

Evaluación de los efectos de los escenarios hidrológicos proyectados para el siglo XXI  
sobre la generación hidroeléctrica

## Acción 3

# DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA.

## FV3.2 - Entregable final

Elaborado por Tecnalia

06 / 2021

Con el apoyo de la Fundación Biodiversidad, del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico



VICEPRESIDENCIA  
TERCERA DEL GOBIERNO  
MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA  
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



## Contenido

Contenido.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA METODOLOGÍA Y ANÁLISIS REALIZADOS.....	8
2.1 Planteamiento general de la metodología.....	8
2.2 Análisis realizados.....	9
3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	11
4. TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA.....	13
4.1 Planteamiento general.....	13
4.2 Uso de datos históricos.....	13
4.3 Empleo de series futuras de caudal.....	14
4.4 Corrección de sesgo.....	16
4.4.1 Escalado por cuantiles.....	16
4.4.2 Método delta.....	17
5. FUENTES DE PROYECCIONES DE CAUDALES.....	18
5.1 Diagramas de cajas y bigotes.....	18
5.2 Caudales observados.....	19
5.3 Características de las proyecciones de caudales aportadas por CEDEX.....	19
5.4 SWICCA (Copernicus CDS).....	20
6. RESULTADOS PRINCIPALES DEL ANÁLISIS DE LAS PROYECCIONES DE CAUDALES.....	23
6.1 Comparativa entre los datos aportados por CEDEX y SWICCA.....	23
6.1.1 Valores de los caudales sin normalizar.....	23
6.1.2 Valores normalizados.....	32
6.2 Comparativa entre los datos registrados y los valores aportados por SWICCA.....	41
6.2.1 Análisis de los resultados.....	41
7. PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA HIDROELÉCTRICA.....	45
7.1 Inicio o cabecera.....	45
7.2 Captación o derivación de caudal.....	45
7.3 Tramo de río.....	46
7.4 Embalse.....	46
7.5 Central hidroeléctrica generadora.....	47
7.6 Central hidroeléctrica reversible.....	48
8. CONCLUSIONES.....	49
9. REFERENCIAS.....	51

DECLARACION DE DESCARGO DE RESPONSABILIDAD:

Este documento ha sido producido con el apoyo de la Fundación Biodiversidad, del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Las opiniones y documentación aportadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad del autor o autores de los mismos, y no reflejan necesariamente los puntos de vista de las entidades que apoyan económicamente el proyecto.

AUTORES:

Elena Turienzo

Jon Ander Gabantxo

Jorge Paz

José Antonio Martínez

Efrén Feliu

Pilar Fernández

Blas Lajarín

Txomin Laburu

## Figuras

Figura 1 Cascada de incertidumbre. Fuente: [20] .....	8
Figura 2 Ejemplo de modelo hidro-energético de simulación .....	9
Figura 3 Ciclo de la función de los servicios climáticos usados para la elaboración del presente informe. Adaptado de [4].....	15
Figura 4 Ejemplo de la técnica de mapeo por cuantiles. Fuente: [8].....	17
Figura 5 Ejemplo de aplicación del método delta. Adaptado de [9].....	17
Figura 6 Caja de bigotes de datos aleatorios. Fuente: <a href="https://matplotlib.org/stable/gallery/pyplots/boxplot_demo_pyplot.html#sphx-glr-gallery-pyplots-boxplot-demo-pyplot-py">https://matplotlib.org/stable/gallery/pyplots/boxplot_demo_pyplot.html#sphx-glr-gallery-pyplots-boxplot-demo-pyplot-py</a> .....	18
Figura 7 Caja de bigotes sin excedentes. Fuente: <a href="https://blog.finxter.com/matplotlib-boxplot/">https://blog.finxter.com/matplotlib-boxplot/</a> .....	19
Figura 8 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales anuales para el sistema integrado por las cuencas piloto 1 y 2. Fuente: [5]. .....	26
Figura 9 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales regulados ( <i>river flow</i> ) anuales para la cuenca piloto 1. Fuente: [4]. .....	27
Figura 10 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales anuales regulados para una la cuenca piloto 2. Fuente: [4].....	28
Figura 11 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales no regulados ( <i>unregulated river flow</i> ) anuales para la cuenca piloto 1. Fuente: [4]. .....	30
Figura 12 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales anuales no regulados para la cuenca piloto 2. Fuente: [4].....	31
Figura 13 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales anuales normalizados con respecto al valor medio anual histórico. Válido para el sistema integrado por las cuencas piloto 1 y 2. Fuente: [5]. .....	35
Figura 14 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales regulados ( <i>river flow</i> ) anuales normalizados con respecto al valor medio anual histórico, para la cuenca piloto 1. Fuente: [4]. .....	36
Figura 15 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales regulados ( <i>river flow</i> ) anuales normalizados con respecto al valor medio anual histórico, para la cuenca piloto 2. Fuente: [4] .....	37
Figura 16 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales no regulados anuales normalizados con respecto al valor medio anual histórico, para la cuenca piloto 1. Fuente: [4].....	39
Figura 17 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales no regulados anuales normalizados con respecto al valor medio anual histórico, para la cuenca piloto 2. Fuente: [4].....	40
Figura 18 Distribución de las proyecciones climáticas de los caudales en la cuenca piloto 1 para el futuro cercano y la única combinación de modelos más coherente, teniendo en cuenta los tres escenarios de emisiones. ....	43
Figura 19 Distribución de los caudales en la cuenca piloto 1. Históricos (izquierda) y proyecciones climáticas para el futuro cercano (derecha), para 4 combinaciones de modelos (compartiendo el modelo hidrológico), teniendo en cuenta el peor escenario de emisiones.....	43

Figura 20 Distribución de las proyecciones climáticas de los caudales en la cuenca piloto 2, para el futuro cercano y la única combinación de modelos más coherente, teniendo en cuenta los tres escenarios de emisiones. .... 44

Figura 21 Distribución de los caudales en la cuenca piloto 2. Históricos (izquierda) y proyecciones climáticas para el futuro cercano (derecha), para 4 combinaciones de modelos (compartiendo el modelo hidrológico), teniendo en cuenta el peor escenario de emisiones..... 44

Figura 22 Ejemplo de configuración del modelo para estudiar un sistema integrado por una central con embalse para el que se dispone de dos afluentes aguas arriba. .... 45

Figura 23 Esquema correspondiente al inicio o cabecera del sistema en estudio. .... 45

Figura 24 Esquema correspondiente a una captación o derivación de caudal..... 46

Figura 25 Esquema correspondiente a un tramo de río. .... 46

Figura 26 Esquema correspondiente a un embalse..... 47

Figura 27 Esquema correspondiente a una central hidroeléctrica..... 47

Figura 28 Curva de rendimiento típica para diferentes tipos de turbina..... 48

Figura 29 Esquema correspondiente a una central hidroeléctrica reversible. .... 48

## Tablas

Tabla 1 Combinaciones de modelos usados en [5].	20
Tabla 2 Combinaciones de modelos empleados entre todos los paquetes de datos provenientes del proyecto SWICCA (Copernicus CDS), para la variable river flow.	21
Tabla 3 Combinaciones de modelos empleados entre todos los paquetes de datos provenientes del proyecto SWICCA (Copernicus CDS), para la variable unregulated river flow.	21
Tabla 4 Color que pertenece a los diagramas de cada conjunto de la Figura 8.	23
Tabla 5 Combinaciones de modelos que predicen los caudales regulados más bajos, para una de las cuencas estudiadas.	24
Tabla 6: combinaciones de modelos que predicen los caudales regulados más altos, para una de las cuencas estudiadas.	24
Tabla 7 Combinaciones de modelos que comparten la tendencia a la baja de los caudales en la Figura 14 y Figura 15.	34
Tabla 8 Combinaciones de modelos coherentes con el escenario RCP 8.5 dentro del futuro cercano. Válido tanto para los caudales regulados como los no regulados.	42
Tabla 9 Combinación de modelos coherente para todos los escenarios RCP del futuro cercano. Válido para ambas variables.	42

## 1. INTRODUCCIÓN

La producción hidroeléctrica, clave para la transición hacia un modelo energético más sostenible, se encuentra vinculada a los recursos hídricos disponibles, siendo por tanto especialmente sensible al cambio climático. Para que los agentes relevantes del sector puedan planificar sus estrategias de adaptación frente al cambio climático es preciso combinar proyecciones hidrológicas e información sectorial.

Este tipo de análisis requiere de recursos, capacidades y conocimientos específicos que hacen que sean complejos de abordar. El objetivo final del proyecto “Evaluación de los efectos de los escenarios hidrológicos proyectados para el siglo XXI sobre la generación hidroeléctrica” es contribuir a superar esta barrera mediante el desarrollo de una metodología y una herramienta informática que simplifique la adquisición de la información climática disponible y su procesamiento, considerando información específica de cada instalación para generar proyecciones de recurso disponible y generación energética.

Para ello, en anteriores etapas del proyecto se ha abordado el análisis de la información y herramientas actualmente disponibles para evaluar el impacto del cambio climático en el sector hidroeléctrico, realizando una revisión de publicaciones científicas, webs, portales proveedores de información, proyectos publicados, herramientas y modelos disponibles. La principal conclusión de este estudio es que actualmente se encuentran disponibles resultados de simulaciones hidrológicas acopladas a proyecciones climáticas que permiten simplificar el estudio de las consecuencias del cambio climático para aprovechamientos específicos. En la metodología propuesta se plantea la manera de adquirir, analizar y aplicar esta información al análisis específico de la generación hidroeléctrica.

Asimismo, en etapas anteriores del proyecto se han definido las principales aplicaciones de los productos del proyecto, destacando aquellos ámbitos de decisión que se considera más interesante informar a través de los modelos y herramientas que se han desarrollado en el marco del mismo. Las prioridades en este sentido son:

- El análisis de la previsible evolución de la generación hidroeléctrica a partir de escenarios climáticos que tienen en consideración el cambio climático, buscando detectar cambios en la generación media pero, en caso de ser posible, también en la producción estacional.
- La evaluación del efecto del cambio climático sobre el papel que tiene la infraestructura hidroeléctrica en la mitigación de los efectos de las sequías en los caudales, la prevención de caudales muy bajos y el mantenimiento del caudal ecológico.
- El análisis de la contribución de la infraestructura hidroeléctrica al control de avenidas bajo escenarios de cambio climático.

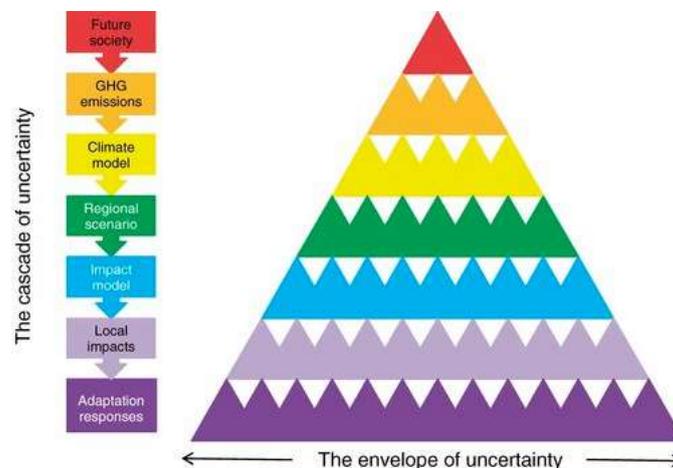
La metodología empleada trata de dar respuesta al análisis de la previsible influencia del cambio climático en estos aspectos. Así mismo, una vez desarrollada la misma se ha aplicado bajo diferentes planteamientos para poder dar respuesta a las inquietudes detectadas durante del desarrollo del proyecto en relación al papel que juega en la actualidad y jugará en el futuro la energía hidroeléctrica y su infraestructura asociada (embalses, etc.) en cuanto al control de avenidas, mantenimiento de caudales, etc. En el presente documento se procede a exponer la metodología para alcanzar los objetivos anteriores, detallando:

- Metodología global.
- Recopilación de información.
- Análisis de la información hidrometeorológica disponible.
- Metodología de tratamiento de la información hidrometeorológica.
- Procedimiento de simulación de la operación de la infraestructura hidroeléctrica.
- Planteamiento de los sistemas operados por Naturgy.

## 2. PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA METODOLOGÍA Y ANÁLISIS REALIZADOS

Previamente a describir el planteamiento de la metodología, es importante tener en cuenta que existen diferentes incertidumbres en el proceso necesario para aplicar proyecciones climáticas al análisis de los impactos locales como los que se abordan en el presente estudio. Aunque los modelos climáticos que se utilizan para generar las mismas están en constante mejora, todavía no es posible asegurar unas condiciones climáticas futuras con un grado de confianza suficientemente alto que permitan una toma de decisiones precisa. Son varias las incertidumbres que se manejan: en la variabilidad climática, la sociedad futura, las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) futuras, cómo interactúan los componentes del sistema climático, etc. Todo ello genera una amplia gama de posibles futuros climáticos con los que trabajar, que se plantean mediante diferentes escenarios. Este enfoque da como resultado una cascada de incertidumbre (ver Figura 1) que conduce a una gama amplia de posibles opciones de adaptación.

Figura 1 Cascada de incertidumbre. Fuente: [20]



A la hora de tomar decisiones, por tanto, la clave frente a la incertidumbre será definir e implementar opciones de adaptación que ofrezcan, tanto beneficios en el clima actual, como resiliencia ante la gama de posibles escenarios de cambio climático futuros. De este modo, aportar un rango de posibles escenarios climáticos o, como en este proyecto, de posibles escenarios de impacto del cambio climático, no ha de ser percibido como una limitación de las herramientas de las que disponemos. Al contrario, aporta una visión del rango de posibles escenarios a los que podemos tener que adaptarnos.

### 2.1 Planteamiento general de la metodología

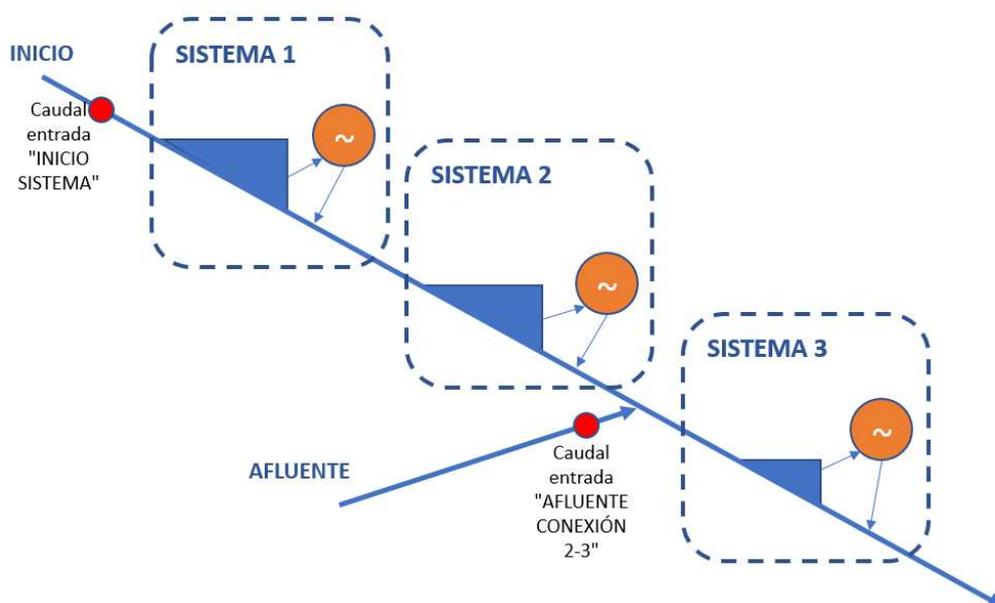
El análisis del impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica se plantea en diferentes etapas sucesivas:

- Recopilación de información sobre caudales históricos y sobre el sistema hidroeléctrico a analizar ya sea a través de fuentes de carácter público o de los datos aportados por las empresas y agentes operadores.
- Generación de un modelo hidroenergético que simule la operación de los embalses, canales, centrales y resto de elementos que integran el sistema hidroeléctrico.
- Calibración del modelo hidro-energético a través de la comparación de sus resultados con los datos históricos disponibles de caudales, volúmenes embalsados, generación eléctrica, etc.

- Adquisición y análisis de las proyecciones de caudales disponibles, abordando generalmente una selección de un conjunto limitado de posibles escenarios.
- Generación de proyecciones de caudal para escenarios futuros ajustadas a los puntos y periodos de interés.
- Inclusión en el modelo de simulación de proyecciones climáticas de caudales que alterarán los caudales circulantes, generación hidroeléctrica y resto de parámetros estudiados.
- Evaluación de los resultados generados considerando proyecciones climáticas y comparación con el escenario base.

La herramienta clave para abordar esta secuencia es un modelo hidro-energético de simulación cuyos datos de entrada serán los caudales del cauce principal al inicio de un sistema hidroeléctrico y de los afluentes que lo alimentan y cuyas principales salidas son los caudales que circulan por cada uno de sus tramos, conducciones, ríos, etc. y la energía generada por los diferentes aprovechamientos.

Figura 2 Ejemplo de modelo hidro-energético de simulación



Este tipo de modelos ha sido generado en el marco de este proyecto para diferentes sistemas en los que Naturgy opera centrales y embalses, de los cuales se describen sus características en los próximos apartados.

