



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Evaluación del hábitat de peces nativos en un tramo del río  
Jucar bajo diversos escenarios de cambio climático

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Santiago Bazan, Frank

Tutor/a: Martínez Capel, Francisco

Cotutor/a externo: MUÑOZ MAS, RAFAEL

Director/a Experimental: MACIAN SORRIBES, HECTOR

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

**Trabajo Fin de Máster**

***EVALUACIÓN DEL HÁBITAT DE PECES  
NATIVOS EN UN TRAMO DEL RÍO JÚCAR  
BAJO DIVERSOS ESCENARIOS DE  
CAMBIO CLIMÁTICO***

**Intensificación:**  
*ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y GESTIÓN DE CUENCAS*

**Autor:**  
*FRANK SANTIAGO BAZAN*

**Tutor:**  
*DR. FRANCISCO MARTÍNEZ CAPEL*

**Cotutor/es:**  
*DR. RAFAEL MUÑOZ MAS*

**Director experimental:**  
*DR. HECTOR MACIÁN SORRIBES*

**SEPTIEMBRE, 2023**



**UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA**

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

# Resumen del Trabajo de Fin de Máster

## Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** Evaluación del hábitat de peces nativos en un tramo del río Júcar bajo diversos escenarios de cambio climático

**Título del TFM en inglés:** Habitat assessment of native fish habitat in a segment of the River Júcar under various climate change scenarios

**Título del TFM en Valenciano:** Avaluació de l'hàbitat de peixos nadius en un tram del va riure Xúquer baix diversos escenaris de canvi climàtic

**Alumno:** Frank Santiago Bazan.

**Tutor:** Dr. Francisco Martínez Capel

**Cotutor:** Dr. Rafael Muñoz Mas

**Director experimental:** Dr. Hector Macián Sorribes

**Fecha de Lectura:** Septiembre, 2023

## Resumen

### En español (máximo 5000 caracteres)

El cambio climático ejerce influencia sobre la hidrosfera y la biosfera en diferentes escalas espaciales, generando modificaciones en los procesos hidrológicos a nivel de cuenca. Estas alteraciones, a su vez, repercuten en la hidrodinámica y las condiciones del hábitat a nivel de tramo fluvial, generando impactos en la biota. La exploración del efecto de estos cambios a nivel local exige la implementación de una secuencia de modelos, abarcando distintas escalas. Asimismo, la simulación bajo diversos escenarios de cambio climático nos brinda la posibilidad de estimar un abanico de impactos.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo estimar el impacto del cambio climático sobre los hábitats de peces de agua dulce en el tramo medio del río Júcar. Para lograrlo, se aplicaron modelos computacionales basados en

procesos (Témez y GAMS) para predecir los caudales circulantes en el tramo de Madrigueras (Albacete). Se consideraron cuatro escenarios de cambio climático del proyecto CMIP6 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5), así como horizontes a corto (2022-2040), medio (2041-2070) y largo (2071-2100) plazo. A partir de dichos caudales, las condiciones hidráulicas se simularon mediante un modelo hidráulico uni-dimensional (1D). La evaluación de las condiciones hidráulicas se basó en modelos de reglas difusas, que combinan datos empíricos sobre preferencias hidráulicas con conocimiento experto. Esta cadena de modelos aplicados de manera consecutiva permitió prever los cambios en la disponibilidad de hábitats (hábitat potencial útil) inducida por el cambio climático para diferentes tallas de tres especies de peces: *Luciobarbus guiraonis*, *Parachondrostoma arrigonis* y *Squalius valentinus*. El modelo hidrológico pronosticó una variación significativa los caudales futuros, indicando entre +2.1 y +11.6%, -18.7 y -39.1% y -8 y -73.5% (respecto al caudal medio histórico) en el corto, medio y largo plazo, respectivamente. En consecuencia, se espera una disminución en la idoneidad del hábitat para los peces, variando entre un 45% y un 80%, dependiendo del escenario y especie. Sin embargo, la intensidad de estos cambios varía en gran medida dependiendo de la especie y la talla considerados.

En conjunto, este estudio destaca la importancia de coordinar enfoques de simulación hidrológica, hidráulica y de hábitats con base científica como herramientas eficaces para la estimación del abanico de impactos del cambio climático en la cuenca del Júcar y que deberían ser considerados por los gestores para su mitigación.

### **En valenciano (máximo 5000 caracteres)**

El canvi climàtic exerceix influència sobre la hidrosfera i la biosfera en diferents escales espacials, generant modificacions en els processos hidrològics a nivell de conca. Aquestes alteracions, al seu torn, repercuteixen en la hidrodinàmica i les condicions de l'hàbitat a nivell de tram fluvial, generant impactes sobre la biota. L'exploració de l'efecte d'aquests canvis a nivell local exigeix la implementació d'una seqüència de models, abastant diferents escales. Així mateix, la simulació sota

diversos escenarios de canvi climàtic ens brinda la possibilitat d'estimar un ventall d'impactes.

En aquest context, el present estudi va tindre com a objectiu estimar l'impacte del canvi climàtic sobre els hàbitats de peixos d'aigua dolça en el tram mitjà del riu Xúquer. Per tal aconseguir-ho, es van aplicar models computacionals basats en processos (Témez i GAMS) per a predir els cabals circulants en el tram de Madrigueras (Albacete). Es van considerar quatre escenaris de canvi climàtic del projecte CMIP6 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 i SSP5-8.5), així com horitzons a curt (2022-2040), mitjà (2041-2070) i llarg (2071-2100) termini. A partir d'aquests cabals, les condicions d'hidràuliques es van simular mitjançant un model hidràulic uni-dimensional (1D). L'avaluació de les condicions hidràuliques es va basar en models de regles difuses, que combinen dades empíriques sobre preferències hidràuliques amb coneixement expert. Aquesta cadena de models aplicats de manera consecutiva va permetre preveure els canvis en la disponibilitat d'hàbitats (hàbitat potencial útil) induïda pel canvi climàtic per a diferent mides de tres espècies de peixos: *Luciobarbus guiraonis*, *Parachondrostoma arrigonis* i *Squalius valentinus*. El model hidrològic va pronosticar una variació significativa futura en els cabals, indicant entre +2.1 i +11.6%, -18.7 i -39.1% i -8 i -73.5% (respecte al cabal mig històric) en el curt, mitjà i llarg termini, respectivament. En conseqüència, s'espera una disminució en la idoneïtat de l'hàbitat per als peixos, variant entre un 45% i un 80%, depenent de l'escenari i espècie. No obstant això, la intensitat d'aquests canvis varia en gran mesura depenent de l'espècie i la mida considerada.

En conjunt, aquest estudi fa palesa la importància de coordinar enfocaments de simulació hidrològica, hidràulica i d'hàbitats amb base científica com a eines eficaces per a l'estimació del ventall d'impactes del canvi climàtic en la conca del Xúquer i que haurien de ser considerats pels gestors per a la seua mitigació.

#### **En inglés (máximo 5000 caracteres)**

Climate change influences the hydrosphere and biosphere at different spatial scales, generating modifications in hydrological processes at the basin level. These alterations, in turn, affect hydrodynamics and habitat conditions at the river reach level, generating impacts on biota. Exploring the effect of these changes at the local

level requires the implementation of a sequence of models covering different scales. In addition, simulation under various climate change scenarios allows us to estimate a range of impacts.

In this context, the present study aimed at estimating the impact of climate change on freshwater fish habitats in the middle reaches of the Júcar river. To achieve this objective, process-based computational models (Témez and GAMS) were applied to predict the circulating flows in the Madrigueras segment (Albacete). Four climate change scenarios of the CMIP6 project were considered (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5), as well as short (2022-2040), medium (2041-2070) and long (2071-2100) term horizons. Hydraulic conditions were simulated using a one-dimensional (1D) hydraulic model from these flow rates. The evaluation of the resulting hydraulics was carried out fuzzy rule-based models, which combined empirical data on hydraulic preferences with expert knowledge. The applied chain of consecutively models allowed predicting changes in habitat suitability (weighted usable area) induced by climate change for several size classes of three fish species: *Luciobarbus guiraonis*, *Parachondrostoma arrigonis*, and *Squalius valentinus*. The hydrological model predicted significant future flow variation between +2.1 and +11.6%, -18.7 and -39.1%, and -8 and -73.5% (concerning the historical mean flow) in the short, medium and long term, respectively.

Consequently, a decrease in habitat suitability for fish is expected, varying between 45% and 80%, depending on scenarios and species. However, the intensity of these changes is highly dependent on the species and size of the fish. Overall, this study highlights the importance of coordinating science-based hydrological, hydraulic and habitat simulation approaches as practical tools for estimating the range of climate change impacts in the Júcar basin that managers should consider for mitigation.

**Palabras clave español (máximo 5):** Caudales ecológicos, simulación del hábitat físico, lógica difusa, peces de agua dulce, ríos mediterráneos.

**Palabras clave valenciano (máximo 5):** Cabals ecològics, simulació de l'hàbitat físic, lògica difusa, peixos d'aigua dolça, rius mediterranis.

**Palabras clave inglés (máximo 5):** Environmental flows, Physical habitat simulation, fuzzy logic, freshwater fish, Mediterranean rivers.



## AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi profunda gratitud hacia quienes colaboraron en el desarrollo de este trabajo. Sus valiosas contribuciones, apoyo constante y motivación desempeñaron un papel esencial en la culminación de mi Trabajo Fin de Máster.

En primer lugar, al Dr. Francisco Martínez Capel, quien no solo me proporcionó la orientación técnica, experiencia y valiosos consejos, sino también me brindó su amistad, aliento, paciencia y absoluta confianza que fueron pilares importantes para superar y concluir este trabajo. Ha sido un privilegio contar con su guía.

Al Dr. Hector Macián Sorribes y Dr. Rafael Muñoz Mas, por su apoyo y disponibilidad durante todo el proceso de este trabajo.

A mis padres y hermanos, quienes me enseñaron que siempre se puede superar cualquier desafío con determinación y una disposición constante para triunfar. Su ejemplo ha sido inspirador.

A mis amigas y amigos, quienes me brindaron su amistad y constante aliento durante el desarrollo del presente trabajo. Sus palabras de ánimo fueron un aliciente invaluable.

Al gobierno de Perú y PRONABEC por darme la oportunidad de cursar mis estudios de Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente en la Universidad Politécnica de Valencia, España. Esta experiencia ha enriquecido mi vida académica y personal de manera inigualable.



## Contenido

<b>1. INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
2.1. Objetivo general .....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
<b>3. DESCRIPCION DEL ÁMBITO DE ESTUDIO Y ESPECIES DE PECES .....</b>	<b>4</b>
3.1. Ámbito de estudio.....	4
3.2. Especies de peces .....	5
3.2.1. Barbo mediterráneo (Luciobarbus guiraonis Steindachner, 1866) .....	6
3.2.2. Loína (Parachondrostoma arrigonis Steindachner, 1866).....	7
3.2.3. Cachuelo valenciano (Squalius valentinus Doadrio y Carmona 2006)....	7
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>9</b>
4.1. Series temporales de cambio climático .....	10
4.1.1. Modelos, escenarios y horizontes de cambio climático .....	10
4.1.2. Agregación a nivel de subcuenca .....	11
4.1.3. Corrección de Sesgo y generación de series futuras.....	12
4.2. Modelación del sistema de recursos hídricos .....	14
4.2.1. Recopilación de datos.....	14
4.2.2. Modelación hidrológica .....	15
4.2.3. Modelación del sistema de recursos hídricos .....	19
4.2.4. Análisis de cambios en los caudales futuros .....	20
4.3. Simulación del hábitat físico .....	21
4.3.1. Selección del tramo de estudio .....	21
4.3.2. Simulación hidráulica .....	23
4.3.3. Desarrollo de modelos de idoneidad de microhábitat mediante sistemas de reglas de lógica difusa.....	24
4.3.4. Evaluación del hábitat físico.....	27



4.3.5.	Cálculo de HPU total.....	28
4.3.6.	Determinación de la cantidad de meses con HPU menores a 30% y 50% 28	
4.3.7.	Cálculo del número de meses consecutivos con HPU que no superan a 30%, 50% .....	28
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>29</b>
5.1.	Escenarios de cambio climático .....	29
5.1.1.	Precipitación .....	29
5.1.2.	Temperatura.....	32
5.2.	Modelización hidrológica .....	35
5.2.1.	Calibración y validación del modelo de Témez .....	35
5.2.2.	Análisis de gestión del sistema de recursos hídricos.....	37
5.3.	Simulación del hábitat físico .....	39
5.3.1.	Simulación hidráulica .....	39
5.3.2.	Curvas HPU-Q .....	41
5.3.3.	Evaluación del HPU total .....	43
5.4.	Meses con HPU menores a 30% y 50%.....	47
5.4.1.	<i>Luciobarbus guiraonis</i> T1.....	47
5.4.2.	<i>Luciobarbus guiraonis</i> T2.....	48
5.4.3.	<i>Luciobarbus guiraonis</i> T3.....	49
5.4.4.	<i>Parachondrostoma arrigonis</i> T1.....	50
5.4.5.	<i>Parachondrostoma arrigonis</i> T2.....	51
5.5.	Numero de meses consecutivos que no superan el 30% y 50% de HPU. ...	52
5.5.1.	<i>Luciobarbus guiraonis</i> T1.....	53
5.5.2.	<i>Luciobarbus guiraonis</i> T2.....	54
5.5.3.	<i>Luciobarbus guiraonis</i> T3.....	55
5.5.4.	<i>Parachondrostoma arrigonis</i> T1.....	56
5.5.5.	<i>Parachondrostoma arrigonis</i> T2.....	57



---

<b>6. DISCUSIÓN .....</b>	<b>59</b>
6.1. Escenarios de cambio climático .....	59
6.2. Modelización hidrológica .....	61
6.3. Simulación de hábitats .....	63
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>67</b>
<b>8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>69</b>
<b>9. ANEXOS .....</b>	<b>76</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del ámbito de estudio, tramo medio del río Júcar. ....	5
Figura 2. Barbo mediterráneo ( <i>Luciobarbus guiraonis</i> , Steindachner, 1866). ....	6
Figura 3. Loína ( <i>Parachondrostoma arrigonis</i> , Steindachner, 1866). ....	7
Figura 4. Cachuelo valenciano ( <i>Squalius valentinus</i> ; Doadrio y Carmona 2006). ....	8
Figura 5. Marco metodológico del presente estudio. ....	9
Figura 6. Mapa de grillas de los modelos de cambio climáticos que abarcan el área de estudio. Los puntos rojos representan los centroides de cada cuadrícula. ....	12
Figura 7. Ilustración de método de mapeo de cuantiles. Los puntos rojos representan los centroides de cada cuadrícula de la malla o raster. ....	13
Figura 8. Representación conceptual del modelo hidrológico del Témiz. ....	16
Figura 9. Cuenca del río Júcar con las siete subcuencas que lo conforman. ....	17
Figura 10. Modelo de gestión de recursos hídricos de la cuenca del río Júcar. ....	20
Figura 11. Mapa de ubicación del segmento fluvial de interés (Madrigueras). ....	22
Figura 12. Representatividad de los mesohábitats en el tramo de simulación del hábitat en Madrigueras. ....	22
Figura 13. Vista en plano del modelo hidráulico 1-dimensional del tramo medio del Júcar en Madrigueras, que muestra la distribución de los transectos con la etiqueta de los mesohábitats identificados. ....	23
Figura 14. Ejemplo de diagrama de cajas y bigotes con datos extremos eliminados, para una especie de pez. a) calado y b) velocidad. ....	25
Figura 15. Ejemplo de histogramas de ausencia y presencia de las variables consideradas para una especie de pez: a) velocidad, b) calado, c) refugio. ....	25
Figura 16. Ejemplo de conjuntos difusos considerados en la modelización. Azul (bajo) y verde (alto). a) velocidad, b) calado y c) refugio. ....	26
Figura 17. Precipitaciones medias mensuales observadas frente a las simuladas (modelos climáticos) en el periodo histórico considerado de 35 años (1980-2014). ....	30
Figura 18. Variación de la precipitación mensual desde 1980 hasta 2100 considerando cuatro escenarios de cambio climático. Las líneas verticales separan los horizontes temporales (periodo histórico y horizontes futuros). ....	31
Figura 19. Temperaturas medias mensuales observadas frente a las simuladas (modelos climáticos) del periodo de histórico (1980-2014). ....	32

Figura 20. Variación de la temperatura media mensual desde 1980 hasta 2100 considerando cuatro escenarios de cambio climático. Las líneas verticales separan los horizontes temporales. ....	34
Figura 21. Caudales simulados y observados tras los periodos de calibración (1982-2006) y validación (2006-2012) en las siete subcuencas de la cuenca del Júcar. El caudal simulado se ha calculado a partir de los datos ERA5_Land. ....	36
Figura 22. Gráfico de cajas y bigotes de los caudales en diferentes horizontes temporales y escenarios de cambio climático. ....	39
Figura 23. Simulaciones hidráulicas de caudales entre 0 y 4 m <sup>3</sup> /s en varias secciones transversales de distintos tipos de mesohábitats: a) tabla, b) corriente, c) rápido y d) poza.....	40
Figura 24. Simulaciones hidráulicas de caudales entre 4 y 9 m <sup>3</sup> /s en varias secciones transversales de distintos tipos de mesohábitats: a) tabla, b) corriente, c) rápido y d) poza.....	41
Figura 25. Curvas de hábitat potencial útil versus caudal (HPU-Q) estimadas mediante sistemas basados en reglas difusas (FRBS, siglas en inglés). La línea vertical del valor 10 m <sup>3</sup> /s indica el caudal medio anual en este tramo de río (régimen regulado) según el Plan Hidrológico del Júcar (2021-27).....	42
Figura 26. Variación del HPU total del <i>Luciobarbus guiraonis</i> bajo escenarios de cambio climático y horizontes temporales Los bigotes representan la variación del valor HPU total entre años (se calcula el HPU total por año), mientras la columna representa el valor medio de HPU total en cada periodo considerado (generalmente, 30 años).....	45
Figura 27. Variación del HPU total de la <i>Parachondrostoma arrigonis</i> bajo escenarios de cambio climático y horizontes temporales Los bigotes representan la variación del valor HPU total entre años (se calcula el HPU total por año), mientras la columna representa el valor medio de HPU total en cada periodo considerado (generalmente, 30 años).....	47
Figura 28. Cantidad de meses de la serie temporal de HPU que no superan el 30 y 50% del máximo de HPU para el <i>Luciobarbus guiraonis</i> T1, bajo cuatro escenarios de cambio climático y dos horizontes temporales. Los bigotes representan la variación del número de meses, mientras la columna representa el valor medio del número de meses de los cinco modelos de cambio climático en cada periodo considerado (30 años). ....	48

Figura 29. Cantidad de meses de la serie temporal de HPU que no superan el 30, 50 y 80% del máximo de HPU para el *Luciobarbus guiraonis* T2, bajo cuatro escenarios de cambio climático y dos horizontes temporales. Los bigotes representan la variación del número de meses, mientras la columna representa el valor medio del número de meses de los cinco modelos de cambio climático en cada periodo considerado (30 años). ..... 49

Figura 30. Cantidad de meses de la serie temporal de HPU que no superan el 30, 50 y 80% del máximo de HPU para el *Luciobarbus guiraonis* T3, bajo cuatro escenarios de cambio climático y dos horizontes temporales. Los bigotes representan la variación del número de meses, mientras la columna representa el valor medio del número de meses de los cinco modelos de cambio climático en cada periodo considerado (30 años). ..... 50

Figura 31. Cantidad de meses de la serie temporal de HPU que no superan el 30, 50 y 80% del máximo de HPU para la *Parachondrostoma arrigonis* T1, bajo cuatro escenarios de cambio climático y dos horizontes temporales. Los bigotes representan la variación del número de meses, mientras la columna representa el valor medio del número de meses de los cinco modelos de cambio climático en cada periodo considerado (30 años). ..... 51

Figura 32. Cantidad de meses de la serie temporal de HPU que no superan el 30, 50 y 80% del máximo de HPU para la *Parachondrostoma arrigonis* T2, bajo cuatro escenarios de cambio climático y dos horizontes temporales. Los bigotes representan la variación del número de meses, mientras la columna representa el valor medio del número de meses de los cinco modelos de cambio climático en cada periodo considerado (30 años). ..... 52

Figura 33. Número de meses consecutivos que no superan el 30% y 50% del máximo HPU del *Luciobarbus guiraonis* T1, bajo cuatro escenarios de cambio climático y tres horizontes temporales. Los puntos representan valores atípicos. .... 53

Figura 34. Número de meses consecutivos que no superan el 30% y 50% del máximo HPU del *Luciobarbus guiraonis* T2, bajo cuatro escenarios de cambio climático y tres horizontes temporales. Los puntos representan valores atípicos. .... 54

Figura 35. Número de meses consecutivos que no superan el 30% y 50% del máximo HPU del *Luciobarbus guiraonis* T3, bajo cuatro escenarios de cambio climático y tres horizontes temporales. Los puntos representan valores atípicos. a) Representa la



---

distribución de valores de toda la serie y b) representa la distribución de valores con una frecuencia de 0 a 50 meses.....	55
Figura 36. Número de meses consecutivos que no superan el 30% y 50% del máximo HPU de la <i>Parachondrostoma arrigonis</i> T1, bajo cuatro escenarios de cambio climático y tres horizontes temporales. Los puntos representan valores atípicos. ....	57
Figura 37. Número de meses consecutivos que no superan el 30% y 50% del máximo HPU del <i>Parachondrostoma arrigonis</i> T2, bajo cuatro escenarios de cambio climático y tres horizontes temporales. Los puntos representan valores atípicos. a) Representa la distribución de valores de toda la serie y b) representa la distribución de valores con una frecuencia de 0 a 50 meses.....	58



## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del <i>Luciobarbus guiraonis</i> según su longitud del cuerpo. ....	6
Tabla 2. Clasificación de la <i>Parachondrostoma arrigonis</i> según su longitud del cuerpo .....	7
Tabla 3. Modelos climáticos globales CMIP6 empleados en este estudio. ....	11
Tabla 4. Medidas de los indicadores de desempeño para modelos hidrológicos ....	19
Tabla 5. Combinación de variables de entrada y reglas difusas. ....	26
Tabla 6. Ejemplo de indicadores de desempeño de un modelo FRBS. ....	27
Tabla 7. Estadísticos de desempeño del modelo hidrológico en cada subcuenca. ..	37
Tabla 8. Evolución del caudal en el tramo Madrigueras como porcentaje del caudal medio en el periodo 2021-2100. Los caudales se presentan tanto en valores absolutos (m <sup>3</sup> /s) como en porcentaje de cambio con respecto al caudal medio en el período observado (2.73 m <sup>3</sup> /s). ....	38
Tabla 9. Cambios porcentuales en el HPU total (x10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> ) de <i>Luciobarbus guiraonis</i> de tres clases de talla bajo escenarios de cambio climático y en tres horizontes temporales, con respecto al periodo histórico de referencia.....	44
Tabla 10. Cambios porcentuales en el HPU total (x10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> ) de <i>Parachondrostoma arrigonis</i> en diferentes tallas bajo escenarios de cambio climático y horizontes temporales.....	46
Tabla 11. Variación de precipitación y temperatura bajo diversos escenarios de cambio climático obtenido en el presente estudio e investigaciones previas.....	60
Tabla 12. Variación del caudal bajo diversos escenarios de cambio climático obtenido en el presente estudio e investigaciones previas. ....	62
Tabla 13. Variación del HPU bajo diversos escenarios de cambio climático obtenido en el presente estudio e investigaciones previas. ....	64

## 1. INTRODUCCION

El aumento de la temperatura, las alteraciones de la precipitación y la mayor frecuencia de fenómenos climáticos extremos afectarán significativamente los patrones hidrológicos y la biota de los ecosistema acuáticos en climas mediterráneos (Dudgeon, 2014; Rodrigo & Trigo, 2007). Dichos cambios pueden desencadenar alteraciones fenológicas (reproducción, migración etc.) de la ictiofauna, y posiblemente la desaparición de señales estacionales críticas para su ciclo vital (Bunn & Arthington, 2002). En conjunto, las condiciones de los ríos podrían dejar de ser adecuadas para las especies que evolucionaron en ellos (Poff & Zimmerman, 2010). Otro asunto importante es que el cambio climático podría facilitar la propagación de especies invasoras que amenacen la biodiversidad autóctona (Dudgeon, 2014). Para preservar los ecosistemas fluviales frente al cambio climático, es crucial implementar una gestión proactiva. Esto implica tener la capacidad de predecir los impactos a nivel local, ya que cada río tiene un régimen de caudal natural que refleja su paisaje original, precipitación y temperatura (Poff & Zimmerman, 2010).

El uso de modelos bajo distintos escenarios que capturen el espectro de posibles efectos del cambio climático se ha convertido en una herramienta indispensable para anticipar cambios hidrológicos y del régimen térmico del agua. A partir de dichos cambios, debemos estudiar los cambios en la idoneidad del hábitat disponible para diversas especies. En este sentido, destaca la técnica de simulación del hábitat físico, que es una poderosa herramienta para cuantificar las variaciones en el hábitat idóneo para distintas especies y clases de biota fluviales (Muñoz-Mas et al., 2017; 2012). Ella permite evaluar el efecto de diversas alternativas de gestión, acciones de restauración y los efectos potenciales del cambio climático (Mouton et al., 2007). Su empleo para evaluar el impacto del cambio climático sobre una especie, en segmentos fluviales no regulados, suele implicar tres componentes de modelización: los modelos hidrológicos, el modelo hidráulico, y el modelo/s de idoneidad del hábitat (distinto para cada especie fase de desarrollo). En cuanto al enfoque hidrológico, la selección del modelo hidrológico representa un reto en sí mismo debido a la existencia de modelos agregados (Témez, GR4J, GR2M, HBV, entre otros), semi-distribuidos (RS-MINERSE) y distribuidos (TETIS, SWAT, MIKE11, etc.) (Castellanos-Osorio et al., 2023; Dal Molin et al., 2020; Pérez-Sánchez et al., 2019; Seiller & Anctil, 2014; Viviroli

et al., 2022). Con respecto al modelo hidráulico, también existe un amplio conjunto de software dedicados a la modelización hidráulica, tanto para modelos hidráulicos unidimensionales como bidimensionales (HEC-RAS, River2D, IBER, RHYHABSIM, etc) que representan las variaciones espaciales y temporales de la profundidad del agua, la velocidad del flujo, el sustrato y refugio (Abdelghani, 2023; Bouiss et al., 2023; I. G. Jowett, 2004). El último componente, el modelo de idoneidad del hábitat para la especie objetivo se ha abordado normalmente mediante enfoques de aprendizaje automático, como son los *Random Forest* (RF), *Support Vector Machine* (SVM), *Decision Tree* (DT), *Artificial Neural Network* (ANN) y Lógica difusa, a través de los sistemas basados en reglas difusas (FRBS en sus siglas en inglés), etc. (Fukuda, 2013; Muñoz-Mas et al., 2014, 2018a, 2018b, 2019).

En la Península Ibérica, estudios previos sugieren que las sequías actuales provocan cambios relativamente pequeños y transitorios en las poblaciones de peces de los cursos mediterráneos, mientras que las sequías más prolongadas y graves, como las que se esperan en los ríos de la demarcación hidrográfica del Júcar (Chirivella Osma et al., 2014), pueden provocar el declive o la extinción local de las especies más sensibles (Almeida et al., 2023).

El presente estudio analizó los cambios en el hábitat potencial útil de tres especies de peces, bajo cuatro escenarios de cambio climático (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5) y tres horizontes temporales, cercano (2022-2040), medio (2041, 2070) y lejano (2071-2100). Los análisis se realizaron en el tramo Madrigueras del río Júcar (Albacete) aplicando el enfoque de simulación del hábitat físico (Bovee et al., 1998). La modelización hidrológica se realizó en un paso temporal mensual empleando el modelo lluvia-escorrentía de Témez, lo que permitió predecir las aportaciones a lo largo de los escenarios histórico y de cambio climático. Asimismo, se estimaron las series mensuales de caudales circulantes empleando un modelo de gestión de recursos hídricos programado en GAMS, bajo las reglas de gestión actuales. Se simularon varios caudales con RHYHABSIM y se evaluaron con modelos de idoneidad de hábitat basados en reglas difusas (FRBS). Se desarrollaron curvas de Hábitat Potencial Útil – caudal (HPU-Q) y los caudales simulados se tradujeron a series temporales de hábitat. Por último, se analizó la variación del HPU total y la frecuencia de meses que la serie de tiempo de HPU supera el 30 y, 50% del máximo de HPU para cada especie y talla.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo general

Estimar el impacto del cambio climático en los hábitats de especies clave de peces nativos de agua dulce en el tramo medio del río Júcar.

