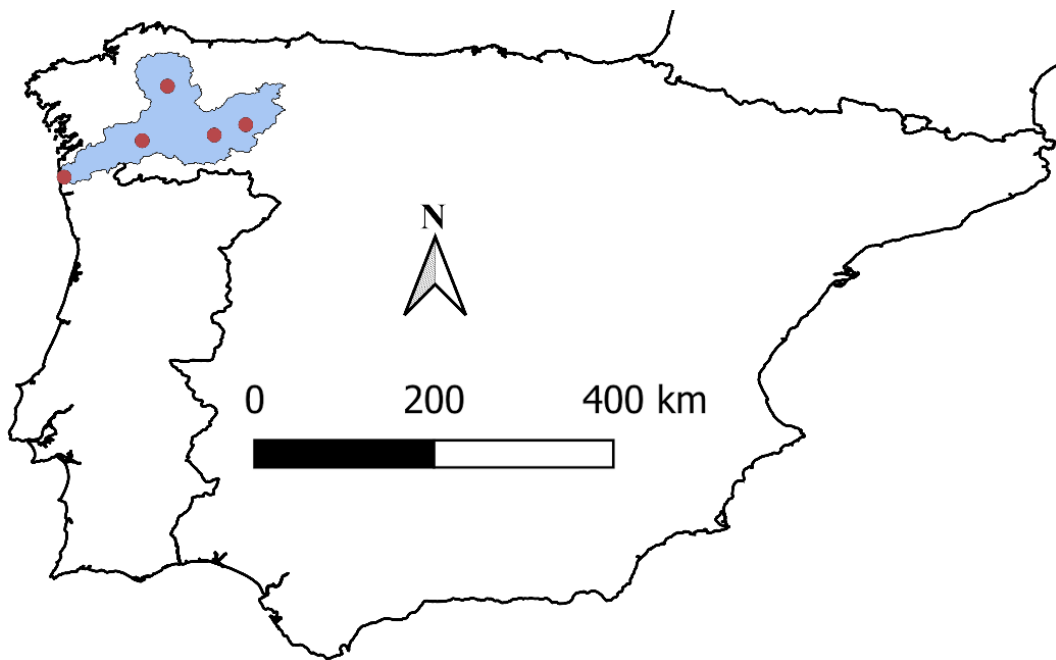


Figura 1.6. Representación del área de estudio. En azul se representa la superficie ocupada por la cuenca hidrográfica del Miño-Sil. Los puntos rojos indican las principales localizaciones en las que se analizará la evolución de los caudales extremos, de este a oeste: Ponferrada, O Barco, Lugo, Ourense y la desembocadura.

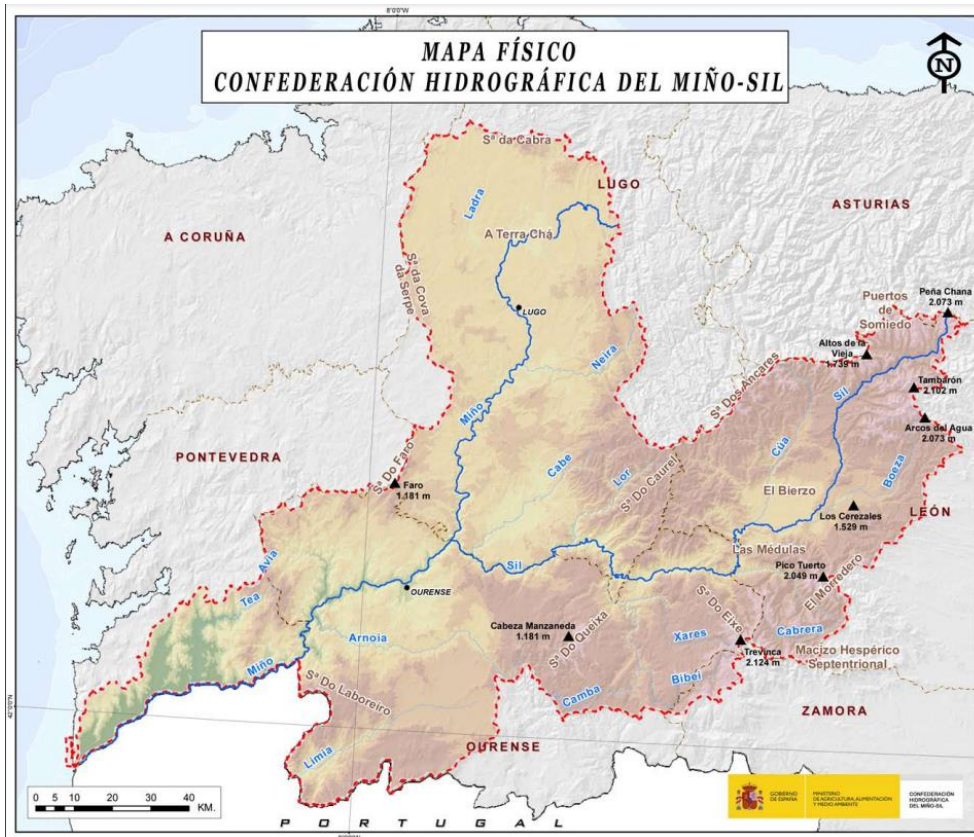


Figura 1.7. Mapa físico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Miño-Sil. Fuente: Confederación Hidrográfica del Miño-Sil (CHMS). Se muestran los principales ríos bajo estudio, tanto el río Miño, como su afluente principal, el río Sil, entre otros.

Tal y como describe la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil (CHMS, www.chms.es), el clima de la cuenca es principalmente atlántico con tendencia mediterránea, caracterizado por inviernos suaves, veranos frescos, aire húmedo, nubosidad abundante y precipitaciones frecuentes durante todo el año. Según datos de la CHMS, la precipitación anual oscila entre 700 y 1.900 mm/año, con una media anual de 1.175 mm para todo el conjunto, como se muestra en la [Figura 1.8](#). La morfología de la cuenca juega un papel importante en la abundancia de las precipitaciones del área de estudio. Desde un punto de vista de dinámica atmosférica, las precipitaciones en el noroeste peninsular deberían alcanzar volúmenes significativamente inferiores a los registrados. Sin embargo, el factor orográfico actúa como un intensificador de la descarga hídrica asociada a frentes, debido a que el relieve fuerza el ascenso de las masas de aire y facilita la precipitación. Al mismo tiempo, la diversidad altimétrica y la orientación de los obstáculos montañosos dan lugar a que el reparto de las precipitaciones sea desigual, lo que se conoce como gradiente pluviométrico.

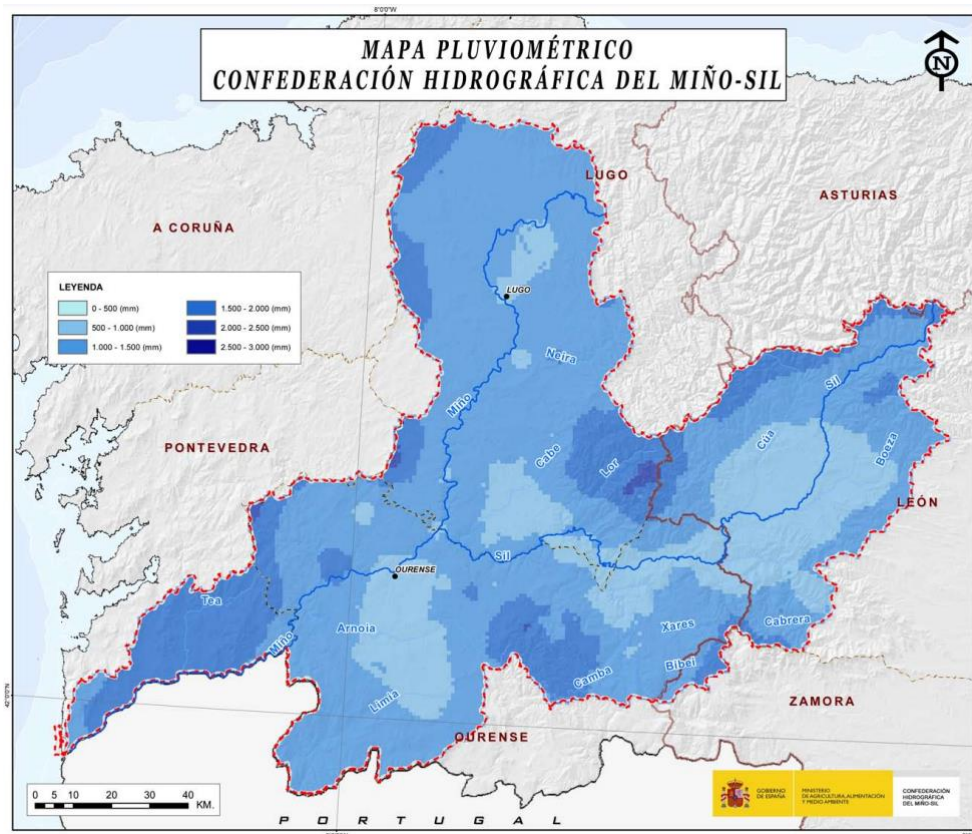


Figura 1.8. Mapa pluviómetro de la parte española de la demarcación hidrográfica del Miño-Sil. Fuente: Confederación Hidrográfica del Miño-Sil (CHMS).

El régimen fluvial de la cuenca es básicamente pluvial, principalmente influenciado por el ciclo hidrológico caracterizado por caudales mínimos en los meses de verano y máximos durante el final del otoño y el invierno (Fernández-Nóvoa et al., 2017). El caudal medio supera los $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en la desembocadura. Durante los meses de caudales máximos, la cuenca puede presentar recurrentemente caudales que provocan que el río se desborde causando inundaciones en importantes poblaciones (Fernández-Nóvoa et al., 2020). Esto es debido a que los sistemas de tormentas que llegan desde el Atlántico al noroeste de la Península Ibérica cargados de calor y humedad pueden provocar, bajo condiciones favorables de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO por sus siglas en inglés), eventos intensos de precipitación sobre la cuenca causando inundaciones (Trigo, 2006; Trigo et al., 2004; Lavers et al., 2011; Trigo et al., 2014).