## 2.2 Análisis realizados

Una vez generados, estos modelos se han ejecutado bajo diferentes escenarios para dar respuestas a las inquietudes y retos que se detectaron durante el proyecto en el sector:

- Escenario histórico aplicado a la infraestructura hidroeléctrica actual: Emplea información climática actual, con los datos de caudales históricos, y sirve para calibrar el modelo de manera que sea capaz de reproducir las métricas registradas.
- Escenarios futuros tendenciales aplicados considerando la infraestructura hidroeléctrica actual: incluyendo simulaciones de clima para los periodos futuros con diferentes RCP.

Este escenario permite tener una valoración de la evolución de la generación eléctrica en función del escenario estudiado.

- Escenarios presentes y futuros considerando la alteración o desaparición de la infraestructura hidroeléctrica. Permiten valorar la contribución actual y futura de la misma a aspectos como el control de avenidas y el mantenimiento de los caudales ecológicos.

### 3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

El modelo requiere de datos de acceso público y privado, y solo puede ser implementado si se dispone de todos ellos. Las fuentes de información que alimentan el modelo son:

- Para dimensionar el modelo y representar adecuadamente la topología de cada sistema hidroeléctrico estudiado, se precisa:
  - Datos facilitados por el operador de las infraestructuras (particularidades del sistema, como conducciones entre infraestructuras, valores límite de operación, etc.). Para desarrollar la metodología se han empleado datos facilitados por Naturgy, pero para aplicarla a otras instalaciones se necesitarán los datos correspondientes a las mismas.
  - Inventario de presas y embalses (facilitado, preferiblemente, por el operador de las infraestructuras o, en su defecto, a través de SIG.MAPAMA).
- Para construir y ajustar el modelo se necesita, además de lo anterior, información (a proporcionar por el operador de las infraestructuras) para un periodo histórico de varios años (10 o más) sobre:
  - Características de los embalses y centrales:
    - Volúmenes máximo, útil, muerto.
    - Capacidad de desagüe de aliviadero.
    - Curvas cota-eficiencia-volumen.
    - Caudal concesional para cada central y/o datos por turbina y número de turbinas.
    - Número y tipo de turbinas en centrales no ligadas a embalse.
    - Cota o altura del salto.
  - Volumen útil diario disponible en cada embalse<sup>1</sup>.
  - Caudales vertidos, turbinados y derivados diarios en cada presa y para cada central.
  - Caudal ecológico diario para cada cauce/tramo<sup>2</sup>.
  - Reglas de operación de los embalses en situaciones de alerta (reglas de vertido, etc.).
- Una vez ajustado el modelo, para simular un periodo cualquiera se necesita (a proporcionar, preferiblemente, por el operador de las infraestructuras o, en su defecto, a través de CEDEX):
  - Datos históricos:
    - Caudal diario de entrada al modelo en el periodo de estudio (estación de aforo aguas arriba en el punto de inicio del sistema).
    - Caudal diario (en el periodo de estudio) de todas las entradas y salidas de agua que se tengan a lo largo de todo el sistema (aforos a la entrada de los embalses y aprovechamientos, en afluentes, trasvases, etc.).
    - Volumen útil de los embalses del sistema el primer día del periodo de estudio (día 1, al inicio del día).
  - Proyecciones climáticas:

---

1 En caso de no disponer de información facilitada por el operador de la infraestructura, se podrían obtener en CEDEX.

2 En caso de no disponer de información facilitada por el operador de la infraestructura, se podrían obtener a través de las confederaciones hidrográficas correspondientes (en los planes hidrológicos, etc.).

- Los mismos datos, pero considerando el efecto del cambio climático. Esta información se puede obtener a partir de modelos hidrológicos calibrados y alimentados con proyecciones climáticas. En los próximos apartados se exponen dos fuentes de información que permiten la obtención de este tipo de datos. En el marco del proyecto se ha generado una herramienta informática que facilita la generación de proyecciones de caudal combinando estas fuentes de información con datos históricos.

## 4. TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

### 4.1 Planteamiento general

Generalmente el análisis de la previsible evolución de la generación hidroeléctrica en escenarios de cambio climático se aborda empleando simulaciones hidrológicas capaces de relacionar los parámetros climáticos con los caudales. A estos se acoplan modelos que simulan la generación hidroeléctrica en función de los caudales disponibles. Para considerar el cambio climático, una vez que esta maquinaria de simulación ha sido calibrada, es “forzada” con escenarios climáticos que recogen las previsible tendencias en los patrones de lluvias, temperaturas y otras variables climáticas.

El objetivo del proyecto es demostrar que en la actualidad existe información suficiente para estimar la generación energética sin abordar la simulación hidrológica “*ad hoc*” de las cuencas en las que existen aprovechamientos hidroeléctricos. De este modo, en este proyecto, se han procesado las series de caudales aportados por simulaciones de ámbito nacional y europeo que han sido forzadas con escenarios climáticos. Se toman los datos de estas fuentes de información para puntos situados aguas arriba del sistema hidroeléctrico estudiado y, gracias al modelo desarrollado en el marco del proyecto, se generan simulaciones de los caudales en puntos intermedios y de salida (punto inferior del mismo). Por ello, no es preciso incorporar aspectos determinantes de la simulación hidrológica como la lluvia, evapotranspiración, temperaturas, usos del suelo, etc. y los datos de caudal serían los únicos que alimentan la metodología aplicada.

En este sentido habrá dos tipologías de datos claramente definidas:

- Datos históricos de caudal: permiten calibrar el modelo y definir los algoritmos y relaciones entre los diferentes datos. Se utilizan directamente o con una modificación “ligera” destinada a eliminar valores anómalos, completar datos faltantes, etc.
- Proyecciones de caudal: al alimentar al modelo, generan nuevas salidas de caudales y energía generada. Las diferencias con la simulación realizada con datos históricos, permite evaluar el impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica.

### 4.2 Uso de datos históricos

Como ocurre con todos otros datos ambientales, al enfrentarnos a series históricas de caudales es frecuente detectar datos faltantes, valores anormalmente elevados, etc. Estos datos son fruto de alteraciones e incidencias en los equipos de medición, la infraestructura de comunicación, los procedimientos de registro de datos, etc. y, a no ser que sean excesivamente numerosos, no invalidan la utilidad de las series.

La detección de valores extremos admite diferentes enfoques. En el caso de las estaciones de aforo estudiadas en este proyecto ha sido suficiente con revisar valores que presentaban diferencias muy notables con los datos anteriores o posteriores. También se han buscado cambios bruscos en la magnitud de los valores, que no han sido detectados.

Las metodologías para completar datos faltantes son muy variadas y se deben ajustar a las características de los datos disponibles. En principio es posible establecer dos grandes aproximaciones. La primera se basa en emplear datos de estaciones o puntos de medición cercanos para asumir que nuestra estación de interés presentará tendencias análogas. De este modo, si para nuestra estación nos faltan algunos días, pero hemos visto que, con carácter general, sus datos guardan correlación con otra estación cercana, podemos emplear sus tendencias para deducir los datos faltantes. En los aforos estudiados esto no ha sido posible, y se procedido a completar las series considerando exclusivamente sus datos de manera individualizada (sin tener en consideración otras estaciones o aforos cercanos). Ya que los datos faltantes han sido muy escasos y se reducen periodos cortos e infrecuentes, han sido

completados con interpolación entre los datos conocidos. No obstante, para periodos más largos sería conveniente tener en cuenta las variaciones estacionales y otras tendencias.

### 4.3 Empleo de series futuras de caudal

Como se exponía en el apartado anterior, en el marco del proyecto se busca demostrar la aplicabilidad directa de simulaciones hidrológicas realizadas a nivel europeo y español, por lo que es conveniente tener presente toda la secuencia de modelos y datos que implica optar por este enfoque independientemente. Solo de este modo es posible interpretar adecuadamente los resultados generados.

El primer paso para la definición del marco climático es modelizar las tasas de emisiones de GEI contemplando diferentes posibilidades en cuanto a su intensidad y los cambios que se introducen en el balance radiativo del planeta tierra. Se trata de escenarios que toman en cuenta la evolución temporal de las emisiones y concentraciones de todos los gases de efecto invernadero, gases químicamente activos, cobertura de superficie terrestre y explotación de recursos terrestres.

En la Tierra la radiación solar incidente se distribuye entre todas las componentes que la forman y, por el hecho de que todos los cuerpos se encuentren a una temperatura determinada, emiten radiación de onda larga.

Algunas partículas de origen antropogénico no consiguen escapar de la atmósfera por lo que quedan suspendidos en la misma. Si el proceso se repite durante un tiempo, la concentración de las partículas que conforman los gases aumenta. Una peculiaridad de ellos es que la mayoría son transparentes a la radiación de onda corta, pero opacas a la radiación de onda larga, lo que hace que parte de la radiación total que debería ser emitida de nuevo al espacio queda atrapada, con el consiguiente aumento de la temperatura del aire. Se tiene, pues un imbalance positivo de la radiación total, a lo que se le denomina *forzamiento radiativo*.

Se definen cuatro escenarios, de las que se plantearán las tres principales, usados en el 5º congreso del IPCC [1] como base para las predicciones climáticas y proyecciones:

- **RCP 2.6:** el pico del forzamiento radiativo es de aproximadamente  $3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  antes del 2100 y se asume que después se reduce [1], con la tasa de emisiones que comienza a reducirse a partir del presente año y para el año 2100 es nula [2]. Para el final del siglo XXI, el escenario plantea la posibilidad de un aumento de la temperatura media global por debajo de  $2^\circ\text{C}$  relativo a la era preindustrial
- **RCP 4.5:** se define como el escenario intermedio, en la que se considera que el forzamiento radiativo se estabiliza con picos de  $4.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  después de 2100 [1]. La tasa de emisiones no comienza a descender hasta 2045 y no lo haría hasta la mitad de la concentración desde ese año hasta 2100. Para entonces, la temperatura media global habrá subido entre  $2$  y  $3^\circ\text{C}$ .

- **RCP 8.5:** el peor escenario en el que el forzamiento supera los  $8.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  incluso después de 2100 [1]. Según los datos que se disponen hoy en día la temperatura media global se incrementará en unos  $4.3^\circ\text{C}$  para 2100 [4].

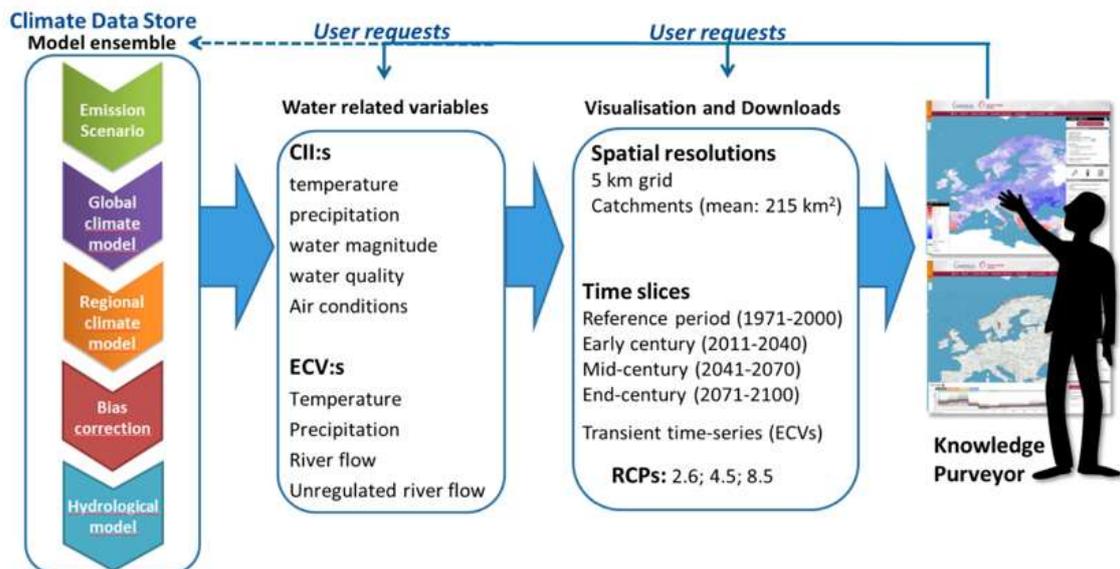
Todos los escenarios RCP contemplan, además del aumento de la temperatura media del aire, la alteración de los patrones de precipitación, acarreado un aumento de la frecuencia de precipitaciones torrenciales o agravación de las sequías en los sistemas hidrológicos.

La filosofía de los GCM se basa, en la medida de lo posible, en datos observados o datos históricos provenientes de otros modelos y, a partir de allí, se introducen expresiones matemáticas al sistema de ecuaciones que se emplea para describir un futuro hipotético, entre los cuales se encuentran además los RCP. Por tanto, lo que se busca es forzar o perturbar la atmósfera media del periodo histórico de acuerdo con los diferentes escenarios, aparte de las causadas por la propia física de la atmósfera.

Dado que los GCM son demasiado globales como para aplicarlos a mayor escala, primero se regionalizan, dando lugar a los RCM. Sin embargo, por la naturaleza de las proyecciones futuras, se introducen errores con respecto a las observaciones o datos históricos, lo que hace que exista sesgo entre ellos. Una vez corregido el sesgo, se traslada todo a escala todavía mayor y se reproducen solo los aspectos hidrológicos, formando los modelos hidrológicos. El penúltimo paso consiste en trasladar los resultados anteriores a una escala local para, finalmente, precisar las decisiones a tomar, en respuesta al impacto local del clima. Es el proceso que se refleja en la Figura 1.

La siguiente figura muestra una ilustración del ciclo de la función de los servicios climáticos usados para la elaboración del presente informe, mostrando el escalado de los modelos climáticos (columna izquierda extrema), indicadores del impacto climático (*Climate Impact Indicators*, CII) y variables climáticas esenciales (*Essential Climate Variables*, ECV) (segunda columna a la izquierda), y la resolución espacial y temporal (tercera columna).

Figura 3 Ciclo de la función de los servicios climáticos usados para la elaboración del presente informe. Adaptado de [4].



En este sentido, se han analizado dos fuentes de información que, pese a presentar ciertas diferencias que serán expuestas más adelante, comparten este planteamiento de generar variables del ciclo hidrológico a partir de simulaciones hidrológicas forzadas con proyecciones climáticas. Por un lado, en los apartados siguientes se expone una comparativa entre las proyecciones de caudales aportadas por los estudios de CEDEX y el Servicio de Cambio Climático de Copernicus y, por el otro lado, más extenso, un análisis de las proyecciones de caudales, basado en observaciones de NATURGY, combinado junto con los datos de C3S.

Las fuentes de información empleadas son:

- Informe “Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España”, desarrollado por CEDEX (Centro de estudios y experimentación de obras públicas) para la Oficina Española de Cambio Climático.
- Conjunto de datos “Water quantity indicators for Europe” del Copernicus Climate Change Service, en adelante referido como “SWICCA”, ya que es el nombre del proyecto en el marco del cual se generaron estas proyecciones.

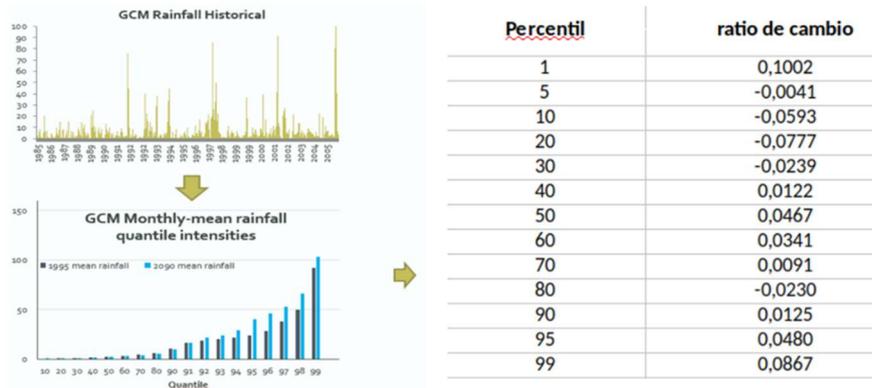
#### 4.4 Corrección de sesgo

Las salidas de los modelos implicados en la generación de proyecciones de caudales cuentan con errores o sesgos que es conveniente eliminar en la medida de lo posible. Tanto las ecuaciones – no lineales– que intentan describir los fenómenos atmosféricos, como los métodos numéricos que las resuelven, contienen errores o limitaciones, lo que hace que se propaguen al aumentar de escala, dando lugar a resultados sesgados. Entre los muchos métodos para corregirlo, para este caso se proponen dos frecuentemente utilizados.

##### 4.4.1 Escalado por cuantiles

Este método tiene como objeto corregir la distribución cuantil de los datos que más se asemeja, valiéndose de los datos observados, datos modelizados para un periodo de referencia y otro futuro. Se utilizará en concreto el frecuentemente usado método de [3], el cual consiste en calibrar la función de distribución acumulada (CDF) simulada, añadiendo, tanto el *cambio delta* promedio, como el cambio delta individual que corresponde a cada percentil que forma la distribución de los datos observados. Se toman en cuenta todos los percentiles, con  $f = g = 1$  en la ecuación A2 de [3]. El resultado de la corrección sigue el curso de la Figura 4 donde los caudales observados, históricos modelizados y proyectados (futuros) se dividen en realidad en 100 cuantiles. La desviación o ratio de cambio de cada cuantil se añade al valor observado correspondiente.

Figura 4 Ejemplo de la técnica de mapeo por cuantiles. Fuente: [8].