Este objetivo general se abordará mediante tres objetivos específicos.

### 2.2. Objetivos específicos

- Estimar los caudales circulantes en el tramo de Madrigueras del río Júcar (Albacete) bajo diferentes escenarios de cambio climático (CMIP6) y horizontes temporales, empleando el modelo lluvia-escorrentía de Témez y un modelo de gestión de recursos hídricos.
- Realizar la simulación del hábitat físico para tres especies de peces nativos, la loína o madrilla del Júcar (*Parachondrostoma arrigonis*; Steindachner, 1866), el barbo mediterráneo (*Luciobarbus guiraonis*; Steindachner, 1866) y el cachuelo valenciano (*Squalius valentinus*; Doadrio y Carmona, 2006), para obtener las respectivas relaciones entre un indicador de hábitat (hábitat potencial útil - HPU) y el caudal del tramo.
- Estimar el impacto del cambio climático sobre el hábitat físico mediante el indicador HPU en series temporales futuras bajo los distintos escenarios considerados.

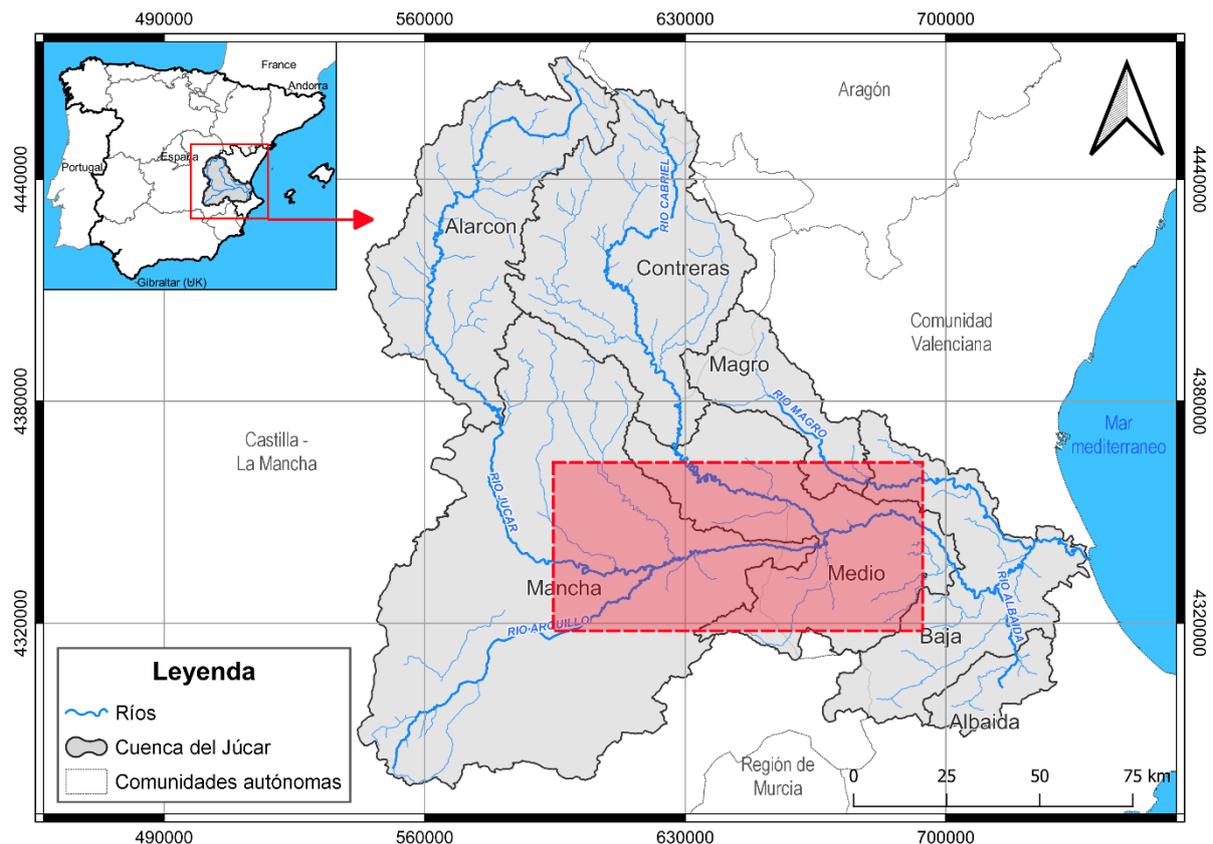
### 3. DESCRIPCIÓN DEL ÁMBITO DE ESTUDIO Y ESPECIES DE PECES

#### 3.1. Ámbito de estudio

El área de estudio se encuentra situado en la cuenca del río Júcar, una cuenca mediterránea de 22 208 km<sup>2</sup> en el este de España, y cuenta con 164 masas superficiales continentales (PHJ, 2022). Sus principales embalses son Alarcón (1088 Mm<sup>3</sup> capacidad útil), Contreras (429 Mm<sup>3</sup>), son la mayor capacidad de la cuenca del río Júcar. Alarcón y Contreras se sitúan en las desembocaduras de las cuencas altas de los ríos Júcar y Cabriel, mientras que Tous se sitúa en el límite de la llanura aluvial del Júcar, en la que se concentran la mayoría de las demandas urbanas y agrícolas (Macian-Sorribes, 2017). La precipitación anual oscila entre 309 y 717 mm, con un valor medio de 475 mm. (PHJ, 2022).

El río Júcar, con sus 512 km de longitud, atraviesa las provincias de Teruel, Cuenca y Valencia, desde la Cordillera Ibérica hasta llegar al Mar Mediterráneo. Este río sigue un patrón característico del clima mediterráneo, con crecidas en otoño y acusado estiaje durante el verano (PHJ, 2022). Dentro de este contexto, el tramo de interés es la cuenca media del río, como se ilustra en la Figura 1.

El tramo medio del río Júcar, que abarca la provincia de Albacete, dentro de la comunidad autónoma de Castilla-La Mancha, representa una porción significativa del sistema hidrográfico del Júcar. Desde una perspectiva ecológica, este segmento fluvial alberga una reducida diversidad de hábitats y especies en el medio acuático. En cuanto a los hábitats acuáticos, se encuentran presentes los ríos permanentes, los arroyos temporales, las lagunas, los humedales y las zonas inundables. En este entorno, se pueden encontrar especies emblemáticas como el barbo común (*Luciobarbus bocagei*), la anguila europea (*Anguilla anguilla*), la nutria (*Lutra lutra*), entre otros.



**Figura 1.** Mapa del ámbito de estudio, en rojo, el tramo medio del río Júcar.

En términos hidrológicos, se caracteriza por un régimen pluvial mediterráneo, con precipitaciones escasas e irregulares y una marcada estacionalidad. El caudal medio anual en el tramo medio se estima en  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  (PHJ, 2022), aunque puede variar considerablemente dependiendo de la estación del año y las condiciones climáticas. Sin embargo, es importante destacar que este tramo se ve afectado por diversas actividades humanas, como la agricultura, la ganadería, la industria, el abastecimiento urbano y la generación hidroeléctrica, las cuales influyen en la calidad y cantidad de agua presente en el río Júcar en esta zona.

### 3.2. Especies de peces

De las distintas especies nativas e invasoras de peces que habitan en el tramo medio del río Júcar, este estudio se centra en tres especies de ciprínidos, los que se detallan en seguida.

### 3.2.1. Barbo mediterráneo (*Luciobarbus guiraonis* Steindachner, 1866)

Pez autóctono, endémica de la Península Ibérica que se distribuye al sur del Ebro en los ríos Mijares, Palancia, Turia, Júcar, Bullent, Serpis, Vinalopó y Clariano. También está presente en la Albufera de Valencia, en el lago de Anna (Valencia) y en la Marjal de Gandía. Se encuentra en algunos ríos del alto Guadiana, como el tramo alto del río Cigüela y entre las lagunas de Ruidera y el embalse de Peñarroya (CSIC, 2016). Tiene una longitud máxima de 60 cm, se alimenta habitualmente de invertebrados bentónicos y algas, tiene una longevidad de aproximadamente 7 años, su periodo reproductivo es de abril a junio sobre fondos de arena y grava (SIBIC, 2017). Según la categoría UICN para España (2011), su estado de conservación es “casi amenazada” (CSIC, 2016; UICN, 2022).

Los peces fueron agrupados considerando el criterio de su longitud máxima (Fornaroli et al., 2020), se detalla en seguida.

**Tabla 1.** Clasificación del *Luciobarbus guiraonis* según su longitud del cuerpo.

Categoría	Abreviación	Descripción
<=10	T1	longitud furcal es inferior o igual a 10 cm
10-20	T2	longitud furcal está entre 10 y 20
>=20	T3	longitud furcal es superior o igual a 20 cm



**Figura 2.** Barbo mediterráneo (*Luciobarbus guiraonis*, Steindachner, 1866).

Fuente: SIBIC (2017), foto de Enric Aparicio.

### 3.2.2. Loína (*Parachondrostoma arrigonis* Steindachner, 1866)

Pez autóctono, especie endémica que se distribuye en la cuenca del río Júcar. Posee una longitud máxima de 30 cm, se alimenta habitualmente de biofilms de diatomeas y algas microscópicas, tiene una longevidad de aproximadamente 7 años, su periodo reproductivo es de marzo a mayo sobre tramos altos de baja profundidad sobre fondos de arena y grava (SIBIC, 2017). Según la categoría UICN para España (2011), su estado de conservación es “en peligro crítico A1ae”, la tendencia de población es regresiva, tanto en área de distribución como en abundancia, habiendo desaparecido o teniendo unas densidades muy bajas en toda la cuenca del Júcar (CSIC, 2016; UICN, 2022).

**Tabla 2.** Clasificación de la *Parachondrostoma arrigonis* según su longitud del cuerpo. (Nota: en los estudios realizados por la UPV nunca se ha encontrado ninguna loína que alcanzase los 20 cm).

Categoría	Abreviación	Descripción
<=10	T1	longitud furcal es inferior o igual a 10 cm
10-20	T2	longitud furcal está entre 10 y 20



**Figura 3.** Loína (*Parachondrostoma arrigonis*, Steindachner, 1866).

Fuente: SIBIC (2017), foto de Enric Aparicio.

### 3.2.3. Cachuelo valenciano (*Squalius valentinus* Doadrio y Carmona 2006)

Pez autóctono, endemismo ibérico que habita en tramos de río con aguas claras, con sustratos heterogéneos y corrientes moderadas, se distribuye por las cuencas hidrográficas mediterráneas (Vinalopó, Monnegre, Serpis, Turia, Júcar, Mijares,

Bullent, Gorgos, etc.). Es una especie: Invertívora, puede alimentarse de invertebrados bentónicos y nectónicos. Posee una longitud máxima de 17.5 cm (SIBIC, 2017). Según la categoría UICN para España (2011), su estado de conservación es “vulnerable” (CSIC, 2016; UICN, 2022)

La base de datos considerada en este estudio no muestra una clasificación de esta especie según la longitud máxima del pez.



**Figura 4.** Cachuelo valenciano (*Squalius valentinus* Doadrio y Carmona 2006).

Fuente: SIBIC (2017), foto de Enric Aparicio.

#### 4. METODOLOGIA

La evaluación del impacto del cambio climático en los hábitats de peces en el tramo medio de la cuenca Júcar se llevó a cabo utilizando un marco metodológico que se presenta en la Figura 5. Marco metodológico del presente estudio.

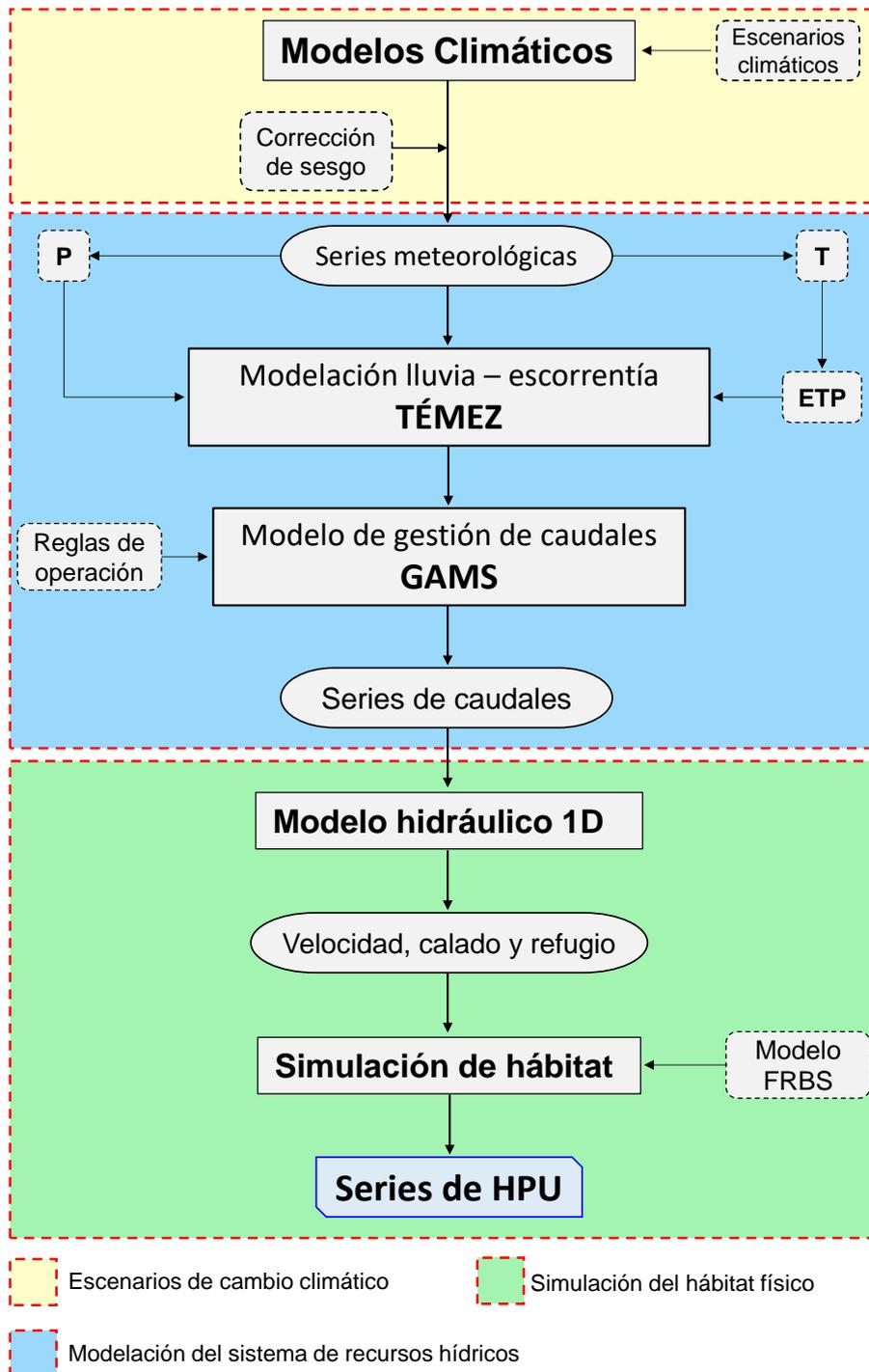


Figura 5. Marco metodológico del presente estudio.

En el diagrama de flujo se describen los componentes necesarios, los cuales se dividen en tres bloques: escenarios de cambio climático (corrección de sesgo y generación de series meteorológicas futuras), modelación del sistema de recursos hídricos (modelación hidrológica (Témez) y gestión de caudales en GAMS (General Algebraic Modeling System, Brooke et al., 1998) y simulación del hábitat físico (simulación hidráulica 1D y evaluación del hábitat a través de modelos FRBSs que permiten la generación de series futuras de HPU). Además, se resalta la información requerida para cada componente y las interacciones entre ellos, tanto en la evaluación presente como en la futura bajo condiciones de cambio climático. Es importante destacar que este marco metodológico es general y puede ser aplicado a otras cuencas siempre y cuando se cuente con suficiente información. Se detallan a continuación los componentes individuales de la metodología.

#### **4.1. Series temporales de cambio climático**

En este apartado se describen los diferentes procesos para la obtención de las series meteorológicas de cambio climático, a partir de los modelos, escenarios y horizontes seleccionados, la agregación de la información a nivel de subcuenca y la corrección de sesgo.

##### **4.1.1. Modelos, escenarios y horizontes de cambio climático**

En el marco de este estudio, se han seleccionado cinco modelos de cambio climático pertenecientes al proyecto CMIP6, obtenidos de la base de datos del programa Copernicus (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip6>) los cuales representan diferentes Modelos de Circulación Global (GCM, siglas en inglés) y escenarios para simular los posibles cambios en el clima. Estos modelos están ampliamente reconocidos y utilizados en la comunidad científica para realizar proyecciones climáticas (Gabino et al., 2023; Ossó et al., 2023) y aparecen detallados en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Modelos climáticos globales CMIP6 empleados en este estudio.

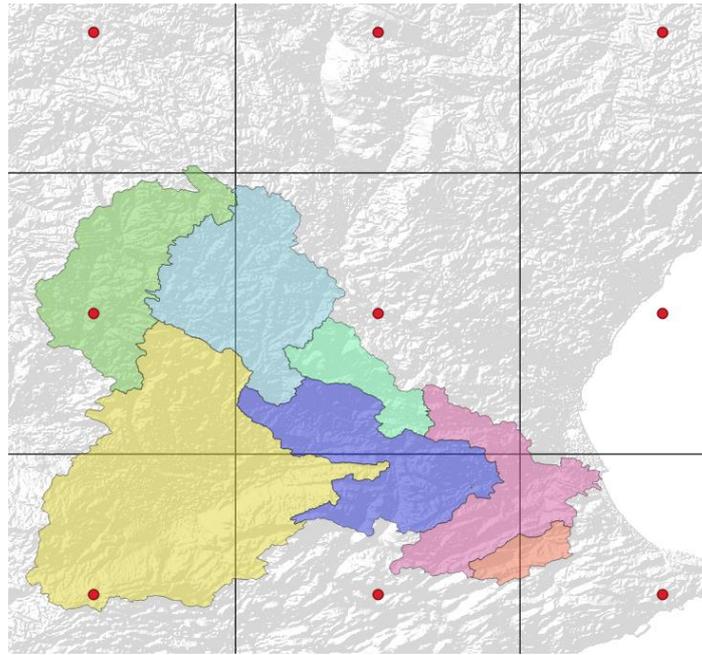
Nº	Modelo	País	Resolución (lon x lat)
1	CNRM-ESM2-1	Francia	1.4°x1.4°
2	GFDL-ESM4	Estados Unidos	1.3°x1°
3	IPSL-CM6A-LR	Francia	2.5°x1.3°
4	MPI-ESM1-2-LR	Alemania	1.9°x1.9°
5	MRI-ESM2-0	Japón	1.1°x1.1°

Además, se han tomado en cuenta cuatro escenarios diferentes del espectro de rutas socioeconómicas compartidas (SSP, en inglés), que representan diferentes trayectorias socioeconómicas y de emisiones de gases de efecto invernadero. Los escenarios seleccionados son: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Cada uno de ellos se caracteriza por diferentes niveles de desarrollo económico, políticas y acciones relacionadas con el cambio climático, y proporcionan un rango plausible de posibles futuros (IPCC, 2021). Para poder analizar los efectos del cambio climático en diferentes momentos, se ha dividido el periodo de estudio en tres horizontes temporales: cercano (2022-2040), medio (2040-2070) y lejano (2070-2100).

#### 4.1.2. Agregación a nivel de subcuenca

Los datos climáticos de precipitación y temperatura de cada serie temporal se obtuvieron de simulaciones descritas por el proyecto CMIP6, así como los centroides de cada cuadrícula de la malla.

Inicialmente, se llevó a cabo el cálculo de los polígonos de Voronoi (Gold et al., 1996), debido a que este enfoque nos permite generar una malla (grid) para cada modelo de cambio climático. Una vez obtenida la malla de cálculo, se procedió a extraer las celdas que abarcan cada subcuenca, lo que nos permitió obtener el valor del porcentaje de área correspondiente a cada una de ellas. Este proceso fue realizado mediante el software QGIS.



**Figura 6.** Mapa de grillas de los modelos de cambio climático que abarcan el área de estudio. Los puntos rojos representan los centroides de cada cuadrícula.

Se empleó un procedimiento específico para calcular tanto la precipitación como la temperatura en cada subcuenca. Para ello, se realizó una media aritmética ponderada considerando los puntos del modelo más cercanos utilizando los pesos de Thiessen previamente calculados. La fórmula utilizada para calcular la precipitación, por ejemplo, fue la siguiente:

$$Prec = \sum \left( pp_{mod\_cc} * \frac{Peso_{mod\_cc}}{100} \right) \quad (1)$$

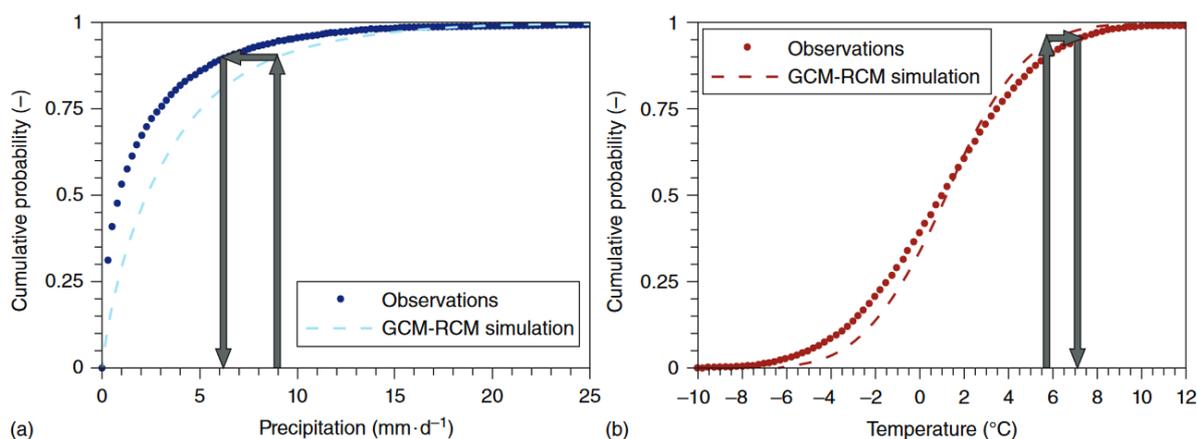
donde  $pp_{mod\_cc}$  es la precipitación de la cuadrícula del modelo de cambio climático y  $Peso_{mod\_cc}$  es el peso que tiene cada cuadrícula del modelo en la subcuenca. Para tal efecto, se desarrolló un código en *R* (R Core Team, 2022) que nos permita la agregación simultánea a nivel de subcuenca. Esto permitió determinar los valores de precipitación y temperatura mensual correspondientes a cada una de las subcuencas pertenecientes a la cuenca del Júcar.

#### 4.1.3. Corrección de Sesgo y generación de series futuras

A pesar de que los GCMs son las fuentes tradicionales para generar datos del clima futuro, su escala espacial es muy gruesa para aplicarse en estudios de escala local. A esto se suma que los resultados de todos los modelos incluyen una gran cantidad de

errores intrínsecos que de no ser corregidos pueden conducir a evaluaciones incorrectas sobre el impacto del cambio climático. En ese sentido, en esta etapa se busca ajustar los datos históricos de los modelos CMIP6 a los datos observados a través de la corrección de sesgo. Para este propósito, se empleó la técnica QMAP, que está basada en el algoritmo de mapeo de cuantiles (Enayati et al., 2021; Gudmundsson et al., 2012).

QMAP ajusta los cuantiles de manera que coincidan con la distribución del conjunto de datos de referencia, al tiempo que conserva los cambios proyectados por el modelo (Figura 7). Este método aplica una función de transferencia univariante a cada variable por separado, lo que permite vincular la función de distribución acumulada de una variable de interés en las simulaciones del modelo con la del conjunto de datos observados (Dumitrescu et al., 2022).



**Figura 7.** Ilustración de método de mapeo de cuantiles. Los puntos rojos representan los centroides de cada cuadrícula de la malla o raster. Fuente: (Hakala et al., 2019)

Para llevar a cabo este proceso, se utilizó el paquete "qmap" de R desarrollado por Gudmundsson et al. (2012), con una robusta estimación de los valores de la relación cuantil-cuantil (RQUANT) de las series temporales y utilizando una regresión lineal por mínimos cuadrados. Éste método ya se ha empleado con éxito previamente en estudios de la cuenca hidrográfica del Júcar (Macian-Sorribes, 2017; Marcos-Garcia et al., 2023).

Una vez generadas las series corregidas de precipitación y temperatura, se procedió a comparar a escala temporal mensual las series temporales históricas de cada modelo con la serie de datos observados. Además, se aplicó el concepto de promedio de conjunto multimodelo para mejorar la fiabilidad y estabilidad a largo plazo de los modelos climáticos y proporcionar previsiones coherentes y fiables (Ilori & Balogun, 2022), debido a que se ha evidenciado que el enfoque de conjunto multimodelo es más eficaz que el enfoque de modelo único en diversas condiciones climáticas en diferentes cuencas complejas, incluido el Mediterráneo (Balhane et al., 2022).

## **4.2. Modelación del sistema de recursos hídricos**

La modelación del sistema de recursos hídricos desarrollado en esta investigación ha requerido en primer lugar establecer una relación entre la precipitación y la esorrentía total mediante el modelo hidrológico de Témez, así se ha podido determinar las series de aportaciones que circularán bajo distintos escenarios de cambio climático (SSPs). En segundo lugar, se utilizó un modelo de gestión de recursos hídricos realizado en el software GAMS®, con el objetivo de gestionar las aportaciones y conocer se serie de caudales circulantes por el tramo de estudio seleccionado.

### **4.2.1. Recopilación de datos**

Los registros mensuales de precipitación y temperatura correspondientes al periodo 1982 a 2012 para la zona de estudio fueron obtenidos a partir del producto ERA5-Land (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land-monthly-means?tab=overview>). Este producto es generado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF) y consiste en una reproducción del componente terrestre del reanálisis climático ECMWF ERA5-Land, el cual posee una resolución espacial de aproximadamente 10 km. El reanálisis climático ECMWF ERA5 es un conjunto de datos globalmente completo y coherente que combina tanto información de modelos climáticos como observaciones reales de diversas ubicaciones en todo el mundo. Esta integración se lleva a cabo mediante la utilización de las leyes de la física, lo que garantiza la fiabilidad y precisión de los resultados obtenidos (Muñoz Sabater, 2019).

En lo que respecta a los datos de las aportaciones para el mismo periodo de tiempo (1982-2012), estos fueron extraídos de la tesis doctoral de Macian-Sorribes (2017), que a su vez fueron proporcionados por la Oficina de Planificación Hidrológica (OPH) de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ).