1.4 Objetivos

Los principales objetivos de este trabajo son determinar la evolución futura de las precipitaciones extremas en la cuenca del Miño-Sil, así como la evolución de los caudales extremos asociados en las localizaciones más importantes de la cuenca durante el siglo XXI. Con este fin, se emplearon datos de precipitaciones del proyecto EURO-CORDEX en base al escenario de emisión RCP 8.5, con los que además se alimentó un modelo hidrológico para obtener así los caudales correspondientes. La estructura del trabajo es la siguiente:

- En el punto 2 aparecen definidas las bases de datos empleadas en este estudio: el proyecto CORDEX, pluviómetros de MeteoGalicia y el modelo hidrológico HEC-HMS. Asimismo, se describe la metodología que se utilizó para el desarrollo de este estudio.
- En el punto 3 se recogen los resultados de este estudio a la vez que son comparados con estudios previos. Inicialmente, se realiza una validación de los modelos de CORDEX para conocer cuáles son los que representan, de forma adecuada, la precipitación en la cuenca del Miño-Sil. Para ello, se comparan los datos de estos modelos con datos de lluvia reales obtenidos de los pluviómetros de MeteoGalicia. Posteriormente, se analizan los datos de precipitación de estos modelos validados y su evolución futura, centrándose especialmente en los valores extremos. Se analizan y comparan los datos para el período histórico (1990-2019) y dos períodos futuros: uno próximo (2030-2059) y otro lejano (2070-2099). Finalmente, con los datos de precipitación procesados por el modelo hidrológico se analizan los cambios proyectados en los caudales extremos en las principales ciudades de la cuenca del Miño-Sil y su desembocadura, comparando los caudales históricos (1990-2019) con los proyectados a final del siglo XXI (2070-2099) por los modelos climáticos.
- En el punto 4 se establecen las principales conclusiones de este estudio.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1 CORDEX

Para la realización de este trabajo se utilizaron los datos de precipitación del proyecto EURO-CORDEX con el objetivo de analizar los cambios futuros esperados tanto en la precipitación, como en los caudales asociados.

El proyecto CORDEX realiza proyecciones futuras, que se extienden a lo largo del siglo XXI, de diversas variables climáticas a escala regional (RCMs) bajo los distintos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero del IPCC (Giorgi et al., 2009). Este proyecto trata de organizar un marco coordinado a nivel internacional para producir proyecciones de cambio climático avanzadas, con la finalidad de ofrecer conocimientos adicionales a servicios de información climática regional y favorecer el entendimiento de los fenómenos climáticos y sus proyecciones futuras.

Para este trabajo, se consideraron un total de 31 RCMs disponibles en el dominio EURO-CORDEX (<http://www.euro-cordex.net>) (Figura 2.1), todos ellos con datos a escala diaria y con una resolución espacial de $0,11^\circ \times 0,11^\circ$.

Para realizar los análisis se obtuvieron los datos relativos al período histórico considerado (1990-2019) y los períodos futuros (2030-2059 y 2070-2099) bajo el escenario RCP8.5.

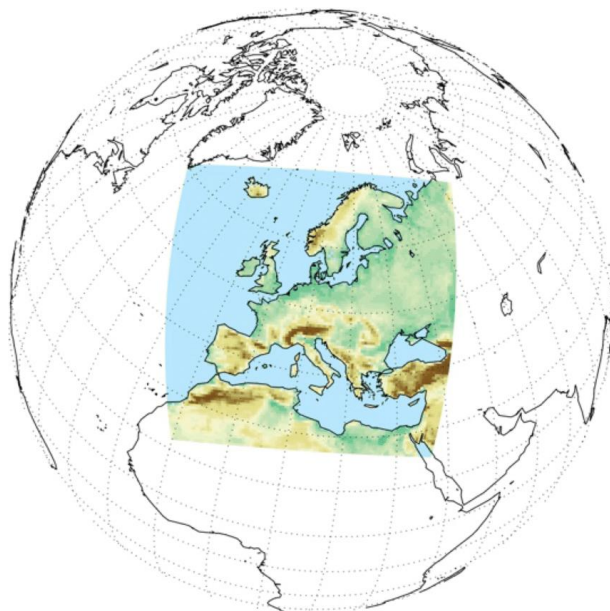


Figura 2.1. Dominio EURO-CORDEX. Fuente: EURO-CORDEX (<http://www.euro-cordex.net>).

2.2 MeteoGalicia

Los datos de precipitación real diaria de los pluviómetros de MeteoGalicia (Unidad de Observación y Predicción Meteorológica de Galicia) (www.meteogalicia.gal), se utilizaron

para realizar comparaciones con los datos ofrecidos por los modelos de CORDEX y así evaluar su eficiencia para el área de estudio. En este sentido, se escogieron aquellos pluviómetros de Meteogalicia incluidos en la cuenca del Miño-Sil que tenían datos desde, por lo menos, 2008, con el fin de tener datos suficientes para realizar una buena comparación. En este sentido, se descargaron los datos, a escala diaria, de 54 pluviómetros para el período 2008-2020.

2.3 Modelo Hidrológico: HEC-HMS

El modelo hidrológico HEC-HMS (Feldman, 2000; Scharffenberg et al., 2018; U.S. Army Corps of Engineers, 2018) fue el utilizado para realizar el procedimiento hidrológico y transformar la precipitación en el caudal correspondiente. Este modelo semi-distribuido es uno de los más utilizados a nivel global para esos procedimientos, siendo ya utilizado previamente tanto en el área de estudio, como en zonas cercanas, dando resultados satisfactorios, es decir, mostrando su capacidad para reproducir de forma adecuada el caudal partiendo de datos de precipitación (Cea y Fraga, 2018; González-Cao et al., 2019; Fraga et al., 2020; Fernández-Nóvoa et al., 2020). El modelo está disponible de forma libre y gratuita en su web oficial (<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>).

El modelo fue parametrizado siguiendo las parametrizaciones calibradas y validadas en un estudio previo en donde se desarrolló un sistema de alerta temprana para el río Miño (Fernández-Nóvoa et al., 2020), y que se describen, brevemente, a continuación. En primer lugar, la cuenca del Miño fue dividida en sub-cuencas atendiendo a las características del terreno, que varían entre 5 y 2172 km² (Figura 2.2). Posteriormente, y de forma concreta para cada subcuenca, la precipitación fue transformada en el caudal respectivo teniendo en cuenta 4 procesos principales. En primer lugar, la infiltración fue calculada a través del método del número de curva (SCS, 1985; NRCS, 2007), lo que proporciona, por un lado, el exceso de lluvia que no se infiltra y que es capaz de discurrir por la superficie, y por otro lado también proporciona la cantidad de lluvia que es capaz de infiltrarse. Los coeficientes fueron estimados siguiendo la metodología presentada en Fernández-Nóvoa et al. (2020), con valores promedio, en situaciones intermedias de humedad, que varían entre 74 y 88. El segundo proceso tiene que ver con la transformación de ese exceso de lluvia en flujo a través de la sub-cuencas hasta llegar al cauce principal. Este proceso se realizó mediante la metodología del hidrograma unitario (SCS, 1982; NRCS, 2007), asignando los tiempos característicos que el agua de lluvia que queda en superficie tarda en fluir a través de cada sub-cuenca hasta llegar al cauce principal, con valores que varían entre 120 y 1740 minutos. En tercer lugar, a través de la metodología del reservorio lineal (U.S. Army Corps of Engineers, 2018), es decir, considerando el tiempo que el agua infiltrada tarda en llegar al cauce principal, se estimaron los coeficientes variando entre 180 y 600 horas. Por último, la forma en la que el agua transcurre por el cauce principal fue estimada a través del método de Muskingum-Cunge (U.S. Army Corps of Engineers, 2018), cuyas variables requeridas (longitud de los tramos, anchura, pendiente...) fueron extraídas a través de datos de modelos digitales del terreno obtenidos el Instituto Geográfico Nacional (IGN) (<https://www.ign.es/>).

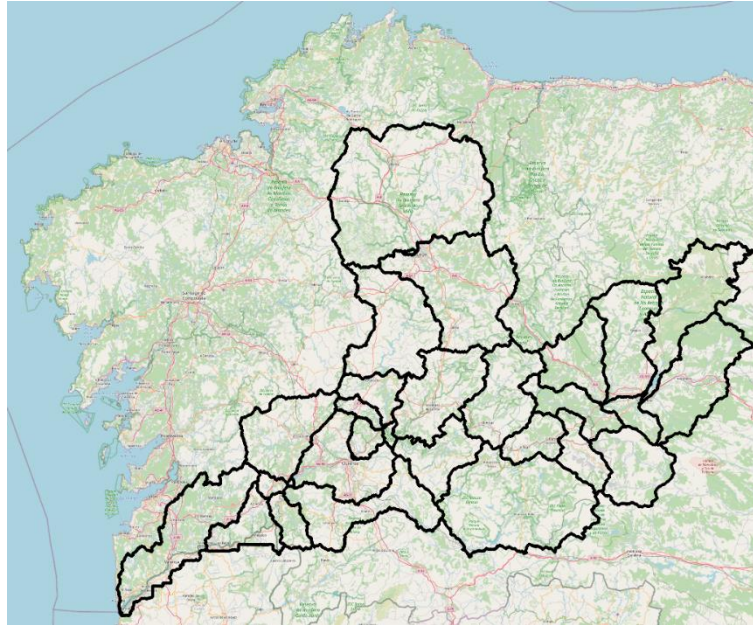


Figura 2.2. División en sub-cuencas de la cuenca del Miño-Sil para el proceso hidrológico.

2.4 Metodología

A pesar de tener 31 modelos disponibles de CORDEX, solamente aquellos que presenten una alta fiabilidad a la hora de representar la precipitación para la zona de estudio, deben de ser tenidos en cuenta para realizar análisis robustos (Des et al., 2021). Para validar los modelos de CORDEX en la zona de estudio, se compararon los valores de precipitación obtenidos por estos modelos con los datos registrados por los 54 pluviómetros de Meteogalicia disponibles para el período 2008-2020 en la zona de estudio. Esta validación se realizó mediante dos métodos estadísticos: el test de Perkins (Perkins et al., 2007) y el análisis de la desviación de los valores más extremos, considerados aquellos que superen el percentil 99. Estos métodos son complementarios permitiendo una mejor validación de los modelos (Des et al., 2021). Así, mientras que el test de solapamiento o de Perkins permite un análisis de toda la serie, el análisis de los valores extremos permite analizar como divergen estos valores, que son los más importantes para el desarrollo de este estudio.