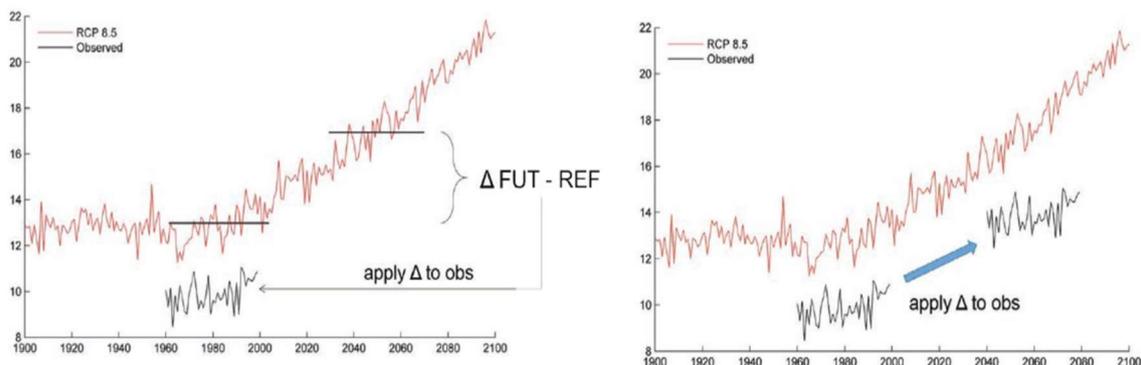
#### 4.4.2 Método delta

Es el método más sencillo y fácil de implementar, pero el menos preciso, ya que se le añade un porcentaje igual para toda la serie observacional. En consecuencia, se genera otra fuente de incertidumbres y da una falsa sensación de fiabilidad de los resultados [5].

Se selecciona una muestra de datos observados, y se obtienen, por un lado, los datos históricos para el mismo periodo (de control o referencia), y por el otro las proyecciones basados en el mismo periodo y que contienen un número igual de días. Seguido, se calcula el valor promedio de toda la serie histórica y proyecciones, para después obtener la diferencia *serie futura – serie histórica*. Por último, se aplica esa diferencia a toda la serie observada.

Se muestra la Figura 5 a modo de ejemplo donde, en el gráfico izquierdo, la curva roja reúne datos históricos y proyecciones climáticas cualesquiera. De las históricas se selecciona un periodo igual al de los datos observados (curva negra, 1960-2000 aproximadamente) y el equivalente en cuanto a los futuros (2030-2065 aproximadamente). Se calcula el valor medio del periodo histórico y futuro, y a este último se le resta el del histórico. Finalmente, la diferencia se suma por igual a la serie observada, resultando en la transformación de la curva negra del gráfico derecho.

Figura 5 Ejemplo de aplicación del método delta. Adaptado de [9].



En el marco del proyecto se ha desarrollado una herramienta informática consistente en un libro Jupyter que facilita la aplicación de esta metodología a datos provenientes de la Climate Data Store del Servicio de Cambio Climático de Copernicus.

## 5. FUENTES DE PROYECCIONES DE CAUDALES

En este apartado se describen las diferentes fuentes de datos de caudales que han sido analizadas en el marco del proyecto. Para ello se emplearán fundamentalmente gráficos de cajas o bigotes, que son explicados previamente.

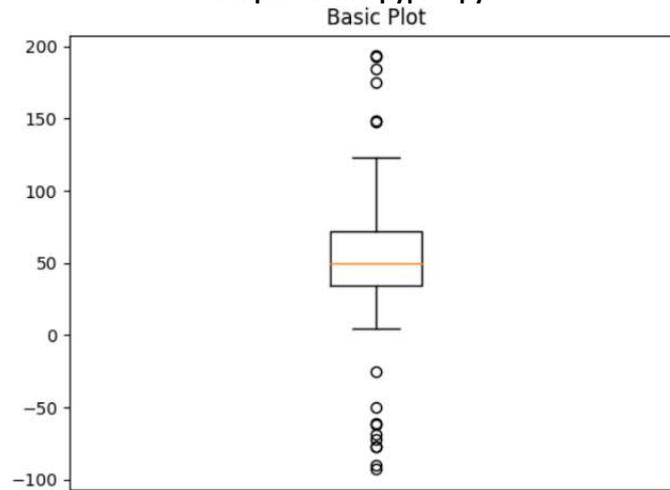
### 5.1 Diagramas de cajas y bigotes

Denominados en inglés por la palabra “*boxplot*”, este tipo de gráficos permite una rápida visualización sobre la distribución de los datos, los valores extremos, dispersión y simetría (Figura 6).

Consisten en una caja rectangular, donde los lados muestran el primer y tercer cuartil ( $Q_1$  y  $Q_3$ , valores *teóricos* más y menos frecuentes). El primer cuartil,  $Q_1$ , corresponde al lado inferior de la caja, y el tercer cuartil,  $Q_3$ , al lado superior, y el largo entre ellos es el *rango intercuartílico*<sup>3</sup>. Una línea dentro de la caja indica la mediana, segundo cuartil, el valor por debajo de la cual se encuentran el 50% de los datos simetría (Figura 6, línea naranja). Por tanto, el rango intercuartílico indica el valor en torno a la que se distribuye el 50% de los datos.

Figura 6 Caja de bigotes de datos aleatorios. Fuente:

[https://matplotlib.org/stable/gallery/pyplots/boxplot\\_demo\\_pyplot.html#sphx-glr-gallery-pyplots-boxplot-demo-pyplot-py](https://matplotlib.org/stable/gallery/pyplots/boxplot_demo_pyplot.html#sphx-glr-gallery-pyplots-boxplot-demo-pyplot-py)



La caja tiene como extremos los valores mínimos y máximos de la variable. Estos no tienen realmente por qué ser los valores máximo y mínimo, sino que se calculan a partir de las siguientes fórmulas:

$$\min = Q_1 - 1.5 IQR \quad (1)$$

$$\max = Q_3 + 1.5 IQR, \quad (2)$$

donde  $IQR = Q_3 - Q_1$ .

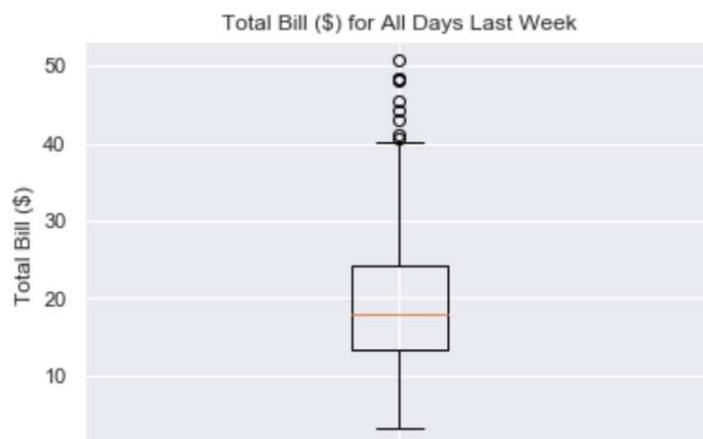
La distancia que queda entre el mínimo y  $Q_1$ , así como entre el máximo y  $Q_3$  se dibuja mediante una línea llamada *bigote*. El máximo y mínimo se identifican mediante marcas perpendiculares o *tapas* en los extremos de los bigotes.

<sup>3</sup> Rango intercuartílico, con su sigla en inglés *Inter Quartile Range* (IQR).

Todo valor que exceda de los extremos es marcado e identificado individualmente, normalmente con un punto negro. Puede darse el caso en el que el máximo o mínimo real quede a la par o por debajo de dichas tapas; en ese caso el bigote llegaría hasta los valores reales y no habría puntos excedentes. La Figura 7 muestra un ejemplo, donde el valor mínimo real es mayor que el bigote inferior y, por tanto, se recorta para coincidir con el valor mínimo real.

Pueden mostrarse los puntos que quedan dentro del máximo o mínimo, es decir, los datos que conforman la muestra, pero esto puede dificultar la interpretación de los datos, ya que la muestra puede ser grande.

Figura 7 Caja de bigotes sin excedentes. Fuente: <https://blog.finxter.com/matplotlib-boxplot/>



En el presente estudio se omitirán los datos punto, así como los excedentes, ya que estos últimos simulan caudales extremadamente altos que ocurren muy raramente.

## 5.2 Caudales observados

En el presente estudio, los datos observados provienen de Naturgy. Aunque al principio se eligió considerar aquellos que están dentro del periodo de referencia, 1971-2000, a fin de compatibilizar las proyecciones de caudales utilizando el modelo hidrológico SIMPA [5], finalmente se han empleado los datos observados entre 2008-2016.

Para definir la metodología se han analizado un total de 8 sistemas, considerando concretamente puntos de entrada a los sistemas de estudio y puntos de conexión de afluentes, así como otros puntos de interés. La información ha sido facilitada por Naturgy, pero no puede ser detallada por ser confidencial.

## 5.3 Características de las proyecciones de caudales aportadas por CEDEX

Los datos de los caudales modelizados, tanto históricos como futuros, están disponibles en la página web de CEDEX, para los siguientes periodos:

- **Histórico (referencia):** 1961-2000
- **Futuro próximo:** 2010-2040
- **Futuro a medio plazo:** 2040-2070
- **Futuro a largo plazo:** 2070-2100

CEDEX realiza el estudio sobre los caudales proyectados, usando las siguientes combinaciones GCM-RCM-modelo hidrológico:

Tabla 1 Combinaciones de modelos usados en [5].

Sigla	Escenario RCP	GCM	Método de regionalización (RCM)	Modelo hidrológico
F4A	4.5	CNRM-CM5	ANAEMET (Método análogo desarrollado por AEMET)	SIMPA
F8A	8.5			
M4A	4.5	MPI-ESM-MR		
M8A	8.5			
N4A	4.5	inmcm4		
N8A	8.5			
Q4A	4.5	bcc-csm1-1		
Q8A	8.5			
R4A	4.5	MIROC-ESM		
R8A	8.5			
U4A	4.5	MRI-CGCM3		
U8A	8.5			

Tal y como se aprecia, el escenario más optimista, el escenario RCP 2.6 queda excluido del estudio.

#### 5.4 SWICCA (Copernicus CDS)

Los datos se han obtenido a través de la base de datos denominada *Water Quantity Indicators for Europe* de CDS Copernicus, originalmente proporcionados por el proyecto SWICCA ejecutado por un consorcio liderado por el Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología (SMHI) [4]. Este proyecto ofrece las salidas de simulaciones hidrológicas acopladas a las salidas de modelos climáticos regionales. Los parámetros de mayor interés para nuestro estudio son:

- **River flow (RF)** Es el caudal medio diario que llevan los ríos, pero teniendo en cuenta los mecanismos reguladores que haya alrededor, como presas, captaciones, embalses, etc.
- **Unregulated river flow (URF)** Corresponde al caudal medio de los ríos, pero sin tener en cuenta los mecanismos reguladores, es decir el caudal de un río natural regulado únicamente por accidentes geográficos.

La resolución temporal tanto para RF como para URF es diaria, en unidades de m<sup>3</sup>/s. En cuanto a la resolución espacial, los datos se aportan a 3 resoluciones diferentes:

- Rejilla de 5 x 5 km.
- Rejilla de 0,5° x 0,5°.
- Cuenca (**catchment**): polígonos irregulares de cuencas con superficie media de 215 km<sup>2</sup>.

La conversación interna resulta en la utilización de escala de cuencas por ser el más preciso. En el CDS los datos a esa escala están expresados no en una rejilla regular de latitud-longitud, sino

por números de identificación (ID), las cuales se han identificado mediante el programa QGIS para los sistemas mencionados en el capítulo 5.1.

Los rangos temporales que cubren los datos son similares a los de CEDEX:

- **Histórico o de referencia:** 1971-2000
- **Futuro cercano:** 2011-2040
- **Futuro a medio plazo:** 2041-2070
- **Futuro a largo plazo:** 2071-2100

El número de combinaciones de modelos que se emplean varía entre cada paquete de datos. En la Tabla 22 y Tabla 33 se muestran cuáles se usan:

**Tabla 2 Combinaciones de modelos empleados entre todos los paquetes de datos provenientes del proyecto SWICCA (Copernicus CDS), para la variable river flow.**

GCM	RCM	Modelo hidrológico
CSC-MPI-ESM-LR	CSC-REMO2009	E-HYPE v 2.1
		Lisflood
		VIC v 4.2.1
IPSL-CM5A	IPSL-WRF33	E-HYPE v 2.1
		Lisflood
		VIC v 4.2.1
KNMI-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	E-HYPE v 2.1
		Lisflood
		VIC v 4.2.1
SMHI-EC-EARTH	SMHI-RCA4_E	E-HYPE v 2.1
		Lisflood
		VIC v 4.2.1
SMHI-HadGEM2-ES		E-HYPE v 2.1
		Lisflood
		VIC v 4.2.1

**Tabla 3 Combinaciones de modelos empleados entre todos los paquetes de datos provenientes del proyecto SWICCA (Copernicus CDS), para la variable unregulated river flow.**

GCM	RCM	Modelo hidrológico
CSC-MPI-ESM-LR	CSC-REMO2009	E-HYPE v 3.1.2
IPSL-CM5A_IPSL	IPSL-CM5A-MR_E	
KNMI-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	
SMHI-EC-EARTH	SMHI-RCA4_E	
SMHI-HadGEM2-ES		

Cabe destacar que ninguna de las combinaciones tanto de la Tabla 2 como la Tabla 3 se usan en el estudio de CEDEX.

Aunque el sesgo de los RCMs se corrija previamente, el problema conocido como *drizzle problem* sigue estando presente, porque presentan demasiados eventos de precipitación escasa comparado con las observaciones [7]. Esto se traslada a los modelos hidrológicos, y estos solo han sido parcialmente corregidos, según [4].

Para atajar el problema se requiere corregir las salidas de los modelos climáticos, sirviéndose para ello tanto de los datos observados como de los históricos. De esta manera se pueden aplicar las proyecciones en modelos de análisis del impacto del cambio climático a escala local [1]. Uno de los métodos ampliamente usados es, por un lado, el escalado por cuantiles (*quantile-quantile mapping* ó *Q-Q mapping*) [8] y, por el otro lado, el método delta [5].

Dada la abundancia de las combinaciones de modelos, sobre todo en la base de datos de SWICCA [4] para los caudales regulados, pero sin descartar los no regulados, se quieren seleccionar algunas de las combinaciones, de acuerdo con la distribución de los datos

## 6. RESULTADOS PRINCIPALES DEL ANÁLISIS DE LAS PROYECCIONES DE CAUDALES

### 6.1 Comparativa entre los datos aportados por CEDEX y SWICCA

#### 6.1.1 Valores de los caudales sin normalizar

##### 6.1.1.1 Caudales regulados

Los caudales regulados son aquellos que están adecuados de acuerdo con las necesidades de abastecimiento, mediante mecanismos reguladores como embalses, presas, etc.

El presente apartado tiene el objetivo de mostrar la distribución de los datos anuales, la variedad de sus valores, así como las combinaciones de modelos disponibles, para el siglo XXI por diferentes fuentes.

Para ello se emplean los datos generados a partir de CEDEX para un sistema que integra dos cuencas. Estas dos cuencas son a su vez analizadas a partir de los datos de SWICCA (denominadas de aquí en adelante como cuencas piloto 1 y 2).

La Figura 8 muestra los *boxplots* de las simulaciones anuales realizadas por CEDEX, correspondientes a una cuenca concreta analizada, para los escenarios RCP 4.5 y 8.5, para el periodo histórico, y el futuro cercano, medio y lejano.

Puesto que la RCM y el modelo hidrológico son siempre los mismos, a partir de esta línea, a la hora de mencionar los modelos, solo se mencionará el GCM. No hay una leyenda disponible en la Figura 8, por lo que se proporciona la siguiente tabla, para identificar el color que pertenece a cada combinación de modelo:

**Tabla 4 Color que pertenece a los diagramas de cada conjunto de la Figura 8.**

GCM	Color
CNRM-CM5	Azul
MPI-ESM-MR	Naranja
inmcm4	Gris
bcc-csm1-1	Amarillo
MIROC-ESM	Azul claro
MRI-CGCM3	Verde

De todas las combinaciones posibles de la Tabla 1, para todos los escenarios y periodos, el modelo *inmcm4* -combinación exacta *inmcm4-anaemet-SIMPA*- es el que predice marcadamente los caudales anuales más bajos, además de que la dispersión es relativamente baja. Por el contrario, el modelo MIROC-ESM es el que predice los caudales más altos, al menos hasta el futuro medio, con mayor frecuencia de caudales relativamente más altos: media por debajo de la mediana y menor dispersión de los caudales más abundantes (menor longitud de las cajas y bigotes por encima de la mediana); en esta última se asemeja con las predicciones del modelo *bcc-csm1-1*, pero ésta presenta mayor dispersión para los caudales relativamente más bajos.

En el futuro lejano y escenario intermedio tanto el modelo MIROC-ESM como *bcc-csm1-1* muestran resultados parecidos, y para el escenario más pesimista el modelo MRI-CGCM3 sobresale del resto de las combinaciones. Es especialmente el modelo MRI-CGCM3 el que genera mayor incertidumbre, porque la dispersión es moderada tanto por encima como por debajo de la mediana (mayor longitud de la caja junto con los bigotes).

El modelo CNRM-CM5 destaca por su regularidad y facilidad de interpretación de los resultados, a lo largo de los periodos y escenarios: reducción de los cuartiles 1 y 3, menor dispersión

generalizada para los caudales medianos a escasos, y longitud del diagrama aproximadamente constante.