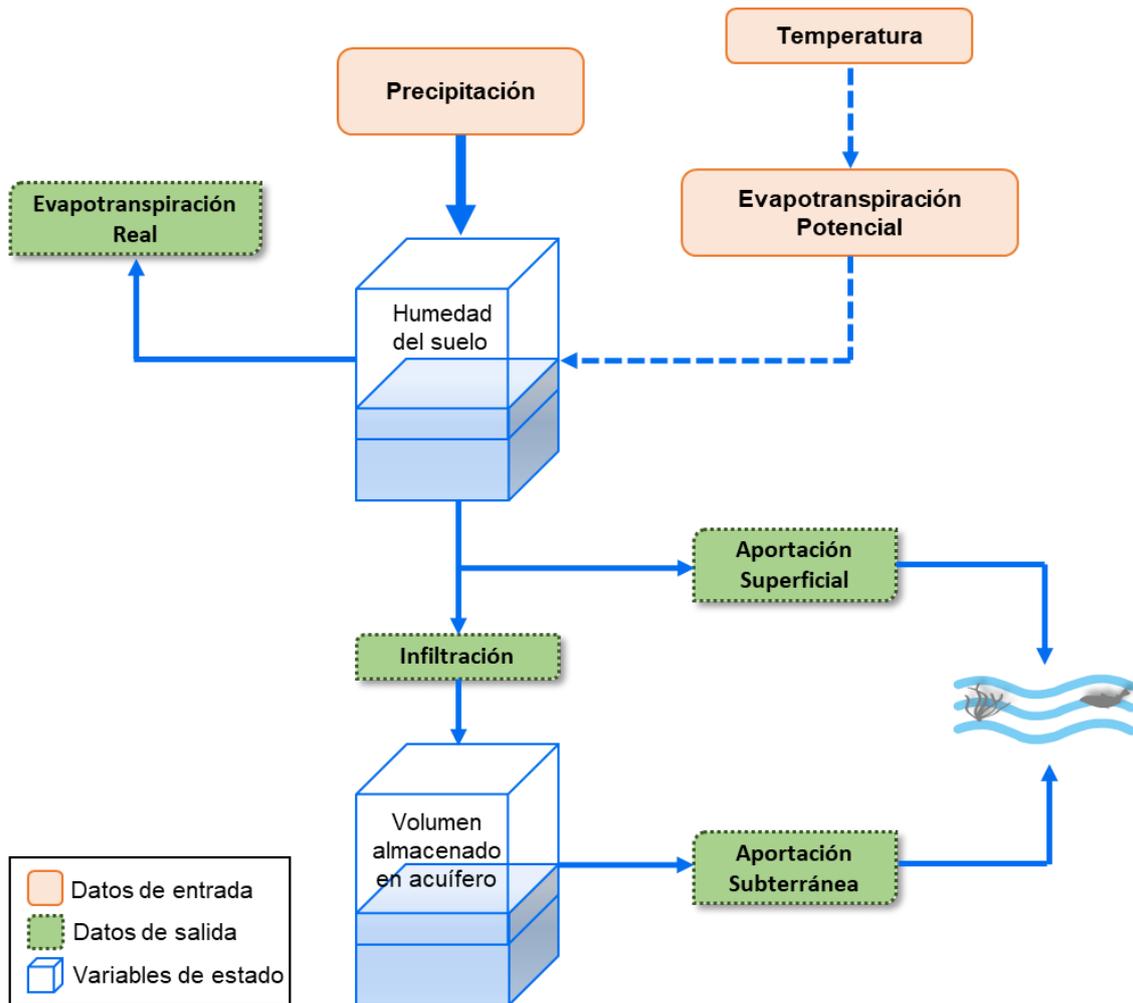
#### 4.2.2. Modelación hidrológica

La simulación hidrológica se realizó a través del modelo hidrológico de Témez (Témez, 1977). Este es un modelo conceptual, determinista y continuo de balance hídrico mensual, agregado y con pocos parámetros (sólo 4), que ha sido ampliamente empleado para la evaluación de recursos hídricos en España (Estrela Monreal et al., 1999; Marcos-García et al., 2017).

El modelo hidrológico de Témez es un método que permite estimar el caudal de referencia en una cuenca vertiente, a partir de la precipitación y la evapotranspiración potencial (Vieira et al., 2018). La formulación de este modelo se basa en los siguientes supuestos:

- Escala temporal mensual.
- Supone una distribución uniforme de la precipitación y la evapotranspiración
- No considera la transferencia de caudal hacia o desde otras cuencas a través de acuíferos.

El modelo se divide en dos tanques de almacenamiento: la zona no saturada (suelo) y la zona saturada (acuífero). Esta última se representa como un embalse subterráneo que descarga de manera lineal hasta alcanzar la escorrentía o caudal total (Figura 8).



**Figura 8.** Representación conceptual del modelo hidrológico de Temez. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 8 se pueden identificar los datos de entrada del modelo, los cuales incluyen:

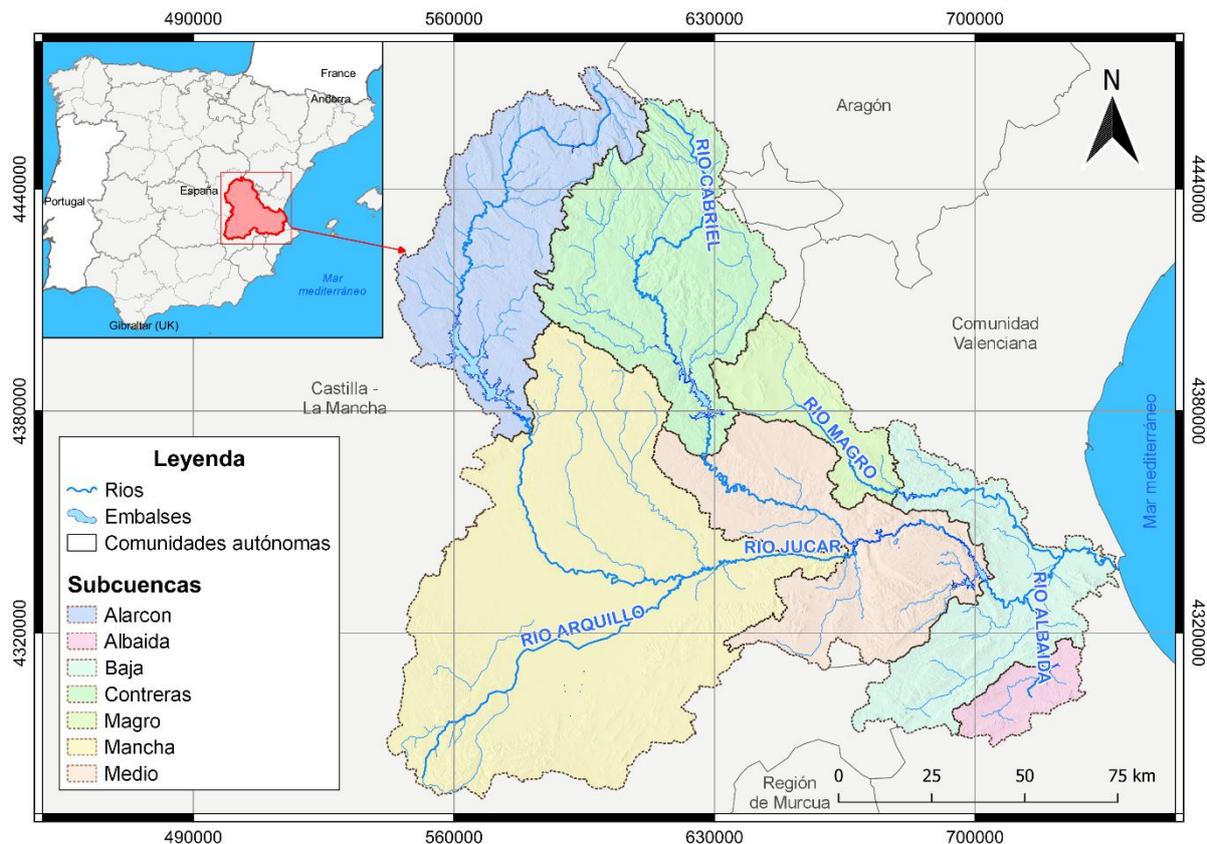
- Precipitación (P), obtenida de los datos de reanálisis ERA5-Land.
- Evapotranspiración potencial (ETP), calculada a partir de la temperatura mediante el modelo de Thornhwaite.

Adicionalmente, se pueden distinguir las salidas generadas, los cuales abarcan la evapotranspiración real (ETR), la infiltración (I) y la recarga del acuífero, las aportaciones superficiales (Esc.Sup) y subterráneas (Esc.Subt), así como la aportación del río (Qsim). Asimismo, se tienen en cuenta las variables de estado: la humedad inicial del suelo ( $H_i$ ) y el volumen inicial de agua en el acuífero ( $V_{inicial}$ ).

Además de los datos previamente mencionados, el modelo requiere que se optimicen cuatro parámetros, los cuales son:

- **Hmax**: capacidad máxima de almacenamiento de humedad del suelo, medida en milímetros (mm).
- **Imax**: capacidad de infiltración máxima, que determina la separación entre las escorrentías superficiales y subterráneas. Se expresa en milímetros por mes (mm/mes).
- **C**: coeficiente de escorrentía, que es adimensional y varía entre 0 y 1.
- **$\alpha$** : recesión o coeficiente de descarga del acuífero, regula el drenaje subterráneo y se mide en meses inversos ( $\text{mes}^{-1}$ ).

La simulación hidrológica se llevó a cabo en las 7 subcuencas de la cuenca del Júcar, que se muestran en la Figura 9. El modelo de Temez se implementó en una hoja de cálculo de Excel®.



**Figura 9.** Cuenca del río Júcar con las siete subcuencas que lo conforman.

#### 4.2.2.1. Calibración y validación

Con el objetivo de mejorar el desempeño y evaluación del modelo, la calibración se llevó a cabo en cada una de las 7 subcuencas pertenecientes a la cuenca del Júcar, comparando los caudales simulados con la información de las estaciones de aforo existente en cada subcuenca (Macian-Sorribes, 2017). La función objetivo era distinta para cada zona según cómo se esperaba que funcionara el sistema hidrológico (Macian-Sorribes et al., 2020). Los cuatro parámetros se optimizaron utilizando la función SOLVER con el algoritmo GRG Nonlinear Solving (Lasdon et al., 1974) de Excel®, debido a la facilidad de uso, eficiencia y menor tiempo requerido para la optimización.

Antes de la calibración se realizó un análisis de sensibilidad para identificar los parámetros más importantes. En primera instancia estos serían calibrados manualmente, y en segunda instancia los parámetros menos sensibles serían calibrados automáticamente. En un tercer paso, los parámetros más sensibles se volvían a calibrar automáticamente. Asimismo, se consideró como restricción:  $H_{max}$ ,  $C$ ,  $I_{max}$  y  $\alpha \geq 0.001$  (Martínez-Capel et al., 2018)

#### 4.2.2.2. Evaluación de desempeño

Se utilizaron las siguientes métricas estadísticas para evaluar el rendimiento del modelo.

- **Coefficiente de correlación de Pearson:** muestra la covariabilidad de las variables simuladas y observadas sin penalización por el sesgo. Varía entre  $-1$  y  $1$ , siendo  $1$  el valor óptimo (Pérez-Sánchez et al., 2019).

$$R = \left( \frac{S_{obs,sim}}{\sqrt{S_{obs} \times S_{sim}}} \right)^2 \quad (2)$$

- **Coefficiente de Nash-Sutcliffe:** es usado para evaluar el poder predictivo de los modelos hidrológicos. Varía entre  $-\infty$  y  $1$ , siendo  $1$  el valor óptimo (Nash & Sutcliffe, 1970).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (3)$$

Una vez calculado ambas métricas estadísticas, se determina el desempeño del modelo con los criterios indicados en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Medidas de los indicadores de desempeño para modelos hidrológicos

<b>Indicadores</b>	<b>Muy bueno</b>	<b>Bueno</b>	<b>Satisfactorio</b>	<b>No Satisfactorio</b>
R	$>0.80$	$0.70 \leq R \leq 0.80$	$0.50 < R < 0.70$	$\leq 0.50$
NSE	$>0.80$	$0.60 \leq NSE \leq 0.80$	$0.50 < NSE < 0.70$	$\leq 0.50$

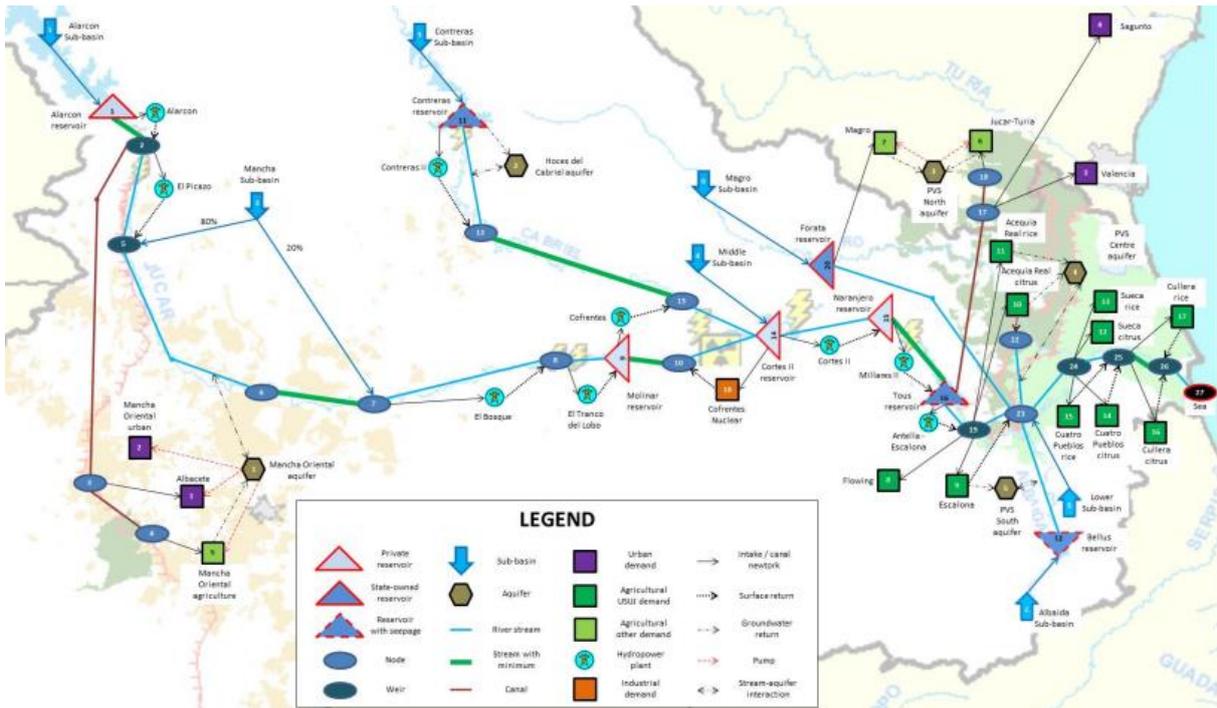
Fuente (Moriasi et al., 2015)

#### 4.2.3. Modelación del sistema de recursos hídricos

Se llevó a cabo un análisis utilizando un modelo hidro-económico de gestión de recursos hídricos para poder estimar los caudales circulantes bajo las condiciones de regulación de caudales según las reglas de operación de presas en la cuenca del río Júcar. Este modelo fue desarrollado por Macian-Sorribes (2017) y el IIAMA, utilizando el software GAMS. Si bien este estudio se centró en el tramo Madrigueras, la modelación se extendió para abarcar toda la cuenca de Júcar, considerando las reglas de operación actuales de todas las presas.

El modelo estima diversas variables fundamentales, tales como los caudales circulantes en el río, el suministro de agua a las demandas urbanas y agrícolas, los beneficios económicos obtenidos por la agricultura, los caudales extraídos de los acuíferos, las interacciones entre el río y los acuíferos, los retornos agrarios al cauce, las descargas al mar y el cumplimiento de los caudales mínimos en el río, de acuerdo con las reglas de operación específicas. Dicho modelo del Júcar cuenta con una estructura que comprende 27 nodos, 8 embalses superficiales, 5 modelos multi-reservorio integrados (EMMs), 7 subcuencas, 18 demandas consuntivas, 9 centrales hidroeléctricas y 6 caudales ambientales (Figura 10).

Para obtener las decisiones óptimas de gestión de los recursos hídricos (reglas de gestión), tanto superficiales como subterráneos, se utilizó el algoritmo CSG-SDDP. Además, se tomaron en cuenta las características físicas del modelo, las cuales se obtuvieron de información pública (CHJ, 2013).



**Figura 10.** Modelo de gestión de recursos hídricos de la cuenca del río Júcar. Fuente: (Macian-Sorribes, 2017)

#### 4.2.4. Análisis de cambios en los caudales futuros

El análisis de cambios en los caudales futuros se llevó a cabo empleando el modelo hidrológico de Temez, previamente calibrado y validado. Mediante este modelo, se calculó las series de aportaciones futuras para cada escenario de cambio climático, basándonos en las proyecciones de precipitación y temperatura y aplicado la corrección de sesgo.

Una vez determinadas las series de aportaciones históricas y futuras, se utilizó el modelo de gestión de recursos hídricos (en el software GAMS) para simular el comportamiento del sistema bajo las reglas de operación actuales. Cada escenario se simuló reemplazando los datos históricos por los provenientes de los escenarios de cambio climático que obtuvimos anteriormente. Mediante una comparación con los caudales del periodo de control, pudimos estimar los posibles cambios en los caudales según los distintos escenarios y horizontes temporales considerados.

### 4.3. Simulación del hábitat físico

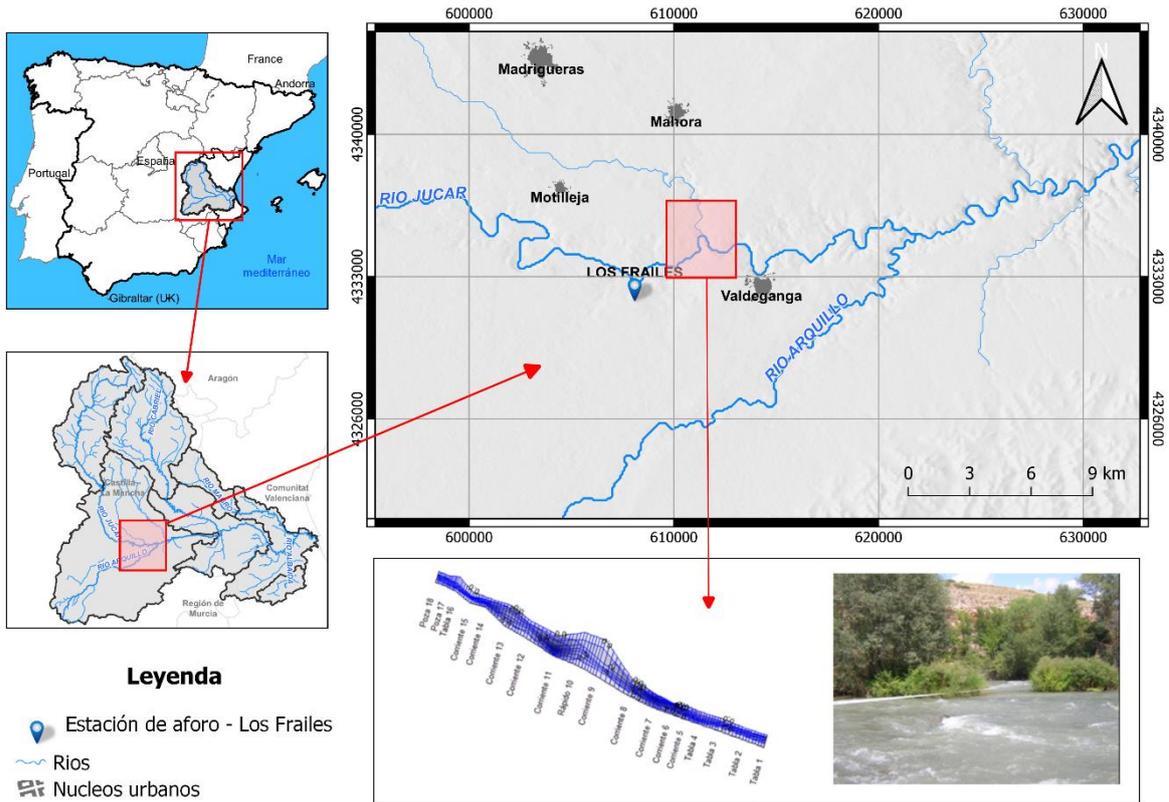
La simulación de hábitat físico (Bovee et al., 1998) de peces es una herramienta que evalúa las condiciones de habitabilidad para las especies de peces en los ríos, considerando variables hidráulicas como el calado, la velocidad, el sustrato y refugio. Esta herramienta se basa en modelos numéricos de simulación hidráulica, unidimensionales o bidimensionales, y en modelos de idoneidad del hábitat, que expresan la probabilidad de presencia de peces en distintos hábitats. Esto nos permite inferir la relación entre la cantidad y calidad del hábitat y el caudal circulante en el tramo estudiado.

Posteriormente, estos valores de cantidad y calidad del hábitat, inferidos gracias a los modelos de idoneidad, se resumen en índices generales de hábitat, como el Hábitat Potencial Útil (HPU), para desarrollar curvas de hábitat total versus caudal y poder inferir el impacto de distintos regímenes de caudales sobre el hábitat disponible.

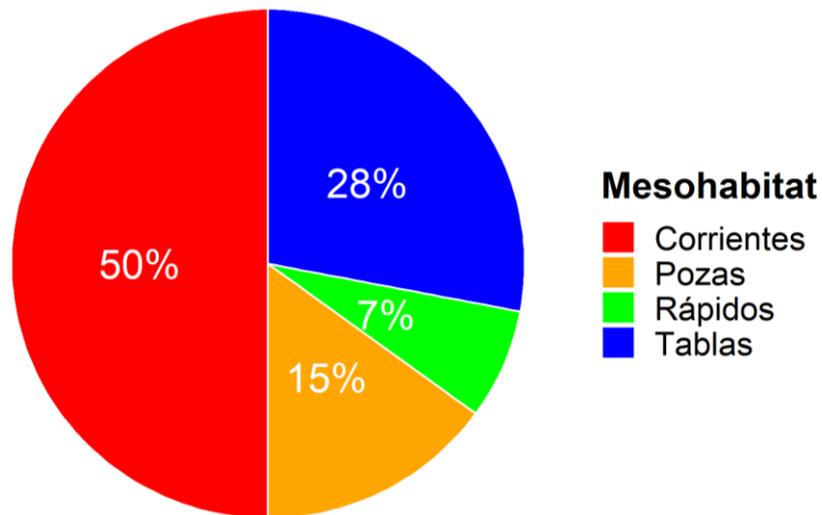
#### 4.3.1. Selección del tramo de estudio

El tramo de estudio seleccionado se encuentra en el río Júcar, aguas arriba de su confluencia con el río Valdemembra, y abarca los términos municipales de Madrigueras, Albacete, Motilleja y Mahora (Figura 11). Tiene una longitud aproximada de 392 metros y un ancho de sección promedio de alrededor de 18 metros. Para la simulación unidimensional, el tramo contaba con la medición del cauce y flujo en 18 transectos o secciones transversales.

La elección de este tramo de estudio se basó en su importancia ambiental, representatividad de mesohábitats (poza, tabla, rápido, etc.) y la presencia de alteraciones morfológicas significativas. La elección la llevó a cabo la empresa TYPESA junto a personal especializado de la Confederación Hidrográfica del Júcar. La llanura de inundación ha sufrido modificaciones, y parte del tramo está canalizado, mientras que otra parte limita con áreas de cultivo. Aproximadamente el 40% de todo el tramo cuenta con cobertura de sombra. Además, existen diversos tipos de refugios para las especies piscícolas, como troncos y ramas, zonas con sombra y un bajo porcentaje de cornisas sumergidas. Las unidades hidromorfológicas o mesohábitats presentes en el tramo (en el periodo de muestreo) se visualizan en la Figura 12, estando dominadas por las corrientes.



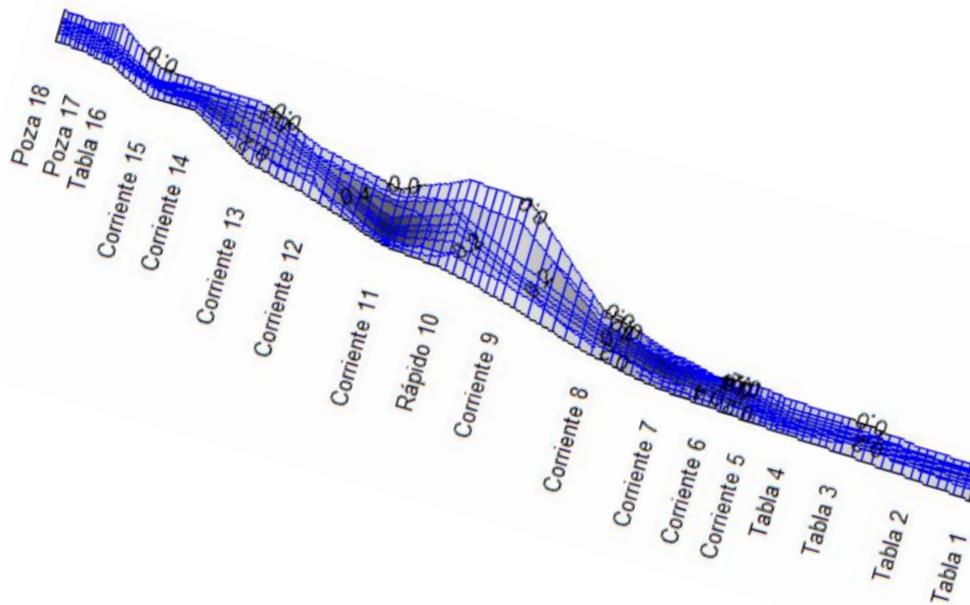
**Figura 11.** Mapa de ubicación del segmento fluvial de interés (Madrigueras).



**Figura 12.** Representatividad de los mesohábitats en el tramo de simulación del hábitat en Madrigueras. Fuente: TYPESA-TECNOMA, (2007).

#### 4.3.2. Simulación hidráulica

Se realizó una simulación hidráulica en el tramo de estudio seleccionado. Para ello, se empleó un modelo hidráulico 1D desarrollado por la empresa TYPASA (en aquel momento TECNOMA; TYPASA-TECNOMA, 2007), que fue recientemente revisado por el grupo de Ecología del IGIC – UPV bajo un convenio de investigación. La distribución espacial de sus transectos en el cauce puede apreciarse en la Figura 13.



**Figura 13.** Vista en plano del modelo hidráulico 1-dimensional del tramo medio del Júcar en Madrigueras (Albacete), que muestra la distribución de los transectos con la etiqueta de los mesohábitats identificados.

La simulación hidráulica se llevó a cabo utilizando el software RHYHABSIM (Jowett, 1989) y se consideró un caudal de calibración de  $2.039 \text{ m}^3/\text{s}$ , aunque en la medición de las condiciones hidráulicas en campo se registró con un caudal máximo de  $7.85 \text{ m}^3/\text{s}$ . Con el objetivo de evaluar el hábitat disponible bajo diferentes condiciones de caudales circulantes, se realizaron simulaciones para un total de 50 caudales distintos, que abarcaban un rango desde  $0.08$  hasta  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ , ya que normalmente no se recomienda extrapolar un modelo hidráulico en un caudal mayor a tres veces el caudal máximo medido (Domeneghetti et al., 2012).

Durante cada simulación, se descargaron los valores de velocidad y calado, y se asociaron al tipo de refugio presente en el entorno. Estos datos generados fueron fundamentales para el análisis y la evaluación de la disponibilidad de hábitat en función de los distintos niveles de caudal.

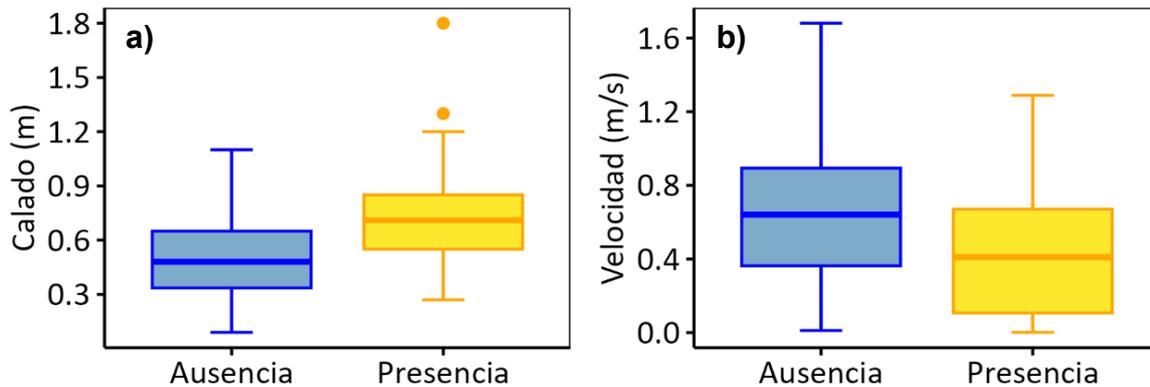
Cabe destacar que la variable refugio es ampliamente reconocida como un factor crucial para el desarrollo de la vida acuática, y en el tramo de estudio, se trabajó con seis tipos de elementos de refugio: cañas, vegetación acuática, sombra, rocas, madera y cuevas, y cornisas. Estos elementos de refugio desempeñan un papel determinante en los patrones de uso del hábitat en ríos y arroyos (Ayllón et al., 2009; Costa et al., 2012; Da Costa et al., 2015; Lee & Suen, 2012). Se consideraron todas las posibles combinaciones de presencia y ausencia de estos diferentes elementos de refugio, con el objetivo de identificar los refugios óptimos para cada especie. En esta clasificación, el valor 0 representa la ausencia de todos los refugios relevantes, mientras que el valor 1 indica la presencia de al menos uno de los refugios relevantes (Vimos-Lojano et al., 2019).