De forma más concreta, el test de solapamiento o test de Perkins permite contrastar el grado de solapamiento entre los valores de precipitación obtenidos por cada modelo de CORDEX y los valores reales registrados por los pluviómetros. Para la realización del test, se agrupan los datos obtenidos de un modelo con los de la estación *in-situ* en intervalos definidos, y se calcula el porcentaje de probabilidad de cada intervalo. Con los valores más bajos en porcentaje de probabilidad de cada intervalo, ya sea con los de la estación o con los del modelo, se calcula su sumatorio y este se multiplica por 100 para conocer el porcentaje de solapamiento. Cuanto más se aproxime al 100% el porcentaje de solapamiento, más se corresponderán los valores estimados con los registros reales.

En cuanto al análisis de los valores extremos, se analiza el valor del percentil 99 de los pluviómetros y el correspondiente de cada modelo, y se compara la diferencia entre ambos con respecto al valor observado en el pluviómetro, obteniendo así el porcentaje de desviación:

$$Desv = 100 \times \frac{abs(P_{pl}^{99} - P_{co}^{99})}{P_{pl}^{99}}$$

Donde P_{pl}^{99} es el percentil 99 del pluviómetro, P_{co}^{99} el percentil 99 de CORDEX correspondiente al píxel en el que se localiza el pluviómetro y abs es referido al valor absoluto.

Considerando cada modelo de CORDEX, se calculan tanto el test de Perkins como la desviación de los valores extremos para cada pluviómetro y su punto correspondiente en el modelo, con lo que se van a obtener 54 valores para cada modelo, a los cuales se le hace el promedio obteniendo así el dato representativo de cada modelo. Para que el modelo sea considerado válido para nuestro estudio, debe cumplir simultáneamente dos condiciones: que el promedio del test de Perkins sea superior al 90%, y que el promedio de la desviación de los valores extremos sea inferior al 30%.

Una vez completado el filtro de modelos óptimos para el enfoque del estudio, serán estos los que se tendrán en cuenta para analizar la evolución de las precipitaciones y caudales en el futuro. Esto se llevará a cabo analizando primeramente los cambios en la precipitación media en el futuro respecto al período histórico, tanto a nivel anual como estacional, y después analizando los cambios en las precipitaciones extremas para diferentes probabilidades de ocurrencia, lo que se conoce como periodos de retorno. Un periodo de retorno es aquel que indica la probabilidad media de ocurrencia de un evento, y suele aparecer indicado en unidad anual, de forma que un periodo de retorno de 100 años hará referencia a un suceso que ocurre con una frecuencia de una vez cada 100 años, o con una probabilidad anual del 0,01%. Esto nos permitirá conocer cómo se espera que cambien estos eventos extremos en el futuro, que es lo más importante a nivel de impacto sobre las actividades socio-económicas, infraestructuras y población. Tras obtener los datos individuales para cada modelo, se realizará el promedio de los resultados de todos los modelos para poder observar los resultados desde un enfoque multimodelo. Estudios anteriores evidencian que un enfoque multimodelo limita los errores de cada modelo por separado y favorece la consistencia de los datos (Jacob et al., 2014).

Una vez analizada la precipitación, los datos de precipitación diaria de cada modelo válido de CORDEX se introducirán en el modelo hidrológico y se obtendrán los caudales representativos de las principales ciudades de la cuenca Miño-Sil tanto para el todo el período histórico (1990-2019) como para el período futuro más lejano (2070-2099). Esto permitirá estudiar y analizar la evolución futura de los caudales extremos en diferentes ciudades de la cuenca mediante un procedimiento similar: primero observando y analizando el cambio individual arrojado por cada modelo en referencia a diferentes períodos de retorno, y posteriormente analizando el cambio según un enfoque multimodelo. Con estos datos concluyentes, se podrá evaluar si las situaciones de caudal extremo y, por consiguiente, las inundaciones, se van a intensificar en el futuro.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de los modelos climáticos

Con el objetivo de evaluar los cambios en la precipitación futura y en la intensidad de los eventos más extremos se han analizado los datos de los Modelos Climáticos Regionales (RCMs por sus siglas en inglés) enmarcados dentro del proyecto EURO-CORDEX (<http://www.euro-cordex.net>), que proporcionan datos diarios de lluvia con una resolución espacial de 0,11°, que es suficiente para resolver las características de la zona hidrológica bajo estudio (Des et al., 2021). CORDEX tiene disponibles más de 30 RCMs para la zona de estudio correspondiendo al escenario RCP8.5 de emisiones. Sin embargo, no se pueden usar directamente todos los modelos disponibles para el análisis de la precipitación en nuestra zona de estudio, ya que alguno de los modelos podría presentar una gran dispersión en relación a los datos reales y no representar correctamente la distribución de precipitación en la zona bajo interés. Es por ello que debemos analizar cuáles de todos los modelos disponibles representan adecuadamente los patrones de precipitación en la cuenca del Miño-Sil. Para ello, se han comparado los datos de cada modelo disponible (Tabla 3.1, donde un número fue asignado a cada modelo) con datos reales de precipitación de los pluviómetros gestionados por MeteoGalicia (www.meteogalicia.gal) para el período 2008-2020. Se ha hecho la comparación para los meses lluviosos, de noviembre a marzo, ya que es cuando hay mayor probabilidad de precipitaciones intensas e inundaciones en nuestra zona de estudio (González-Cao et al., 2019; Fernández-Nóvoa et al., 2020). Como se comentó previamente, para que un modelo sea considerado válido, se ha exigido que tenga un valor en el test de Perkins (Perkins et al., 2007) superior al 90% y una desviación menor del 30 % en relación a los valores extremos. En este sentido el test de Perkins consiste en la medición del grado de solapamiento entre la precipitación obtenida en cada modelo con los valores reales de los pluviómetros, mientras que los valores extremos se consideran aquellos que superan el percentil 99. Como se puede observar en la Tabla 3.1, los modelos 1, 4, 6, 13, 14, 26 y 29 cumplen ambas condiciones, y por lo tanto serán los que se utilizarán en el desarrollo del estudio.

Tabla 3.1. Modelos climáticos disponibles en CORDEX para la cuenca del Miño-Sil y análisis de su validez. Los modelos que cumplan ambas condiciones, un valor en el test de Perkins superior al 90% y una desviación menor del 30% en los valores extremos, serán considerados como válidos (marcados en verde).

#	Modelo Climático Global // Regional	Perkins	Extremos
1	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CLMcom//CCLM4-8-17	Sí	Sí
2	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_RMIB-UGent//ALARO-0	-	-
3	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_SMH// RCA4	-	-
4	ICHEC-EC-EARTH_CLMcom//ETH-COSMO-crCLIM-v1-1	Sí	Sí
5	ICHEC-EC-EARTH_DMI//HIRHAM5	Sí	-
6	ICHEC-EC-EARTH_KNMI// RACMO22	Sí	Sí
7	ICHEC-EC-EARTH_SMHI//RCA4	-	Sí
8	IPSL-IPSL-CM5A-MR_DMI//HIRHAM5	-	-
9	IPSL-IPSL-CM5A-MR_GERICS//REMO2015	-	-
10	IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-INERIS// WRF331F	-	-
11	IPSL-IPSL-CM5A-MR_KNMI//RACMO22E	-	-
12	IPSL-IPSL-CM5A-MR_SMH// RCA4	-	-
13	MOHC-HadGEM2-ES_CLMcom// CCLM4-8-17	Sí	Sí
14	MOHC-HadGEM2-ES_CLMcom//ETH-COSMO-crCLIM-v1-1	Sí	Sí
15	MOHC-HadGEM2-ES_CNRM//ALADIN63	-	-
16	MOHC-HadGEM2-ES_ICTP//RegCM4-6	-	Sí
17	MOHC-HadGEM2-ES_SMHI//RCA4	-	-
18	MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMcom// CCLM4-8-17	-	-
19	MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMcom//ETH-COSMO-crCLIM-v1-1	Sí	-
20	MPI-M-MPI-ESM-LR_CNRM//ALADIN63	-	-
21	MPI-M-MPI-ESM-LR_DMI//HIRHAM5	-	-
22	MPI-M-MPI-ESM-LR_ICTP//RegCM4-6	-	Sí
23	MPI-M-MPI-ESM-LR_KNMI//RACMO22E	-	-
24	MPI-M-MPI-ESM-LR_MPI-CSC//REMO2009	-	-
25	MPI-M-MPI-ESM-LR_SMHI//RCA4	-	-
26	NCC-NorESM1-M_CLMcom//ETH-COSMO-crCLIM-v1-1	Sí	Sí
27	NCC-NorESM1-M_CNRM//ALADIN63	-	-
28	NCC-NorESM1-M_GERICS//REMO2015	-	-
29	NCC-NorESM1-M_IPSL//WRF381P	Sí	Sí
30	NCC-NorESM1-M_KNMI//RACMO22E	-	Sí
31	NCC-NorESM1-M_SMHI//RCA4	-	-

3.2 Análisis de la precipitación obtenida a través de los modelos climáticos y sus proyecciones futuras

En este apartado se analizará la precipitación característica de la cuenca del Miño-Sil en el período histórico (1990-2019), tanto a nivel anual como estacional, y se profundizará en los cambios futuros esperados como consecuencia del cambio climático tanto para el futuro próximo (2030-2059) como para el futuro lejano (2070-2099).

La distribución anual de precipitación a partir del promedio ofrecido por los 7 modelos válidos seleccionados para el período histórico (1990-2019) se muestra en la [Figura 3.1](#). Como se puede ver, la zona final de la cuenca (suroeste) es la que presenta una mayor precipitación,

aproximándose en algunas zonas a los 6 mm diarios en promedio. Esto, a escala anual, se traduce en más de 2000 mm acumulados a lo largo del año, lo que ofrece una buena representatividad de la realidad (Cortizas y Alberti, 1999). La menor precipitación a escala anual la encontramos en las zonas interiores del río Sil y del río Miño superior, con valores inferiores a los 3 mm diarios en media. A escala anual esto corresponde a una precipitación acumulada en el entorno de los 1000 mm, o incluso valores menores en algunos puntos, tal y como también detectaron estudios previos que caracterizaron la zona en base a datos medidos (Cortizas y Alberti, 1999). En promedio, el valor anual medio de la precipitación para el período histórico obtenido de los modelos es de 3,74 mm diarios, que se corresponde con una precipitación acumulada a lo largo del año de aproximadamente 1365 mm, nuevamente representativo de lo que sucede en la realidad (Cortizas y Alberti, 1999). Por lo tanto, podemos concluir que los modelos, en su conjunto, ofrecen una buena representatividad a escala anual tanto de los valores de precipitación en términos absolutos, como de su variabilidad espacial.