Una inspección más detenida permite observar una tendencia a la baja de los caudales anuales, sobre todo porque los diagramas individuales bajan de posición en el eje de ordenadas, reducción de la longitud de las cajas, bigotes y mayor concentración de los caudales más bajos.

La Figura 9 muestra los *boxplots* de los caudales anuales regulados de SWICCA, para la misma cuenca piloto, y la variable *river flow*. En todos los casos hay excedentes por encima del máximo teórico, pero estos se han omitido. No hay excedentes por debajo del mínimo teórico.

La comparativa es ligeramente más difícil entre los distintos gráficos, porque las posibilidades de combinaciones de modelos son más extensas en SWICCA que en el estudio de CEDEX, y dentro de la Figura 9, el número de combinaciones difiere entre los escenarios. No obstante, la serie de cajas en forma de escalera facilita la comparativa interna. De todos los casos, las combinaciones que predicen los caudales más bajos son las siguientes:

**Tabla 5 Combinaciones de modelos que predicen los caudales regulados más bajos, para una de las cuencas estudiadas.**

GCM	RCM	Modelo hidrológico
CSC-MPI-ESM-LR	CSC-REMO2009	E-HYPE v2.1
IPSL-CM5A	IPSL-WRF33	
KNMI-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	
SMHI-EC-EARTH	SMHI-RCA4	
SMHI-HadGEM2-ES		

Por el contrario, están las siguientes que predicen caudales más altos:

**Tabla 6: combinaciones de modelos que predicen los caudales regulados más altos, para una de las cuencas estudiadas.**

GCM	RCM	Modelo hidrológico
CSC-MPI-ESM-LR	CSC-REMO2009	Lisflood
KNMI-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	
SMHI-EC-EARTH	SMHI-RCA4	
SMHI-HadGEM2-ES		

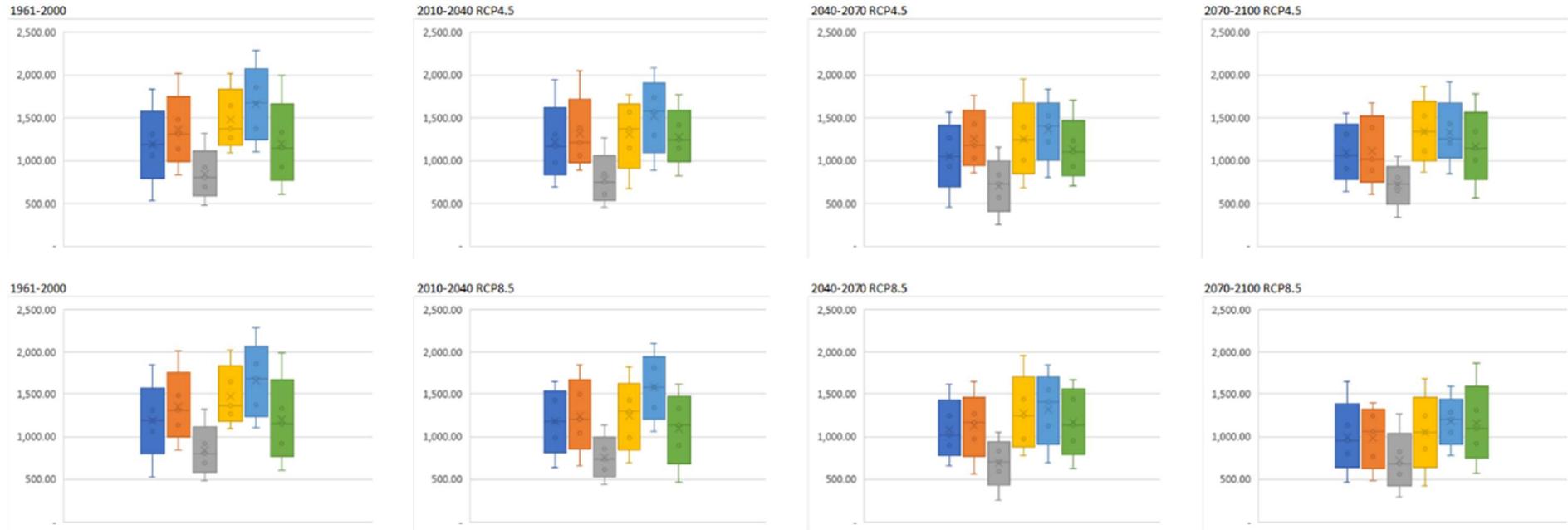
Las combinaciones de la Tabla 5 y Tabla 6 sugieren, por el momento, que los extremos están determinados por el modelo hidrológico que se use, ya que entre los GCMs y RCMs no existen grandes diferencias.

La Figura 10 muestra el mismo tipo de datos que en la Figura 9, pero para la cuenca 2. La conclusión que puede extraerse es inmediatamente la misma que en la Figura 9, a diferencia de valores notablemente más altos. Por tanto, la Tabla 5 y Tabla 6 son también válidas para la cuenca piloto 2.

La primera conclusión que puede sacarse es que SWICCA proporciona muchos caudales regulados que son mucho más bajos (primer cuartil muy cerca del mínimo teórico), incluso llegando bastantes veces a niveles de alarma por caudales extremadamente bajos. Todos los valores promedio están bastante por debajo que aquellas de CEDEX. La variedad de combinaciones de modelos tanto en CEDEX como SWICCA evidencia importantes diferencias de los caudales regulados, pero con un elemento común que es la posible sequedad con no poca frecuencia. Como el valor medio es bastante más alto que la mediana, y la dispersión es menor para los valores por debajo de la mediana, se puede concluir que los valores de los caudales

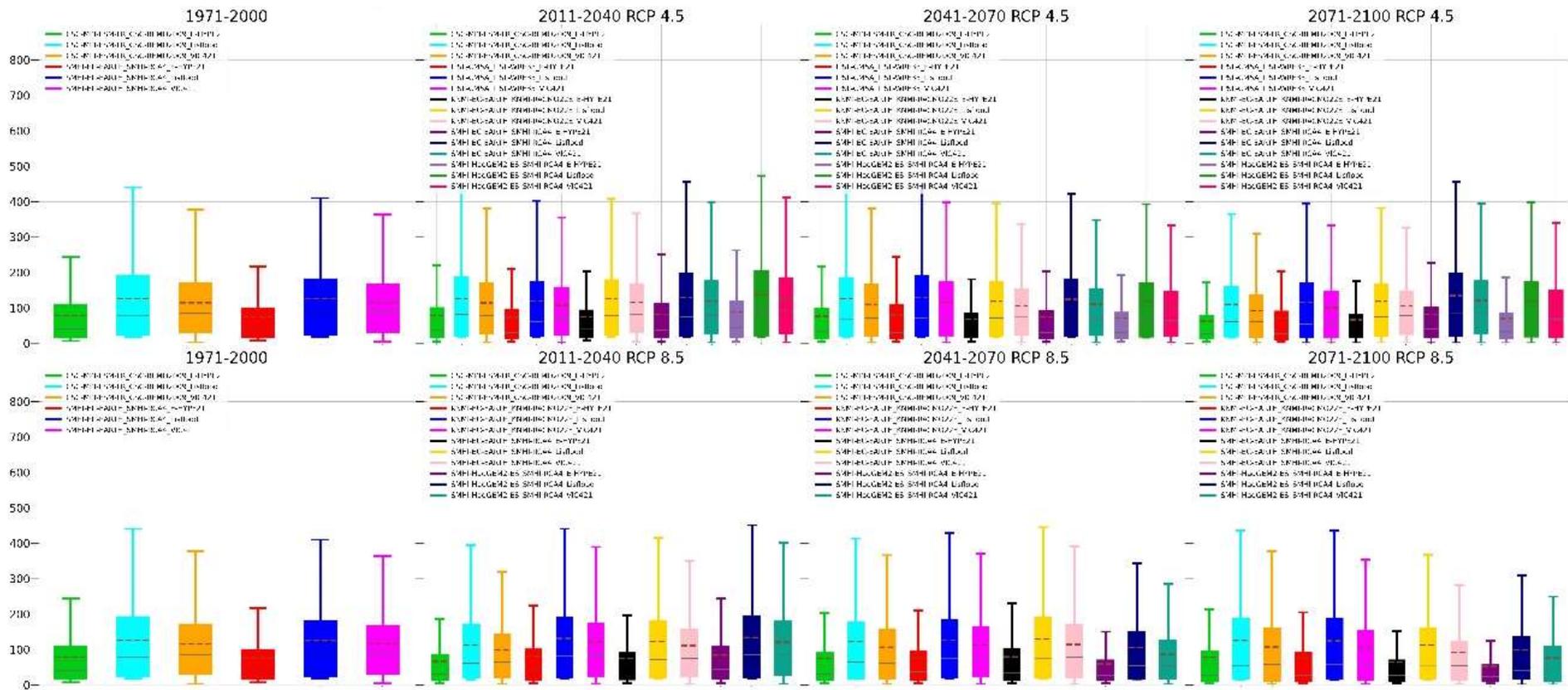
obedecen a una distribución normal logarítmica. En todos los casos hay menor dispersión para caudales relativamente más bajos, lo que indica que esos caudales ocurren con mayor frecuencia.

**Figura 8 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales anuales para el sistema integrado por las cuencas piloto 1 y 2. Fuente: [5].**



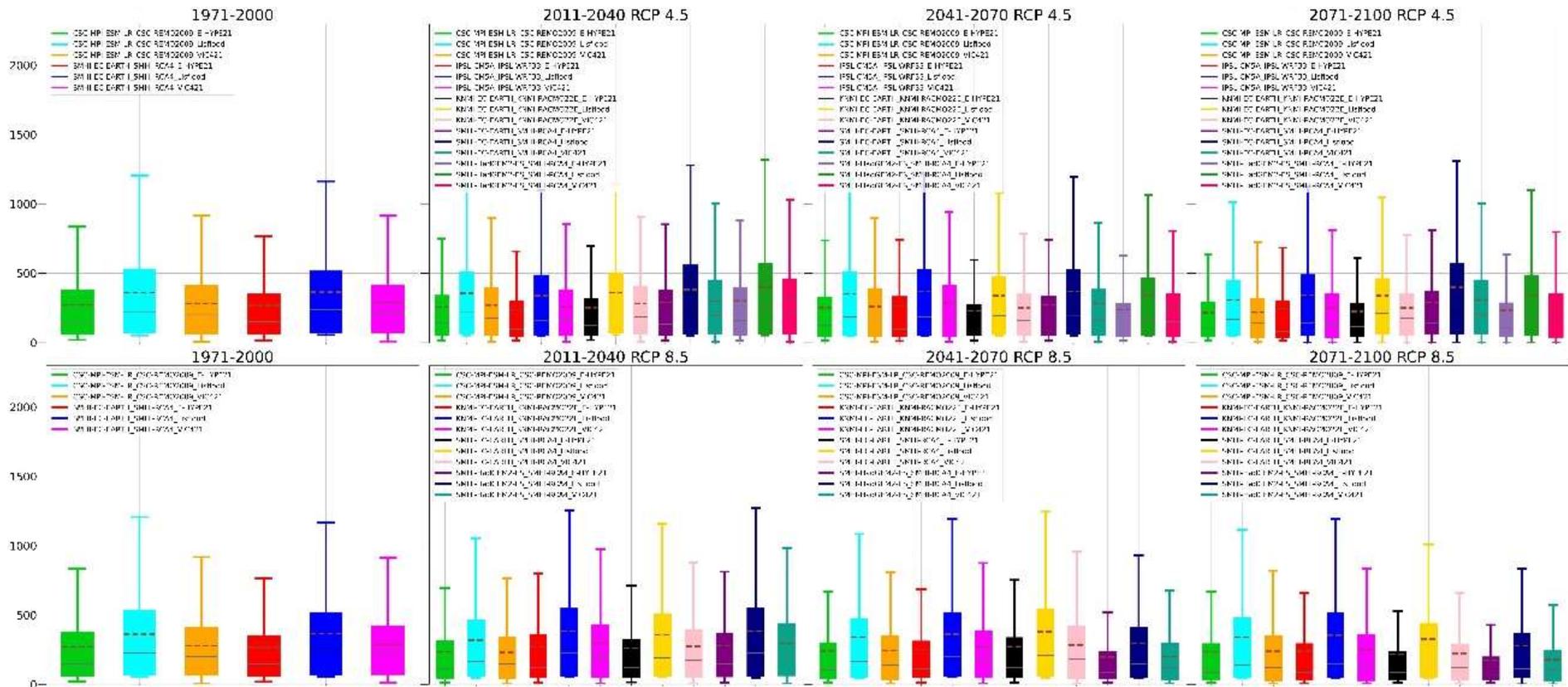
Este gráfico tiene en cuenta el escenario RCP 4.5 (fila superior) y RCP 8.5 (fila inferior). Considera el periodo histórico (columna del extremo izquierdo), futuro cercano (segunda columna desde la izquierda), futuro medio (tercera columna desde la izquierda) y futuro lejano (columna del extremo derecho). Los datos históricos son iguales para los dos escenarios, porque la distinción entre ellos es redundante. El valor medio se indica mediante el símbolo x.

Figura 9 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales regulados (river flow) anuales para la cuenca piloto 1. Fuente: [4].



Se tienen en cuenta el escenario RCP 4.5 (fila superior) y RCP 8.5 (fila inferior); considerando el periodo histórico (columna del extremo izquierdo), futuro cercano (segunda columna desde la izquierda), futuro medio (tercera columna desde la izquierda) y futuro lejano (columna del extremo derecho). Los datos históricos son iguales para los dos escenarios, porque la distinción entre ellos es redundante.

**Figura 10 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales anuales regulados para una la cuenca piloto 2. Fuente: [4].**



La distribución de los escenarios y periodos es la misma que en la Figura 9.

### 6.1.1.2 Caudales no regulados

Este tipo de caudal es equivalente a un sistema hídrico natural, en el que no hay mecanismos reguladores.

La Figura 11 muestra los valores de los caudales no regulados para una primera cuenca analizada. El número de combinaciones de modelos es menor que para los caudales regulados, y aumenta para el futuro. Una primera observación permite ver la disparidad de los valores que arrojan los distintos modelos.

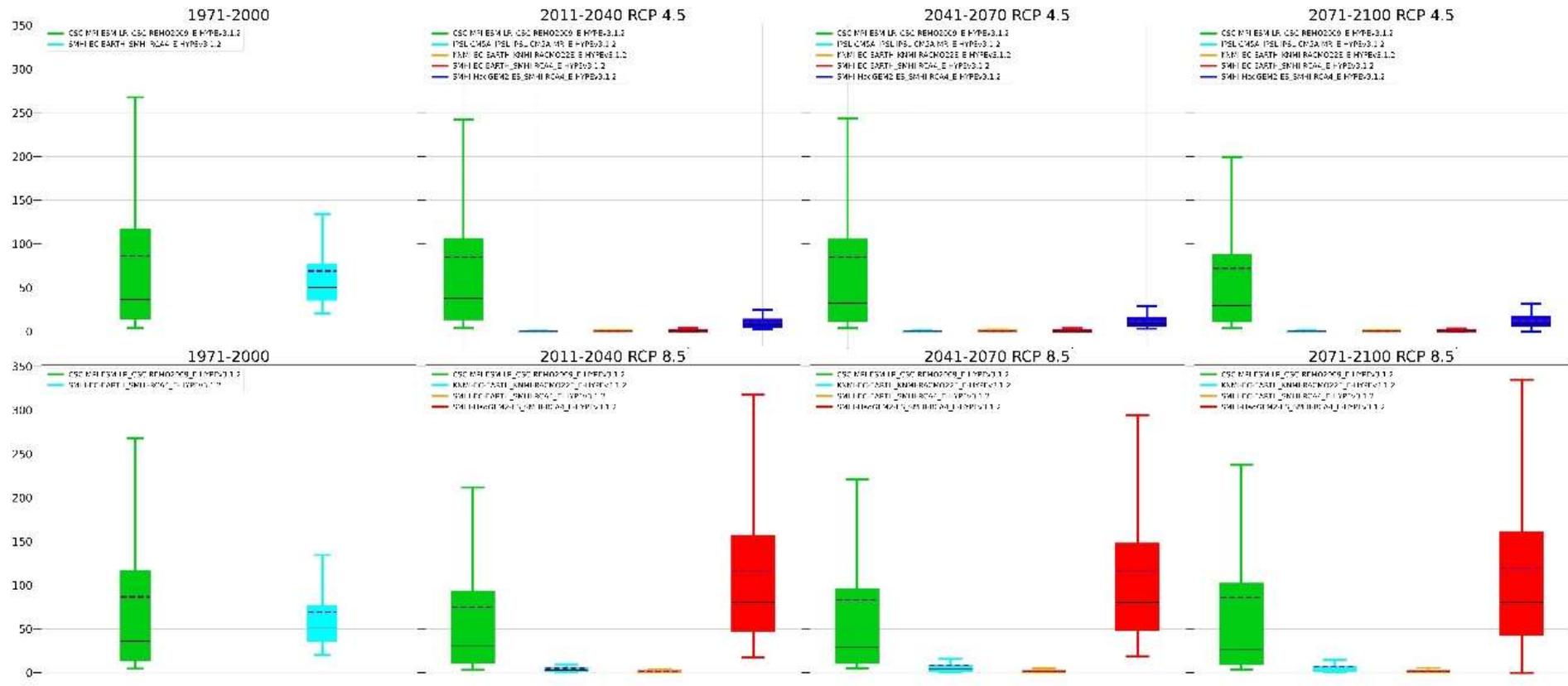
Tan solo la combinación GCM / RCM / Modelo hidrológico CSC-MPI-ESM-LR / CSC-REMO2009 / E-HYPE v3.1.2 es la que mantiene una distribución sin grandes cambios para todos los periodos. En cambio, la combinación que arroja valores históricos coherentes es la SMHI-EC-EARTH / SMHI-RCA4 / E-HYPE v3.1.2, pero para el futuro predice una drástica reducción de los caudales, donde se plantea un escenario en el que algunos puntos caudalosos de la red hidrográfica se mantienen secos durante mucho tiempo, lo cual es virtualmente imposible.