#### 4.3.3. Desarrollo de modelos de idoneidad de microhábitat mediante sistemas de reglas de lógica difusa

Se utilizaron modelos de idoneidad de hábitats implementados en el software de programación estadística *R* como parte del Proyecto WATER4CAST (UPV), que consideran como variables de entrada el calado, la velocidad y el refugio. Los modelos se construyeron siguiendo criterios homogéneos a través de sistemas basados en reglas difusas (FRBS, en inglés). Estos modelos son mixtos, porque combinan datos (*data driven*) con conocimiento experto (*Expert Knowledge*) y fueron desarrollados empleando el modelo de tipo “Mamdani” (Mamdani & Assilian, 1975), y criterios de discretización de las variables usados previamente (Muñoz-Mas et al., 2016).

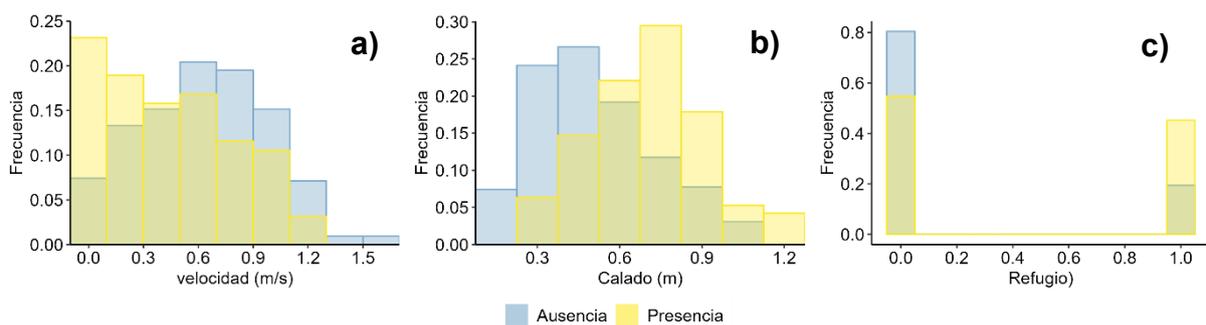
A continuación, se presenta un ejemplo del procedimiento seguido por el equipo del IGIC e IIAMA para la construcción de un modelo de idoneidad de hábitat para una especie de pez. La construcción de dicho modelo implica tener un profundo conocimiento de los datos utilizados. Por lo tanto, es recomendable comenzar con un análisis exploratorio de los datos para asegurarse de su validez y calidad. En este sentido, un primer método de exploración de los datos es el gráfico de cajas y bigote,

o *boxplot* en inglés, el cual permite una representación gráfica de la distribución de los datos y facilita la detección de valores atípicos (Figura 14).



**Figura 14.** Ejemplo de diagrama de cajas y bigotes con datos extremos eliminados, para una especie de pez. a) calado y b) velocidad.

Después de haber eliminado los datos que, según criterio de experto, son atípicos o extremo (posibles errores), se procede a generar los histogramas de las variables de microhábitat utilizadas en el estudio. Estas variables típicamente incluyen el calado, la velocidad y la disponibilidad de refugio. Cabe destacar que se deben analizar los histogramas por separado para las dos categorías esenciales de datos: presencia y ausencia de peces.

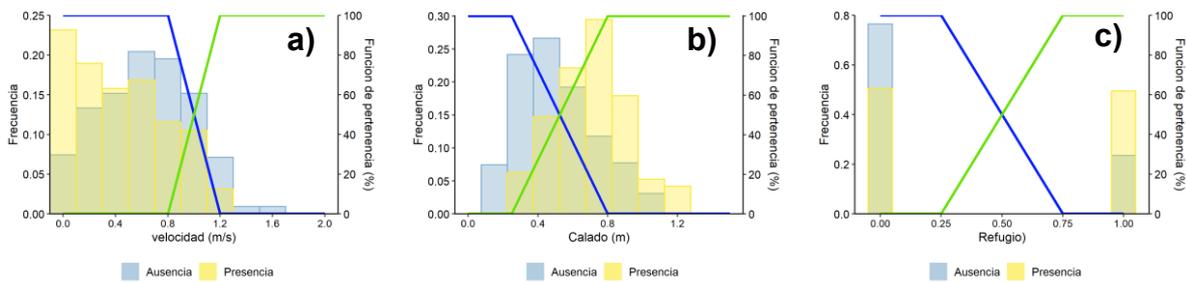


**Figura 15.** Ejemplo de histogramas de ausencia y presencia de las variables consideradas para una especie de pez: a) velocidad, b) calado, c) refugio.

Estos modelos incorporan información empírica y conocimiento experto, y se evalúan considerando las métricas de especificidad (ratio de datos de ausencia correctamente clasificados), sensibilidad (ratio de datos de presencia correctamente clasificados) y

TSS (*True Skill Statistic*), que es la suma de sensibilidad y especificidad menos uno ( $TSS = S_n + S_p - 1$ ) (Mouton et al., 2010).

Para la creación del modelo, en primer lugar, se construyen conjuntos difusos para cada variable, que nos permiten discretizar las variables en categorías sencillas del tipo Bajo, Medio o Alto, pero de un modo difuso. Por tanto, se convierten en variables cualitativas que se describen en términos lingüísticos.



**Figura 16.** Ejemplo de conjuntos difusos considerados en la modelización. Azul (bajo) y verde (alto). a) velocidad, b) calado y c) refugio.

A continuación, combinando las distintas clases de las tres variables de entrada, se deben establecer reglas difusas que determinan la idoneidad de hábitat asociada a cada combinación de categorías o conjuntos difusos para cada especie de pez. En la siguiente tabla se muestra el ejemplo de las reglas difusas. Con los conjuntos difusos y con dichas reglas queda definido el modelo, que se debe testear para optimizar su desempeño. Este proceso se hizo como se explica a continuación.

**Tabla 5.** Combinación de variables de entrada y reglas difusas.

Velocity	Var2	Depth	Var4	Cover	Var6	Suitability
V.Low	and	D.Low	and	C.Low	->	Low
V.High	and	D.Low	and	C.Low	->	Low
V.Low	and	D.High	and	C.Low	->	High
V.High	and	D.High	and	C.Low	->	Low
V.Low	and	D.Low	and	C.High	->	Low
V.High	and	D.Low	and	C.High	->	High
V.Low	and	D.High	and	C.High	->	High
V.High	and	D.High	and	C.High	->	High

Una vez definido el modelo inicial, se puede calibrar modificando tanto los parámetros que definen los conjuntos difusos, de cada variable, como las reglas difusas. En el caso de las tres especies objetivo, se hizo la calibración utilizando todo el conjunto de datos empíricos tomados en campo; al final de dicha calibración los indicadores de ajuste mencionados antes fueron calculados. Se muestra un ejemplo del modelo construido en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Ejemplo de indicadores de desempeño de un modelo FRBS.

<b>Indicador</b>	<b>valor</b>
Sensibilidad (Sn)	0.78
Especificidad (Sp)	0.60
TSS	0.38

#### 4.3.4. Evaluación del hábitat físico

Para la evaluación del hábitat físico en el tramo de estudio se utilizaron los modelos de idoneidad del hábitat para cada especie de pez (y talla) y los resultados de las simulaciones para cada caudal considerado. Así, las curvas de Hábitat Potencial Útil - Caudal (HPU - Q) resultantes se han considerado como indicadores de la disponibilidad y calidad del hábitat a medida que cambia el caudal. La evaluación del hábitat se llevó a cabo en el lenguaje de programación *R*, utilizando un código específico desarrollado al efecto. Además, para asignar un valor de HPU más allá del caudal máximo simulado (30 m<sup>3</sup>/s), se realizó una extrapolación utilizando la función *approxExtrap* en *R*.

No todas las clases de talla están presentes a lo largo del año. Por tanto, es importante mencionar que para desarrollar un adecuado análisis de las series de HPU, se tuvo en cuenta los periodos biológicamente significativos, siendo crítica para la talla 1 (T1) el periodo de mayo a septiembre, para la talla 2 (T2) de octubre a abril y para la talla 3 (T3) todo el año. Hay que recordar que las tres especies pertenecen a la familia de los ciprínidos, por lo cual en este trabajo se simplificaron uniendo para todos los mismos periodos según tallas.

#### 4.3.5. Cálculo de HPU total

Se procedió a calcular las HPU totales para todas las especies de peces incluidas en este estudio, considerando todos los escenarios. Este cálculo consiste en la suma de los valores mensuales de HPU para cada horizonte temporal contemplado. Después, se realizaron comparaciones entre los valores obtenidos para cada especie y escenario, como se ha hecho en estudios previos (Morid et al., 2020; Papadaki et al., 2016; Zhang et al., 2019).

#### 4.3.6. Determinación de la cantidad de meses con HPU menores a 30% y 50%

Con el fin de realizar un análisis que indique las repercusiones de los caudales ecológicos con respecto a la normativa actual (en función de porcentaje del HPU total, para cada especie y talla), y que tenga un significado claro para cada escenario contemplado en su conjunto, se calculó la frecuencia de meses en la serie temporal con HPU menores a los umbrales 30% y 50%, que aparecen indicados en la Instrucción de Planificación Hidrológica de España (Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre). Análisis similares han sido realizados en estudios previos (Viganò et al., 2016). Estos cálculos se realizaron mediante código específicamente creado en lenguaje *R*.

#### 4.3.7. Cálculo del número de meses consecutivos con HPU que no superan a 30%, 50%

Aunque el análisis previamente mencionado tiene una significación general para cada escenario, otro factor relevante para la fauna acuática es la continuidad de los períodos de caudal bajo. Por ejemplo, no es lo mismo tener caudales bajos y un hábitat muy limitante durante 3 meses consecutivos cada año, de modo regular en la época estival (propia del clima mediterráneo), que tener caudales de la misma magnitud repartidos en 3 meses de modo discontinuo durante el año. Así pues, el número de meses consecutivos en que la serie temporal de HPU no supera los umbrales 30%, 50% de HPU, se calculó mediante la función *rle* de *R*.

## 5. RESULTADOS

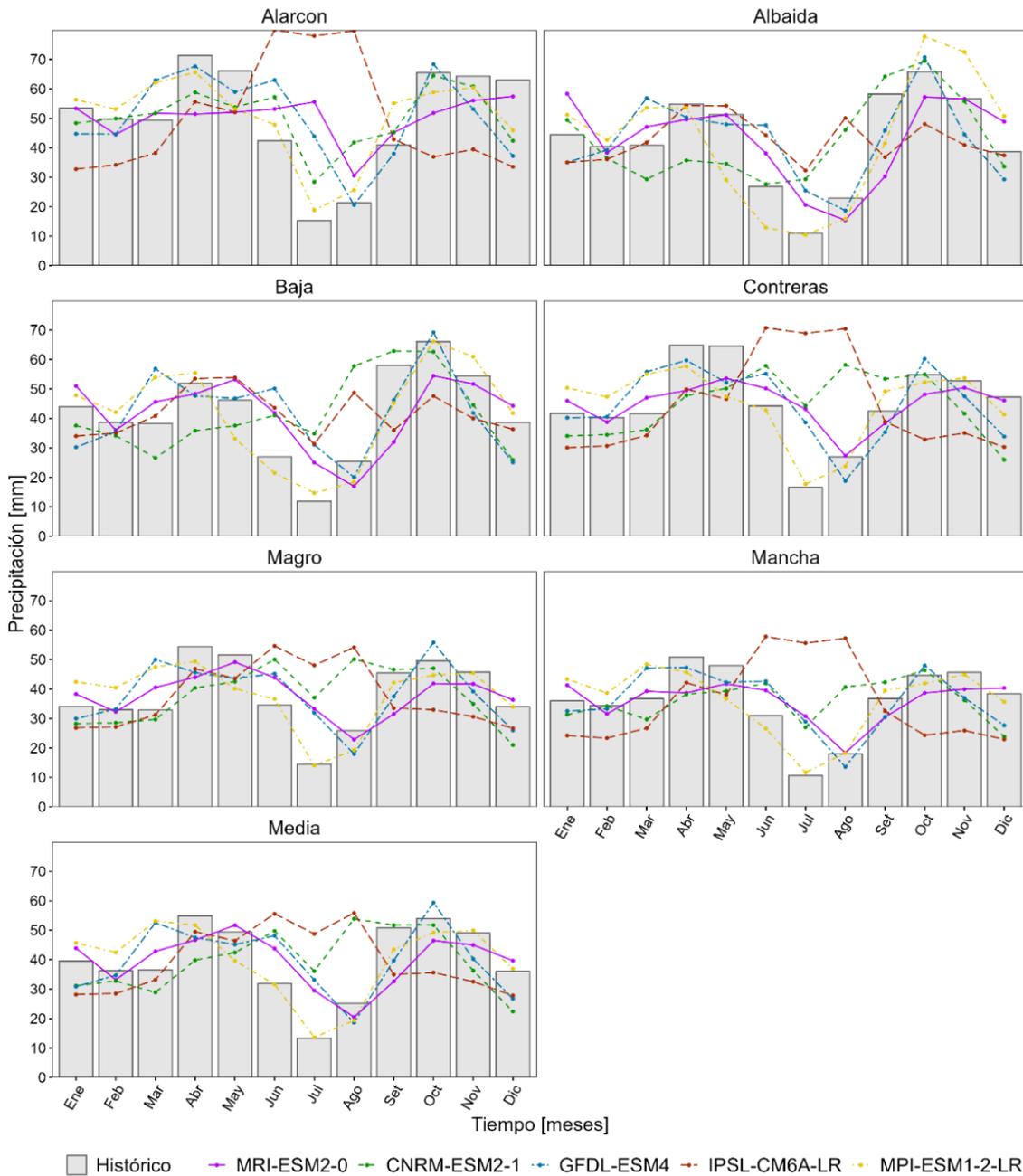
### 5.1. Escenarios de cambio climático

Puesto que los cálculos climáticos para distintos escenarios son datos clave para las siguientes fases del trabajo, se ilustran aquí los resultados esenciales, que pueden resultar útiles para otros investigadores. Los cambios a largo plazo de la precipitación y temperatura mensual sobre las siete subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Júcar se han observado durante el período de 2022 a 2100. Estos cambios han sido analizados mediante la aplicación de un enfoque de promedio multimodelo, como se explicó anteriormente, y se ha desglosado en las siguientes secciones.

#### 5.1.1. Precipitación

La Figura 17 muestra los cambios en la precipitación media mensual para el periodo histórico (1980-2014) de los cinco modelos de cambio climático, obteniéndose que la precipitación simulada de los modelos MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM-0 y GFDL-ESM4 proporcionan el mejor ajuste a la precipitación mensual. En cambio, los modelos CNRM-ESM2-1 y IPSL-CM6A-LR sobrestiman la precipitación en verano y subestiman ligeramente en otoño.

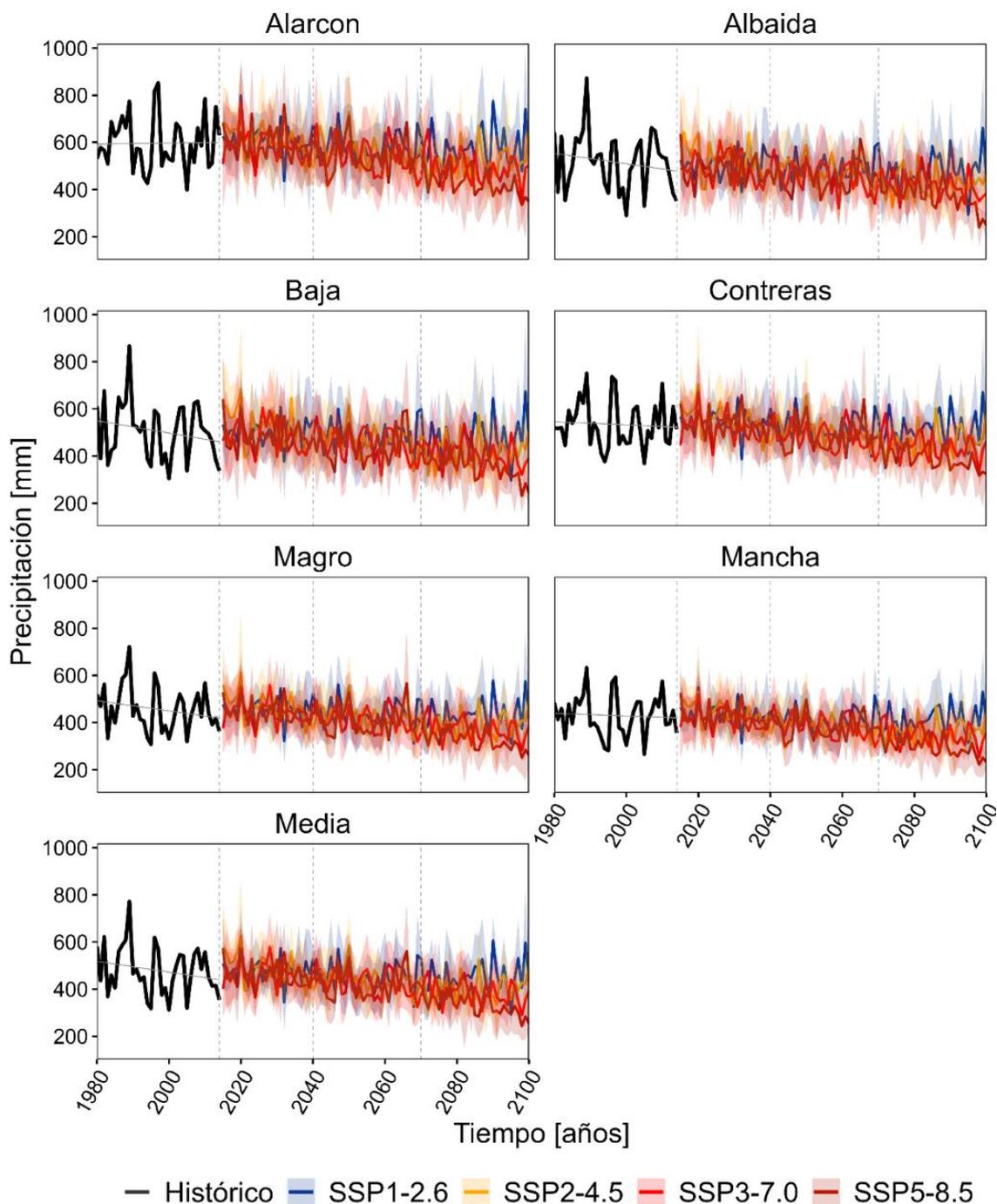
En relación con el cambio de la precipitación mensual durante el período de referencia considerado, se ha observado un patrón general hacia la disminución en el período futuro. Sin embargo, es importante destacar que esta disminución varía dependiendo de los diferentes escenarios SSP considerados (Figura 18). En particular, el escenario SSP5-8.5 proyecta la mayor reducción en la precipitación mensual, estimándose en aproximadamente un 30% para el año 2100, siguiendo casi la misma proporción de reducción el escenario SSP3-7.0. Por otro lado, el escenario SSP2-4.5 presenta el menor decremento, con una disminución cercana al 5% para el mismo período. En cuanto al escenario SSP1-2.6, se observa una mayor oscilación en su comportamiento proyectado. Además, es preciso señalar que la mayor variabilidad en los cambios de precipitación mensual se evidencia en el horizonte lejano, es decir, entre los años 2070 y 2100.



**Figura 17.** Precipitaciones medias mensuales observadas frente a las simuladas (modelos climáticos) en el periodo histórico considerado de 35 años (1980-2014).

También es interesante profundizar en las particularidades de la subcuenca de La Mancha. Aunque es innegable que sus contribuciones están condicionadas por las dinámicas de la cuenca aguas arriba, abordar sus posibles cambios es crucial, pues estos pueden ejercer un rol determinante en las futuras demandas agrícolas dentro de esta subcuenca. Como se visualiza en la Figura 18, la mayoría de los escenarios

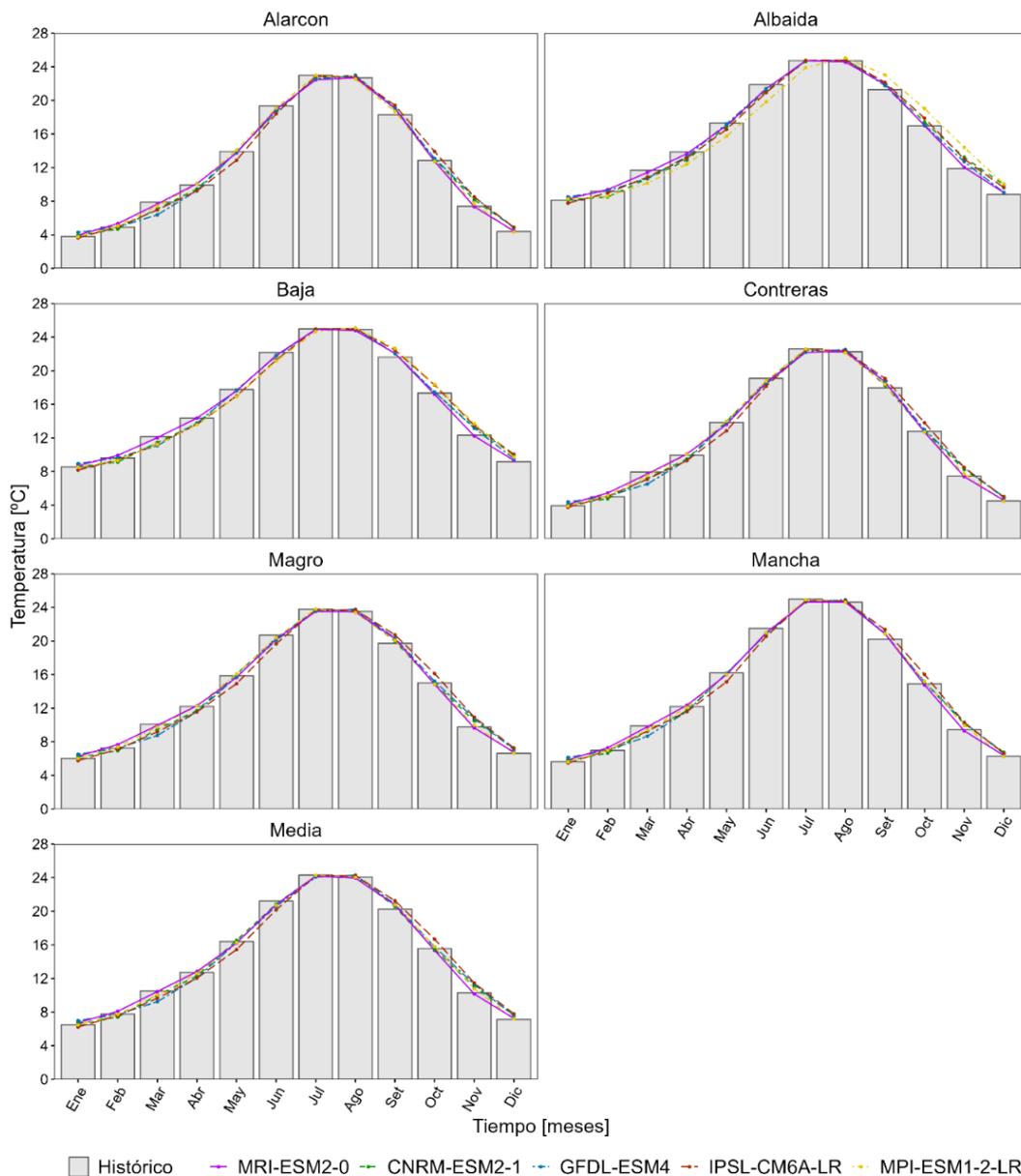
sugieren una marcada reducción en la precipitación en los años venideros, particularmente bajo la proyección del escenario SSP5-8.5.



**Figura 18.** Variación de la precipitación mensual desde 1980 hasta 2100 considerando cuatro escenarios de cambio climático. Las líneas verticales separan los horizontes temporales (periodo histórico y horizontes futuros).

### 5.1.2. Temperatura

Del mismo modo que en el apartado anterior, la Figura 19 muestra la variación de la temperatura media mensual para el periodo histórico (1980-2014) de la serie observada y los cinco modelos de cambio climático. Todos los modelos muestran un buen ajuste a la hora de reproducir la temperatura, con pequeñas diferencias entre ellos, y un comportamiento similar. En todos ellos se observa que, en los meses de marzo y abril, los valores de temperatura simulados están ligeramente por debajo del registro histórico medido.

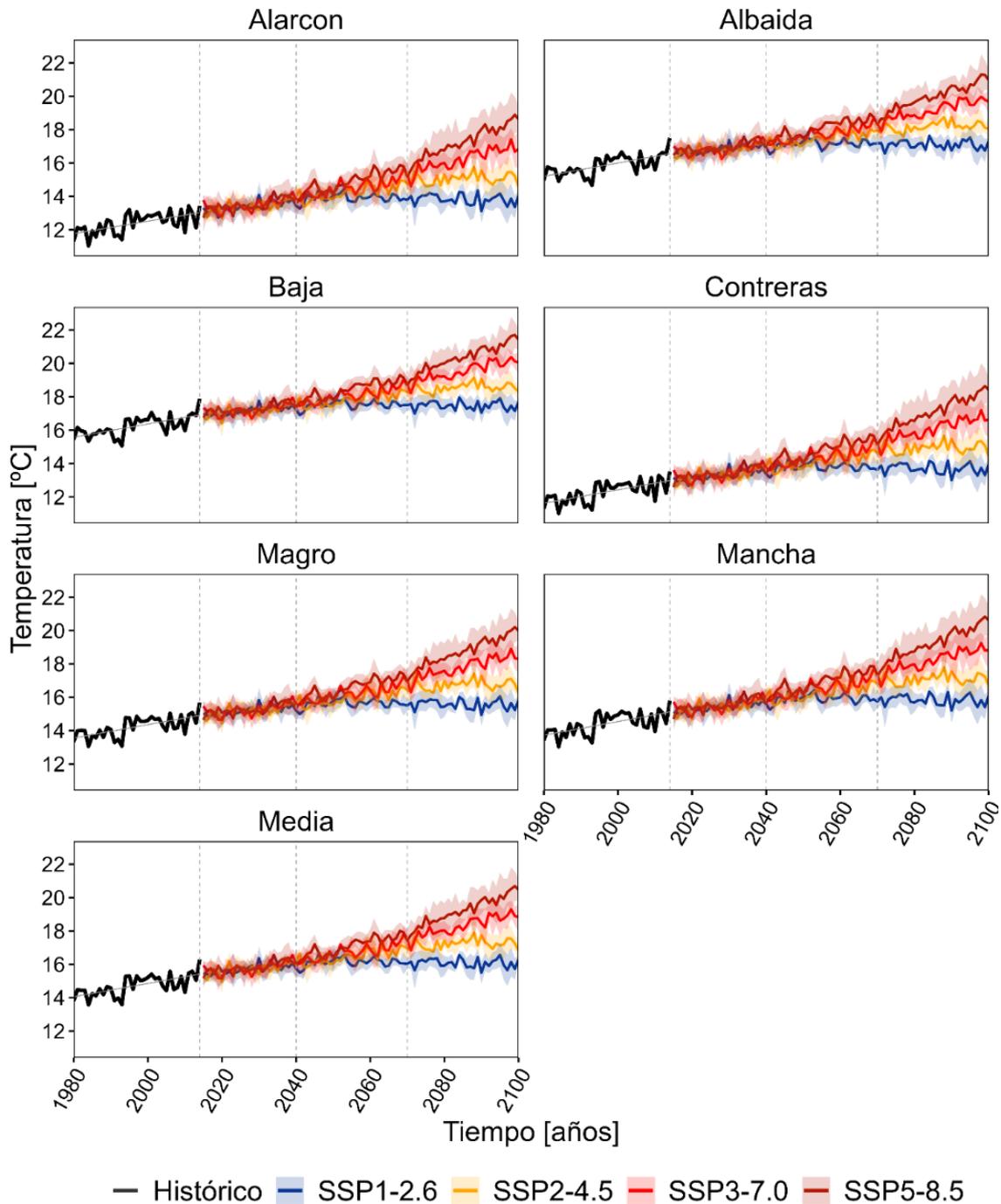


**Figura 19.** Temperaturas medias mensuales observadas frente a las simuladas (modelos climáticos) del periodo de histórico (1980-2014).