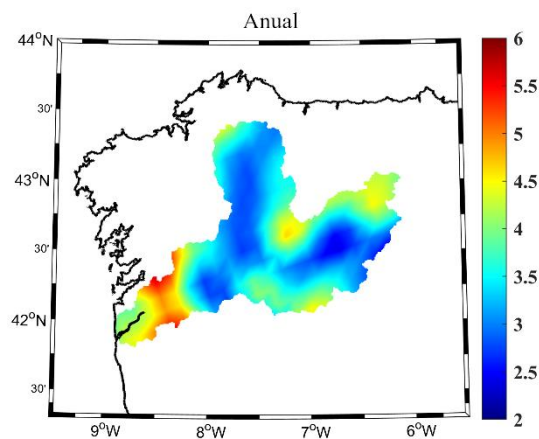


Figura 3.1. Valores medios de la precipitación anual (mm/día) promediando los resultados ofrecidos por los 7 modelos válidos para el período histórico considerado (1990-2019).

Una vez analizados los valores medios de la precipitación a escala anual, se van a evaluar los cambios que se esperan para el futuro (Figura 3.2). Se identifica un ligero descenso en los valores medios de precipitación anual de cara al futuro cercano (Figura 3.2a), con una media de descenso para la cuenca en torno al 8,50% respecto al período histórico. Hacia finales de siglo, se espera un descenso más drástico de la precipitación (Figura 3.2b), reforzando la idea de que la frecuencia de las precipitaciones sea cada vez menor. Los datos indican que, en el futuro lejano, puede llover alrededor de un 20 % menos que en la actualidad. Estudios previos realizados sobre la Península Ibérica confirman también esas expectativas de disminución en la precipitación media anual a lo largo del siglo XXI (Morata, 2014), situación que ya se viene observando en los últimos años en muchas zonas de la Península Ibérica (Inundaciones y Cambio Climático, 2018). Concretamente en la zona bajo análisis, la cuenca del Miño-Sil, estudios previos desarrollados utilizando modelizaciones diferentes también detectaron unas

expectativas de disminución de la precipitación media anual con valores en rangos similares (Morata, 2014).

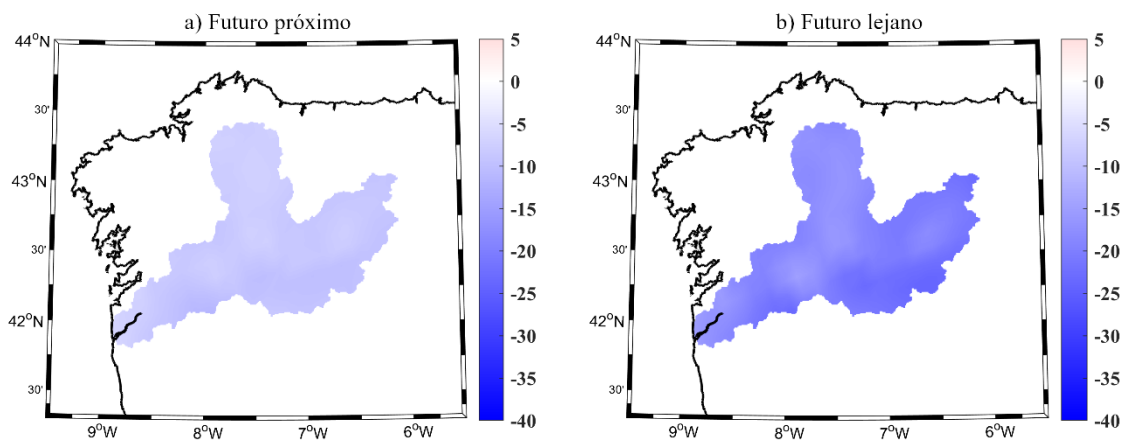


Figura 3.2. Cambios en las precipitaciones medias anuales (%) en (a) el futuro próximo (2030-2059) y (b) lejano (2070-2099) promediando los 7 modelos válidos.

A pesar de que la tendencia es a una disminución de la lluvia en el futuro, no solamente es importante conocer en media, a nivel anual, los cambios en la precipitación, sino que es tan importante conocer en que épocas se van a producir, es decir, como se distribuirán a lo largo de las diferentes estaciones del año. Por ello a continuación, se caracterizará la precipitación a escala estacional, así como los cambios esperados.

En la [Figura 3.3](#) se muestra la distribución estacional de las precipitaciones considerando el período histórico, que es de utilidad para apreciar las variaciones en los patrones de precipitación a lo largo del año.

En general, se observan patrones semejantes a la media anual, por lo que las variaciones se encuentran principalmente en los valores absolutos, a excepción de los meses de verano, donde la menor precipitación se da en la parte final de la cuenca. En concreto, la estación más seca es el verano, registrándose una precipitación media en torno a los 1,30 mm diarios, lo que equivale aproximadamente a 120 mm acumulados durante la estación, dato que concuerda con la realidad de los veranos secos en Galicia (Cortizas y Alberti, 1999). Por otra parte, la mayor precipitación a escala estacional tiene lugar durante el invierno, donde en promedio la cuenca presenta 6,21 mm diarios de precipitación, que superan los 9 mm en algunas zonas cercanas a la desembocadura. Esto supone una precipitación acumulada a lo largo de la estación en el entorno de los 560 mm, que pueden superar los 800 mm acumulados cerca de la desembocadura, lo que está en concordancia con registros previos de la cuenca (Cortizas y Alberti, 1999). Se dan valores intermedios en primavera y en otoño, con un valor promedio para la cuenca de 3,88 y 3,63 mm diarios, respectivamente.

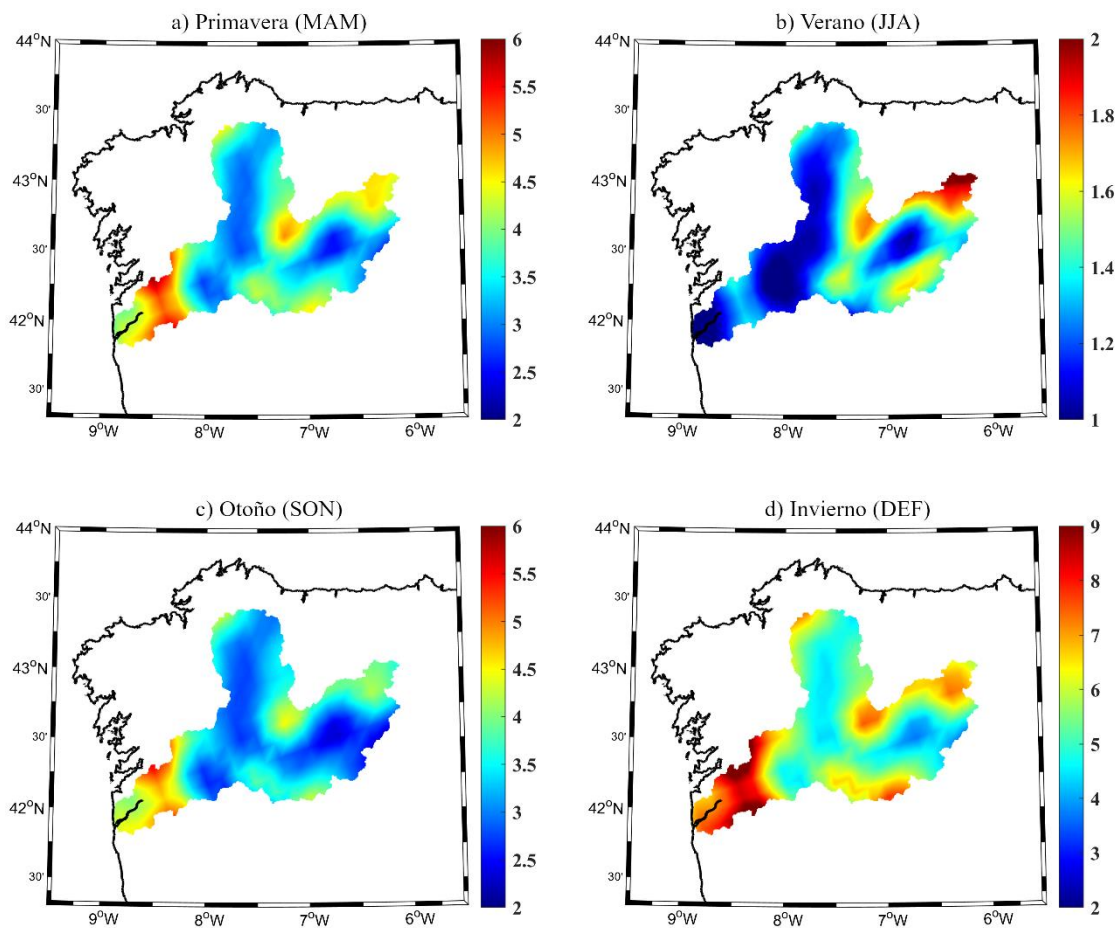


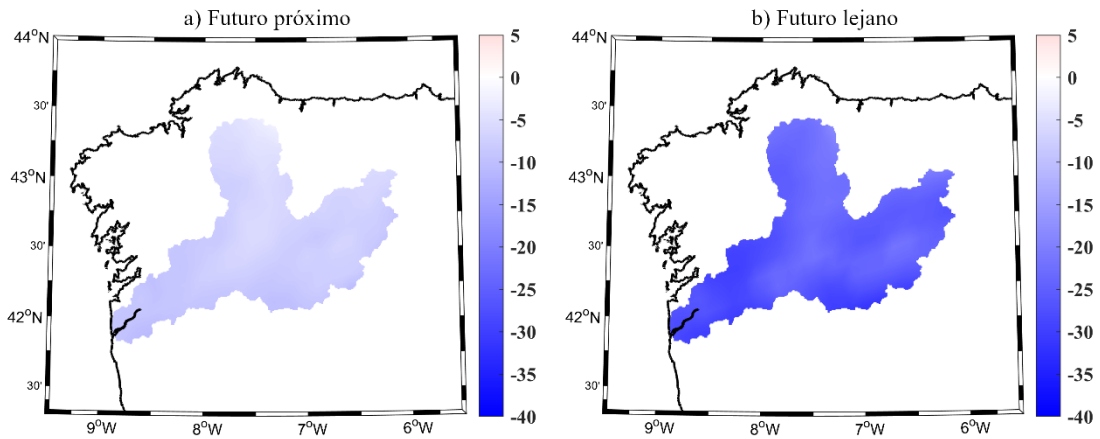
Figura 3.3. Valores medios de la precipitación para cada estación (mm/día) promediando los 7 modelos válidos para el período histórico (1990-2019). Entre paréntesis se indican los meses considerados para cada estación.