Por el contrario, una combinación que simula solo los periodos futuros predice caudales mucho más altos y dispersos para el escenario pesimista que para el intermedio: SMHI-HadGEM2-ES / SMHI-RCA4 / E-HYPE v3.1.2. El resto de las combinaciones que solo simula el futuro predice una sequedad permanente para estos puntos conocidos con caudales constantes.

La situación que describe la Figura 12 es muy parecida a la de la Figura 11, siendo la combinación que presenta pequeños cambios entre escenarios con respecto al periodo de referencia, la misma que en la Figura 11.

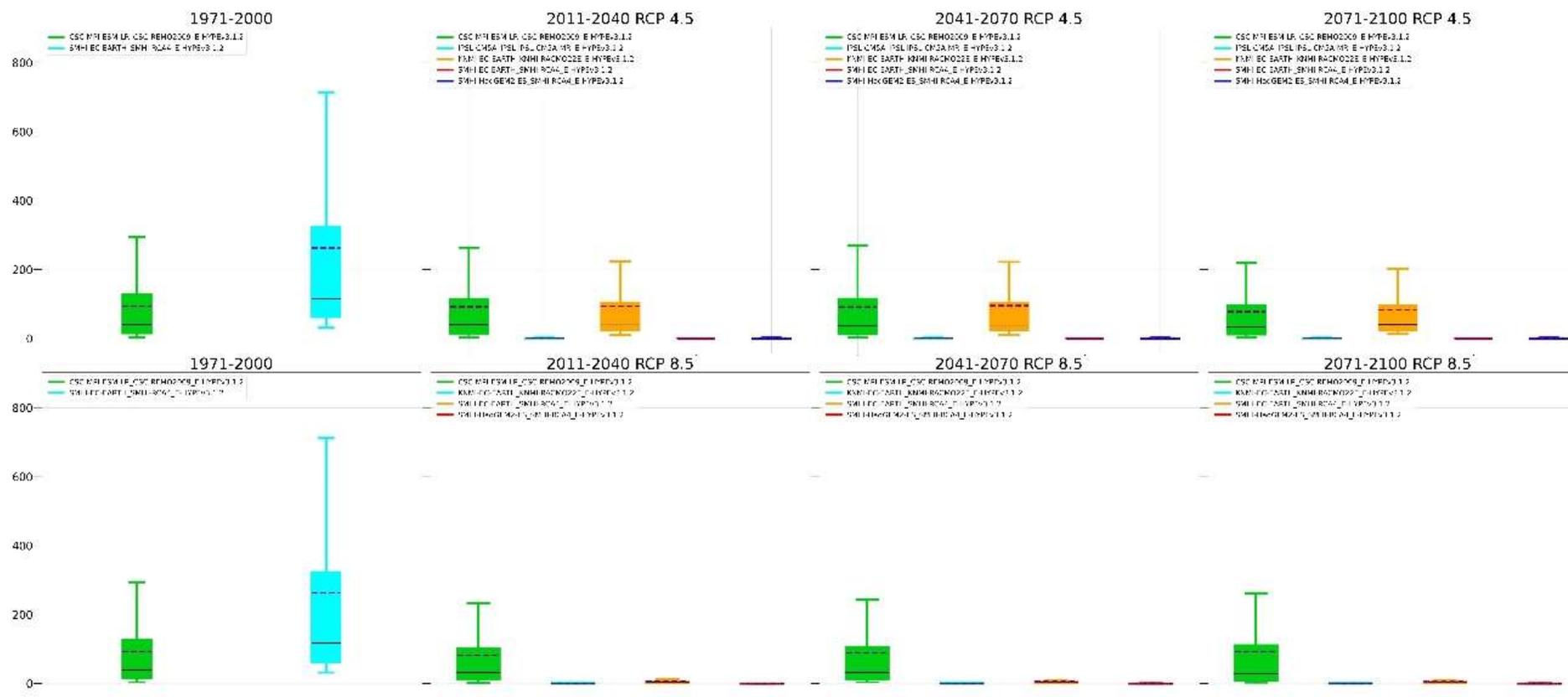
En cualquier caso, sorprende el hecho de que los caudales sean mucho más escasos que las de CEDEX (Figura 8), porque un sistema hídrico natural se imagina normalmente con un flujo abundante, en el que no hay estructuras que alteren el mismo en ningún punto. No existe ninguna tendencia realista que indique cambios en los valores de caudales.

Figura 11 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales no regulados (*unregulated river flow*) anuales para la cuenca piloto 1. Fuente: [4].



Se tiene en cuenta el escenario RCP 4.5 (fila superior) y RCP 8.5 (fila inferior); considerando el periodo histórico (columna del extremo izquierdo), futuro cercano (segunda columna desde la izquierda), futuro medio (tercera columna desde la izquierda) y futuro lejano (columna del extremo derecho).

Figura 12 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales anuales no regulados para la cuenca piloto 2. Fuente: [4].



La distribución de los escenarios y periodos es la misma que en la Figura 11.

## 6.1.2 Valores normalizados

### 6.1.2.1 Priorización de las combinaciones de modelos

Para simplificar la interpretación de la evolución de los caudales, y teniendo en cuenta que el objetivo es observar sus cambios en relación con los valores históricos, cada diagrama se ha normalizado con respecto al caudal medio de los valores históricos. De esta forma, todos los valores históricos tendrán el valor medio  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , y para los periodos futuros se puede observar cómo cambia dicho valor, junto con la forma de la caja y el bigote.

Ello implica que las combinaciones de modelos deben coincidir entre ellos. Esto no afecta al estudio de CEDEX, pero el número de combinaciones de modelos de los datos de SWICCA es irregular. Por tanto, y ante la variedad de valores descrito a lo largo del capítulo 6.1, se mostrarán los valores de caudales de SWICCA cuyos modelos coinciden con aquellos que han simulado los valores históricos.

### 6.1.2.2 Caudales regulados

La dinámica de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** es la misma que la Figura 8, excepto que los datos están normalizados con respecto al valor anual medio de los datos históricos. Ello la dota de un aspecto más ordenado y simétrico. Los modelos usados siguen siendo, por supuesto, los de la Tabla 1. Sin embargo, con la relatividad hace que se pierda información sobre los caudales absolutos y es recomendable tener en cuenta estos últimos. Las particularidades de los modelos discutidos en el apartado 5 (FUENTES DE PROYECCIONES DE CAUDALES) se mantendrán, porque se trata de una división directa.

Los diagramas históricos poseen un valor medio cercano al 1, porque en ese caso están “autonormalizados” con respecto a su valor medio.

En cuanto al escenario intermedio, el modelo CNRM-CM5 mantiene el valor medio en el futuro próximo, y para el medio y lejano prevé una reducción del 10%. El modelo MPI-ESM-MR también conserva la media para el futuro próximo, pero conlleva un 10% de reducción para el futuro medio y un 15% para el lejano, con respecto a la media histórica.

El siguiente, el inmcm4, contempla una ligera reducción de los caudales para el futuro cercano, y un 15% para el medio y lejano. El modelo que prevé la mayor reducción es MIROC-ESM, un mínimo de 10% para todo el futuro considerado y hasta un 20% para el futuro lejano. Le sigue el bcc-csm1-1 con reducciones algo más ligeras que MIROC-ESM.

En cuanto al escenario más pesimista, el modelo más optimista es el CNRM-CM5, que no muestra cambios significativos con respecto a la dinámica del escenario intermedio. Le sigue inmcm4 con una reducción de menos del 10% para el futuro cercano, 15% para el medio, y 10% para el futuro lejano. El resto contempla hasta un 10% menos de caudal para el futuro cercano, casi un 20% para el futuro medio y la alarmante cifra de un 30% menos para el futuro lejano. En este sentido, el modelo más pesimista es MIROC-ESM.

El único modelo que prácticamente no plantea ninguna reducción en toda la Figura 13 es MRI-CGCM3; contempla hasta un 15% de aumento para el futuro cercano dentro del escenario intermedio.

La Figura 14 muestra los caudales modelizados de SWICCA para la misma cuenca, todos ellos normalizados con respecto al valor histórico del modelo correspondiente. El obvio resultado es que el cambio relativo de los modelos equivale a 1.

Una primera inspección permite ver que, ningún valor medio es inferior al 10% de reducción, ni tampoco superior al 10% de aumento. En general, dicho valor ronda en torno al intervalo [0.95, 1.05]. Los caudales más abundantes. Aparte de ello, es bastante mayor que la mediana, por lo

que hay una concentración de reducción de caudales, de al menos un 40% de reducción. No existe ninguna combinación que destaque por grandes reducciones o aumentos.

Para el escenario intermedio, solo el modelo global CSC-MPI-ESM-LR y regional CSC-REMO2009, con modelos hidrológicos E-HYPE v2.1 y VIC v4.2.1 siguen un curso intuitivo de la reducción de caudales: reducción del tamaño de las cajas con desplazamiento vertical ligeramente hacia abajo, con un descenso del valor medio del 10%.

Esta tendencia la comparte la combinación SMHI-EC-EARTH/SMHI-RCA4/E-HYPE v2.1, que, aunque la longitud de la caja aumente para el futuro lejano, rompiendo la tendencia del acortamiento, dado que el valor medio y mediana están muy separados, ello sugiere una concentración de caudales muy bajos. El resto de las combinaciones no prevé cambios apreciables u oscila con cambios ligeros.

La situación es parecida dentro del escenario más pesimista, donde el modelo hidrológico E-HYPE versión 2.1 hace notoria la reducción de caudales. Para una segunda cuenca analizada (Figura 15

) los resultados son parecidos a la primera cuenca, a diferencia de tan solo reducciones del mismo curso, pero de magnitud menor. La tendencia a la baja en la Figura 14 y Figura 15 se comparte de manera intuitiva por la siguiente combinación:

**Tabla 7 Combinaciones de modelos que comparten la tendencia a la baja de los caudales en la Figura 14 y Figura 15.**

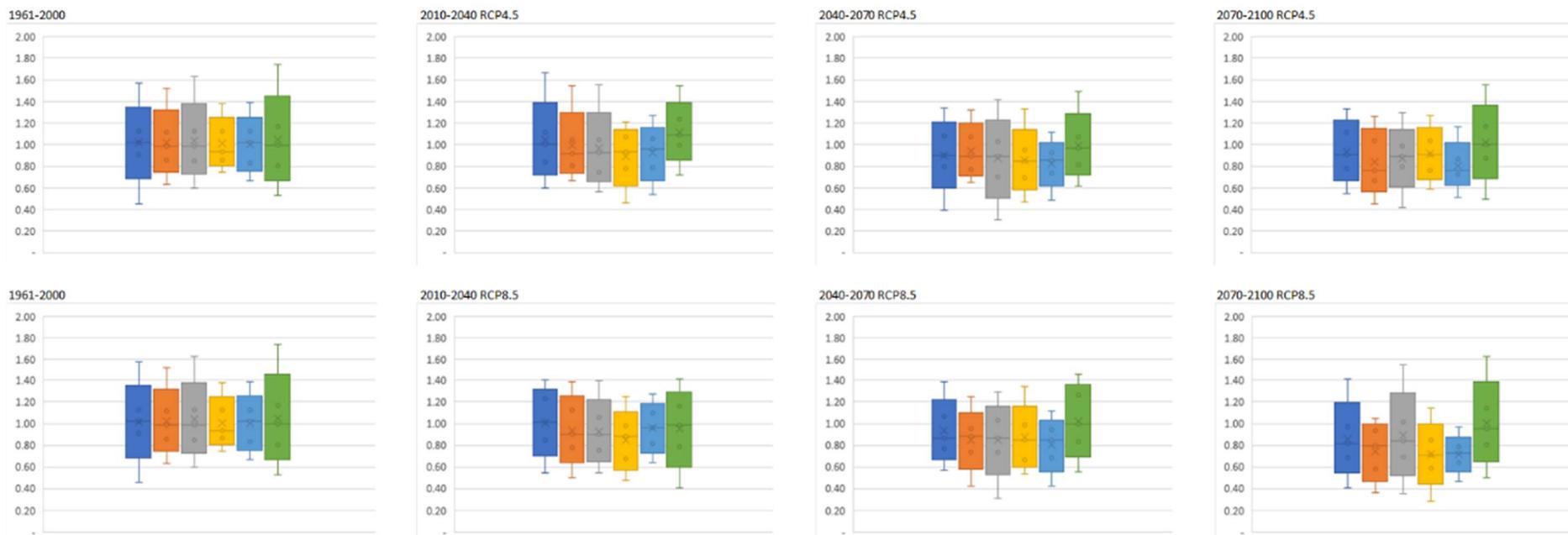
GCM	RCM	Modelo hidrológico
CSC-MPI-ESM-LR	CSC-REMO2009	E-HYPE v2.1
SMHI-EC-EARTH	SMHI-RCA4	

Sin embargo, no hay ninguna otra correlación al considerar resultados por la misma combinación GCM-RCM, o el mismo modelo hidrológico.

Aunque el periodo de referencia sea 10 años más corta de la que considera CEDEX, no se esperarían demasiados cambios en los resultados históricos. De todas formas, 30 años se consideran suficientes como para que la distribución de una variable obedezca a una normal, logarítmica en este caso.

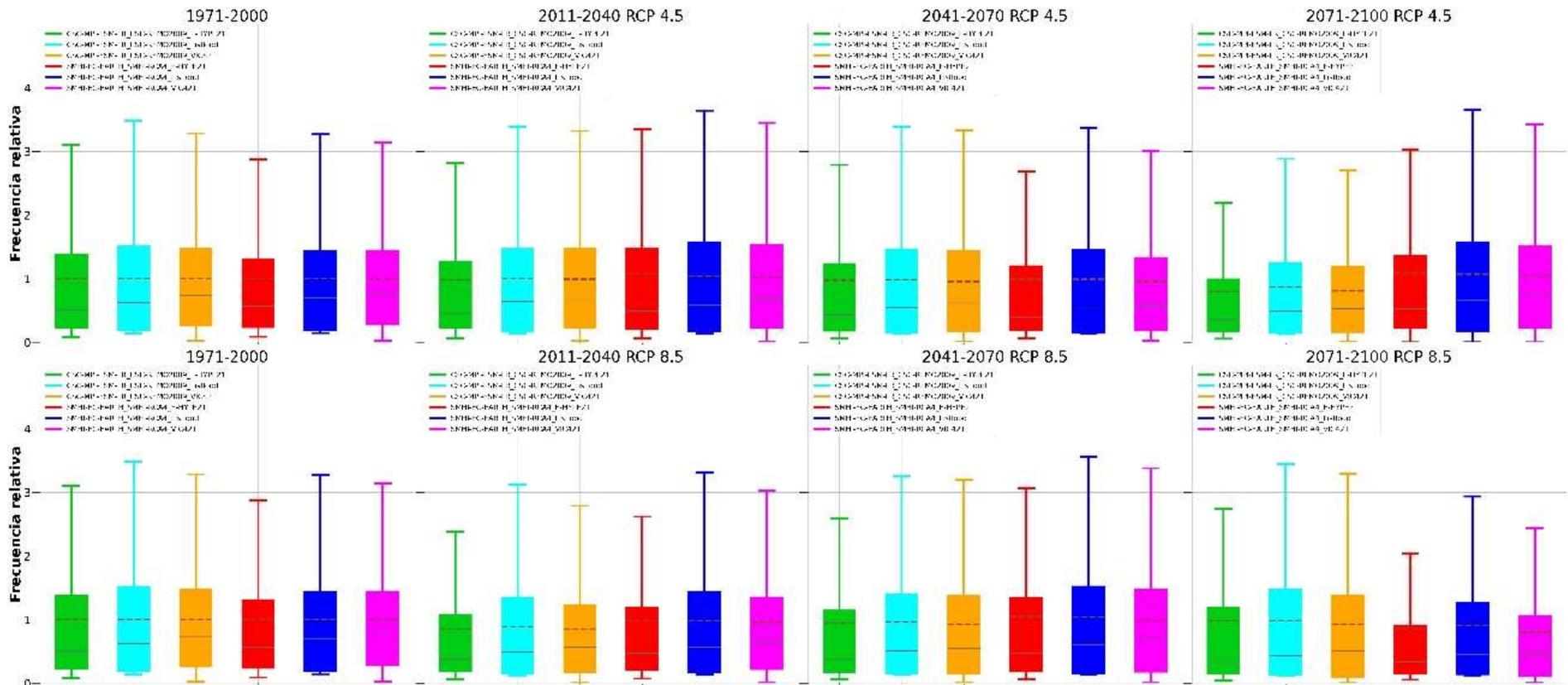
No obstante, la parte negativa de los datos de SWICCA es que, en todos los casos el valor medio se encuentra muy por encima de la mediana, lo que indica una concentración de caudales muy pequeños, acercándose a la sequedad en no pocas ocasiones, algo no muy realista. Por tanto, el valor medio hay que interpretarlo con precaución, y atender a la posición de la mediana, junto con el primer cuartil.