En cuanto a la variación a largo plazo de la temperatura media mensual, todos los modelos climáticos y en todos los escenarios SSP, predicen un aumento como se muestra en la Figura 20. Además, como tendencia general, dicho incremento es más significativo en el escenario SSP5-8.5 en comparación con el escenario SSP1-2.6, con un intervalo aproximado de 4°C y de 1.2°C para dichos escenarios, respectivamente.

En detalle, los modelos indican una señal de calentamiento más intensa, proyectando un incremento notable de alrededor de 3°C y 4°C para finales de siglo en los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5, respectivamente. Asimismo, se espera que el aumento de la temperatura de los escenarios SSP1-2.6 y SSP2-4.5 sea menos significativa que para los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5 en toda la cuenca hidrográfica del Júcar. La temperatura aumentó a un ritmo similar en los cuatro escenarios durante la mitad del siglo, mientras que se prevé que el ritmo de aumento de la temperatura sea rápido durante el horizonte lejano en todos los escenarios. La magnitud del aumento de la temperatura con el SSP5-8.5 fue la mayor, seguida del SSP3-7.0, SSP2-4.5 y el SSP1-2.6.

Si nos enfocamos en la subcuenca de La Mancha, se percibe un incremento notable en la temperatura. Para el año 2100, se proyecta que la temperatura superará en +3°C la media del periodo histórico (1982-2012) bajo el escenario más pesimista (SSP5-8.5), mientras que, en el caso del escenario más optimista (SSP1-2.6), se anticipa un aumento de 1.3 °C. Estos mismos patrones se reflejan en las otras seis subcuencas que conforman la cuenca del Júcar, con pequeñas variaciones en la magnitud de incremento.



**Figura 20.** Variación de la temperatura media mensual desde 1980 hasta 2100 considerando cuatro escenarios de cambio climático. Las líneas verticales separan los horizontes temporales.

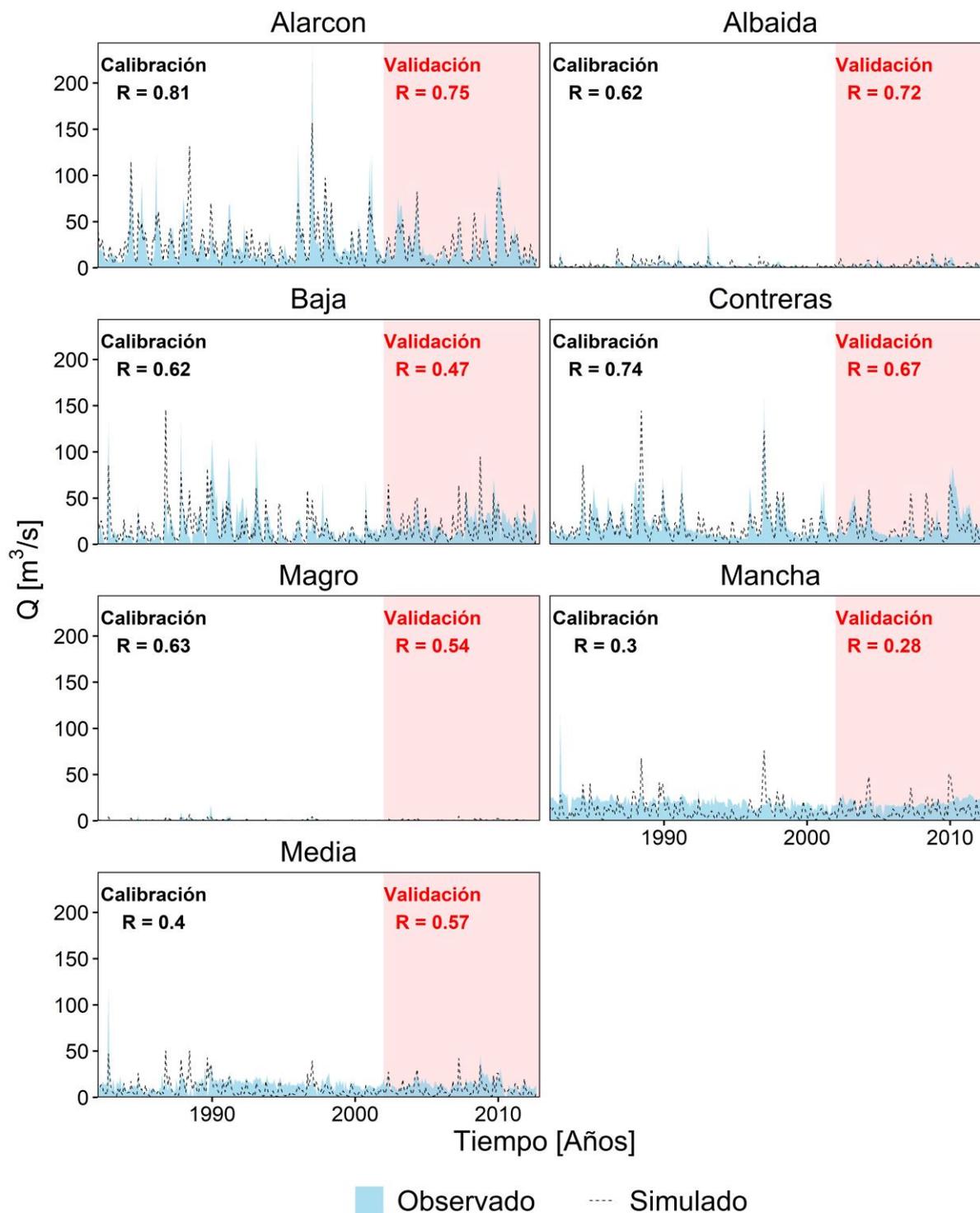
## 5.2. Modelización hidrológica

### 5.2.1. Calibración y validación del modelo de Témez

El modelo hidrológico de Témez fue calibrado utilizando datos mensuales de aportaciones de agua provenientes de siete estaciones hidrológicas, abarcando el período comprendido entre 1982 y 2005. Posteriormente, se procedió a validar dicho modelo para el período 2006-2012. Los valores resultantes de la optimización de los parámetros fundamentales del modelo se detallan en el Anexo 1. Para una mejor comprensión, las series de aportaciones simuladas mensuales, inicialmente expresadas en  $\text{hm}^3/\text{mes}$ , fueron convertidas a  $\text{m}^3/\text{s}$ . En la Figura 21 se puede apreciar la comparación entre los caudales simulados y los observados de las estaciones utilizadas, aportando una imagen global del grado de ajuste del modelo.

Se puede apreciar que los caudales base y los picos son representados de manera bastante eficiente por el modelo. No obstante, se observan discrepancias significativas entre los caudales simulados y los observados en las subcuencas de La Mancha y Media, donde las diferencias son más pronunciadas.

Los estadísticos de desempeño, tales como el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el coeficiente de correlación (R), proporcionan evidencia concluyente de que el modelo hidrológico de Témez ha funcionado de manera adecuada tanto durante el período de calibración como durante el de validación, tal como se muestra en la Tabla 7. Durante el proceso de calibración, se obtuvieron valores máximos y mínimos de R de 0.81 y 0.30, respectivamente. Para el período de validación, estos valores fueron de 0.75 y 0.28, respectivamente. En cuanto al NSE, se observaron valores máximos de 0.65 y 0.60, y mínimos de 0.10, tanto para el período de calibración como para el de validación.



**Figura 21.** Caudales simulados y observados tras los periodos de calibración (1982-2006) y validación (2006-2012) en las siete subcuencas de la cuenca del Júcar. El caudal simulado se ha calculado a partir de los datos ERA5\_Land.

**Tabla 7.** Estadísticos de desempeño del modelo hidrológico en cada subcuenca.

Subcuenca	Calibración		Validación	
	NSE	R	NSE	R
Alarcón	0.65	0.81	0.60	0.75
Mancha	0.10	0.30	0.10	0.28
Contreras	0.46	0.74	0.37	0.67
Media	0.15	0.40	0.10	0.57
Baja	0.27	0.62	0.15	0.47
Magro	0.39	0.63	0.36	0.54
Albaida	0.37	0.62	0.51	0.72

En consecuencia, el rendimiento global del modelo hidrológico de Témex durante los períodos de calibración y validación ha demostrado ser aceptable, lo que ha permitido su utilización en la simulación de series de aportaciones futuras. Sin embargo, resulta importante destacar que la estimación precisa de los caudales presenta ciertas dificultades, especialmente en la zona de La Mancha, debido a las complejas interacciones hidrológicas que se desarrollan, como se discute en detalle más adelante.

#### 5.2.2. Análisis de gestión del sistema de recursos hídricos

Una vez determinadas las series de aportaciones históricas y futuras, se utilizó el modelo de gestión de recursos hídricos (en el software GAMS) para simular el comportamiento del sistema bajo las reglas de operación actuales. La simulación de cada escenario se ha realizado reemplazando los datos históricos por aquellos procedentes de los escenarios de cambio climático, obtenidos anteriormente.

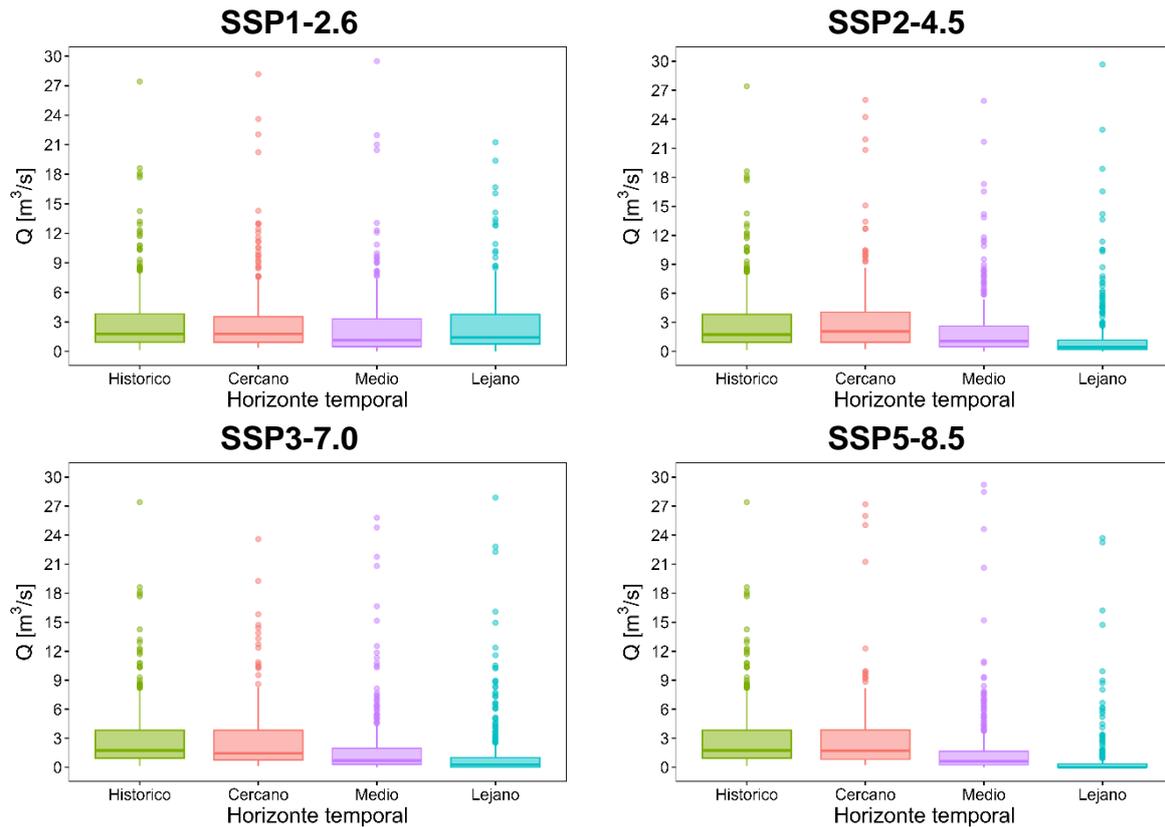
Se realizaron simulaciones para cuatro escenarios de cambio climático y tres horizontes temporales específicos, como se muestra en la Tabla 8. Los caudales se presentan tanto en valores absolutos ( $m^3/s$ ) como en porcentaje de cambio con respecto al caudal medio histórico (1982-2012).

**Tabla 8.** Evolución del caudal en el tramo Madrigueras como porcentaje del caudal medio en el periodo 2021-2100. Los caudales se presentan tanto en valores absolutos ( $m^3/s$ ) como en porcentaje de cambio con respecto al caudal medio en el período observado ( $2.73 m^3/s$ ).

Escenario	Caudal ( $m^3/s$ )		
	Cercano (2021-2040)	Medio (2041-2070)	Lejano (2071-2100)
SSP1-2.6	3.31 (11.6%)	2.41 (-18.7%)	2.73 (-8.0%)
SSP2-4.5	3.33 (12.3%)	2.28 (-23.3%)	1.43 (-51.8%)
SSP3-7.0	2.97 (0.0%)	1.86 (-37.2%)	1.34 (-54.7%)
SSP5-8.5	3.03 (2.1%)	1.81 (-39.1%)	0.79 (-73.5%)
Promedio	3.16 (6.5%)	2.09 (-29.6%)	1.57 (-47.0%)

Los resultados de los caudales circulantes en el tramo Madrigueras revelan un incremento leve en el corto plazo (2021-2040), con un promedio del +6.5%. Sin embargo, en el escenario SSP3-7.0 no se aprecian ningún cambio significativo en el caudal. En el horizonte medio (2041-2070), se evidencia una disminución del caudal en todos los escenarios, lo que resulta en una disminución media del 29.6% con respecto al caudal histórico. Así el escenario SSP1-2.6 presenta la menor disminución en el caudal (-18.7%), mientras que el escenario SSP5-8.5 muestra la reducción más pronunciada (-39.1%). Igualmente, durante el horizonte lejano, se proyecta una disminución de caudal mucho mayor en todos los escenarios, con valores que van desde el -8.0% hasta el -73.5%, con un promedio del -47%.

Asimismo, en la Figura 22 se representa de modo resumido la distribución de los caudales en el tramo Madrigueras, observándose una tendencia general a la disminución del caudal a medida que se avanza en el tiempo. En el horizonte cercano, se observa un ligero aumento o estabilidad en el caudal, pero a partir del horizonte medio, se registran reducciones significativas en todos los escenarios. En particular, el horizonte lejano muestra las mayores disminuciones en el caudal, con el escenario SSP5-8.5 presentando la reducción más drástica; lo cual tendrá un impacto significativo en la disponibilidad del recurso hídrico futuro.



**Figura 22.** Gráfico de cajas y bigotes de los caudales en diferentes horizontes temporales y escenarios de cambio climático.

### 5.3. Simulación del hábitat físico

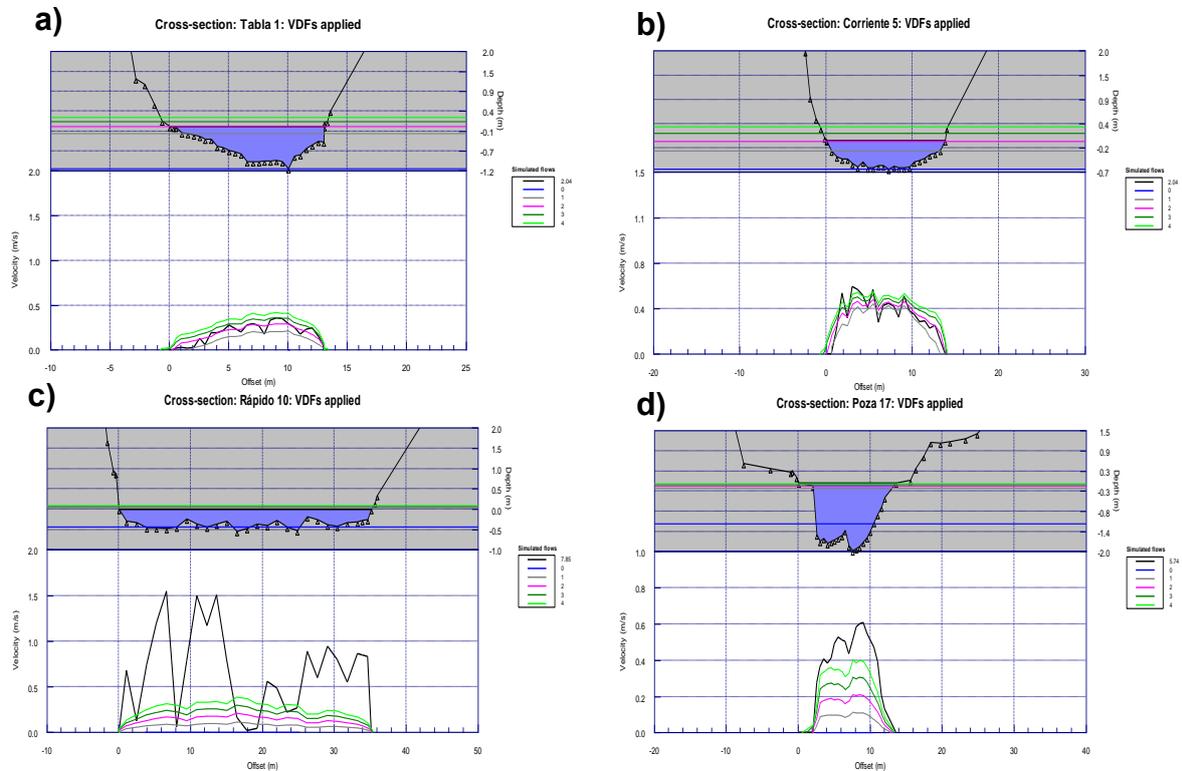
A continuación, se analizan los efectos de las variaciones de caudal sobre la idoneidad del hábitat. Estas evaluaciones se llevaron a cabo para las tres especies de peces consideradas, en los cuatro escenarios de cambio climático y tres horizontes temporales.

#### 5.3.1. Simulación hidráulica

El modelo hidráulico disponible fue utilizado para simular caudales en un rango de 0.08 a 45 m<sup>3</sup>/s, asegurándonos previamente de que estos caudales estuvieran dentro de los márgenes medidos en el cauce. Es preciso señalar que en el tramo de estudio se midieron las condiciones hidráulicas en campo con un caudal máximo de 7.85 m<sup>3</sup>/s mediante un equipo ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler).

Es importante considerar que simular un caudal de 45 m<sup>3</sup>/s resulta bastante elevado teniendo en cuenta las condiciones hidráulicas del segmento fluvial estudiado. Por lo tanto, podríamos considerar que a partir de 24 m<sup>3</sup>/s la incertidumbre en los resultados

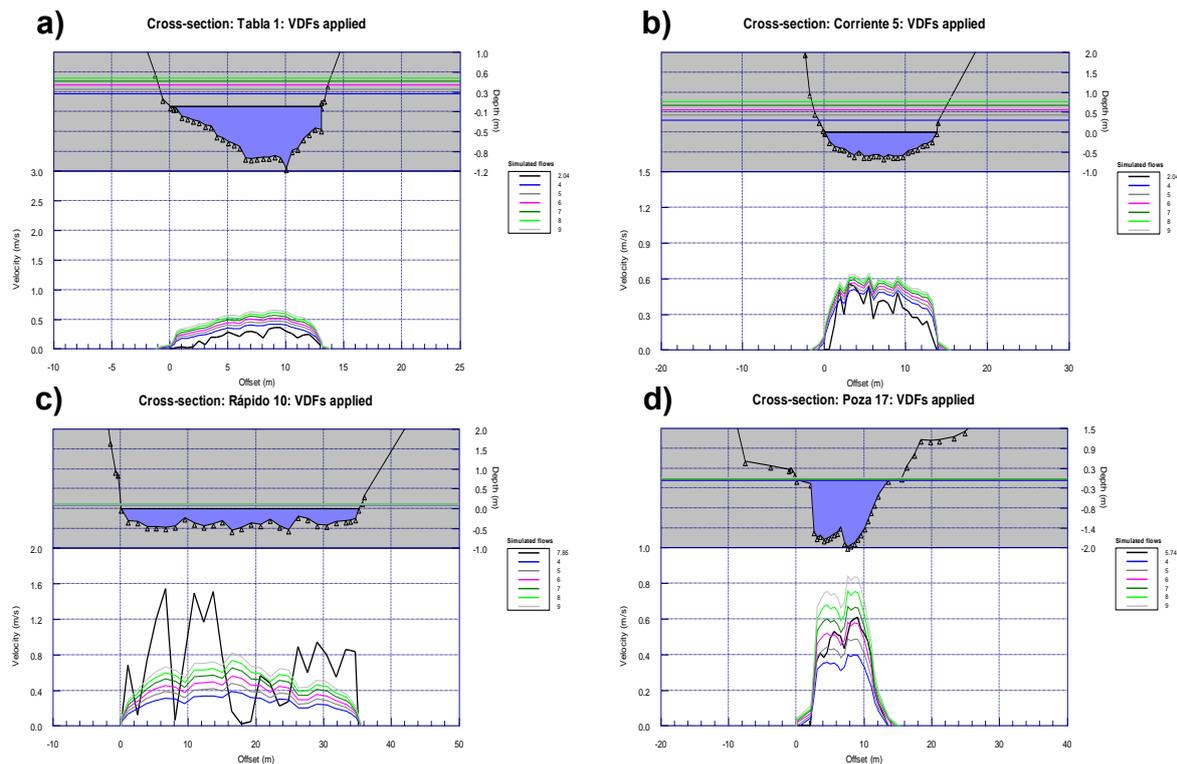
se incrementa considerablemente, aunque la frecuencia de esos caudales es baja y no afecta significativamente a los resultados globales del análisis.



**Figura 23.** Simulaciones hidráulicas de caudales entre 0 y 4 m<sup>3</sup>/s en varias secciones transversales de distintos tipos de mesohabitats: a) tabla, b) corriente, c) rápido y d) poza.

Esta incertidumbre, sin embargo, depende también de los resultados de la simulación del hábitat, ya que podrían indicar resultados relativamente estables, con poca influencia de los errores hidráulicos que puedan inducirse en la modelización; esto se analiza por tanto en secciones posteriores. Para una mejor visualización de los resultados del modelo, se presenta la Figura 23, que ilustra los resultados hidráulicos en varias secciones transversales de distintos tipos de mesohabitats, en el rango de 0 a 4 m<sup>3</sup>/s.

Del mismo modo, en la Figura 24 se visualizan los resultados hidráulicos en varias secciones transversales de distintos tipos de mesohabitats en el rango de 4 a 9 m<sup>3</sup>/s.

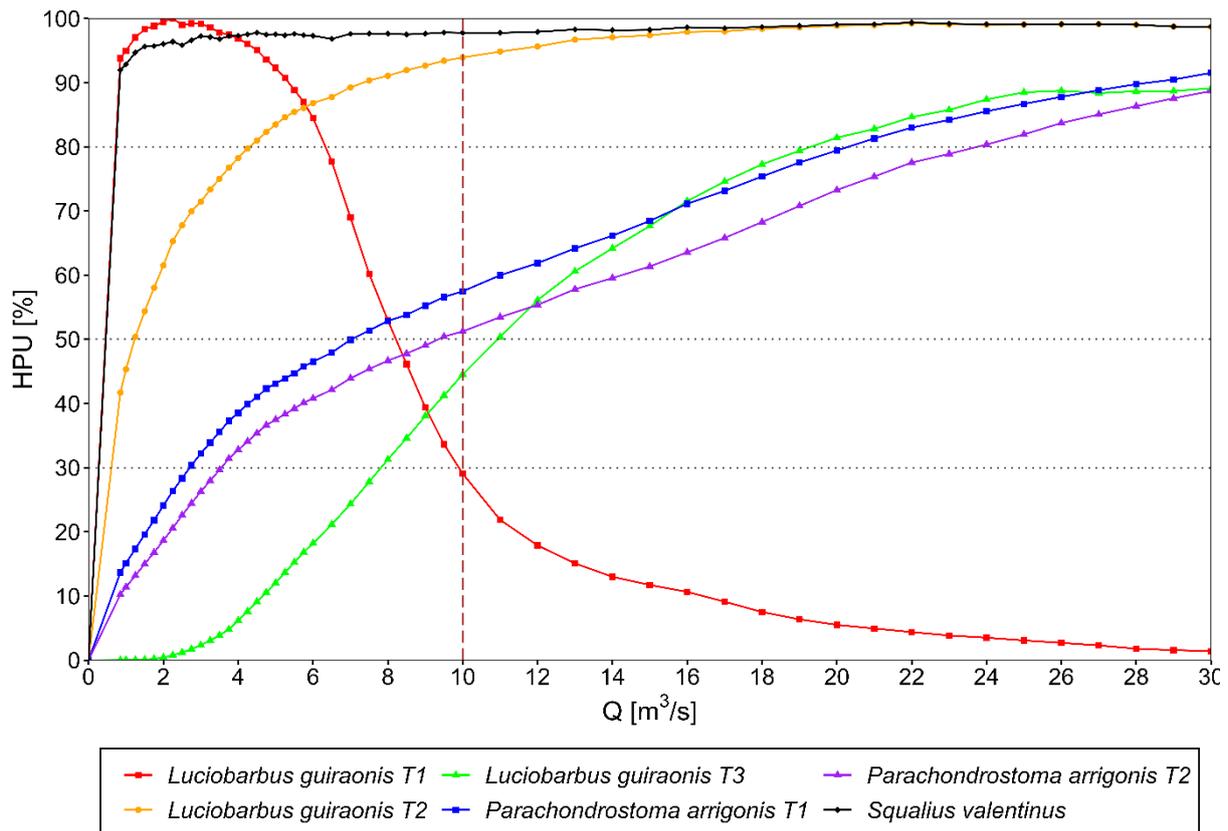


**Figura 24.** Simulaciones hidráulicas de caudales entre 4 y 9 m<sup>3</sup>/s en varias secciones transversales de distintos tipos de mesohábitats: a) tabla, b) corriente, c) rápido y d) poza.

Es relevante tener en cuenta que los valores correspondientes a caudales bajos y medios pueden considerarse más realistas y confiables, en contraste con los valores correspondientes a caudales muy altos, que podrían presentar una menor fiabilidad de modelación. Sin embargo, es importante destacar que estos valores mostraron tendencias coherentes en relación con el resto de los datos.

### 5.3.2. Curvas HPU-Q

Los resultados obtenidos a partir de la simulación del hábitat se presentan en forma de curvas HPU-Q para las tres especies de peces y diferentes tallas, como se visualiza en la Figura 25. La mayoría de las curvas HPU-Q muestran un comportamiento ascendente a medida que el caudal aumenta, alcanzando asíntotas en torno a los 20 m<sup>3</sup>/s, lo cual concuerda con la morfología del cauce. Asimismo, en la mayoría de las especies y tallas, las curvas muestran un incremento de forma parabólica o sigmoïdal. Cabe señalar que más allá del caudal máximo simulado (30 m<sup>3</sup>/s), el valor de HPU se estimó como una constante, igual al valor máximo de HPU.



**Figura 25.** Curvas de hábitat potencial útil versus caudal (HPU-Q) estimadas mediante sistemas basados en reglas difusas (FRBS) en %, con respecto al máximo HPU de la serie. La línea vertical del valor  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  indica el caudal medio anual en este tramo de río (régimen regulado) según el Plan Hidrológico del Júcar (2021-27).