En cuanto a los cambios que se esperan en el futuro, en la [Figura 3.4](#) vemos como en todas las estaciones se espera una disminución de la lluvia, que será más acusada en el futuro lejano. La estación que va a presentar una reducción porcentual más drástica en la precipitación es el verano, donde la disminución en promedio para toda la cuenca será superior al 20% en el futuro próximo, pero que alcanzará un descenso promedio cercano al 40% en el futuro lejano, es decir, que a final de siglo lloverá casi la mitad en verano de lo que llueve actualmente. Esto puede tener consecuencias críticas ya que el verano es la época en la que menos llueve con diferencia y, a mayores, se va a experimentar la mayor disminución relativa en precipitación, lo que puede provocar problemas de disponibilidad de agua en la cuenca del Miño-Sil. De hecho, esta mayor pérdida de precipitación en la época estival detectada en este estudio es coherente con los resultados obtenidos en estudios previos ([Morata, 2014](#)), lo que corrobora esa situación crítica de escasez de agua hacia la que se tiende en el futuro en los meses más cálidos en la cuenca del Miño-Sil.

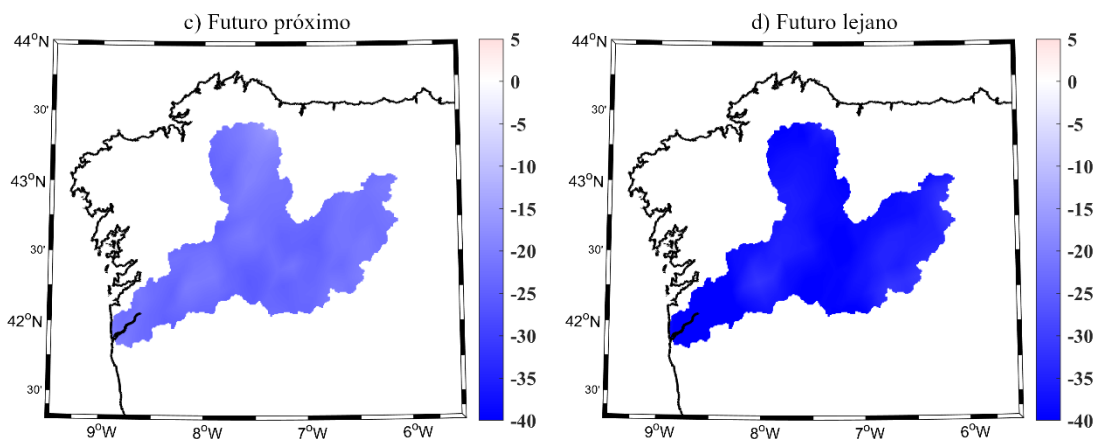
En el lado opuesto se encuentra el invierno, que es la estación que menos va a sufrir ese decrecimiento de la precipitación, con escasas disminuciones en el futuro próximo (~ 5% en media para toda la cuenca) y con valores en torno al 10% de disminución a finales de siglo. La

primavera y el otoño presentan disminuciones intermedias, con valores de 7,73% y 9,82%, respectivamente en el futuro próximo, que se incrementarán hasta unas bajadas de 25,90% y 22,04 %, respectivamente, para el futuro lejano.

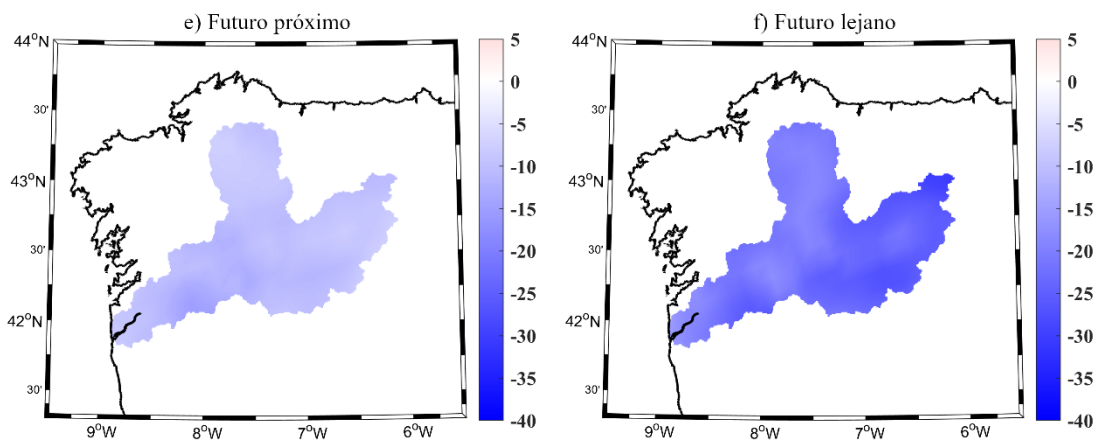
- Primavera



- Verano



- Otoño



- Invierno

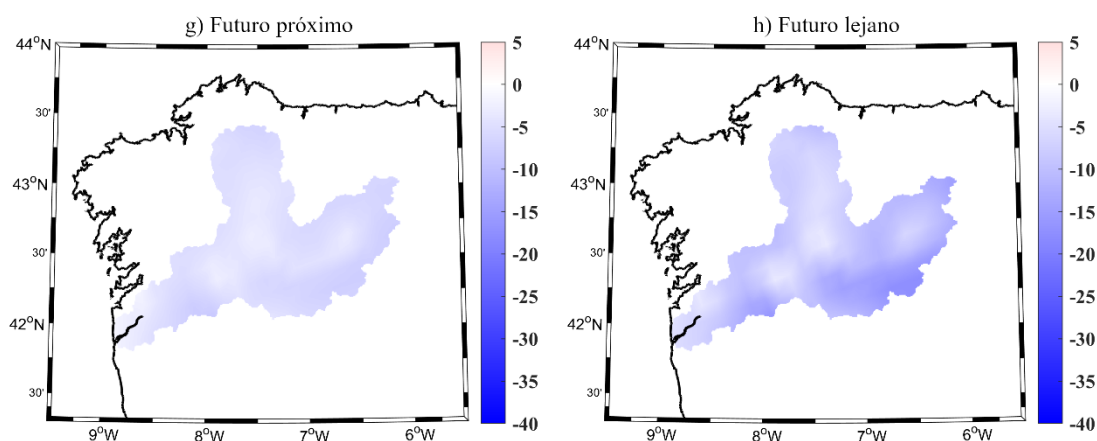


Figura 3.4. Cambios en las precipitaciones medias estacionales (%) en el futuro próximo (2030-2059) y lejano (2070-2099) promediando los 7 modelos válidos.

3.3 Valores extremos de precipitación y sus proyecciones futuras

En líneas generales la precipitación en la cuenca del Miño-Sil va a disminuir en el futuro, tanto a escala anual como a escala estacional. Además, también es muy importante analizar qué va a suceder con los valores extremos, que serán considerados aquellos que superen el percentil 99,9 de precipitación, ya que pueden llevar asociados eventos importantes de inundación. En este sentido se caracterizarán los eventos más extremos y se analizará su evolución futura.

La [Figura 3.5](#) muestra el patrón medio de precipitaciones extremas que, al contrastarlo con el patrón de la precipitación media anual, vemos que presenta una distribución similar, con los mayores valores en la zona próxima a desembocadura y los mínimos en las zonas interiores de la cuenca. La media de valores extremos en toda la cuenca es de 73,28 mm diarios pudiendo llegar a superar los 100 mm diarios en las zonas próximas a la desembocadura.

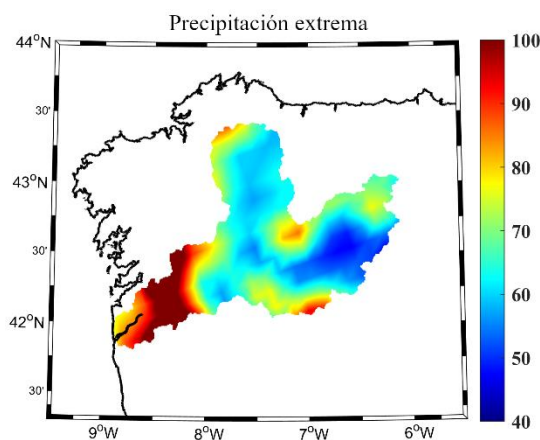


Figura 3.5. Valores extremos de precipitación (percentil 99,9) en la Cuenca del Miño-Sil (mm/día) promediando los 7 modelos válidos para el período histórico (1990-2019).

Una vez estudiado el patrón medio de precipitaciones extremas, vamos a analizar su evolución con el paso del tiempo (Figura 3.6). El futuro próximo, aunque en promedio muestra una tendencia al aumento (2,62%), presenta una evolución espacialmente variable, ya que en unas zonas de la cuenca la precipitación extrema aumentaría (principalmente en la cuenca del río Sil), a la vez que en otras disminuiría (principalmente en la cuenca del río Miño) (Figura 3.6a). En cambio, en el futuro más lejano la tendencia es a aumentar la intensidad de los valores extremos en toda la cuenca, con un aumento medio del 6,44%, llegando a superar el 10% en una parte importante de la cuenca (Figura 3.6b). Este resultado corrobora el pronóstico de que los eventos de precipitación serán más intensos con el paso de los años, lo que puede llevar asociadas inundaciones más importantes.