Figura 13 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales anuales normalizados con respecto al valor medio anual histórico. Válido para el sistema integrado por las cuencas piloto 1 y 2. Fuente: [5].



Los diagramas tienen en cuenta el escenario RCP 4.5 (fila superior) y RCP 8.5 (fila inferior); considerando el periodo histórico (columna del extremo izquierdo), futuro cercano (segunda columna desde la izquierda), futuro medio (tercera columna desde la izquierda) y futuro lejano (columna del extremo derecho). La distinción entre los escenarios para el periodo histórico es redundante. El valor medio se indica mediante el símbolo x.

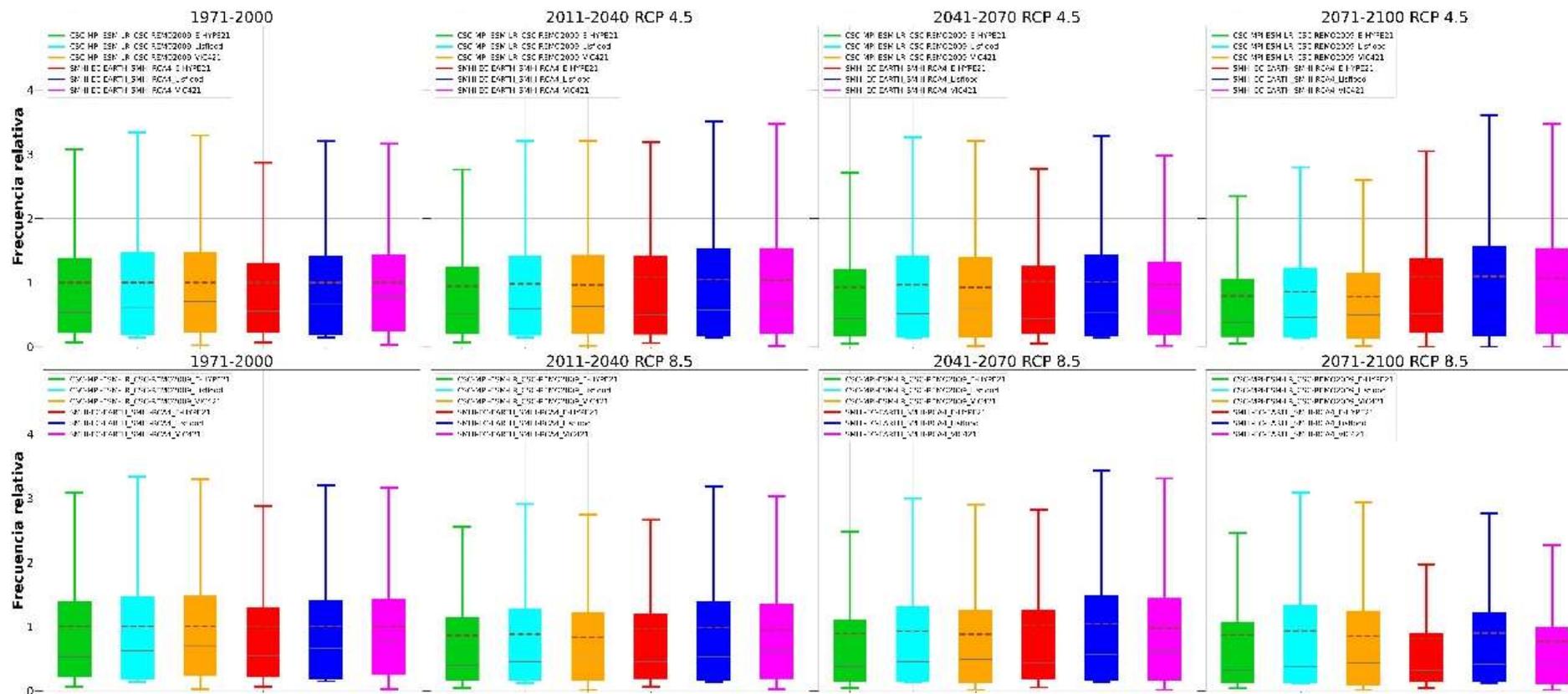
Figura 14 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales regulados (river flow) anuales normalizados con respecto al valor medio anual histórico, para la cuenca piloto 1. Fuente: [4].



La distribución de los escenarios y periodos es la misma que en la Figura 13.

Figura 15 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales regulados (river flow) anuales normalizados con respecto al valor medio anual histórico, para la cuenca piloto 2.

Fuente: [4]



Misma distribución de los escenarios y periodos que en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

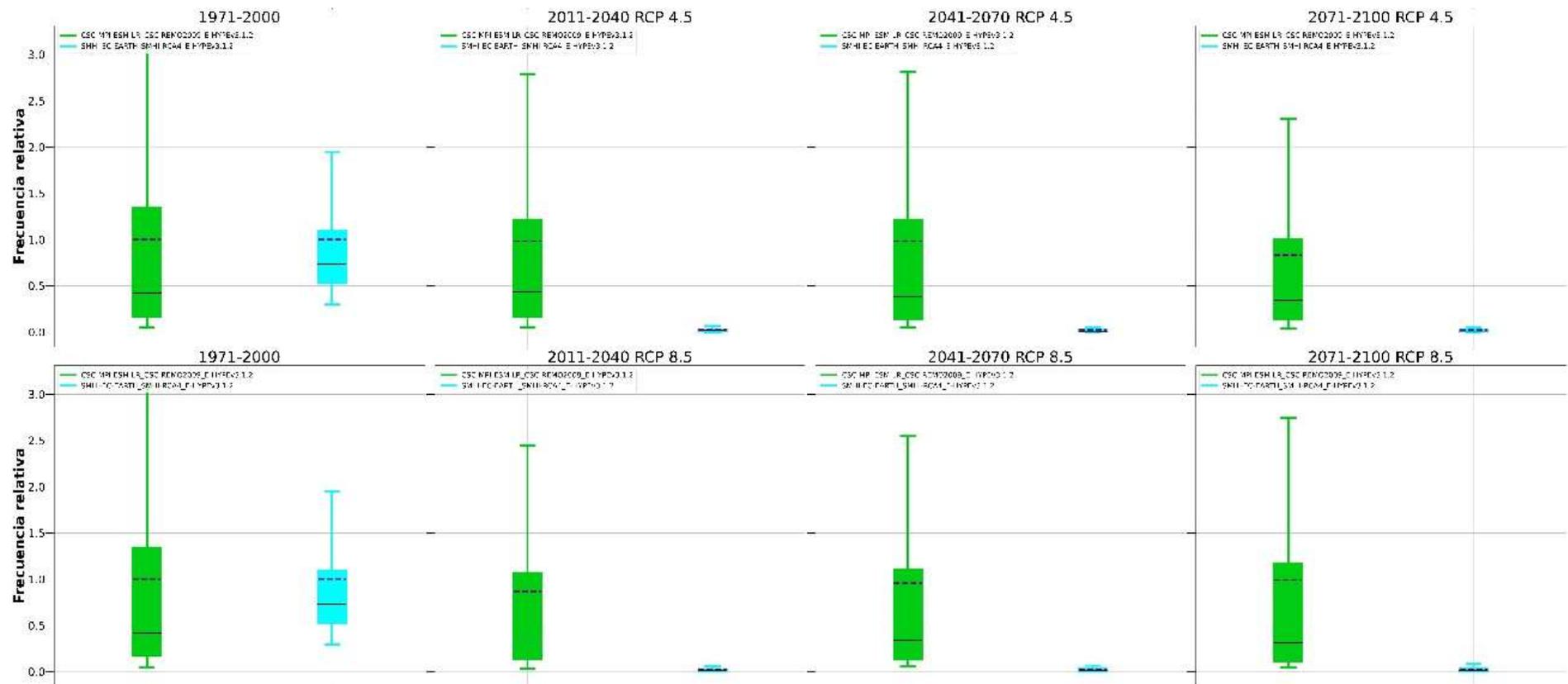
### 6.1.2.3 Caudales no regulados

Las figuras siguientes muestran los caudales no regulados anuales arrojados por los datos de SWICCA, teniendo en cuenta aquellos modelos que coinciden con los que simulan los datos históricos. Todo ello para la cuencas anteriormente indicadas como cuencas 1 y 2.

En ambos casos el modelo hidrológico es el mismo. Tan solo la combinación CSC-MPI-ESM-LR / CSC-REMO2009 muestra resultados coherentes, aunque solo se aprecie la tendencia a la baja dentro del escenario intermedio. Reducción del 15% del valor medio para el futuro lejano, sin cambios apreciables para el resto y misma concentración de caudales bajos. En cambio, la combinación SMHI-EC-EARTH / SMHI-RCA4 arroja datos no realistas, mostrando una sequedad prácticamente permanente durante el siglo XXI, difícil de explicar.

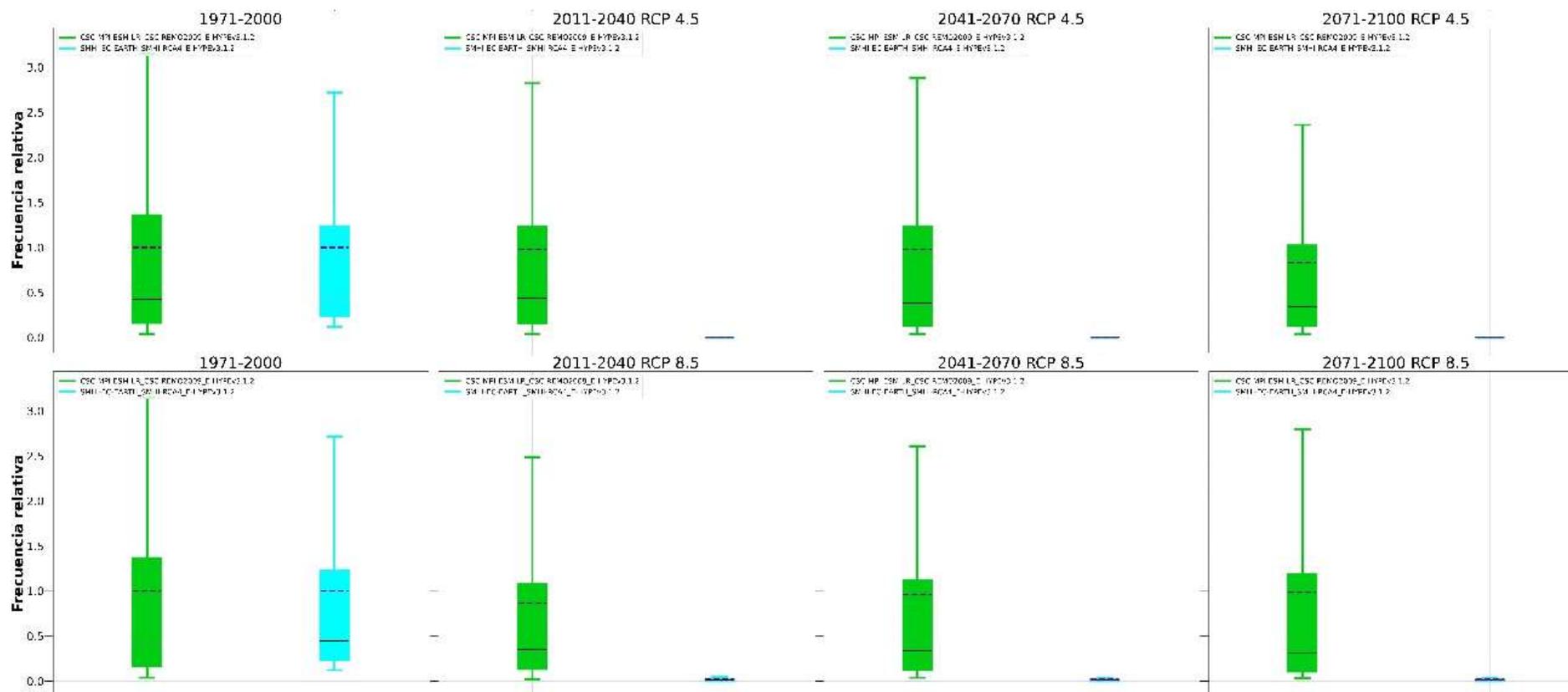
Dadas las situaciones que presenta la variable de caudales no regulados, de aquí en adelante solo se mostrarán los resultados referentes a los caudales regulados.

Figura 16 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales no regulados anuales normalizados con respecto al valor medio anual histórico, para la cuenca piloto 1. Fuente: [4].



La distribución de los escenarios y periodos es la misma que en la Figura 13.

Figura 17 Diagramas de cajas y bigotes de los caudales no regulados anuales normalizados con respecto al valor medio anual histórico, para la cuenca piloto 2. Fuente: [4].



Misma distribución de los escenarios y periodos que en la Figura 13.

Uno de los aspectos más interesantes de los datos aportados por CEDEX es que aportan un dato sólido y sencillo de aplicar para generar proyecciones de caudales. Se trata de los porcentajes de variación de la escurrentía para diferentes cuencas. Aplicando el método delta anteriormente expuesto es sencillo “escalar” los caudales históricos aplicando estos valores que se recogen en el informe principal. Si bien este método es relativamente sencillo aplicar y fácil de comunicar, no captura cambios en los caudales elevados o reducidos, ya que aplica un tasa de cambio medio a todos los valores. Para realizar este tipo de ajustes es preciso realizar un tratamiento por cuantiles. En el próximo apartado se realiza un análisis de este tipo y se generan proyecciones de sesgo a partir de los valores históricos y los datos aportados por SWICCA, que permiten un fácil acceso a las variaciones para diferentes rangos de caudales.

Cabe indicar que el informe de CEDEX también aporta esta información por cuantiles, aunque no en el informe principal. Para tener acceso a toda la información que aporta esta fuente, se ha de consultar los anexos o la aplicación informática (plugin de QGIS accesible solo a través de una solicitud específica).

## 6.2 Comparativa entre los datos registrados y los valores aportados por SWICCA

Para el análisis de los datos de SWICCA frente a los datos observados, las proyecciones se han corregido por el escalado de cuantiles. y, a diferencia del primer estudio, se considerarán todos los sistemas de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Los datos observados están normalizados con respecto a su correspondiente valor medio, así como los datos de SWICCA, normalizados con respecto al valor medio histórico del modelo correspondiente.

La metodología empleada en este trabajo se basa en analizar, en primer lugar, las diferencias entre los valores registrados y las salidas de los modelos para el periodo histórico, para, en una segunda etapa, eliminar los sesgos apreciados a las proyecciones aportadas por los modelos para periodos futuros. A medida que el cambio climático se va haciendo patente, es cada vez más interesante prestar una especial atención a que el periodo histórico de los modelos y nuestras observaciones para realizar la corrección de sesgo sean de años similares o al menos cercanos. De no ser así, en caso de que existieran tendencias (p.ej. hacia mayores o menores precipitaciones, mayores sequías, etc.) no estaríamos realizando una comparativa válida.

Se ha realizado un análisis de las series observacionales más extensas para detectar si existen este tipo de tendencias. Esta análisis se ha realizado empleando pruebas de tendencia de Mann-Kendall y ha arrojado que efectivamente existe una clara tendencia a la reducción de los caudales en todas las series con datos de varias décadas.

Ante esta situación, y viendo que el cambio climático es evidente, es conveniente que el periodo base de las observaciones y el periodo histórico de las simulaciones coincida. Puesto que en ocasiones esto no es así, se ha realizado un ejercicio para extender una de las series.

### 6.2.1 Análisis de los resultados

Las proyecciones climáticas aportadas por SWICCA se han combinado con los datos observados e históricos modelizados, y se han corregido mediante la técnica de mapeo por cuantiles [3] anteriormente expuesta.

Lo anterior lleva a trabajar solamente con los datos correspondientes al futuro cercano, el periodo 2011-2040. Una parte complementaria del análisis de las proyecciones climáticas que concierne al presente apartado sugiere fuertemente tener en cuenta un único modelo hidrológico, que es la versión actualizada del modelo E-HYPE. Se han extraído dos modalidades: la primera de ellas arroja resultados coherentes para un único escenario, la RCP 8.5, para las siguientes combinaciones de modelos:

**Tabla 8 Combinaciones de modelos coherentes con el escenario RCP 8.5 dentro del futuro cercano. Válido tanto para los caudales regulados como los no regulados.**

GCM	RCM	Modelo hidrológico
CSC-MPI-ESM-LR	CSC-REMO2009	E-HYPE v3.1.2
KNMI-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	
SMHI-EC-EARTH	SMHI-RCA4	
SMHI-HadGEM2-ES		

La otra modalidad consiste en considerar todos los escenarios RCP posibles para una única combinación de modelos:

**Tabla 9 Combinación de modelos coherente para todos los escenarios RCP del futuro cercano. Válido para ambas variables.**

GCM	RCM	Modelo hidrológico
CSC-MPI-ESM-LR	CSC-REMO2009	E-HYPE v3.1.2

Por tanto, la primera conclusión directa que se puede obtener es que, los resultados coherentes dependen del tipo de GCM y RCM utilizados si se tiene en cuenta el peor escenario de emisiones. Asimismo, solo una combinación de la Tabla 8 es coherente para todos los escenarios.