Con respecto al barbo, se observa que las curvas correspondientes a la talla 2 (T2) y la talla 3 (T3) presentan una tendencia ascendente a medida que el caudal aumenta, aunque el barbo T2 muestra una asíntota en niveles más bajos de caudal en comparación con el barbo T3. En el caso del barbo talla 1 (T1), el más pequeño, se evidencia un óptimo en caudales inferiores al resto (entre 2 y  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ), seguido de un descenso de la curva a partir de los  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Las curvas HPU-Q correspondientes a las tallas 1 y 2 de la loína (T1 y T2) muestran un incremento paralelo, y monótonamente creciente, aunque reducen su pendiente en torno a los  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Es importante mencionar que la curva HPU-Q correspondiente al cachuelo valenciano alcanza rápidamente su asíntota a partir de 90% de HPU, motivo por el cual, esta especie no se considera en los análisis posteriores, ya que su relación con el caudal parece no mostrar apenas variación (salvo caudales muy bajos) según estos análisis.

### 5.3.3. Evaluación del HPU total

Los resultados de HPU total (suma acumulada durante el periodo respectivo) muestran los valores para diferentes especies de peces en distintos escenarios y horizontes temporales. Las subsecciones siguientes detallan los resultados por especies y tallas.

Como se ha comentado en la sección anterior, la curva de HPU de *Squalius valentinus* alcanza su asíntota rápidamente y se mantiene constante en diversos caudales, generando una serie temporal invariable. Por ello, no se aplicó el análisis de HPU total.

#### 5.3.3.1. Barbo - *Luciobarbus guiraonis*

Los cambios porcentuales del HPU total del barbo se puede apreciar en la Tabla 9, demostrando una clara reducción en todos los escenarios y horizontes temporales analizados.

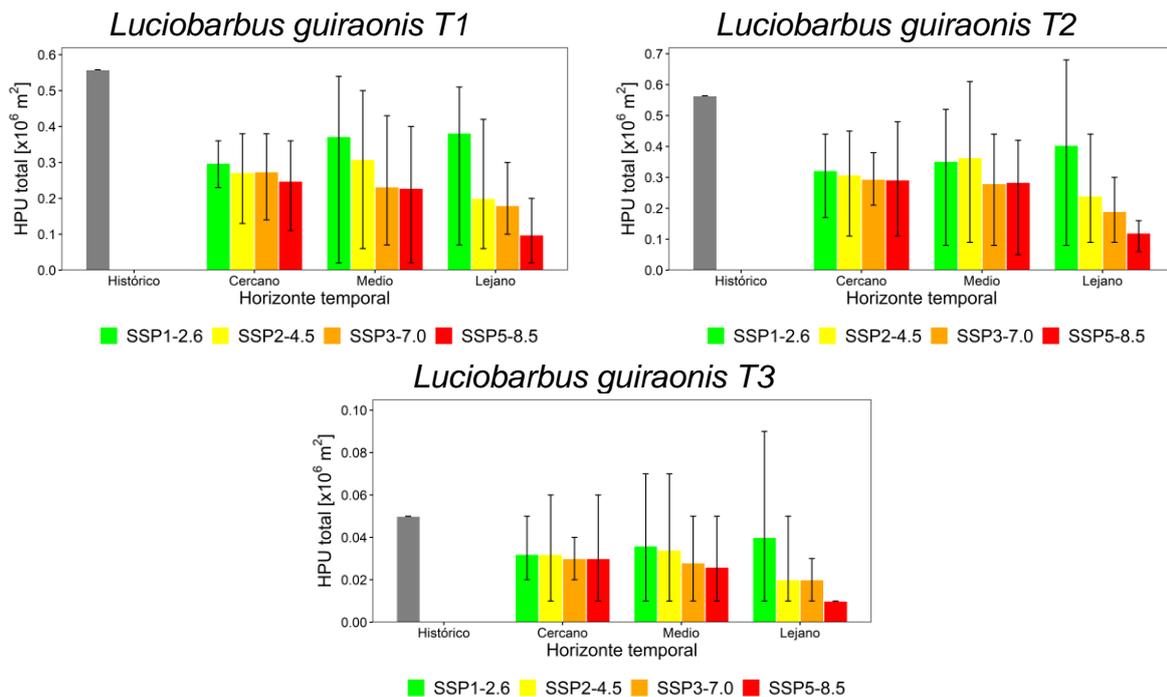
En relación con la talla 1, se observa una reducción gradual del HPU total, que es mayor al cambiar de escenario desde el SSP1-2.6 hasta el SSP5-8.5 y que también es en general mayor para los periodos temporales más lejanos. Específicamente, para el año 2100, se proyectan reducciones de HPU total que varían desde el 32% hasta el 82% en comparación con el periodo histórico, para los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5, respectivamente. Esta es la talla más vulnerable, al ser los de menor talla y mayor sensibilidad a los efectos del deterioro en calidad de agua y en el hábitat en general.

**Tabla 9.** Cambios porcentuales en el HPU total ( $\times 10^6 \text{ m}^2$ ) de *Luciobarbus guiraonis* de tres clases de talla bajo escenarios de cambio climático y en tres horizontes temporales, con respecto al periodo histórico de referencia.

Horizonte temporal	Escenario	<i>Luciobarbus guiraonis</i>		
		T1	T2	T3
	Histórico	0.56	0.56	0.05
Cercano (2022-2040)	SSP1-2.6	0.3 (-47%)	0.32 (-43%)	0.03 (-36%)
	SSP2-4.5	0.27 (-51%)	0.31 (-45%)	0.03 (-36%)
	SSP3-7.0	0.27 (-51%)	0.29 (-48%)	0.03 (-40%)
	SSP5-8.5	0.25 (-56%)	0.29 (-48%)	0.03 (-40%)
Medio (2041-2070)	SSP1-2.6	0.37 (-33%)	0.35 (-38%)	0.04 (-28%)
	SSP2-4.5	0.31 (-45%)	0.36 (-35%)	0.03 (-32%)
	SSP3-7.0	0.23 (-58%)	0.28 (-50%)	0.03 (-44%)
	SSP5-8.5	0.23 (-59%)	0.28 (-50%)	0.03 (-48%)
Lejano (2071-2100)	SSP1-2.6	0.38 (-32%)	0.4 (-28%)	0.04 (-20%)
	SSP2-4.5	0.2 (-64%)	0.24 (-57%)	0.02 (-60%)
	SSP3-7.0	0.18 (-68%)	0.19 (-66%)	0.02 (-60%)
	SSP5-8.5	0.1 (-82%)	0.12 (-79%)	0.01 (-80%)

En cuanto a la talla 2 (T2), la pérdida del HPU total sigue un patrón similar que la talla 1, revelando que, hacia el final del horizonte cercano, considerando los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5, se espera una pérdida del 48%. A medida que avanzamos en el tiempo, la reducción es similar (50%) al final del horizonte medio (2041-2070), en cambio se estima que llegue al -66% o al -79% en el año 2100, en los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5, respectivamente.

Respecto a la talla 3 (T3), es importante destacar que el HPU total histórico presenta un valor significativamente más bajo, con  $0.05 \times 10^6 \text{ m}^2$ , en comparación con las tallas 1 y 2 ( $0.56 \times 10^6 \text{ m}^2$ ). La disminución del HPU total se intensifica en el horizonte lejano, pero solo en los escenarios más pesimistas, con un rango de valores entre el -20% y -80% en los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5, respectivamente.



**Figura 26.** Variación del HPU total del *Luciobarbus guiraonis* bajo escenarios de cambio climático y horizontes temporales. Los bigotes representan la variación del valor HPU total entre años (se calcula el HPU total por año), mientras la columna representa el valor medio de HPU total en cada periodo considerado (generalmente, 30 años).

Además, la Figura 26 ilustra los cambios en el HPU total, mostrando la situación de referencia (histórico) junto con las proyecciones en diferentes escenarios de cambio climático. El impacto del cambio climático se evidencia en la disminución de los HPU totales para las tres tallas de barbo, con reducciones que alcanzan hasta un alarmante 80% según los escenarios y horizontes temporales analizados. Es importante destacar que este efecto se maximiza en el escenario SSP5-8.5 y durante el periodo de 2070-2100, mientras que resulta menos pronunciado en el escenario SSP1-2.6, en comparación con el periodo histórico.

### 5.3.3.2. Loína - *Parachondrostoma arrigonis*

En la Tabla 10 se presentan los cambios porcentuales en el HPU total de la loína, revelando una reducción en todos los escenarios y horizontes temporales analizados.

Al analizar la talla 1, se observa que en el periodo histórico (referencia) el valor de HPU total es de  $0.19 \times 10^6 \text{ m}^2$ , el cual va disminuyendo gradualmente según los horizontes temporales. En el horizonte temporal cercano (2022-2040), se observa una reducción porcentual que alcanza un máximo del -47% (escenario SSP3-7.0). A

medida que avanzamos hacia el horizonte medio, esta disminución se incrementa ligeramente hasta llegar a un  $-52\%$  (escenario SSP5-8.5). Sin embargo, es en el horizonte lejano donde se registra una reducción significativamente mayor, llegando a alcanzar un  $-80\%$ .

En cuanto a la talla 2, el HPU total de referencia se establece en  $0.34 \times 10^6 \text{ m}^2$ , lo que representa aproximadamente el doble de la talla 1. Al igual que en aquella, se observa un patrón de disminución progresivo en el HPU total a medida que avanzamos en los horizontes temporales. En el horizonte cercano, se registra una reducción porcentual de hasta un  $-47\%$  (escenario SSP3-7.0), seguido de un  $-49\%$  (escenario SSP5-8.5) en el horizonte medio. Se produce un salto, en el horizonte lejano, con la disminución más pronunciada que llega a alcanzar un  $-79\%$  (escenario SSP5-8.5).

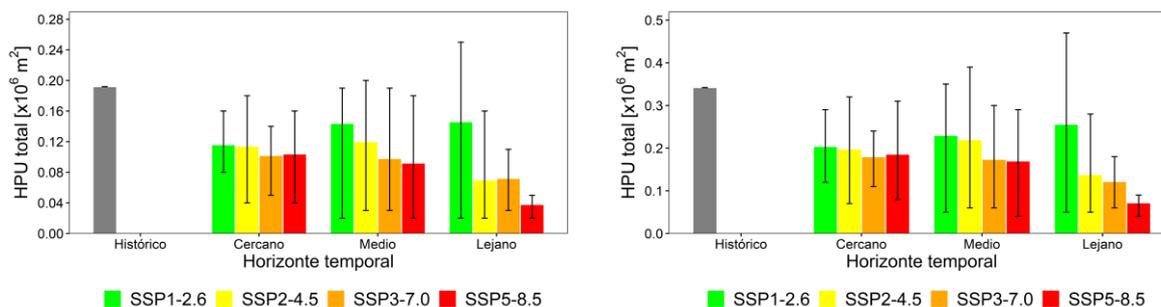
**Tabla 10.** Cambios porcentuales en el HPU total ( $\times 10^6 \text{ m}^2$ ) de *Parachondrostoma arrigonis* en diferentes tallas bajo escenarios de cambio climático y horizontes temporales.

Horizonte temporal	Escenario	<i>Parachondrostoma arrigonis</i>	
		T1	T2
	Histórico	0.19	0.34
Cercano (2022-2040)	SSP1-2.6	0.12 (-40%)	0.20 (-40%)
	SSP2-4.5	0.11 (-41%)	0.20 (-42%)
	SSP3-7.0	0.10 (-47%)	0.18 (-47%)
	SSP5-8.5	0.10 (-46%)	0.19 (-46%)
Medio (2041-2070)	SSP1-2.6	0.14 (-25%)	0.23 (-33%)
	SSP2-4.5	0.12 (-38%)	0.22 (-36%)
	SSP3-7.0	0.10 (-49%)	0.17 (-49%)
	SSP5-8.5	0.09 (-52%)	0.17 (-50%)
Lejano (2071-2100)	SSP1-2.6	0.15 (-24%)	0.26 (-25%)
	SSP2-4.5	0.07 (-64%)	0.14 (-60%)
	SSP3-7.0	0.07 (-63%)	0.12 (-64%)
	SSP5-8.5	0.04 (-80%)	0.07 (-79%)

Adicionalmente, la Figura 27 presenta de manera gráfica los cambios en el HPU total, tanto la situación histórica como las proyecciones en distintos escenarios. Ciertamente, todos los escenarios estiman una disminución significativa en la cantidad total de hábitat disponible para esta especie en peligro grave de extinción.

T1

T2



**Figura 27.** Variación del HPU total de la *Parachondrostoma arrigonis* bajo escenarios de cambio climático y horizontes temporales. Los bigotes representan la variación del valor HPU total entre años (se calcula el HPU total por año), mientras la columna representa el valor medio de HPU total en cada periodo considerado (generalmente, 30 años).

#### 5.4. Meses con HPU menores a 30% y 50%

Las series temporales futuras se compararon para los horizontes medio y lejano, indicando el número de meses en que no se supera el 30 y 50% del máximo de HPU. Para realizar una comparación adecuada, solo se analizaron los horizontes 2040-2070 y 2070-2100, debido a que cuentan con 30 años de datos. En concreto para el SSP5-8.5 a largo plazo (2070-2100), solo el 14% y 8% de la serie temporal de HPU superará los máximos del 30% y 50% de HPU, respectivamente, para ambas especies. A largo plazo la especie más afectada será la loína del Júcar, ya que la cantidad de meses en que se supera el HPU máximo es relativamente menor a la otra especie.

En esta sección se explica la cantidad de meses en el que el HPU no supera el 30 y 50% del máximo de HPU de cada especie y talla. En todas las figuras se puede visualizar la relación directamente proporcional entre el umbral de HPU establecido y el número de meses.

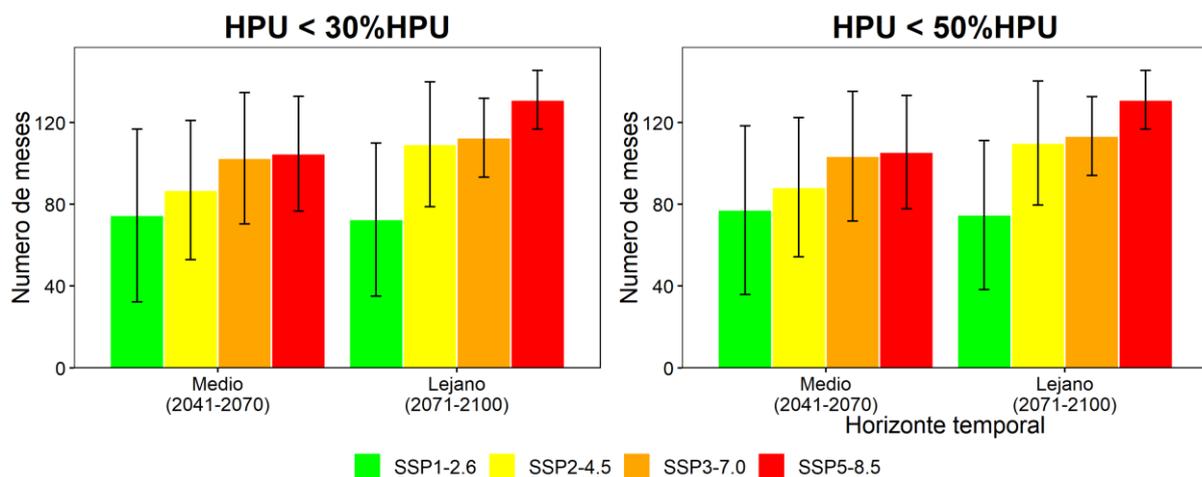
Como se ha comentado en la sección 5.3.2, la curva de HPU de *Squalius valentinus* alcanza su asíntota rápidamente y se mantiene constante en todos los caudales, generando una serie temporal invariable. Por ello, no se incluyó en este análisis.

##### 5.4.1. *Luciobarbus guiraonis* T1

La Figura 28 presenta gráficamente la cantidad de meses en los que los requerimientos de hábitat del barbo T1 no superan los umbrales de máximo HPU establecidos. Se observa un incremento en el número de meses según el escenario y horizonte temporal analizados. En concreto, en el horizonte medio y el escenario

SSP5-8.5, se identifican 105 meses en los que los valores no superan los umbrales del 30% y 50% del máximo de HPU. Sin embargo, en un escenario más optimista como el SSP1-2.6, se registran 44 y 77 meses que no superan los umbrales del 30% y 50% del máximo de HPU, respectivamente.

Por otro lado, en el horizonte temporal lejano, la situación se vuelve más crítica. En el escenario SSP5-8.5, se alcanzan 131 meses en los que los valores de la serie temporal de HPU no superan los máximos del 30% y 50% de HPU. No obstante, en el escenario SSP1-2.6, se registran 72 y 75 meses en los que los valores no superan los umbrales mencionados.



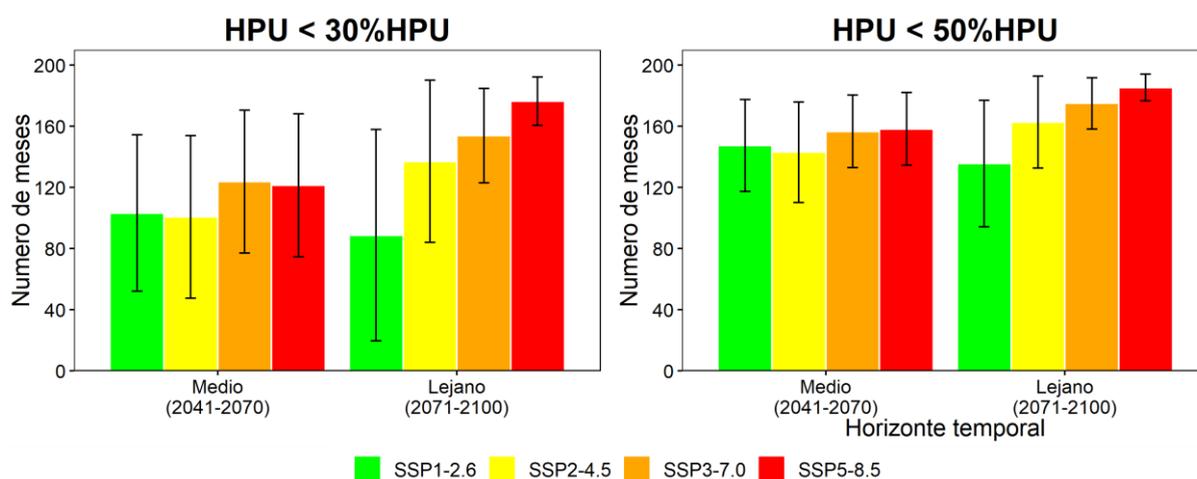
**Figura 28.** Cantidad de meses de la serie temporal de HPU que no superan el 30 y 50% del máximo de HPU para el *Luciobarbus guiraonis* T1, bajo cuatro escenarios de cambio climático y dos horizontes temporales. Los bigotes representan la variación del número de meses, mientras la columna representa el valor medio del número de meses de los cinco modelos de cambio climático en cada periodo considerado (30 años).

#### 5.4.2. *Luciobarbus guiraonis* T2

La cantidad de meses en que los requerimientos de hábitat del barbo T2 no superan los umbrales de máximo HPU establecidos se muestran en la Figura 29. Se puede visualizar un evidente incremento en el número de meses según el escenario y horizonte temporal analizados. En particular, en el horizonte medio y el escenario SSP5-8.5, se identifican el número de meses que no superan los umbrales 30 y 50% del máximo de HPU son 121 y 158, respectivamente. Sin embargo, en un escenario más optimista como el SSP1-2.6, se registran 103 y 147 meses, respectivamente. Así

pues, el umbral más crítico de los 2, el del 30%, no se superaría en un 29% del periodo (103 meses) en el caso optimista (SSP1-2.6), mientras que no se superaría en un 34% del tiempo en el escenario pesimista (SSP5-8.5). Considerando el umbral del 50%, las diferencias entre escenarios son escasas (158 *versus* 147 meses) y suponen como media un 42% del periodo.

En contraste, en el horizonte temporal lejano, la situación se torna más crítica. En el escenario SSP5-8.5, se alcanzan 176 y 185 meses en los que los valores de la serie temporal de HPU no superan los máximos del 30% y, 50%. No obstante, en el escenario SSP1-2.6, se registran 89 y 136 meses en los que los valores no superan los umbrales mencionados.



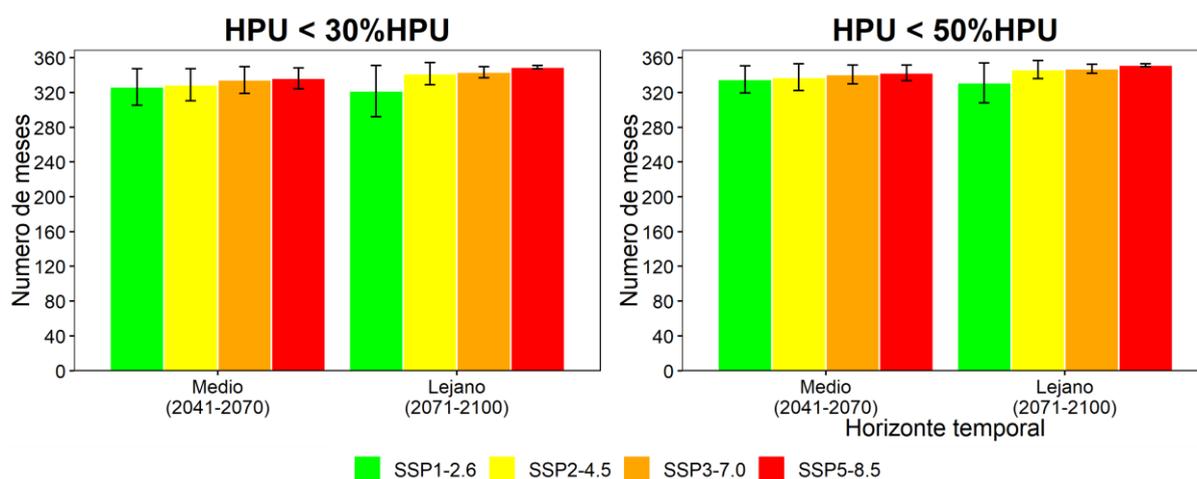
**Figura 29.** Cantidad de meses de la serie temporal de HPU que no superan el 30 y 50% del máximo de HPU para el *Luciobarbus guiraonis* T2, bajo cuatro escenarios de cambio climático y dos horizontes temporales. Los bigotes representan la variación del número de meses, mientras la columna representa el valor medio del número de meses de los cinco modelos de cambio climático en cada periodo considerado (30 años).

#### 5.4.3. *Luciobarbus guiraonis* T3

Los resultados respecto a la cantidad de meses en los que los requerimientos de hábitat del barbo T3 no superan los umbrales establecidos se presentan en la Figura 30. Se observa claramente un cuantioso incremento en el número de meses según los diferentes escenarios y horizontes temporales analizados. En el horizonte medio y el escenario más pesimista como es el SSP5-8.5, se estiman 336 y 343 meses en donde los valores no superan los umbrales del 30% y 50% del máximo de HPU,

respectivamente. En contraste, en un escenario más optimista como el SSP1-2.6, la situación cambia sutilmente, ya que se alcanzan 326 y 335 meses que no superan los mismos umbrales mencionados. Es decir que, en el escenario pesimista, aproximadamente durante el 93% del periodo medio no se alcanzaría el 30% del HPU máximo.

En lo que respecta al horizonte temporal lejano, se observa una situación constante y poco cambiante. En el escenario SSP5-8.5, se registran 349 y 351 meses en los que los valores de la serie temporal de HPU no superan los umbrales del 30% y 50% del máximo de HPU, respectivamente. Estos valores se mantienen en niveles similares en los otros tres escenarios de análisis, sin mostrar una variación significativa.



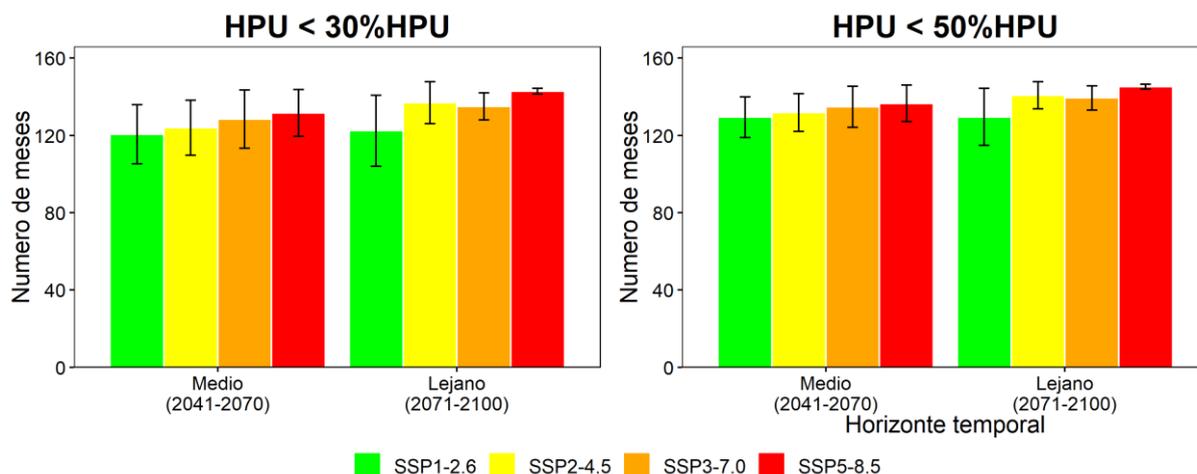
**Figura 30.** Cantidad de meses de la serie temporal de HPU que no superan el 30 y 50% del máximo de HPU para el *Lucioibarbus guiraonis* T3, bajo cuatro escenarios de cambio climático y dos horizontes temporales. Los bigotes representan la variación del número de meses, mientras la columna representa el valor medio del número de meses de los cinco modelos de cambio climático en cada periodo considerado (30 años).

#### 5.4.4. *Parachondrostoma arrigonis* T1

La Figura 31 presenta el gráfico de la cantidad de meses en los que los requerimientos de hábitat de la loína T1 no superan los umbrales establecidos de máximo HPU. Se observa un incremento en el número de meses según los diferentes escenarios y horizontes temporales analizados. Específicamente, en el horizonte medio y el escenario SSP5-8.5, se alcanzan 132 y 137 meses que no superan los umbrales del 30% y 50% del máximo de HPU, respectivamente. Sin embargo, en un escenario

como el SSP1-2.6, se observa una ligera disminución, identificándose 120 y 129 meses que no superan los umbrales mencionados.

Por otro lado, en el horizonte temporal lejano, se evidencia un gradual empeoramiento de la situación. En el escenario SSP5-8.5, se registran 143 y 145 meses en que no se superan los umbrales 30% y 50% del máximo HPU, respectivamente. En contraste, en el escenario SSP1-2.6, se identifican 122 y 130, respectivamente.

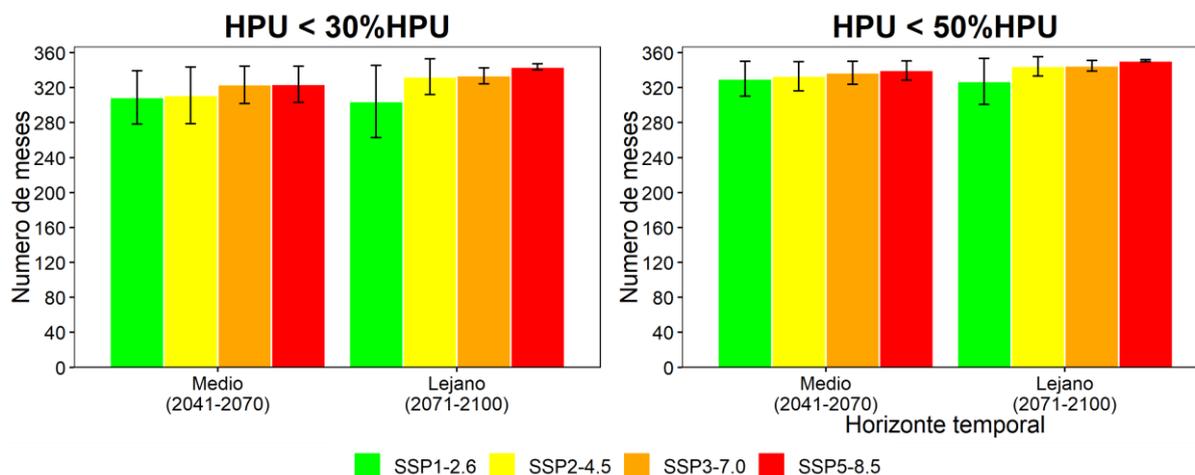


**Figura 31.** Cantidad de meses de la serie temporal de HPU que no superan el 30 y 50% del máximo de HPU para la *Parachondrostoma arrigonis* T1, bajo cuatro escenarios de cambio climático y dos horizontes temporales. Los bigotes representan la variación del número de meses, mientras la columna representa el valor medio del número de meses de los cinco modelos de cambio climático en cada periodo considerado (30 años).