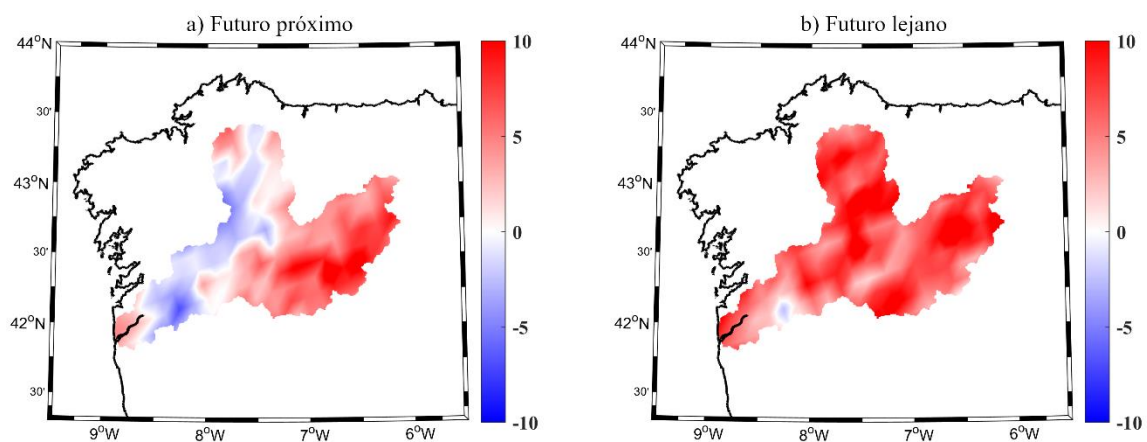


Figura 3.6. Cambios en los valores extremos de precipitación (percentil 99,9) (%) en (a) el futuro próximo (2030-2059) y (b) lejano (2070-2099) promediando los 7 modelos válidos.

Una vez confirmado que, a pesar de la disminución general de las precipitaciones medias, los eventos más extremos tienden a aumentar su intensidad, vamos a analizar este punto en más profundidad estudiando lo que va a suceder en términos de períodos de retorno, es decir, aquellos eventos extremos que tienden a darse una vez cada ciertos años. Para ello, vamos a considerar diferentes períodos de retorno, concretamente de 10, 25, 50 y 100 años. Calcularemos los períodos de retorno a nivel diario, y también aplicando una media móvil a 3 días, es decir, la lluvia acumulada considerando 3 días, ya que los frentes que llegan a la cuenca suelen tener más de un día de duración (Cabalar, 2005).

De los 7 modelos climáticos utilizados en este estudio, 4 de ellos muestran un aumento de precipitaciones extremas en términos de períodos de retorno para el futuro próximo, mientras que 5 confirman esta tendencia para el futuro lejano (Tabla 3.2). Por lo tanto, el mayor aumento, y más robusto, se da para el futuro lejano. Si analizamos los resultados considerando la media de precipitación de 3 días (Tabla 3.3), en el futuro lejano la mayoría de modelos también indican un aumento de las precipitaciones extremas asociadas a períodos de retorno, mientras que para el futuro próximo existe una mayor incertidumbre.

Tabla 3.2. Valores promedio de precipitación extrema (mm/día) en la cuenca del Miño-Sil para cada modelo válido según diferentes períodos de retorno, obtenidos para el período histórico (H), el futuro próximo (F_p) y el futuro lejano (F_l), considerando datos diarios. En rojo (azul) se indica el incremento (disminución) en el futuro respecto al período histórico.

Modelo	#1			#4			#6			#13			#14			#26			#29			
	H	F _p	F _l	H	F _p	F _l	H	F _p	F _l	H	F _p	F _l	H	F _p	F _l	H	F _p	F _l	H	F _p	F _l	
P^R																						
P^{R10}	76	84	83	83	80	79	79	79	84	76	72	107	74	76	93	78	83	87	70	65	69	
P^{R25}	87	98	96	96	94	93	92	92	98	90	85	134	88	90	115	91	96	103	83	74	81	
P^{R50}	95	108	105	107	105	103	101	103	108	101	95	154	97	101	131	101	106	114	92	81	90	
P^{R100}	103	118	115	117	115	113	110	112	118	112	105	174	107	111	146	111	115	125	101	87	99	

Tabla 3.3. Valores promedio de precipitación extrema (mm/día) en la cuenca del Miño-Sil para cada modelo válido según diferentes períodos de retorno obtenidos para el período histórico (H), el futuro próximo (F_p) y el futuro lejano (F_l), considerando 3 días de lluvia acumulada. En rojo (azul) se indica el incremento (disminución) en el futuro respecto al período histórico.

Modelo	#1			#4			#6			#13			#14			#26			#29			
	H	F _p	F _l	H	F _p	F _l	H	F _p	F _l	H	F _p	F _l	H	F _p	F _l	H	F _p	F _l	H	F _p	F _l	
P^R																						
P^{R10}	44	55	50	51	47	48	49	48	49	49	47	62	52	52	63	45	51	48	45	40	40	
P^{R25}	50	66	58	60	56	56	56	56	57	57	56	75	62	61	77	52	61	56	54	45	48	
P^{R50}	54	74	64	67	63	63	62	62	62	64	62	85	69	69	88	57	68	62	60	49	53	
P^{R100}	58	83	70	73	69	69	67	68	68	70	68	95	77	76	98	63	75	68	67	54	58	

Las [Tablas 3.4 y 3.5](#) muestran los valores de precipitación extrema para los diferentes periodos de retorno promediando los resultados ofrecidos por todos los modelos climáticos considerados. En promedio, los modelos indican un aumento poco importante en el futuro próximo, pero que ganará importancia a finales de siglo. Así, considerando los datos diarios ([Tabla 3.4](#)), se observa un ligero aumento de las precipitaciones extremas de cara al futuro próximo de apenas 0,5 mm en promedio, que se vuelve considerablemente mayor si nos enfocamos en el futuro lejano, desde aproximadamente 10 mm para el menor período de retorno considerado, hasta cerca de 19 mm para el período de retorno de 100 años. Esto, en términos relativos, implica un aumento del 12% para la precipitación correspondiente al período de retorno de 10 años, que se dispara hasta un 17% para el período de retorno de 100 años. Al considerar una media móvil a 3 días ([Tabla 3.5](#)), el promedio de los modelos también indica un ligero aumento en los valores asociados a períodos de retorno en el futuro próximo, a pesar de la incertidumbre asociada a que tantos modelos indicaban disminución como aumento en este período. A finales de siglo la tendencia nuevamente es clara, con un aumento aproximado en el entorno del 7% para el período de retorno de 10 años que aumenta hasta aproximadamente un 11% para el período de retorno de 100 años. En ambos casos se observa que, cuanto más alto es el período de retorno a considerar, el incremento de las precipitaciones extremas se verá reflejado en mayor porcentaje, de forma que los eventos más extremos son los que experimentarán un aumento todavía mayor. Estudios previos que analizaron algunos modelos de EURO-CORDEX a través de un downscaling dinámico, disponible en AEMET (Agencia Estatal de Meteorología, www.aemet.es), también concluyeron que a pesar de que en la cuenca del Miño-Sil las precipitaciones medias tenderán a disminuir, los eventos extremos de precipitación tenderán a intensificarse, lo que refuerza los resultados obtenidos en la elaboración de este trabajo ([Inundaciones y Cambio Climático, 2018](#)). Por su parte, [Lorenzo y Alvarez, 2020](#), aunque analizaron de forma general toda la Península Ibérica, también mostraron ese posible incremento de los eventos extremos de precipitación sobre la cuenca del Miño-Sil a través del análisis de proyecciones futuras.

Tabla 3.4. Promedio y desviación estándar de la precipitación (mm/día) considerando los resultados de todos los modelos válidos en la cuenca Miño-Sil según diferentes períodos de retorno, obtenidos para el período histórico, el futuro próximo y el futuro lejano, considerando datos diarios.

P^R	Histórico	Futuro próximo	Futuro lejano
P^{R10}	76,58 ± 3,97	76,96 ± 6,67	86,11 ± 11,69
P^{R25}	89,54 ± 4,34	89,97 ± 8,15	102,70 ± 16,96
P^{R50}	99,16 ± 4,79	99,63 ± 9,37	115,02 ± 20,91
P^{R100}	108,70 ± 5,34	109,21 ± 10,61	127,23 ± 25,01

Tabla 3.5. Promedio y desviación estándar de la precipitación (mm/día) considerando los resultados de todos los modelos válidos en la cuenca Miño-Sil según diferentes períodos de retorno, obtenidos para el período histórico, el futuro próximo y el futuro lejano, considerando 3 días de lluvia acumulada.

p^R	Histórico	Futuro próximo	Futuro lejano
p^{R10}	47,96 ± 3,36	48,69 ± 4,89	51,34 ± 8,02
p^{R25}	55,94 ± 4,42	57,37 ± 6,56	60,93 ± 10,82
p^{R50}	61,86 ± 5,29	63,81 ± 7,83	68,06 ± 12,91
p^{R100}	67,73 ± 6,19	70,20 ± 9,07	75,12 ± 15,03

3.4 Proyecciones futuras de caudales extremos

Los resultados obtenidos en los análisis previos indican una disminución, en promedio, de la precipitación en el futuro. Sin embargo, también se detectó que cuando se produzcan, estas van a ocurrir con mayor intensidad, lo que se espera que conduzca a eventos de precipitación cada vez más extremos. Este incremento de los eventos extremos de precipitación puede tener unas consecuencias importantes sobre las poblaciones, ya que pueden llevar asociados eventos de desbordamiento de los ríos, lo que puede dar lugar a inundaciones cada vez más devastadoras. A continuación, dada esta problemática futura detectada, introduciremos en el modelo hidrológico los datos diarios de precipitación proporcionados por cada uno de los 7 modelos climáticos validados, para obtener los correspondientes caudales esperados y analizar cómo se verán afectados los eventos extremos de caudal en las principales ciudades de la cuenca del Miño-Sil, contrastando los valores esperados de cara al futuro con los obtenidos para el período histórico. Dado que los modelos muestran un inequívoco y robusto incremento de los eventos extremos de precipitación en el futuro lejano, el análisis de los caudales se centrará en los cambios esperados a final de siglo (2070-2099).