### 6.2.1.1 Cuenca piloto 1

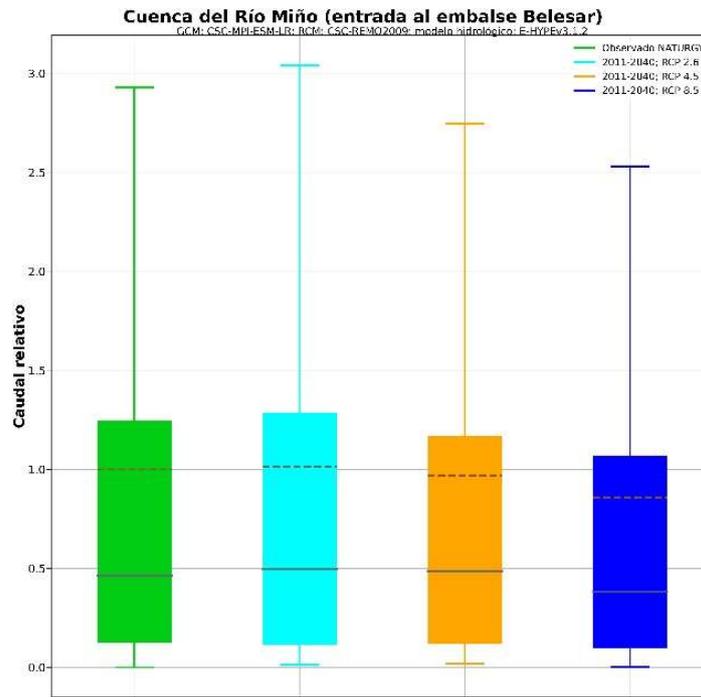
El modelo coherente con todos los escenarios, para escenario más optimista (RCP 2.6) (Figura 19) augura un ligero aumento generalizado de los valores de los caudales, con respecto a los históricos. El valor promedio aumenta un 5%, así como los valores extremadamente altos (un 200% mayor que el valor promedio), pero la distribución se mantiene sin grandes cambios.

Ligera reducción para el escenario intermedio (RCP 4.5) en cuanto al valor medio (reducción del 10%) y menor presencia de valores extremos más altos, así como su valor, siendo el teórico más elevado un 175% mayor que la media.

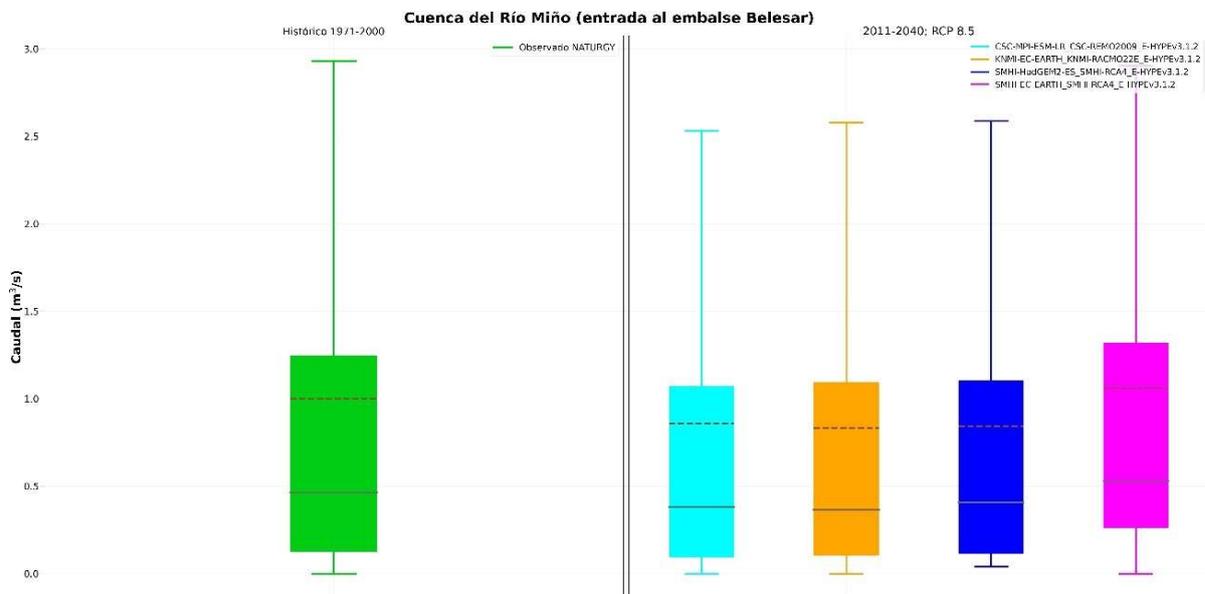
Para el escenario más pesimista (Figura 19), se aprecia una clara reducción de los valores de los caudales para al menos tres de los modelos más coherentes de la Tabla 8- entre un 20 y 25% menor que el valor medio histórico. En todos los casos, si el caudal de un día cualquiera resulta ser menor que la mediana, ya de por sí mucho menor que la media, es bastante probable que sea relativamente baja. Sin embargo, siempre es más probable observar valores mayores, aunque se sitúen entre un 10% más que el valor medio y hasta un 70% menos. Se aprecia también una reducción en la probabilidad de ocurrencia de los valores extremadamente altos (un 150% mayor que el valor promedio).

La excepción la conforma la última combinación de modelos de la Tabla 8, en la que observa un aumento generalizado de caudales, con un aumento del 10% del valor medio, así como la ocurrencia de valores mayores dentro de los que se considerarían extremos. Este último es el mismo diagrama que se muestra, en azul en la Figura 18 y cian en la Figura 19.

**Figura 18 Distribución de las proyecciones climáticas de los caudales en la cuenca piloto 1 para el futuro cercano y la única combinación de modelos más coherente, teniendo en cuenta los tres escenarios de emisiones.**



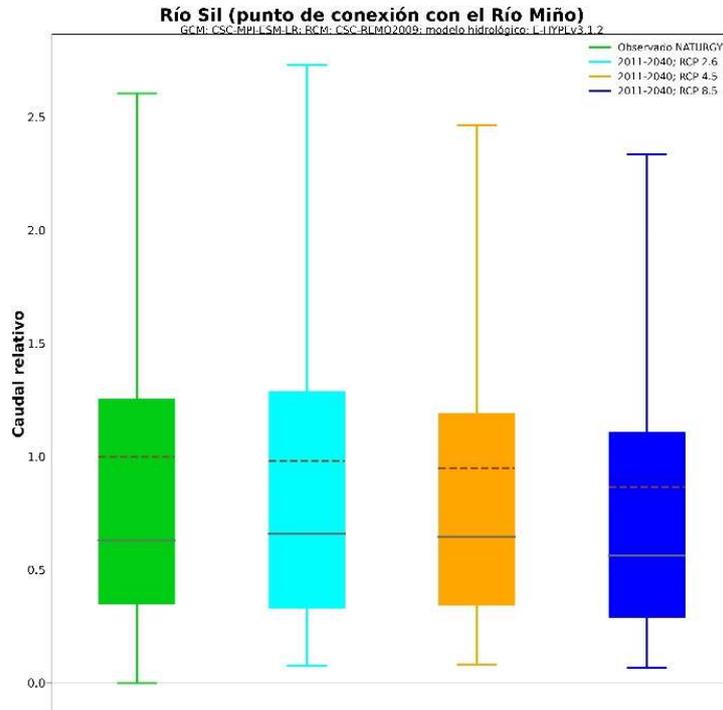
**Figura 19 Distribución de los caudales en la cuenca piloto 1. Históricos (izquierda) y proyecciones climáticas para el futuro cercano (derecha), para 4 combinaciones de modelos (compartiendo el modelo hidrológico), teniendo en cuenta el peor escenario de emisiones.**



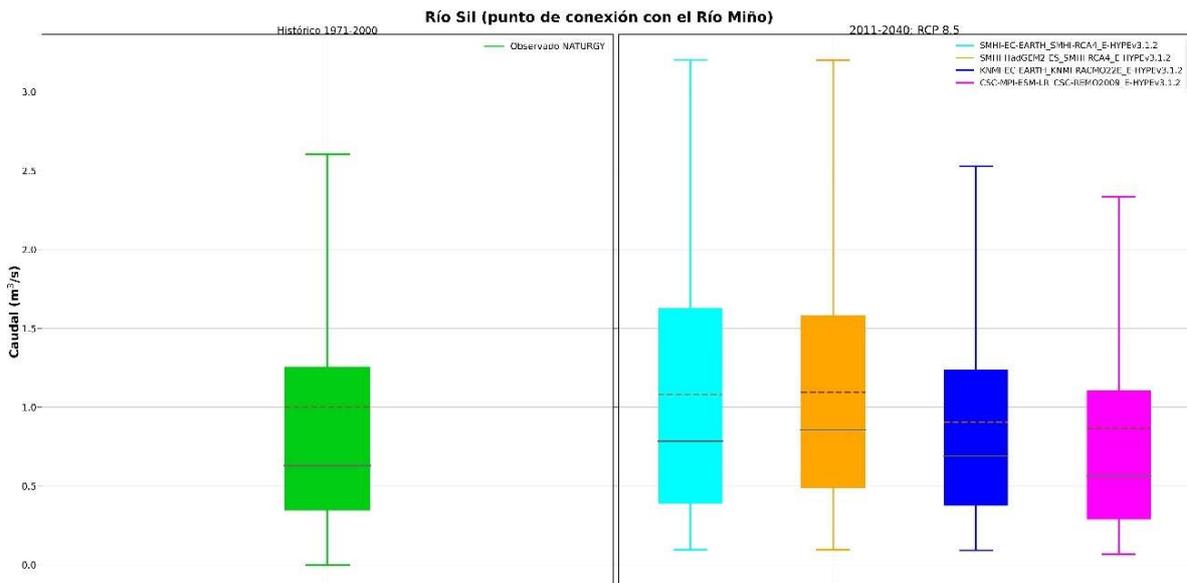
### 6.2.1.2 Cuenca piloto 2

No hay grandes diferencias en cuanto a los resultados para la segunda cuenca piloto; mediante una inspección más detenida se pueden observar, efectivamente, ligeras diferencias entre los dos puntos. Por tanto, los resultados del apartado 6.2.1.1 también aplican para el presente.

**Figura 20 Distribución de las proyecciones climáticas de los caudales en la cuenca piloto 2, para el futuro cercano y la única combinación de modelos más coherente, teniendo en cuenta los tres escenarios de emisiones.**



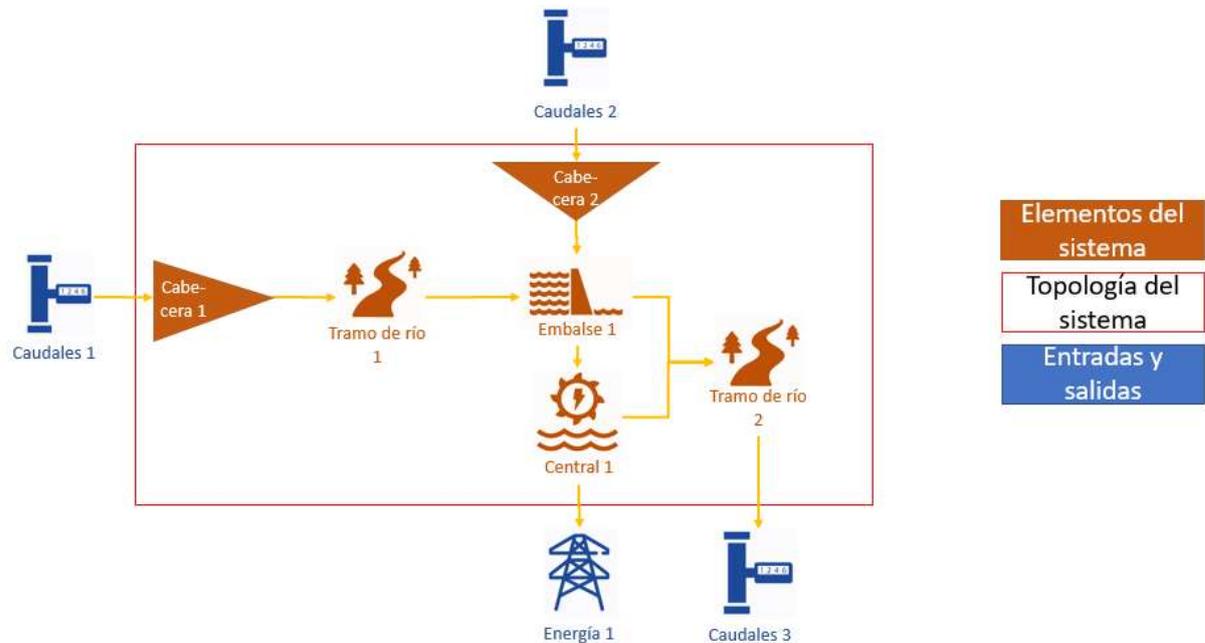
**Figura 21 Distribución de los caudales en la cuenca piloto 2. Históricos (izquierda) y proyecciones climáticas para el futuro cercano (derecha), para 4 combinaciones de modelos (compartiendo el modelo hidrológico), teniendo en cuenta el peor escenario de emisiones.**



## 7. PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA HIDROELÉCTRICA

La concepción del modelo incluye la creación de un conjunto de elementos que, al integrarse y combinarse entre sí puedan permitir simular cualquier conjunto de centrales o sistema hidroeléctrico.

Figura 22 Ejemplo de configuración del modelo para estudiar un sistema integrado por una central con embalse para el que se dispone de dos afloros aguas arriba.



A continuación, se describe cada uno de los tipos de elementos o tramos empleados.

### 7.1 Inicio o cabecera

Se trata de un punto de entrada de caudales al sistema. Se encuentra asociado a una serie temporal de caudales diarios que cede completamente al tramo o elemento situado aguas abajo, que es el que da inicio al sistema en estudio. Para construir y ajustar el modelo, se trabajó con series históricas de caudales para el periodo 2008-2016.

Figura 23 Esquema correspondiente al inicio o cabecera del sistema en estudio.



### 7.2 Captación o derivación de caudal

Se trata de un punto en el sistema en el cual un determinado caudal de entrada es dividido en dos salidas, en función de una regla de operación. Esta regla de operación se puede determinar en función del caudal entrante, época del año, caudal máximo trasvasable, caudal ecológico, etc. El caudal de salida principal es el caudal entrante menos el caudal derivado/trasvasado.

Figura 24 Esquema correspondiente a una captación o derivación de caudal.



La modelización de **azudes** sigue este mismo esquema, considerando que el caudal saliente (que se considera igual al caudal entrante) se divide en dos salidas, una que sigue el propio cauce del río y otra que se desvía mediante canal o similar. Se seguirán unas reglas de operación que dependerán de cada caso particular, aunque el cauce del río deberá mantener en todo momento un caudal mínimo no inferior al ecológico.

Si en un punto se produce una captación o derivación hacia más de dos puntos, se simula empleando varias captaciones en serie.

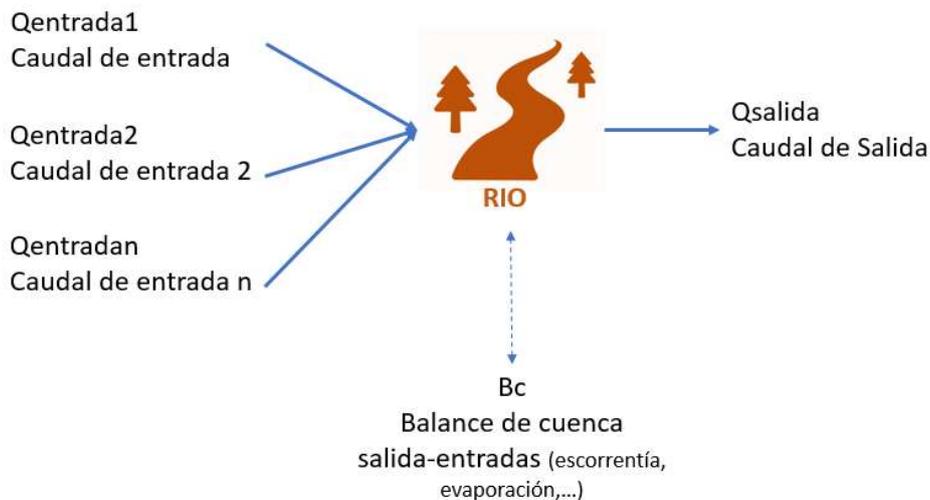
### 7.3 Tramo de río

Este tramo cuenta con una o varias entradas (cabeceras, derivaciones, embalses, centrales, etc.) y una salida.

Por otro lado, se estudia en cada caso la posibilidad y conveniencia de incluir un balance de agua propio de la cuenca que refleje la escorrentía que drena hacia el río, afluentes, captaciones y trasvases no identificados como elementos singulares, etc. Este balance se calcularía, para cada paso de tiempo, en función de las entradas y puede tener signo positivo (existen aportaciones mayores que las detracciones de recursos) o negativo.

Así, por tanto, la salida sería la suma de las entradas y, en su caso, del balance de la propia cuenca del tramo de río.

Figura 25 Esquema correspondiente a un tramo de río.



### 7.4 Embalse

Este tramo cuenta con una entrada y una salida principal, pudiendo haber otras salidas adicionales en forma de trasvases o derivaciones.