#### 5.4.5. *Parachondrostoma arrigonis* T2

Los resultados respecto a la cantidad de meses en los que los requerimientos de hábitat de la loína T2 no superan los umbrales establecidos se presentan en la Figura 32. Se observa claramente un notable incremento en el número de meses según los diferentes escenarios y horizontes temporales analizados. En el horizonte medio y el escenario como es el SSP5-8.5, se estiman 324 y 340 meses en donde los valores no superan los umbrales del 30% y 50% del máximo de HPU, respectivamente. En cambio, en un escenario más optimista como el SSP1-2.6, la situación presenta cambios sutiles, ya que se alcanzan 309 y 330, respectivamente.

En lo que respecta al horizonte temporal lejano, se observa una situación relativamente constante. En el escenario SSP5-8.5, se registran 344 y, 351 meses en los que los valores de la serie temporal de HPU no superan los umbrales del 30% y 50% del máximo de HPU, respectivamente. Sin embargo, en el escenario SSP1-2.6 se observa un ligero descenso del número de meses, registrándose 304 y 327 meses, respectivamente



**Figura 32.** Cantidad de meses de la serie temporal de HPU que no superan el 30 y 50% del máximo de HPU para la *Parachondrostoma arrigonis* T2, bajo cuatro escenarios de cambio climático y dos horizontes temporales. Los bigotes representan la variación del número de meses, mientras la columna representa el valor medio del número de meses de los cinco modelos de cambio climático en cada periodo considerado (30 años).

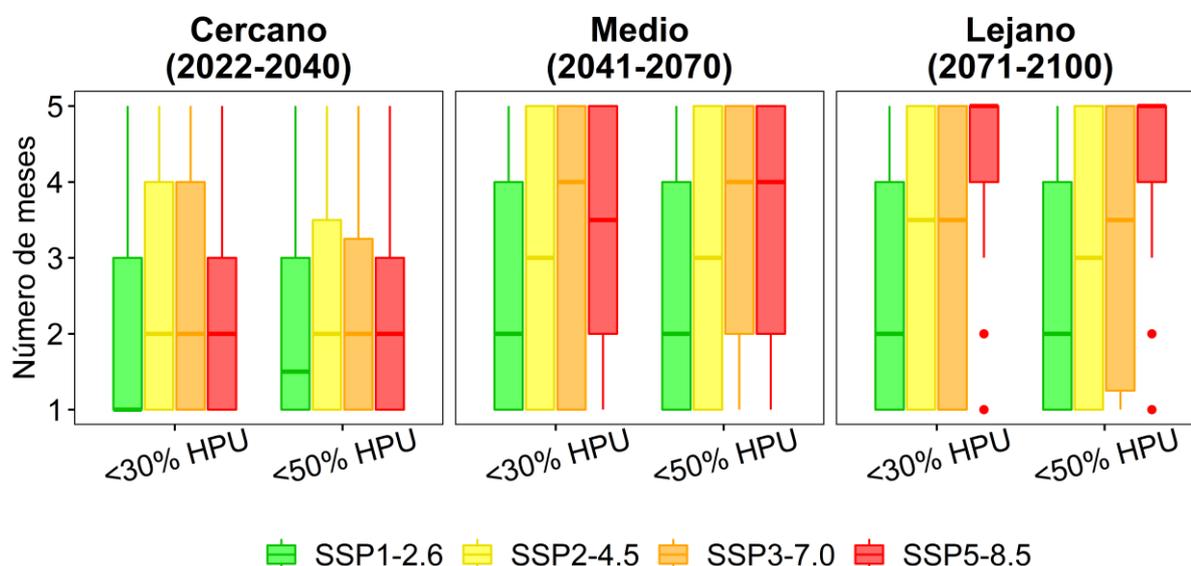
### 5.5. Numero de meses consecutivos que no superan el 30% y 50% de HPU.

En este apartado se analiza el número de meses consecutivos que no superan los umbrales de 30% y 50% de máximo HPU. Asimismo, es importante aclarar que el número de meses que no superan el 50% de máximo HPU, también incluyen aquellos que no superan el 30% del máximo HPU, debido a que no se hizo una distinción separada para cada uno de los umbrales establecidos.

Como se ha comentado en la sección 5.3.2, la curva de HPU de *Squalius valentinus* alcanza su asíntota rápidamente y se mantiene constante en todos los caudales, generando una serie temporal invariable. Por ello, no se realizó este análisis.

### 5.5.1. *Luciobarbus guiraonis* T1

Los meses consecutivos en que no se superan los umbrales de 30 y 50% de máximo HPU se muestran en la Figura 33. En el horizonte cercano, las diferencias entre el 30 y 50% son pequeñas, con un valor relativamente constante de 2 meses en todos los escenarios. Con respecto al horizonte medio, como era de esperar, se observa un empeoramiento. En el escenario SSP1-2.6, se mantiene un valor constante de 2 meses consecutivos dentro de los rangos establecidos. Sin embargo, en los escenarios SSP2-4.5 hasta SSP5-8.5, se observa un aumento hasta alcanzar un valor de 4 meses consecutivos (lo cual suele ser común en épocas de sequía durante un verano típico, con 2 o 3 meses sin lluvia).



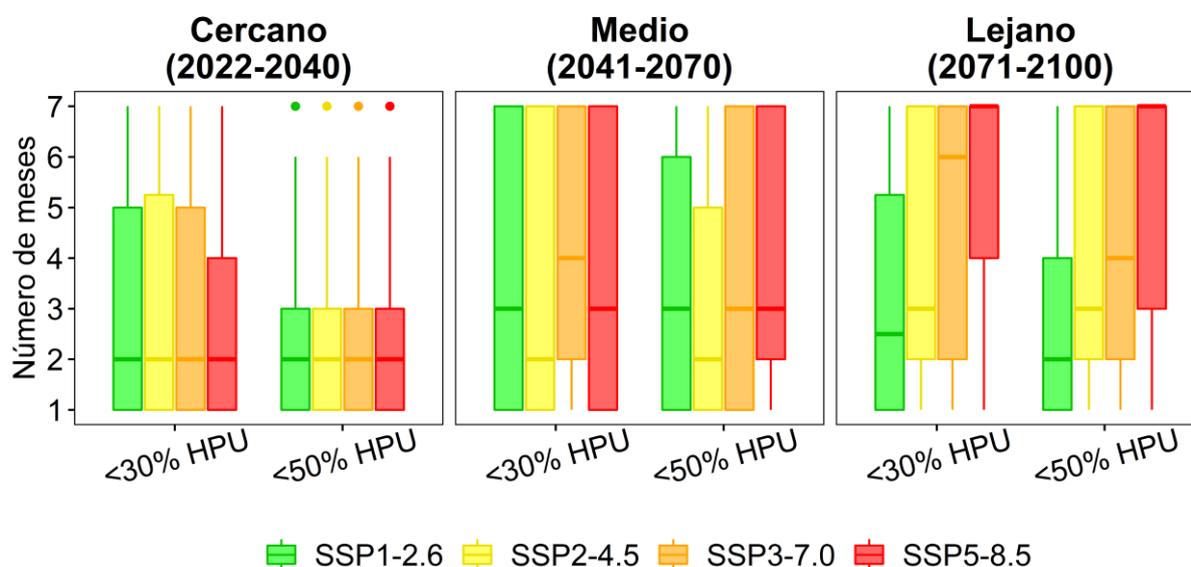
**Figura 33.** Número de meses consecutivos que no superan el 30% y 50% del máximo HPU del *Luciobarbus guiraonis* T1, bajo cuatro escenarios de cambio climático y tres horizontes temporales. Los puntos representan valores atípicos.

En cuanto al horizonte lejano, se visualiza mayor variación entre los diferentes escenarios, registrando valores que van desde 2 (SSP1-2.6) hasta 5 (SSP5-8.5) meses consecutivos que no se superan los umbrales de 30 y 50% del máximo HPU. Esto podría tener efectos importantes en la comunidad de peces de esta talla, ya que experimentarán una degradación de su hábitat.

### 5.5.2. *Luciobarbus guiraonis* T2

Los meses consecutivos en que no se superan los umbrales de 30 y 50% de máximo HPU se muestran en la Figura 34. En el horizonte cercano, se observa una constante en de 2 meses consecutivos en todos los escenarios. Sin embargo, se aprecia una mayor concentración y la presencia de algunos valores más altos (hasta 7 meses) en el número de meses que no superan el 50% del máximo HPU. En el horizonte medio, se observa variaciones, ya que el percentil 75 muestra un aumento considerable, mientras que la mediana se mantiene relativamente constante en 3 meses consecutivos.

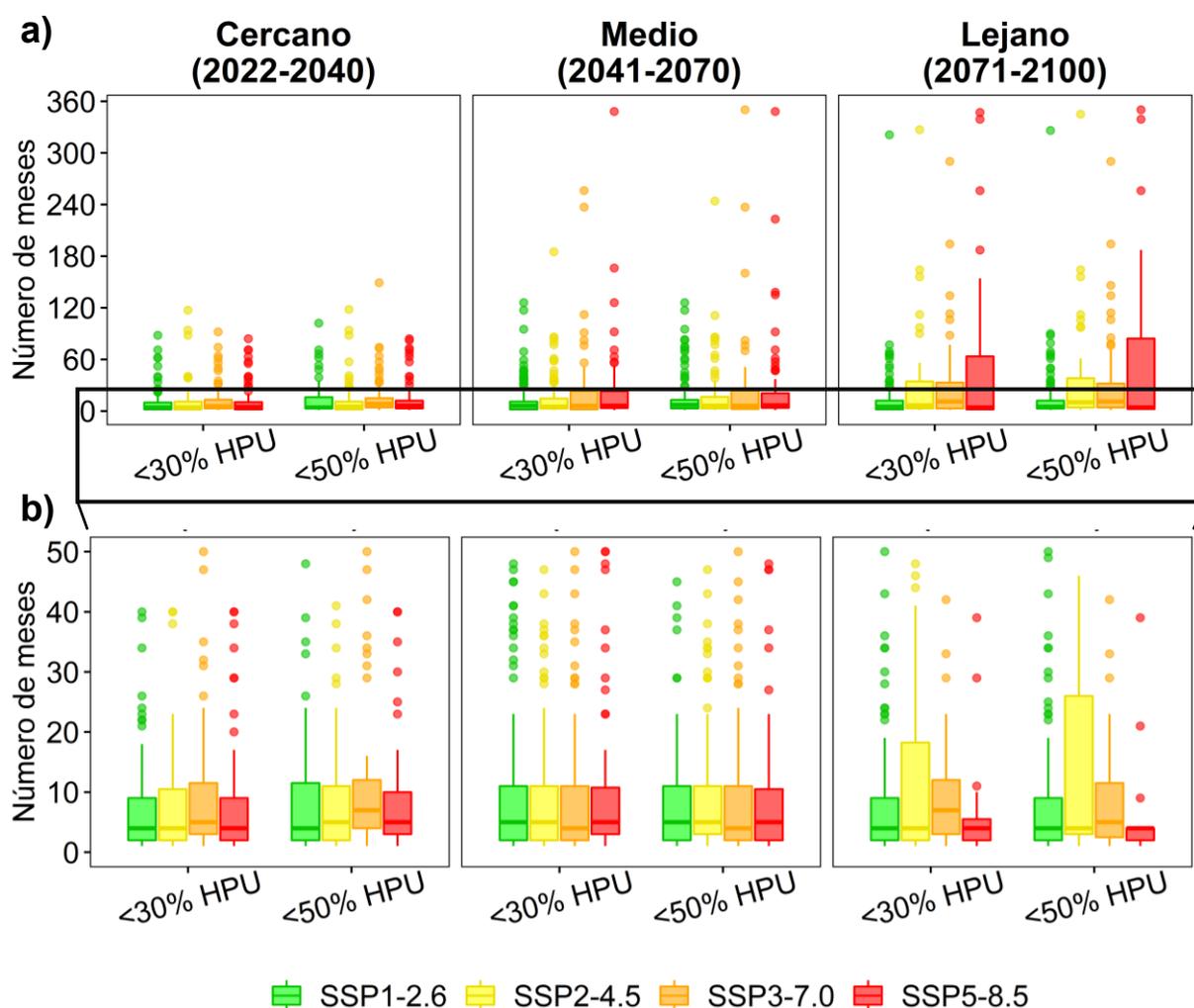
En el horizonte lejano, se observan cambios más significativos. La mediana en los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5 aumenta hasta valores cercanos a 7 meses consecutivos en que no se superan el 30% y 50% del máximo HPU. En contraste, en el escenario SSP1-2.6, la mediana se mantiene en un valor cercano a 2 meses consecutivos en ambos umbrales establecidos.



**Figura 34.** Número de meses consecutivos que no superan el 30% y 50% del máximo HPU del *Luciobarbus guiraonis* T2, bajo cuatro escenarios de cambio climático y tres horizontes temporales. Los puntos representan valores atípicos.

### 5.5.3. *Luciobarbus guiraonis* T3

En la Figura 35a se muestra la cantidad de meses consecutivos en los que no se superan los umbrales del 30% y 50% del máximo de HPU. Sin embargo, debido a la falta de claridad en la visualización de los percentiles en la mayoría de las cajas, se proporciona un detalle más completo en la Figura 35b, donde se establece un máximo de 50 meses en la frecuencia. En el horizonte cercano, no se observa una variación significativa entre los cuatro escenarios, con todos ellos presentando valores menores a 10 meses consecutivos. Sin embargo, se destaca el escenario SSP3-7.0, que alcanza una mediana de 7 meses consecutivos en los que no se supera el 50% del máximo de HPU.



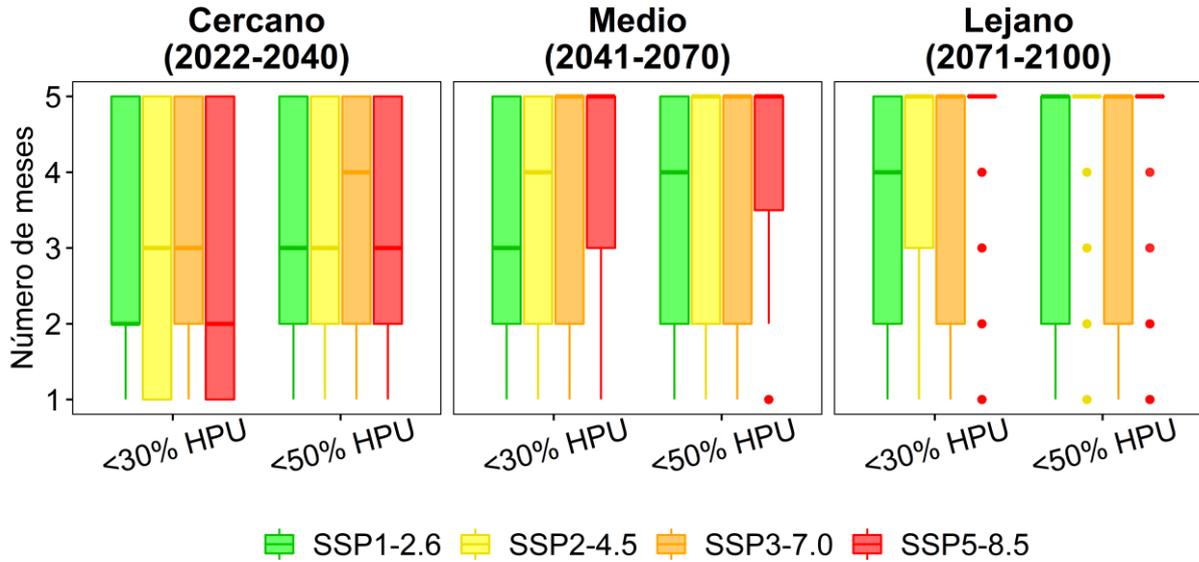
**Figura 35.** Número de meses consecutivos que no superan el 30% y 50% del máximo HPU del *Luciobarbus guiraonis* T3, bajo cuatro escenarios de cambio climático y tres horizontes temporales. Los puntos representan valores atípicos. a) Representa la distribución de valores de toda la serie y b) representa la distribución de valores con una frecuencia de 0 a 50 meses.

En el horizonte medio, aunque las medianas no presentan cambios significativos y se mantienen por debajo de los 5 meses consecutivos que no superan los umbrales establecidos, se observa una considerable cantidad de valores atípicos que pueden llegar a superar los 300 meses consecutivos. Con respecto al horizonte lejano, se observan cambios más pronunciados en el percentil 75 en el escenario SSP2-4.5, mientras que en los demás escenarios se mantienen valores menores a los 10 meses consecutivos. Sin embargo, al examinar los valores atípicos, se registran valores cercanos a los 350 meses consecutivos que no superan el umbral establecido en el escenario SSP5-8.5.

#### 5.5.4. *Parachondrostoma arrigonis* T1

Los meses consecutivos en que no se superan los umbrales de 30 y 50% de máximo HPU se muestran en la Figura 36. En el horizonte cercano, se observa una variabilidad en los meses consecutivos que no superan el 30% del máximo HPU. Los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 registran una mediana de 2 meses, con una mayor variación en los percentiles 25 y 75 en este último escenario. Los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 alcanzan una mediana de 3 meses, pero muestran una distribución más amplia de los datos. En cuanto a los meses consecutivos que no superan el umbral del 50% del máximo HPU, se observa que la distribución de datos es más estrecha en todos los escenarios, y todos alcanzan una mediana de 3 meses, excepto el escenario SSP3-7.0, que registra una mediana de 3 meses.

En el horizonte medio, se aprecia una mayor variabilidad en las medianas de cada escenario. Se identifica un valor máximo de 5 meses consecutivos (en los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5) y un mínimo de 3 meses (en el escenario SSP1-2.6) en relación al umbral del 30% del máximo HPU. Con respecto al umbral 30%, todos los escenarios muestran una mediana de 5 meses consecutivos sin superar dicho umbral, excepto SSP1-2.6, que alcanza los 4 meses. Con respecto al horizonte lejano, la mayoría de los escenarios alcanzan una mediana de 5 meses consecutivos sin superar el 30% y 50% del máximo HPU. Solo el escenario SSP1-2.6 registra valores de 4 meses consecutivos que no superan el 30% del máximo HPU.



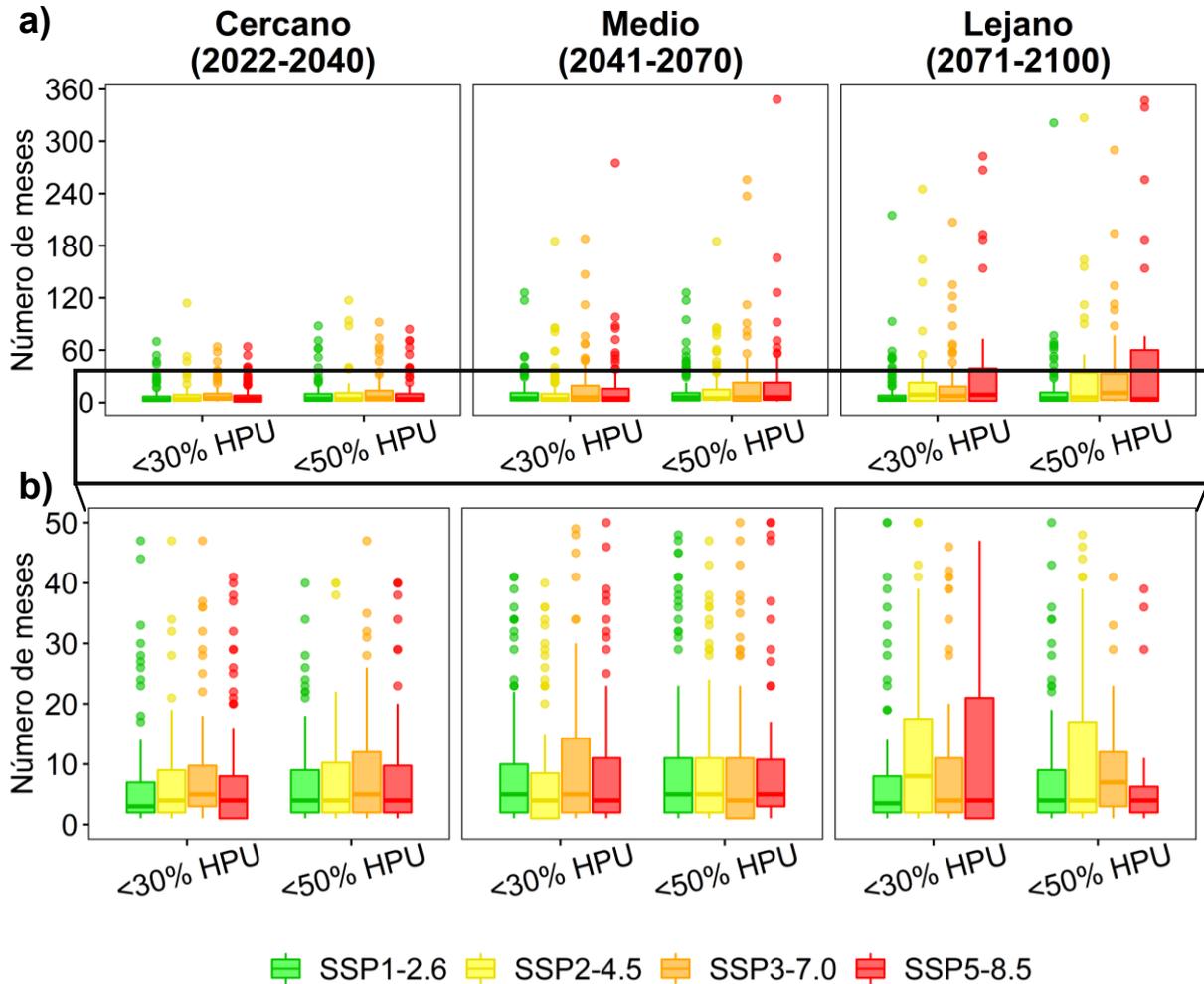
**Figura 36.** Número de meses consecutivos que no superan el 30% y 50% del máximo HPU de la *Parachondrostoma arrigonis* T1, bajo cuatro escenarios de cambio climático y tres horizontes temporales. Los puntos representan valores atípicos.

#### 5.5.5. *Parachondrostoma arrigonis* T2

En la Figura 37a se presentan las cantidades de meses consecutivos en los que no se superan los umbrales del 30% y 50% del máximo HPU. Debido a la dificultad de visualizar adecuadamente los percentiles en la mayoría de las cajas, se proporciona un detalle más amplio en la Figura 37b, donde se establece un máximo de 50 meses de frecuencia. En el horizonte cercano, se observan ligeras variaciones en las medianas de los cuatro escenarios, siendo todas ellas menores a 5 meses consecutivos que no superan los umbrales del 30% y 50% del máximo HPU. Sin embargo, también se registran algunos valores atípicos que pueden alcanzar hasta 100 meses consecutivos.

En el horizonte medio, las medianas no presentan cambios significativos y se mantienen por debajo de los 5 meses consecutivos que no superan los umbrales establecidos. Sin embargo, se observa una gran cantidad de valores atípicos que pueden llegar hasta los 300 meses consecutivos. Con respecto al horizonte lejano, se observan cambios más notables en el percentil 75 en el escenario SSP2-4.5, mientras que en los demás escenarios se mantienen valores inferiores a los 5 meses consecutivos. Sin embargo, también se visualiza una gran cantidad de valores

atípicos, siendo el escenario SSP5-8.5 el que registra valores cercanos a los 350 meses consecutivos que no superan los umbrales establecidos.



**Figura 37.** Número de meses consecutivos que no superan el 30% y 50% del máximo HPU del *Parachondrostoma arrigonis* T2, bajo cuatro escenarios de cambio climático y tres horizontes temporales. Los puntos representan valores atípicos. a) Representa la distribución de valores de toda la serie y b) representa la distribución de valores con una frecuencia de 0 a 50 meses.

## 6. DISCUSIÓN

La variabilidad climática y los cambios en los patrones hidrológicos presentan desafíos sustanciales para la conservación y gestión sostenible de los ecosistemas acuáticos. La evaluación del hábitat de peces nativos en un tramo del río Júcar bajo diversos escenarios de cambio climático indican una disminución en los caudales circulantes y la cantidad y calidad del hábitat disponible para las especies estudiadas en línea con la severidad de los escenarios de cambio climático analizados. Estos resultados ayudan a comprender cómo las alteraciones en las condiciones climáticas pueden influir en la habitabilidad de dichas especies.

### 6.1. Escenarios de cambio climático

Los resultados derivados de las proyecciones de precipitación y temperatura, basados en cinco modelos de cambio climático provenientes del proyecto CMIP6, presentan un panorama que, lamentablemente, carece de optimismo, aunque es esencial subrayar la significativa incertidumbre que rodea los escenarios climáticos futuros. Con la finalidad de afrontar este desafío, se ha optado por aplicar un enfoque de promedio multimodelo, como lo indican trabajos previos (Balhane et al., 2022). La variabilidad en las proyecciones climáticas es una característica importante a considerar al evaluar los impactos del cambio climático, especialmente en la cuenca del río Júcar. La comparación de esta investigación con otros estudios afines en la región y cuencas adyacentes se encuentran resumidos en la Tabla 11, ya que los climas mediterráneos se caracterizan por una gran variabilidad intrínseca.

En relación con la precipitación, la reducción proyectada en este estudio bajo el escenario SSP5-8.5 se encuentra en coherencia con las tendencias identificadas por Marcos-García et al. (2023) y previamente en 2017, ya que dichos trabajos estimaban una disminución del 35% en la cuenca alta del Júcar durante la primavera del año 2070, y reducciones del 40% y 27% en las cuencas media y baja, respectivamente, utilizando escenarios RCPs. Estas estimaciones se alinean con las proyecciones de disminución en la precipitación presentadas por Escrivá-Bou et al. (2017), que indican una variabilidad que oscila entre -30% y -5% en un escenario conjunto.

**Tabla 11.** Variaciones de precipitación y temperatura bajo diversos escenarios de cambio climático obtenidos en el presente estudio e investigaciones previas.

Investigación	Escenario	Variable	Cambio ( $\Delta$ )
Presente investigación (2023)	SSP1-2.6	Precipitación	-5 - -30%
	SSP2-4.5		
	SSP3-7.0		
	SSP5-8.5	Temperatura	+1.3 - +4°C
	SSP1-2.6		
	SSP2-4.5		
	SSP3-7.0		
Marcos-Garcia et al. (2023)	RCP 8.5	Precipitación	-35 - +13%
		Temperatura	+3.50 - +3.75°C
Gomez-Gomez et al. (2022)	RCP 8.5	Precipitación	-28.2%
		Temperatura	+40.4%
Marcos-Garcia et al. (2017)	RCP 8.5	Precipitación	-35 - +8%
		Temperatura	+3.75°C
Escriva-Bou et al. (2017)	Ensemble de todos los escenarios	Precipitación	-30 - -5%
		Temperatura	+2.0 - +4.0°C
Chirivella et al. (2014)	A2	Precipitación	-17.40 - +8.21%
	B2	Temperatura	+1.32 - +2.34°C

En lo que respecta a la temperatura, los hallazgos de esta investigación coinciden con las proyecciones de incremento presentadas por Marcos-Garcia et al. (2023), así como en 2017, y por Escriva-Bou et al., (2017). Estos trabajos anticiparon un aumento significativo en la temperatura, variando entre +3.50 °C y +4 °C.

Considerando la variabilidad no como un punto específico sino en términos regionales, en la cuenca del río Segura Gomez-Gomez et al. (2022) identificaron una disminución de la precipitación en un 28% y un aumento del 40.4% en la temperatura. Además, el estudio realizado por Chirivella et al. (2014) aporta una perspectiva adicional al

considerar los escenarios A2 y B2 del proyecto CMIP3, destacando la variabilidad en las proyecciones de precipitación y temperatura, con cambios tanto positivos como negativos en diferentes rangos. Estas diferentes perspectivas en conjunto contribuyen a una comprensión más completa de las posibles variaciones climáticas en las cuencas mediterráneas.