En el área correspondiente a Lugo (Tabla 3.6), los resultados no son muy claros, ya que 4 modelos indican un aumento moderado de los caudales extremos, mientras que los otros 3 indican una disminución. Al focalizarnos en otras áreas de estudio, los cambios son más consistentes. Para las áreas correspondientes a Ponferrada y O Barco (Tablas 3.7 y 3.8) se detecta que 6 de los 7 modelos apuntan hacia un aumento de los caudales extremos, aunque también moderado. En cuanto a las áreas correspondientes a Ourense y a la desembocadura de la cuenca (Tablas 3.9 y 3.10), todos los modelos indican de forma unánime que los caudales extremos van a experimentar un aumento, que será de mayor magnitud en estas zonas.

Tabla 3.6. Valores a escala diaria de caudal extremo (m^3s^{-1}) en Lugo según diferentes períodos de retorno obtenidos para el período histórico (H) y el futuro lejano (F_1). En rojo (azul) se indica el incremento (disminución) en el futuro.

Modelo	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁
p^{R10}	702	819	808	725	575	592	701	933	1001	876	851	804	321	475
p^{R25}	863	1014	1039	915	731	738	888	1205	1332	1130	1082	1021	388	595
p^{R50}	902	1158	1211	1056	846	846	1028	1407	1578	1318	1253	1182	438	685
p^{R100}	1101	1301	1381	1196	960	954	1166	1608	1821	1505	1423	1342	488	773

Tabla 3.7. Valores a escala diaria de caudal extremo (m^3s^{-1}) en Ponferrada según diferentes períodos de retorno obtenidos para el período histórico (H) y el futuro lejano (F_1). En rojo (azul) se indica el incremento (disminución) en el futuro.

Modelo	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁
p^{R10}	737	788	570	636	666	701	566	872	636	889	623	544	596	762
p^{R25}	943	991	719	806	827	865	714	1139	811	1180	770	683	754	1006
p^{R50}	1095	1142	829	933	946	986	825	1338	941	1395	880	786	871	1187
p^{R100}	1247	1292	938	1058	1064	1107	934	1534	1069	1609	988	888	987	1367

Tabla 3.8. Valores a escala diaria de caudal extremo (m^3s^{-1}) en O Barco según diferentes períodos de retorno obtenidos para el período histórico (H) y el futuro lejano (F₁). En rojo (azul) se indica el incremento (disminución) en el futuro.

Modelo	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁
p^R₁₀	1329	1434	856	1096	919	959	926	1288	1139	1390	924	884	839	943
p^R₂₅	1668	1792	1046	1381	1127	1167	1153	1647	1457	1800	1105	1077	1038	1194
p^R₅₀	1919	2058	1188	1592	1282	1321	1322	1913	1693	2105	1238	1220	1186	1381
p^R₁₀₀	2169	2321	1328	1802	1436	1474	1489	2176	1928	2407	1371	1362	1332	1565

Tabla 3.9. Valores a escala diaria de caudal extremo (m^3s^{-1}) en Ourense según diferentes períodos de retorno obtenidos para el período histórico (H) y el futuro lejano (F₁). En rojo (azul) se indica el incremento (disminución) en el futuro.

Modelo	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁	H	F ₁
p^R₁₀	3379	4280	2666	3232	2704	2985	2838	4249	3330	4213	2659	2894	2229	2630
p^R₂₅	4179	5333	3254	4009	3280	3586	3511	5440	4201	5416	3191	3539	2710	3325
p^R₅₀	4773	6115	3691	4587	3709	4033	4012	6326	4847	6310	3586	4019	3067	3842
p^R₁₀₀	5362	6891	4124	5159	4133	4476	4508	7203	5488	7195	3978	4494	3421	4353

Tabla 3.10. Valores a escala diaria de caudal extremo (m^3s^{-1}) en la desembocadura según diferentes períodos de retorno obtenidos para el período histórico (H) y el futuro lejano (F_1). En rojo (azul) se indica el incremento (disminución) en el futuro.

Modelo	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
	H	F_1	H	F_1	H	F_1	H	F_1	H	F_1	H	F_1	H	F_1
P^{R10}	4224	5349	3333	4040	3379	3731	3547	5311	4162	5266	3324	3617	2787	3288
P^{R25}	5224	6666	4068	5011	4100	4483	4389	6800	5251	6770	3989	4424	3388	4157
P^{R50}	5966	7644	4614	5733	4636	5041	5015	7907	6059	7887	4483	5023	3834	4802
P^{R100}	6702	8613	5155	6448	5166	5595	5635	9003	6860	8994	4972	5617	4276	5442

Si atendemos a los valores extremos de caudal promediados a todos los modelos para cada localidad (Tablas 3.11-3.15), se espera un aumento de un 4~5% para la localidad de Lugo, un rango de valores pequeño una vez contrastado con otras localidades. En Ponferrada, el aumento en la intensidad de los caudales extremos ronda entre un 18% y un 23% según el período de retorno considerado. De la misma forma, en O Barco este incremento será de entre un 15% y un 19%. Los cambios más notables se producirán en la localidad de Ourense y en la desembocadura, con aumentos desde un 24% para un período de retorno de 10 años hasta un 28% para un período de retorno de 100 años. Estos resultados corroboran que los eventos extremos de caudal cada vez serán más críticos en las principales ciudades de la cuenca del Miño-Sil. Muchas de estas localizaciones, que están sujetas a inundaciones cuando el río Miño y sus afluentes sobrepasan ciertos umbrales de caudal (González-Cao et al., 2019; Fernández-Nóvoa et al., 2020), sufrirán consecuencias cada vez más frecuentes y drásticas debido a esta intensificación de los caudales extremos, por lo que será necesaria la aplicación de medidas de mitigación y/o adaptación para contrarrestar el incremento futuro de esta problemática.

Estudios previos más generales, a nivel europeo, pero que también incluyen la cuenca del Miño-Sil, en donde se analizan los cambios esperados en los caudales extremos a través de la inclusión de las variables climáticas proyectadas en modelos hidrológicos, también concluyeron una intensificación de los caudales extremos y riesgo de inundación para la cuenca del Miño-Sil a medida que avanza el siglo (Alfieri et al., 2015a), resultados corroborados en Inundaciones y Cambio Climático, 2018, lo que da robustez a los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Tabla 3.11. Promedio y desviación estándar a escala diaria del caudal extremo (m^3s^{-1}) considerando los resultados de todos los modelos válidos en Lugo según diferentes períodos de retorno, obtenidos para el período histórico y el futuro lejano.

p^R	Histórico	Futuro
p^{R10}	708,57 ± 217,59	746,35 ± 162,30
p^{R25}	903,36 ± 297,51	945,40 ± 215,32
p^{R50}	1048,09 ± 357,44	1093,28 ± 255,10
p^{R100}	1191,45 ± 417,02	1239,76 ± 294,68

Tabla 3.12. Promedio y desviación estándar a escala diaria del caudal extremo (m^3s^{-1}) considerando los resultados de todos los modelos válidos en Ponferrada según diferentes períodos de retorno, obtenidos para el período histórico y el futuro lejano.

p^R	Histórico	Futuro
p^{R10}	627,61 ± 60,11	741,69 ± 124,72
p^{R25}	790,95 ± 79,13	952,75 ± 179,25
p^{R50}	912,31 ± 209,36	1109,56 ± 220,66
p^{R100}	1032,51 ± 108,61	1264,89 ± 262,06

Tabla 3.13. Promedio y desviación estándar a escala diaria del caudal extremo (m^3s^{-1}) considerando los resultados de todos los modelos válidos en O Barco según diferentes períodos de retorno, obtenidos para el período histórico y el futuro lejano.

p^R	Histórico	Futuro
p^{R10}	990,37 ± 178,48	1142,13 ± 227,19
p^{R25}	1227,75 ± 240,07	1436,75 ± 303,33
p^{R50}	1404,11 ± 286,53	1655,65 ± 367,73
p^{R100}	1578,79 ± 332,91	1872,46 ± 427,92

Tabla 3.14. Promedio y desviación estándar a escala diaria del caudal extremo (m^3s^{-1}) considerando los resultados de todos los modelos válidos en Ourense según diferentes períodos de retorno, obtenidos para el período histórico y el futuro lejano.

p^R	Histórico	Futuro
p^{R10}	2829,22 ± 405,01	3497,32 ± 723,24
p^{R25}	3475,17 ± 544,02	4378,41 ± 974,14
p^{R50}	3955,09 ± 648,76	5033,01 ± 1163,28
p^{R100}	4430,45 ± 752,64	5681,41 ± 1352,06

Tabla 3.15. Promedio y desviación estándar a escala diaria del caudal extremo (m^3s^{-1}) considerando los resultados de todos los modelos válidos en la desembocadura según diferentes períodos de retorno, obtenidos para el período histórico y el futuro lejano.

p^R	Histórico	Futuro
p^{R10}	3536,53 ± 506,26	4371,66 ± 904,05
p^{R25}	4343,96 ± 680,01	5473,01 ± 1217,57
p^{R50}	4943,86 ± 810,66	6291,26 ± 1454,13
p^{R100}	5538,06 ± 940,78	7101,77 ± 1689,89

4. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo consistió en analizar la evolución futura de las precipitaciones extremas en la cuenca del Miño-Sil, así como los cambios esperados en los caudales extremos asociados en algunas de las localizaciones más importantes de la cuenca, como las ciudades de Lugo, Ponferrada, O Barco, Ourense y el río Miño en su desembocadura. Para este fin, se tuvieron en cuenta los datos de precipitación obtenidos de la rama europea del proyecto CORDEX, pero considerando solamente aquellos modelos regionales capaces de reproducir de forma adecuada la precipitación histórica en la zona de estudio. Esta validación se realizó comparando las simulaciones históricas con la precipitación real obtenida de los pluviómetros de Meteogalicia. Un total de 7 modelos de EURO-CORDEX mostraron precisión suficiente para la cuenca del Miño-Sil, por lo que se tomaron sus datos de precipitación considerando un período histórico (1990-2019) y dos períodos futuros: uno próximo (2030-2059) y otro lejano (2070-2099). El análisis de las proyecciones futuras se realizó considerando el escenario RCP8.5, ya que es preferible una perspectiva más conservadora y que considere el peor escenario posible en este tipo de análisis, con vistas a aplicar medidas de mitigación y adaptación suficientes. Con esta información, se analizaron las proyecciones futuras de la precipitación, con especial atención a sus valores extremos. Además, con los datos de precipitación de los modelos validados de EURO-CORDEX se alimentó un modelo hidrológico que permitió obtener el caudal fluvial correspondiente y analizar así la evolución futura de los caudales en la cuenca, con especial atención a aquellos capaces de generar situaciones de inundación.