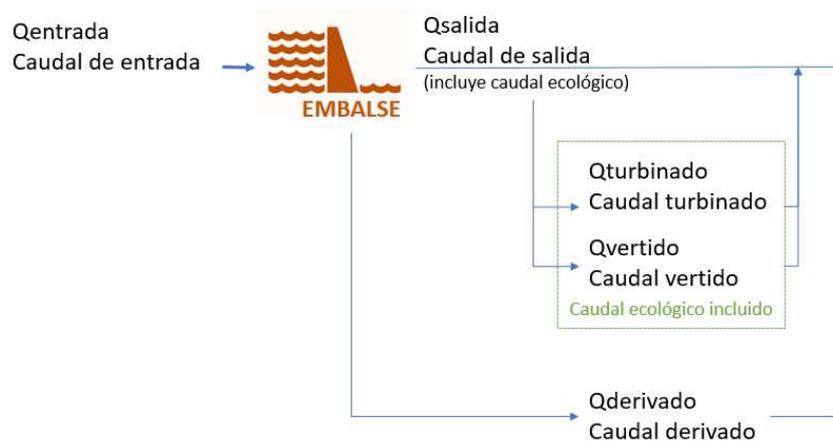
La salida principal se determina, para cada paso de tiempo, en función del caudal entrante, el volumen embalsado y las reglas de operación del embalse en situaciones de alerta que, en algunos casos, podría cambiar según la época del año (época de lluvias o seca).

Este caudal de salida es la suma de dos términos:

- caudal turbinado (que conecta con el tramo de central hidroeléctrica): se asume que se turbinan todo lo posible, siempre que no se superen los máximos establecidos para la central correspondiente y el embalse esté por encima de su cota de turbinación.
- caudal vertido: obtenido como caudal de salida menos caudal turbinado.

Siempre se opera para cumplir el caudal ecológico, que generalmente irá por turbina.

Figura 26 Esquema correspondiente a un embalse.



### 7.5 Central hidroeléctrica generadora

Este tramo cuenta con una entrada (caudal turbinado) y da como salida la producción de energía en la central.

Figura 27 Esquema correspondiente a una central hidroeléctrica.

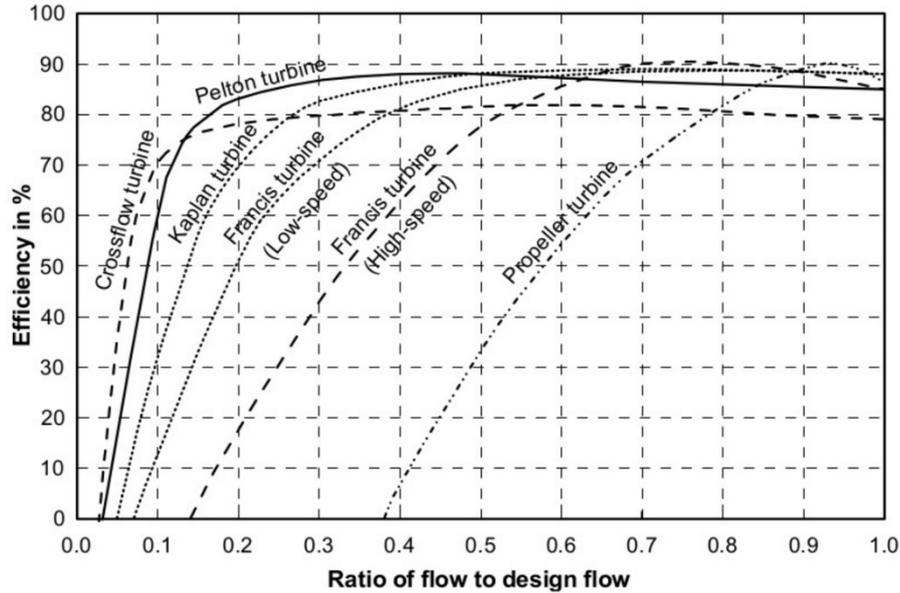


**En centrales que turbinan agua procedente de un embalse,** la energía generada se obtiene multiplicando el caudal de entrada (caudal turbinado) por el coeficiente energético de la central ( $\text{kWh/m}^3$ ). Este se determina, para cada paso de tiempo, a partir de las curvas cota-eficiencia-volumen como función del volumen útil embalsado.

**En centrales que turbinan agua derivada de un azud o a través de un canal,** la energía generada en un segundo se obtiene a partir la ecuación  $(\rho * H * \eta * g) * Q$ , siendo:  $\rho$ , la densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ );  $H$ , el salto bruto (m);  $\eta$ , la eficiencia del sistema (conducción, tubería de presión, válvulas, turbina);  $g$ , la aceleración de la gravedad ( $\text{m/s}^2$ ); y  $Q$ , el caudal de entrada (caudal turbinado) ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

En los casos en que se desconozca la eficiencia concreta del aprovechamiento, se emplearán las curvas típicas de rendimiento de las turbinas que se muestran en la Figura 28 aplicadas a los caudales concesionales de cada central. Para poder emplearlas en todo el rango de caudales, se utilizan líneas de tendencia con funciones polinómicas ajustadas a cada una de ellas.

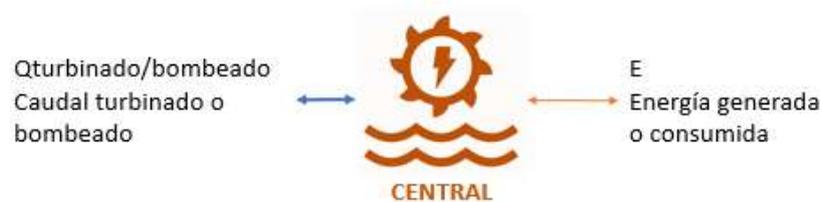
Figura 28 Curva de rendimiento típica para diferentes tipos de turbina.



### 7.6 Central hidroeléctrica reversible

Este tramo funciona entre dos embalses, teniendo dos modos de funcionamiento: el modo de central generadora explicado antes y el modo de central de bombeo. Este último cuenta con dos entradas, el caudal bombeado y la energía consumida en la central.

Figura 29 Esquema correspondiente a una central hidroeléctrica reversible.



Por lo tanto, en este caso, la diferencia respecto a la central generadora estará en el cambio al modo bomba, donde la energía consumida se obtiene a partir la ecuación  $(\rho \cdot g \cdot H \cdot Q) / \eta$ , siendo:  $\rho$ , la densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ );  $g$ , la aceleración de la gravedad ( $\text{m/s}^2$ );  $H$ , el salto bruto o altura manométrica ganada por el agua ( $\text{m}$ );  $Q$ , el caudal bombeado ( $\text{m}^3/\text{s}$ ); y  $\eta$ , la eficiencia del sistema.

En los casos en que se desconozca la eficiencia concreta del sistema en estudio, se empleara un valor fijo de 0.87<sup>4</sup>.

4 <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn206.html>

## 8. CONCLUSIONES

Existe actualmente una demanda creciente de información que permita evaluar y monetizar el riesgo que el cambio climático puede suponer para el sector energético. En particular, la producción hidroeléctrica, resulta clave para la transición hacia un modelo energético más sostenible. Además, su vinculación a los recursos hídricos disponibles la hace especialmente sensible al cambio climático.

Existe una **carencia/escasez de recursos** para analizar la magnitud de esta problemática y planificar adecuadamente las estrategias de adaptación. El presente proyecto, “Evaluación de los efectos de los escenarios hidrológicos proyectados para el siglo XXI sobre la generación hidroeléctrica”, nacido con el objetivo de facilitar más recursos a los agentes del sector, ha dado como **resultado**:

- Una recopilación de información actualizada sobre las fuentes de información climática, herramientas y metodologías existentes para el análisis de la evolución de la generación hidroeléctrica.
- El desarrollo de una metodología que simplifica la evaluación de los efectos del cambio climático sobre la generación hidroeléctrica.
- El desarrollo de una herramienta informática fácil de usar que guía al usuario en la adquisición y procesado de las proyecciones hidrológicas existentes y permite evaluar el comportamiento de sistemas hidroeléctricos sencillos.

La **metodología y la herramienta** han sido validadas y calibradas con información real, aportada en este caso por Naturgy. Con ellas se ha conseguido cumplir una serie de **objetivos**:

- Servir de guía en el desarrollo de estudios de vulnerabilidad de la generación hidroeléctrica ante el cambio climático.
- Facilitar la recopilación y tratamiento de información climática (caudales históricos y proyectados).
- Facilitar la estimación de producción hidroeléctrica de sistemas sencillos a partir del recurso disponible.
- Facilitar el análisis de la contribución del sector hidroeléctrico a:
  - el control de sequías: evaluando el efecto que la infraestructura tiene sobre la prevención de caudales muy bajos y mantenimiento del caudal ecológico.
  - el control de avenidas: evaluando el impacto que podría tener no acumular agua en los embalses.
- Facilitar la comparativa entre escenarios de futuro y la monetización del riesgo a partir de caudales proyectados que tengan en consideración el cambio climático, buscando detectar potenciales cambios en la generación anual y estacional.

Como principales **conclusiones del estudio**, es posible destacar lo siguiente:

- La metodología desarrollada permite una aproximación cuantitativa al análisis de riesgo y establecer las prioridades cara a futuros estudios de detalle, necesarios para las centrales en las que se observen mayores riesgos, y para el diseño de las medidas de adaptación.
- La herramienta desarrollada:
  - se orienta a usuarios no expertos, habiendo sido realizada en formato MS Excel, de uso común y altamente configurable.
  - permite aproximar adecuadamente la operación de la mayor parte de los sistemas hidroeléctricos estudiados, permitiendo planteamientos diferentes según sean embalses de mayor o menor capacidad.

- ha requerido ajustes específicos en las reglas de operación para su uso en determinados sistemas que se no se ajustan adecuadamente a este modelo simplificado. Algunos casos más complejos han requerido la elaboración de modelos de simulación específicos (más complejos) que permiten un mejor ajuste.
- En lo referente al estudio de los caudales proyectados por los modelos, se ha observado una incertidumbre amplia. Los modelos disponibles ofrecen tendencias muy dispares y, en algunos casos, opuestas para los mismos tramos de los cauces y ríos.
- La resolución empleada en el estudio resulta clave, dado que se ha observado como cauces cercanos ofrecen tendencias muy diferentes en diferentes simulaciones.
- En general, aquellos escenarios de futuro con mayores niveles de emisión muestran resultados más pesimistas (reducción general de los recursos hídricos que origina menor producción hidroeléctrica) .
- Mayores aportes no siempre se traducen en mayor producción, ya que ésta depende de:
  - El patrón de caudal: los caudales extremos dificultan el aprovechamiento óptimo del recurso.
  - El nivel de los embalses: la eficiencia de la generación depende del nivel de agua en el embalse.
- Queda patente la eficacia de la infraestructura hidroeléctrica para el modulado/suavizado de los cambios en los caudales, observándose que:
  - La gestión realizada en los embalses suaviza el efecto de los cambios que se den en los caudales para las centrales situadas aguas abajo.
  - Los embalses permiten gestionar los extremos (caudales muy altos y muy bajos) de cara a optimizar su aprovechamiento.
  - Infraestructura clave para el mantenimiento de los caudales ecológicos, con una contribución aún más importante en escenarios de cambio climático.

El trabajo elaborado ha sido presentado en dos foros donde se recogieron opiniones muy favorables, tanto sobre la temática, como sobre el trabajo realizado, así como la necesidad de seguir investigando y desarrollando nuevos productos en este ámbito:

- internamente, a una amplia representación de Naturgy en la que se contaba con diversos perfiles relacionados con la temática del estudio y,
- externamente, en un taller abierto a otros agentes del sector en el tomaron parte activamente, además de Naturgy, la Oficina Española de Cambio Climático, otras empresas energéticas (Iberdrola, Endesa) y Red Eléctrica de España. Además, asistieron otros tipos de agentes ligados a administraciones públicas, universidades, bancos de desarrollo y consultoría.

Cabe resaltar, como principales conclusiones, el gran interés que suscita la temática propuesta, habida cuenta del papel clave que la generación hidroeléctrica tiene para la transición hacia un modelo energético más sostenible, y su vinculación a los recursos hídricos disponibles, que la hace especialmente sensible al cambio climático. Queda camino por delante que, necesariamente, deberá prestar atención al refuerzo de la investigación en este ámbito, la inversión en estudios de detalle específicos y la adaptación del sector, que permita un aprovechamiento óptimo de la infraestructura hidroeléctrica compatible con la conservación y mejora del estado de nuestros ríos.

## 9. REFERENCIAS

- [1] Copernicus Climate Change Service: Water quantity indicators for Europe. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-water-quantity-swicca?tab=overview>
- [2] Maraun, D. Bias Correcting Climate Change Simulations - a Critical Review. *Curr Clim Change Rep* 2, 211–220 (2016). <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0050-x>
- [3] Amengual, A. et al. A Statistical Adjustment of Regional Climate Model Outputs to Local Scales: Application to Platja de Palma, Spain. AMS, febrero 2012. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-10-05024.1>
- [4] <https://www.slideshare.net/KeithVaugh/hydropower-11538342>
- [5] <http://documents1.worldbank.org/curated/en/917841468188335073/pdf/99392-WP-Box393199B-PUBLIC-Hydropower-Report.pdf>
- [6] IPCC: Definition of Terms Used Within the DDC Pages: *glossary, Representative Concentration Pathways (RCPs)*; [https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/glossary/glossary\\_r.html](https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/glossary/glossary_r.html) (revisado por última vez el 17 de diciembre de 2020).
- [7] Jubb, I., Canadell, P., Dix, M. 2013. *Representative Concentration Pathways*. Australian Climate Change Science Program Information paper.
- [8] ClimateNexus. 2020. *RCP 8.5: Business-as-usual or a worst-case scenario?*; <https://climatenexus.org/climate-change-news/rcp-8-5-business-as-usual-or-a-worst-case-scenario> (revisado por última vez el 17 de diciembre de 2020)
- [9] Copernicus CDS. 2016. Definition of new climate impact indicators for water management, including data requirements; <https://datastore.copernicus-climate.eu/c3s/published-forms/c3sprod/sis-water-quantity-swicca/definition-new-climate-indicators-for-water-management.pdf> (revisado por última vez el 18 de diciembre de 2020)
- [10] Copernicus Climate Change Service, CDS, 2020. Water quantity indicators for Europe; <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-water-quantity-swicca?tab=overview> (revisado por última vez el 18 de diciembre de 2020 y, a esa fecha, se actualizó por última vez el 16 de diciembre de 2020)
- [11] CEDEX (Centro de estudios y experimentación de obras públicas). Julio de 2017. *Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Secretaría de Estado de Medio Ambiente; Oficina Española de Cambio Climático. Tomo único, 320 pp; [http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/3B08CCC1-C252-4AC0-BAF7-1BC27266534B/145732/2017\\_07\\_424150001\\_Evaluaci%C3%B3n\\_cambio\\_clim%C3%A1tico\\_recu.pdf](http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/3B08CCC1-C252-4AC0-BAF7-1BC27266534B/145732/2017_07_424150001_Evaluaci%C3%B3n_cambio_clim%C3%A1tico_recu.pdf) (revisado por última vez el 18 de diciembre de 2020).
- [12] Sánchez, F. J. (2017). *Hidrología Superficial y Subterránea*. Createspace Independent Pub., 414 pp. <https://hidrologia.usal.es/Libro.htm>
- [13] Climate Change, Agriculture and Food Security. 2014. *Bias-correction*; [http://www.ccafs-climate.org/bias\\_correction](http://www.ccafs-climate.org/bias_correction) (revisado por última vez el 18 de diciembre de 2020)
- [14] Climate Change in Australia, 2020. *Scaling methods, detailed explanation of the mean and quantile-quantile scaling methods used*; <https://www.climatechangeinaustralia.gov.au/en/support-and-guidance/using-climate-projections/application-ready-data/scaling-methods> (revisado por última vez el 14 de diciembre de 2020)

- [15] Charron, I. (2016). *A Guidebook on Climate Scenarios: Using Climate Information to Guide Adaptation Research and Decisions*, 2016 Edition. Ouranos, 94p. <https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/Guidebook-2016.pdf>
- [16] Wissing, J. 2010. *A Hydrological Framework for Geo-referenced Steady-state Exposure Assessment in Surface Water on the Catchment Scale*. Erlangung des Doktorgrades. Fachbereichs Mathematik/Informatik der Universität Osnabrück, Osnabrück. 123 pp.
- [17] Bowers, M. C., Tung, W. W., Gao, J. B.. 2012. *On the distributions of seasonal river flows: Lognormal or power law?*. *Water Resour. Res.*, 48, 1-12. W05536, doi:10.1029/2011WR011308.
- [18] Iliopoulou, T., Aguilar, C., Arheimer, B., Bermúdez, M., Bezak, N., Ficchi, A., Koutsoyiannis, D., Parajka, J., Polo, M. J., Thirel, G., and Montanari, A..2019. *A large sample analysis of European rivers on seasonal river flow correlation and its physical drivers*, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **23**, 73–91, <https://doi.org/10.5194/hess-23-73-2019>.
- [19] Basu, A., Mandal, A., Martín, N., Pardo, L. 2018. *A Robust Wald-Type Test for Testing the Equality of Two Means from Log-Normal Samples*. *Methodol Comput Appl Probab*, 21, 85-107. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11009-018-9639-y>
- [20] Wilby, R. L. y Dessai, S. *Robust adaptation to climate change*. 2010. *Weather*, Volume 65, Issue7 Pages 180-185. <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wea.543>