Además, es importante considerar que el cambio climático podría tener influencias en la distribución y el comportamiento de las especies de peces, con el potencial de alterar los patrones reproductivos, las tasas de crecimiento y la supervivencia de las poblaciones al exceder las temperaturas máximas soportables por las especies de salmónidos presentes en la cuenca (Muñoz-Mas et al., 2016). En consecuencia, es relevante destacar que las proyecciones climáticas derivadas del presente estudio para la cuenca del río Júcar se encuentran en consonancia con investigaciones previas, reforzando la apremiante necesidad de implementar estrategias de adaptación y una gestión sostenible orientada a la conservación de los ecosistemas acuáticos y las comunidades de peces nativos en este contexto cambiante, y además subraya la importancia de abordar estos desafíos de manera integral.

## **6.2. Modelización hidrológica**

La modelización hidrológica, realizada a través del modelo de lluvia-escorrentía de Témez, y la gestión del sistema de recursos hídricos mediante el software GAMS, ofrecen una base sólida al proporcionarnos información valiosa sobre la posible respuesta del sistema de recursos hídricos y al mismo tiempo arrojar luces sobre los impactos probables de los escenarios de cambio climático en los caudales del río Júcar. En este contexto, las reducciones de caudal estimadas en este trabajo son coherentes con la literatura en el ámbito de estudio (Tabla 12). Por ejemplo, Estrela et al. (2012) evidenciaron una disminución en las aportaciones en la cuenca del Júcar bajo diversos escenarios climáticos, proyectando una reducción del 40%. De manera similar, Chirivella et al. (2014) cuantificaron estos impactos en un rango de entre -13.45% y 18%, con un promedio de -2.13%. Además, los estudios de Marcos-García et al. (2017) y Marcos-García & Pulido-Velázquez (2017) respaldan la tendencia decreciente en las aportaciones, al abordar los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5. En ambos casos, se observa una disminución en las aportaciones en la cuenca con una variabilidad proyectada de reducción entre el 8% y el 45%. Estos resultados

coinciden con la expectativa de una menor disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca debido a los efectos del cambio climático, especialmente bajo escenarios de altas emisiones.

**Tabla 12.** Variación del caudal bajo diversos escenarios de cambio climático obtenido en el presente estudio e investigaciones previas.

Investigación	Variable	Escenario	Cambio ( $\Delta$ )
Presente investigación (2023)	Caudal	SSP1-2.6	
		SSP2-4.5	-73.5 - 12.3%
		SSP3-7.0	
		SSP5-8.5	
Marcos-Garcia et al. (2017)	Caudal	RCP 4.5	
		RCP 8.5	-28 - -45%
Marcos-Garcia & Pulido-Velazquez (2017)	Caudal	RCP 4.5	-29%
		RCP 8.5	-36%
Chirivella et al. (2014)	Caudal	A2	-13.45 - 18%
		B2	
Estrela et al. (2012)	Caudal	A2	-32 - -24%
		B2	

Resulta esencial mencionar que los estadísticos derivados del proceso de calibración y validación del modelo hidrológico de Témex (NSE y R) indican su adecuado rendimiento en la reproducción de los caudales observados (Moriasi et al., 2015), presentando valores comparables con una investigación previa a nivel de España (Pérez-Sánchez et al., 2019), lo que valida cualquier análisis posterior. No obstante, es interesante destacar que estos valores podrían parecer ligeramente inferiores en comparación con estudios anteriores que han empleado enfoques similares en la cuenca del río Júcar (Marcos-Garcia et al., 2017, Marcos-Garcia & Pulido-Velazquez, 2017). Esto podría deberse a que la ley de excedentes de Témex es asintótica para los valores más altos de precipitación, pero difiere en el rango más bajo de la curva, sin requerir que tanto la evapotranspiración potencial como el déficit de humedad del suelo se agoten completamente.

Además, a pesar de ser un modelo hidrológico ampliamente aplicado en España, la modelización subterránea de Témiz se encuentra excesivamente simplificada y no es adecuada para acuíferos kársticos, donde existen múltiples curvas de descarga en el agotamiento del acuífero (Pérez-Sánchez et al., 2019). Sumando a esto, en el caso de la cuenca del río Júcar, la excesiva extracción de aguas subterráneas en la región de la Mancha (acuífero de la Mancha Oriental) provoca una reducción del caudal (a través de la interacción entre curso de agua y acuífero), lo cual resulta difícil de replicar mediante el modelo Témiz (Macian-Sorribes, 2017; Macian-Sorribes et al., 2020). La modelización hidrológica es a menudo un desafío en las cuencas fluviales debido a factores topográficos, procesos hidrológicos complejos e interacciones, además de la marcada variación espacial de la precipitación y la temperatura, lo que limita con frecuencia la capacidad de reproducir con precisión el caudal de los ríos.

A pesar de las limitaciones inherentes, la modelización hidrológica realizada en la cuenca del Júcar, dentro del contexto del cambio climático y la gestión de los recursos hídricos, ofrece resultados que enfatizan la urgente necesidad de abordar los posibles impactos futuros en la disponibilidad de agua. Aunque los estadísticos de calibración y validación muestran valores menores en comparación con estudios previos, los hallazgos siguen siendo de gran relevancia para orientar la toma de decisiones en la planificación y gestión de los recursos hídricos en esta cuenca. Asimismo, la alteración de los patrones de caudales puede tener un impacto significativo en la configuración de hábitats, la calidad del agua y la distribución de nutrientes, factores esenciales para la subsistencia de las comunidades acuáticas.

### **6.3. Simulación de hábitats**

Este estudio evidencia la viabilidad del modelado de hábitat basado en lógica difusa (Mouton et al., 2011; Muñoz-Mas et al., 2012), al ser capaz de generar resultados que podrían ser relevantes en términos de presencia y ausencia de peces bajo diversos escenarios de cambio climático. Las proyecciones climáticas, al prever una disminución en el caudal, han llevado a una reducción general en los hábitats acuáticos disponibles y, en consecuencia, a una pérdida en el hábitat potencial útil (HPU). Esta disminución en la idoneidad del hábitat es un efecto esperado ante las cambiantes condiciones climáticas. Aunque el trabajo se centró en tres especies de peces nativos en la cuenca media del río Júcar, es plausible que estos resultados

tengan implicaciones más amplias para toda la cuenca (Rafael Muñoz-Mas et al., 2018), generando la migración o desplazamiento de los peces de un tramo a otro, lo que pone en manifiesto la importancia de la conectividad fluvial.

La Tabla 13 muestra una comparación de los resultados de este estudio e investigaciones anteriores. Se evidencia que las especies de ciprínidos evaluadas experimentarán un marcado empobrecimiento del hábitat físico en diversos escenarios climáticos (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5), con reducciones de HPU que oscilan entre el 20% y el 82%. Esta tendencia se alinea el rango de estimaciones previas de Muñoz-Mas et al. (2016) y Muñoz-Mas et al. (2018) en poblaciones de salmónidos de la cuenca del Júcar, donde las pérdidas de hábitat (en términos de HPU) oscilaban entre el 28% y el 85% bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Aunque las especies son diferentes, este rango de reducciones de HPU se confirma. Aunque resulta claro que el cambio climático y los cambios derivados en las variables hidráulicas puede influir de manera diferente en los peces debido a las diversas preferencias de hábitat y rasgos de su ciclo vital (Guse et al., 2015), y que los cambios del régimen térmico pueden afectar de modo diferente a especies de aguas frías y de aguas cálidas, nuestros resultados corroboran la magnitud y relevancia de los efectos esperables.

**Tabla 13.** Variación del hábitat potencial útil (HPU) para grupos de especies de peces bajo diversos escenarios de cambio climático obtenidos en el presente trabajo y otros previos en la cuenca hidrográfica del Júcar.

Investigación	Familia	Variable	Escenario	Cambio ( $\Delta$ )
Presente investigación (2023)	Ciprínidos	HPU	SSP1-2.6	-20 - -47%
			SSP2-4.5	-32 - -64%
			SSP3-7.0	-40 - -68%
			SSP5-8.5	-40 - -82%
Muñoz-Mas (2016)	Salmónido	HPU	RCP 4.5	-85%
			RCP 8.5	-77%
Muñoz-Mas (2018)	Salmónido	HPU	RCP 4.5	-16.2%
			RCP 8.5	-27.6%

En un enfoque paralelo, es relevante destacar que, a pesar de que la simulación proporciona un panorama general de los probables impactos del cambio climático en las especies de peces en el segmento fluvial elegido, el modelo conlleva limitaciones inherentes. Ciertas restricciones lógicas en la disponibilidad de datos específicos sobre especies y hábitats pueden influir en la precisión de las proyecciones. Asimismo, la interacción compleja entre el cambio climático, los caudales y los hábitats de los ciprínidos exige consideraciones adicionales, como el efecto de la temperatura del agua y la competencia con otras especies (Muñoz-Mas et al., 2016).

Además, debe señalarse que esta evaluación abarca algunas variables de importancia, como el calado, la velocidad y el refugio, pero no abarca la totalidad de las variables potencialmente relevantes. Por ejemplo, los modelos utilizados no contemplan el sustrato, debido a la importancia clave que tiene el refugio para estas especies y a la complejidad que supondría combinar cuatro variables en los modelos multivariantes utilizados; además el tamaño muestral (datos experimentales de campo) influyen en la elaboración de los modelos basados en reglas difusas, cuando se desea hacer una calibración y/o validación, fiables. A pesar de esto, se sabe que los peces de río a menudo están muy limitados por la disponibilidad del sustrato (Mouton et al., 2011), lo que incide en su presencia, ausencia y abundancia. Es vital reconocer que el cambio climático también ejercerá influencia en las condiciones fisicoquímicas del hábitat acuático; se debe considerar que una disminución en la calidad del agua podría conllevar riesgos significativos para la integridad del ecosistema, aspectos que no han sido abordados en esta investigación. No obstante, esto ha sido raramente estudiado.

Finalmente, es importante reconocer que las actuales estrategias de gestión y conservación de la biodiversidad difícilmente pueden contrarrestar completamente el efecto adverso del cambio climático. No obstante, un incremento en la supervisión y/o monitorización de las poblaciones de peces y el cumplimiento y mejora de los caudales ecológicos establecidos puede favorecer la aplicación de enfoques de gestión idóneos, como la práctica de la pesca con captura y suelta o programas de repoblación (Muñoz-Mas et al., 2018), con el propósito de atenuar los efectos proyectados del cambio climático en la cuenca del río Júcar. Por tanto, una conclusión derivada es que cabe la posibilidad que alguna de las especies analizadas se extinga en los segmentos fluviales aguas abajo, debido a las fuertes reducciones en el hábitat, como es el caso



de la loína, *Parachondrostoma arrigonis* (CSIC, 2016; UICN, 2022). En consecuencia, este estudio ilustra de manera significativa los impactos del cambio climático en las poblaciones de peces nativos.

## 7. CONCLUSIONES

Las conclusiones se presentan a continuación de un modo sucinto:

1. En el presente trabajo se aplicó el enfoque de modelización en cascada (hidrológica, hidráulica e idoneidad de hábitat), partiendo de una perspectiva de promedio multimodelo en los escenarios de cambio climático. El resultado final aporta una visión integral sobre el abanico de impactos del cambio climático, considerando los modelos y escenarios del proyecto CMIP6, en el tramo medio de la cuenca el río Júcar.
2. Los cuatro escenarios de cambio climático (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5) proyectaron un patrón generalizado de disminución de la precipitación (hasta un 30%) y el aumento paulatino de la temperatura (hasta 4°C) para finales de siglo. Con estos cambios en las condiciones meteorológicas se espera una disminución en las aportaciones en la cuenca con una variabilidad proyectada de reducción entre el -8 y el -73%, con un promedio de -47%, con respecto al periodo histórico.
3. A pesar de las limitaciones inherentes, dentro del contexto del cambio climático y la gestión de los recursos hídricos, los resultados de modelización hidrológica concuerdan de modo general con estudios previos y enfatizan la urgente necesidad de abordar los posibles impactos futuros en la disponibilidad de agua.
4. La evaluación del hábitat físico, a partir de la simulación hidráulica y la evaluación de la idoneidad del hábitat mediante modelos basados en reglas difusas, permitieron obtener las curvas de hábitat potencial útil en función del caudal (HPU-Q) de las tres especies nativas: *Luciobarbus guiraonis*, *Parachondrostoma arrigonis*, y *Squalius valentinus*. Dichas series de HPU se calcularon para las dos primeras especies, no así para la última porque la curva HPU-Q alcanza su asíntota rápidamente y se mantiene constante con el aumento de caudal (así como la serie de HPU).
5. En términos del HPU total, en general, se prevé que el *Luciobarbus guiraonis* experimentará un marcado empobrecimiento del hábitat, con reducciones que oscilan entre el 20% (SSP1-2.6) y 82% (SSP5-8.5) para el año 2100. Igualmente, *Parachondrostoma arrigonis* experimentará una reducción del hábitat estimado entre el 24% (SPP1-2.6) y 80% (SSP5-8.5) para finales de siglo.

6. Los análisis de series temporales de HPU (con respecto a los umbrales de 30 y 50% del máximo HPU) indicaron que *Luciobarbus guiraonis* sufrirá impactos graves derivados del cambio climático, debido a que el número de meses de la serie temporal que no superarán dichos umbrales, en un escenario optimista (SSP1-2.6), oscila entre el 12 y 41%, mientras que en un escenario más pesimista, el porcentaje se incrementa hasta un intervalo de 29 y 97%. En relación con *Parachondrostoma arrigonis*, el porcentaje de meses que no superan dichos umbrales varían entre el 33 y 91% en el escenario SSP1-2.6, y entre el 37 y 97% en el escenario SSP5-8.5.
7. Al analizar los meses consecutivos de HPU bajo los umbrales de 30 y 50% (del máximo HPU), la mediana de la serie indicó que *Parachondrostoma arrigonis* podría experimentar entre 3 (SSP1-2.6) y 5 (SSP5-8.5) meses consecutivos al año en los cuales no se superasen los umbrales establecidos. Por su parte, *Luciobarbus guiraonis* podría experimentar entre 2 (SSP1-2.6) y 10 (SSP5-8.5) meses consecutivos por año en que no se superasen dichos umbrales.
8. Los resultados de la evaluación del hábitat físico antes mencionados sugieren que cabe la posibilidad de que alguna de las especies analizadas se extinga en los segmentos fluviales del tramo medio del Júcar, ya sea en Madrigueras o en otros de régimen hidrológico y morfología similares, debido a las fuertes disminuciones en el hábitat (en términos de HPU) y al elevado número potencial de meses consecutivos bajo condiciones del hábitat muy degradadas. Potencialmente los efectos serían peores para las especies más sensibles, como es el caso de la loína del Júcar, *Parachondrostoma arrigonis*, especie en peligro de extinción.
9. Es importante reconocer que las actuales estrategias de gestión y conservación de la biodiversidad acuática difícilmente podrían contrarrestar completamente las consecuencias adversas del cambio climático. No obstante, un incremento en la supervisión y/o monitorización puede favorecer a la aplicación de enfoques de gestión idóneos, como la práctica de la pesca con captura y suelta, mayor control de la calidad del agua en tramos concretos, restauración de sus hábitats o programas de repoblación.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelghani, L. (2023). Modeling of dam-break flood wave propagation using HEC-RAS 2D and GIS: case study of Taksebt dam in Algeria. *World Journal of Engineering, December*. <https://doi.org/10.1108/WJE-10-2022-0405>
- Almeida, P. R., Mateus, C. S., Alexandre, C. M., Pedro, S., Boavida-Portugal, J., Belo, A. F., Pereira, E., Silva, S., Oliveira, I., & Quintella, B. R. (2023). The decline of the ecosystem services generated by anadromous fish in the Iberian Peninsula. En *Hydrobiologia* (Vol. 850, Números 12-13). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s10750-023-05179-6>
- Balhane, S., Driouech, F., Chafki, O., Manzanar, R., Chehbouni, A., & Moufouma-Okia, W. (2022). Changes in mean and extreme temperature and precipitation events from different weighted multi-model ensembles over the northern half of Morocco. *Climate Dynamics*, 58(1-2), 389-404. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05910-w>
- Bouiss, H., Bengamra, S., Amarjouf, N., Oujidi, M., Amar, I., & Gradi, A. (2023). Application of Two-Dimensional Hydraulic Modelling of Hydrological Risk Related to Urban Flood . A Case of the Taza City , Morocco. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24(6), 173-185. <https://doi.org/https://doi.org/10.12912/27197050/168332>
- Bovee, K. D., Lamb, B. L., Bartholow, J. M., Stalnaker, C. B., Taylor, J., & Henriksen, J. (1998). *Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology*.
- Bunn, S. E., & Arthington, A. H. (2002). Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management*, 30(4), 492-507. <https://doi.org/10.1007/s00267-002-2737-0>
- Castellanos-Osorio, G., López-Ballesteros, A., Pérez-Sánchez, J., & Senent-Aparicio, J. (2023). Disaggregated monthly SWAT+ model versus daily SWAT+ model for estimating environmental flows in Peninsular Spain. *Journal of Hydrology*, 623(March), 129837. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129837>

- Chirivella Osmá, V., Capilla Romá, J. E., & Pérez Martín, M. A. (2014). Modelling regional impacts of climate change on water resources: the Júcar basin, Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 60(1), 30-49. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.866711>
- CHJ. (2013). *Proyecto del Plan Hidrológico*.
- CSIC. (2016). *Enciclopedia virtual de los invertebrados españoles*. Museo Nacional de Ciencias Naturales. <http://www.vertebradosibericos.org/>
- Dal Molin, M., Schirmer, M., Zappa, M., & Fenicia, F. (2020). Understanding dominant controls on streamflow spatial variability to set up a semi-distributed hydrological model: The case study of the Thur catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(3), 1319-1345. <https://doi.org/10.5194/hess-24-1319-2020>
- Domeneghetti, A., Castellarin, A., & Brath, A. (2012). Assessing rating-curve uncertainty and its effects on hydraulic model calibration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(4), 1191-1202. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1191-2012>
- Dudgeon, D. (2014). Threats to Freshwater Biodiversity in a Changing World. En B. Freedman (Ed.), *Global Environmental Change* (pp. 243-253). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5784-4\\_108](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5784-4_108)
- Escriva-Bou, A., Pulido-Velazquez, M., & Pulido-Velazquez, D. (2017). Economic Value of Climate Change Adaptation Strategies for Water Management in Spain's Jucar Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(5). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000735](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000735)
- Estrela, T., Pérez-Martin, M. A., & Vargas, E. (2012). Impacts of climate change on water resources in Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 57(6), 1154-1167. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.702213>
- Fukuda, S. (2013). Effects of data prevalence on species distribution modelling using a genetic takagi-sugeno fuzzy system. *Proceedings of the 2013 IEEE International Workshop on Genetic and Evolutionary Fuzzy Systems, GEFS 2013 - 2013 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, SSCI 2013*, 21-27. <https://doi.org/10.1109/GEFS.2013.6601051>

- Gabino, L., Lozano, C., Santa, M., López, C., Pérez, A., Ignacio, V., Doménech, A., & Cantos, J. O. (2023). Local - scale regionalisation of climate change effects on rainfall pattern : application to Alicante City ( Spain ). *Theoretical and Applied Climatology*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04565-3>
- Gold, C. M., Remmele, P. R., & Roos, T. (1996). Voronoi Methods in GIS. En *Advanced School on the Algorithmic Foundations of Geographic Information Systems* (pp. 21-35). [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F3-540-63818-0\\_2.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F3-540-63818-0_2.pdf)
- Gomez-Gomez, J. de D., Pulido-Velazquez, D., Collados-Lara, A. J., & Fernandez-Chacon, F. (2022). The impact of climate change scenarios on droughts and their propagation in an arid Mediterranean basin. A useful approach for planning adaptation strategies. *Science of the Total Environment*, 820, 153128. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153128>
- Guse, B., Kail, J., Radinger, J., Schröder, M., Kiesel, J., Hering, D., Wolter, C., & Fohrer, N. (2015). Eco-hydrologic model cascades: Simulating land use and climate change impacts on hydrology, hydraulics and habitats for fish and macroinvertebrates. *Science of the Total Environment*, 533, 542-556. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.078>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- Jowett, I. (1989). RHYHABSIM: River hydraulic and habitat simulation. *New Zealand Freshwater Fisheries Miscellaneous Report (New Zealand)*, 49, 39p.
- Jowett, I. G. (2004). *RHYHABSIM River Hydraulics and Habitat Simulation*.
- Macian-Sorribes, H. (2017). *Design of Optimal Reservoir Operating Rules in Large Water Resources Systems combining Stochastic Programming, Fuzzy Logic and Expert Criteria* [Universitat Politecnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/82554/Macián - Design of optimal reservoir operating rules in large water resources systems combining s....pdf?sequence=1>

- Macian-Sorribes, H., Pechlivanidis, I., Crochemore, L., & Pulido-Velazquez, M. (2020). Fuzzy postprocessing to advance the quality of continental seasonal hydrological forecasts for river basin management. *Journal of Hydrometeorology*, 21(10), 2375-2389. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0266.1>
- Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1-13. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2)
- Marcos-Garcia, P., Lopez-Nicolas, A., & Pulido-Velazquez, M. (2017). Combined use of relative drought indices to analyze climate change impact on meteorological and hydrological droughts in a Mediterranean basin. *Journal of Hydrology*, 554, 292-305. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.028>
- Marcos-Garcia, P., & Pulido-Velazquez, M. (2017). Cambio climático y planificación hidrológica: ¿es adecuado asumir un porcentaje único de reducción de aportaciones para toda la demarcación? *Ingeniería del agua*, 21(1), 35. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.6361>
- Marcos-Garcia, P., Pulido-Velazquez, M., Sanchis-Ibor, C., García-Mollá, M., Ortega-Reig, M., Garcia-Prats, A., & Girard, C. (2023). From local knowledge to decision making in climate change adaptation at basin scale. Application to the Jucar River Basin, Spain. *Climatic Change*, 176(4), 1-23. <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03501-8>
- Martínez-Capel, F., Muñoz-Mas, R., Macian-Sorribes, H., Barea-Sanchez, C., Ruiz Rodrigues, M., Puig-Mengual, C., Pulido-Velazquez, M., Oliva Paterna, F. J., Belda Pérez, E. J., & Martínez Morlanes, M. P. (2018). *Adaptación al cambio global: gestión integral del régimen ecológico de caudales para el hábitat de la anguila europea y el cacho valenciano frente a especies invasoras*.
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>

- Mouton, A. M., Alcaraz-Hernández, J. D., De Baets, B., Goethals, P. L. M., & Martínez-Capel, F. (2011). Data-driven fuzzy habitat suitability models for brown trout in Spanish Mediterranean rivers. *Environmental Modelling and Software*, 26(5), 615-622. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.12.001>
- Mouton, Ans M., Schneider, M., Depestele, J., Goethals, P. L. M., & De Pauw, N. (2007). Fish habitat modelling as a tool for river management. *Ecological Engineering*, 29(3), 305-315. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.11.002>
- Muñoz-Mas, R., Fukuda, S., Pórtolos, J., & Martínez-Capel, F. (2018). Revisiting probabilistic neural networks: a comparative study with support vector machines and the microhabitat suitability for the Eastern Iberian chub (*Squalius valentinus*). *Ecological Informatics*, 43(May 2017), 24-37. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.10.008>
- Muñoz-Mas, R., Gil-Martínez, E., Oliva-Paterna, F. J., Belda, E. J., & Martínez-Capel, F. (2019). Tree-based ensembles unveil the microhabitat suitability for the invasive bleak (*Alburnus alburnus* L.) and pumpkinseed (*Lepomis gibbosus* L.): Introducing XGBoost to eco-informatics. *Ecological Informatics*, 53(September 2018), 100974. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2019.100974>
- Muñoz-Mas, R., Lopez-Nicolas, A., Martínez-Capel, F., & Pulido-Velazquez, M. (2016). Shifts in the suitable habitat available for brown trout (*Salmo trutta* L.) under short-term climate change scenarios. *Science of the Total Environment*, 544, 686-700. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.147>
- Muñoz-Mas, R., Martínez-Capel, F., Alcaraz-Hernández, J., & Mouton, A. M. (2017). On species distribution modelling, spatial scales and environmental flow assessment with Multi-Layer Perceptron Ensembles: A case study on the redfin barbel (*Barbus haasi*; Mertens, 1925). *Limnologica*, 62, 161-172. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2016.09.004>
- Muñoz-Mas, R., Martínez-Capel, F., Garófano-Gómez, V., & Mouton, A. M. (2014). Application of Probabilistic Neural Networks to microhabitat suitability modelling for adult brown trout (*Salmo trutta* L.) in Iberian rivers. *Environmental Modelling and Software*, 59, 30-43. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.05.003>

- Muñoz-Mas, Rafael, Marcos-García, P., Lopez-Nicolas, A., Martínez-García, F. J., Pulido-Velazquez, M., & Martínez-Capel, F. (2018). Combining literature-based and data-driven fuzzy models to predict brown trout (*Salmo trutta* L.) spawning habitat degradation induced by climate change. *Ecological Modelling*, 386(February), 98-114. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.08.012>
- Muñoz-Mas, Rafael, Martínez-Capel, F., Schneider, M., & Mouton, A. M. (2012). Assessment of brown trout habitat suitability in the Jucar River Basin (SPAIN): Comparison of data-driven approaches with fuzzy-logic models and univariate suitability curves. *Science of the Total Environment*, 440, 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.074>
- Ossó, A., Craig, P., & Allan, R. P. (2023). An assessment of CMIP6 climate signals and biases in temperature, precipitation and soil moisture over Europe. *International Journal of Climatology*, May, 1-22. <https://doi.org/10.1002/joc.8169>
- Pérez-Sánchez, J., Senent-Aparicio, J., Segura-Méndez, F., Pulido-Velazquez, D., & Srinivasan, R. (2019). Evaluating hydrological models for deriving water resources in peninsular Spain. *Sustainability (Switzerland)*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/su11102872>
- Poff, N. L., & Zimmerman, J. K. H. (2010). Ecological responses to altered flow regimes: A literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology*, 55(1), 194-205. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02272.x>
- R Core Team. (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Rodrigo, F. S., & Trigo, R. M. (2007). Trends in daily rainfall in the Iberian Peninsula from 1951 to 2002. *International Journal of Climatology*, 27, 513-529. <https://doi.org/10.1002/joc.1409>
- Seiller, G., & Anctil, F. (2014). Climate change impacts on the hydrologic regime of a Canadian river: Comparing uncertainties arising from climate natural variability and lumped hydrological model structures. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(6), 2033-2047. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2033-2014>



TYPSA-TECNOMA. (2007). *Régimen de caudales mínimos en tramos representativos del río Júcar. Memoria. Asistencia técnica. Clave FP. OPH.002/2005.*

UICN. (2022). *The Red List*. International Union for Conservation of Nature's. <https://www.iucnredlist.org/>

Viviroli, D., Sikorska-Senoner, A. E., Evin, G., Staudinger, M., Kauzlaric, M., Chardon, J., Favre, A. C., Hingray, B., Nicolet, G., Raynaud, D., Seibert, J., Weingartner, R., & Whealton, C. (2022). Comprehensive space-time hydrometeorological simulations for estimating very rare floods at multiple sites in a large river basin. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(9), 2891-2920. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2891-2022>

## 9. ANEXOS

Parámetros de calibración del modelo hidrológico de Témez

Subcuenca	Parámetros			
	Hmax (mm)	C (%)	Imax (mm)	$\alpha$ (mes <sup>-1</sup> )
Alarcón	450.81	0.001	800.00	0.839
Mancha	1274.02	0.001	820.00	0.764
Contreras	525.32	0.001	800.00	0.847
Media	777.71	0.001	820.00	0.671
Baja	331.04	0.001	800.00	0.686
Magro	2173.99	0.004	700.00	0.642
Albaida	481.93	0.001	800.00	0.629

## Histograma de caudales históricos de los 5 modelos de cambio climático.