Las principales conclusiones obtenidas en el desarrollo de este trabajo fueron las siguientes:

- De forma general cabe esperar una reducción en la precipitación media anual en la cuenca del Miño-Sil. Concretamente, se proyecta una disminución media para la cuenca del 8,5% en un futuro próximo respecto al período histórico considerado, que será más pronunciada de cara a finales de siglo, llegando casi hasta un 20% de disminución promedio en la cuenca. Este descenso será menos notable durante el invierno y más pronunciado durante el verano, lo que puede llevar asociado mayores problemas de disponibilidad de agua. De hecho, la precipitación media durante los meses de verano experimentará un descenso de más del 20% en un futuro próximo, que se intensificará llegando hasta aproximadamente un 40% de disminución en un futuro más lejano, lo que implica que a finales de siglo en el verano lloverá casi la mitad de lo que llueve actualmente.
- A pesar de la disminución media de la precipitación, cabe esperar un aumento de intensidad en los eventos de precipitación extremos. De hecho, cuanto mayor es el período de retorno considerado para los eventos de precipitación, más se va a ver aumentada su intensidad en el futuro, es decir, que los eventos más extremos son los que más se intensificarán. Se espera, por tanto, una intensificación en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos de precipitación en la cuenca del Miño-Sil. Concretamente, los eventos de precipitación

extremos, considerados por encima del percentil 99,9, aumentarán su intensidad en más de un 6% en promedio para toda la cuenca hacia finales de siglo, lo cual irá de la mano de inundaciones más importantes. Si consideramos períodos de retorno para analizar los eventos más extremos de precipitación, su intensidad se incrementará hasta un 12% a finales de siglo si se considera un período de retorno de 10 años y subirá en hasta un 17% el valor del período de retorno de 100 años.

- El incremento de la precipitación extrema va a propiciar que los eventos extremos de caudal también se vean intensificados en el futuro. En zonas del alto Miño, como Lugo, aunque en promedio los modelos indican un aumento de la intensidad de los caudales extremos, existe una mayor incertidumbre en los resultados. A lo largo del río Sil, en áreas como Ponferrada y O Barco, los caudales extremos aumentarán de forma inequívoca. Ya aguas abajo de la desembocadura del río Sil en el río Miño, el incremento de los caudales extremos se verá todavía más intensificado. Así, a la altura de la ciudad de Ourense y en la desembocadura del río Miño, se esperan incrementos cercanos al 25% en el valor de caudal extremo para el período de retorno de 10 años, que se incrementa hasta cerca del 30% al considerar un período de retorno del caudal de 100 años. Esto dará lugar a más situaciones de desbordamiento de los ríos y mayor amplitud de las zonas inundadas, lo que tendrá consecuencias notables sobre las poblaciones afectadas.

En definitiva, podemos concluir que, aunque la precipitación en promedio va a disminuir en la cuenca del Miño-Sil, cabe esperar un claro aumento en los fenómenos de precipitación extrema en el futuro, que se verá intensificado a medida que pasen las décadas y que provocará inundaciones de mayor magnitud en la mayor parte de la cuenca del Miño-Sil. Ante estos resultados, será imprescindible implementar medidas de mitigación, como puede ser un mayor control por parte de los embalses, y de adaptación, con una mejor planificación del terreno que no invada las zonas inundables.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., Salamon, P., Wyser, K. y Feyen, L. (2017). Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future*, 5, 171–182.
- Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L. y Forzieri, G. (2015a). Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(5), 2247-2260.
- Alfieri, L., Feyen, L., Dottori, F. y Bianchi, A. (2015b). Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios. *Global Environmental Change*, 35, 199-212.
- Arnell, N. W. y Gosling, S. N. (2016). The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climate Change*, 134(3), 387-401.
- Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R. A., Parajka, J., Merz, B., ... y Živković, N. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573(7772), 108-111.
- Cabalar Fuentes, M. (2005). Los temporales de lluvia y viento en Galicia. Propuesta de clasificación y análisis de tendencias (1961-2001). *Investigaciones geográficas*, 36, 103-118.
- Cea, L. y Fraga, I. (2018). Incorporating antecedent moisture conditions and intraevent variability of rainfall on flood frequency analysis in poorly gauged basins. *Water Resources Research*, 54, 8774–8791.
- Cortizas, A. M. y Alberti, A. P. (1999). *Atlas climático de Galicia*. Xunta de Galicia, 187.
- Des, M., Fernández-Nóvoa, D., deCastro, M., Gómez-Gesteira, J. L., Sousa, M. C. y Gómez-Gesteira, M. (2021). Modeling salinity drop in estuarine areas under extreme precipitation events within a context of climate change: Effect on bivalve mortality in Galician Rías Baixas. *Science of the Total Environment*, 790, 148147.
- Fekete, A., Tzavella, K. y Baumhauer, R. (2017). Spatial exposure aspects contributing to vulnerability and resilience assessments of urban critical infrastructure in a flood and blackout context. *Natural Hazards*, 86(1), 151-176.
- Feldman, A.D. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual*. USA Army Corps of Engineers: Washington, DC, USA; Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA.
- Fernández Nóvoa, D., Des Villanueva, M. y Gómez Gesteira, M. (2021). *O Cambio Climático*. Esenciais. Breviarios de Divulgación do Saber. Universidade de Vigo.
- Fernández-Nóvoa, D., García-Feal, O., González-Cao, J., de Gonzalo, C., Rodríguez-Suárez, J. A., del Portal, C. R. y Gómez-Gesteira, M. (2020). MIDAS: A New Integrated Flood Early Warning System for the Miño River. *Water*, 12 (9), 3420.

- Fernández-Nóvoa, D., deCastro, M., Des, M., Costoya, X., Mendes, R. y Gómez-Gesteira, M. (2017). Characterization of Iberian turbid plumes by means of synoptic patterns obtained through MODIS imagery. *Journal of Sea Research*, 126, 12-25.
- Fraga, I., Cea, L. y Puertas, J. (2020). MERLIN: a flood hazard forecasting system for coastal river reaches. *Natural Hazards*, 100 (3), 1171–1193.
- Giorgi, F., Jones, C. y Asrar, G. (2009). Addressing climate information needs at regional level: The CORDEX framework. *WMO Bulletin*, 58, 175-183.
- González-Cao, J., García-Feal, O., Fernández-Nóvoa, D., Domínguez-Alonso, J. M. y Gómez-Gesteira, M. (2019). Towards an automatic early warning system of flood hazards based on precipitation forecast: the case of the Miño River (NW Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19, 2583-2595.
- Inundaciones y cambio climático (2018). *Ministerio para la Transición Ecológica*. Madrid, 105.
- IPCC (2021). *Climate change 2021: The Physical Science Basis*. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Huang, M., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B., Lonnoy, E., Maycock, T. K., Waterfield, T., Leitzell, K. y Caud., N. (eds.)]. Cambridge University Press.
- IPCC (2013). *Cambio climático 2013: Bases físicas*. Contribución del grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M.M.B., Allen S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. y Midgley P. M. (eds.)]. Cambridge University Press.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., ... y Georgopoulou, E. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional environmental change*, 14, 563-578.
- Jongman, B. (2018). Effective adaptation to rising flood risk. *Nature communications*, 9(1), 1-3.
- Lavers, D. A., Allan, R. P., Wood, E. F., Villarini, G., Brayshaw, D. J. y Wade, A. J. (2011). Winter floods in Britain are connected to atmospheric rivers. *Geophysical Research Letters*, 38(23).
- Lorenzo, M. N. y Alvarez, I. (2020). Climate change patterns in precipitation over Spain using CORDEX projections for 2021-2050. *Science of The Total Environment*, 723, 138014.
- Morata, A. (2014). *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR4*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 197.

- Natural Resources Conservation Service (NRCS) (2007). *National Engineering Handbook: Chapter 16 Hydrographs*. In: Washington, DC.
- Noji, E. K. (2000). The public health consequences of disasters, *Prehospital and disaster medicine: the official journal of the National Association of EMS Physicians and the World Association for Emergency and Disaster Medicine in association with the Acute Care Foundation*, 15 (4), 147-157.
- Paprotny, D., Sebastian, A., Morales-Nápoles, O. y Jonkman, S. N. (2018). Trends in flood losses in Europe over the past 150 years. *Nature communications*, 9(1), 1-12.
- Perkins, S. E., Pitman, A. J., Holbrook, N. J. y McAneney, J. (2007). Evaluation of the AR4 Climate Models' Simulated Daily Maximum Temperature, Minimum Temperature, and Precipitation over Australia Using Probability Density Functions. *Journal of Climate*, 20, 4356-4376.
- Scharffenberg, B., Bartles, M., Brauer, T., Fleming, M. y Karlovits, G. (2018). *Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). User's Manual: Version 4.3*. USA Army Corps of Engineers: Washington, DC, USA.
- Schoof, J. T. y Robeson, S. M. (2016). Projecting changes in regional temperature and precipitation extremes in the United States. *Weather and Climate Extremes*, 11, 28-40.
- Soil Conservation Service (SCS) (1985). *National engineering handbook (Hydrology) Section 4*. In; U.S. Dept. of Agriculture (USDA): Washington, DC.
- Trigo, I. F. (2006). Climatology and interannual variability of storm-tracks in the Euro-Atlantic sector: a comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses. *Climate Dynamics*, 26, 127–143.
- Trigo, R. M., Varino, F., Ramos, A. M., Valente, M. A., Zêzere, J. L., Vaquero, J. M., Gouveia, C. M. y Russo, A. (2014). The record precipitation and flood event in Iberia in December 1876: Description and synoptic analysis. *Frontiers in Earth Science*, 2, 3.
- Trigo, R. M., Pozo-Vázquez, D., Osborn, T. J., Castro-Díez, Y., Gámiz-Fortis, S. y Esteban-Parra, M. J. (2004). North Atlantic Oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 24, 925–944.
- Uriarte, A. (2013). *Historia del clima de la Tierra*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, Victoria-Gasteiz, Spain, 306.
- U.S. Army Corps of Engineers (2018). *Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) User's Manual: Version 4.3*. Institute for Water Resources Davis: Hydrologic Engineering Center. 2018.
- Zalasiewicz, J. y Williams, M. (2021). Climate change through Earth's history. *Climate Change*, 3–17.